

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E DESENVOLVIMENTO DE
METODOLOGIAS PARA ESTUDOS DE ANCORAGEM DE
ESTRUTURAS FLUTUANTES COM ESTACAS DE SUCÇÃO**

CÁSSIA MARIA DE ASSIS RANGEL MELO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JUNHO - 2010

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA ESTUDOS DE ANCORAGEM DE ESTRUTURAS FLUTUANTES COM ESTACAS DE SUÇÃO

CÁSSIA MARIA DE ASSIS RANGEL MELO

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

Orientador: Prof. Sérgio Tibana

Co-orientador: Prof. Fernando Saboya Júnior

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JUNHO - 2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

39/2010

Melo, Cássia Maria de Assis Rangel

Avaliação de desempenho e desenvolvimento de metodologias para estudos de ancoragem de estruturas flutuantes com estacas de sucção. – Campos dos Goytacazes, 2010.

viii, 162 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2010.

Orientador: Sérgio Tibana.

Co-orientador: Fernando Saboya Junior

Área de concentração: Geotecnia. Bibliografia: f. 108-114.

1. Estacas de sucção 2. Fundação *Offshore* 3. Modelos em escala reduzida
4. Processo de eletro-osmose I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título.

CDD 624.156

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E DESENVOLVIMENTO DE
METODOLOGIAS PARA ESTUDOS DE ANCORAGEM DE
ESTRUTURAS FLUTUANTES COM ESTACAS DE SUCÇÃO**

CÁSSIA MARIA DE ASSIS RANGEL MELO

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

Aprovada em 22 de Junho de 2010.

Comissão Examinadora:



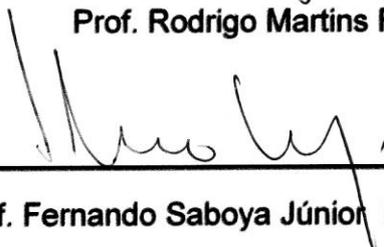
Prof. Maurício Ehrlich D.Sc. – COPPE/UFRJ



Marcelo Luvison Rigo D.Sc. – Manchester Serviços



Prof. Rodrigo Martins Reis D.Sc. – UENF



Prof. Fernando Saboya Júnior D.Sc. – Co-orientador, UENF



Prof. Sérgio Tibana D.Sc. – Orientador, UENF

Dedico esta dissertação aos meus filhos Bianca e Bruno, estímulos que me impulsiona a buscar vida nova a cada dia, meus agradecimentos por terem aceito se privar de minha companhia pelos estudos em momentos tão importantes na vida de vocês, concedendo a mim a oportunidade de me realizar ainda mais.

AGRADECIMENTOS

Eis que chegou o momento de expressar sinceros agradecimentos a muitos e tantos adorados familiares e amigos – tanto aos ‘velhos’ e queridos, quanto aos que se revelaram ao longo desse tempo.

Bem sei que corro o risco de não dar conta deste ‘muitíssimo obrigado’ como é merecido, porque será difícil exprimir a beleza que foi esse movimento de energias e impulsos que foram chegando ao longo dessa caminhada.

Para maior percepção desse sentido devo contar que esta não foi uma caminhada breve, mas uma travessia que parecia sem fim, principalmente pelas intercorrências pessoais de toda ordem, que me atropelaram. Esses percalços, longe de obscurecerem o trajeto, aumentaram-lhe o brilho. E, ao invés de me deterem, impulsionaram-me com mais força.

Se o desafio era enorme, as motivações eram grandiosas, somadas às espontâneas generosidades que fizeram possível a transformação de instantâneos momentos de angústia e sofrimento em uma estrada larga, margeada de flores, frutos e frondosas árvores! Uma estrada toda verde – repleta de cheiros, cores, e sons – cujo nome é esperança e cuja base é a busca de saberes.

Talvez esta dissertação seja o resultado mais visível desse processo de construção em meio a uma conjuração de afetos e amizades. Dessa forma, dando continuidade à história, dedico algumas palavras àqueles que dela fazem parte direta ou indiretamente ou, ainda, pelo fato de simplesmente existirem.

Aos meus exemplos de vida, **Gilberto e Marly** que sempre me estimularam a dar este grande passo. Estas duas pessoas com muita sabedoria, discernimento, bom senso e dedicação estiveram ao meu lado me encorajando nas horas difíceis e me aplaudindo nos momentos de glória. Obrigada por serem meus pais, profissionais corretos e competentes, fonte de inspiração, apoio e ensino diário.

A meus filhos, **Bianca e Bruno**, que trazem tanta luz e gosto para minha vida, um amor especial. Vocês são a lição mais profunda que vivi de ética, dignidade e amor... Ambos souberam compreender todas as minhas buscas – as existenciais e as teóricas – tendo paciência comigo nas horas mais difíceis.

Ao meu irmão **João José**, pelos conselhos dispensados e ao exemplo de amor e dedicação à vida acadêmica.

As **minhas irmãs** e a toda a **minha família**, meu muito obrigado pela compreensão quanto ao afastamento e ausência em momentos especiais.

Ao meu querido professor **Sérgio Tibana**, na qualidade de amigo e orientador, os tantos e inesquecíveis diálogos, conselhos e ensinamentos que me impulsionaram durante esta caminhada. Sou inteiramente grata por essa orientação que ultrapassa a dissertação e aos conhecimentos geotécnicos, bem como ao imenso carinho nos momentos de dificuldade e desespero. Agradeço, sobretudo, ao privilégio de haver conhecido e trabalhado com você durante estes anos. Você é exemplo de amor e dedicação a arte de ensinar.

Ao professor **Fernando Saboya Albuquerque Júnior**, por ter me recebido nesta instituição após 11 anos de afastamento, e como co-orientador por todo ensinamento e conhecimento transmitido ao longo desta pesquisa.

Ao engenheiro, pesquisador e companheiro de laboratório **Sérgio Antônio Brum Junior**, por tudo que transmitiu e fez por mim durante estes longos e últimos meses de pesquisa. Posso afirmar que sem você para iniciar os estudos em ancoragem *offshore* no “nosso” laboratório, esse trabalho não teria sido concluído. E principalmente, por todo o seu empenho na execução dos meus últimos ensaios, ao seu companheirismo e ensinamentos na difícil reta final. Palavras não tenho para demonstrar toda a minha gratidão e admiração.

Aos pesquisadores **Rodrigo Martins Reis, Rubens Ramires Sobrinho e Victor Montero Del’Aguila**, obrigada pelos conhecimentos transmitidos e pelo suporte nas horas mais importantes desta pesquisa.

Aos colegas de Laboratório, **Wallace Rosa Pereira** e especialmente ao **André Luis Flor Manhães**, por me impulsionar a novos conhecimentos práticos, por toda paciência e ajuda na execução dos ensaios.

Aos técnicos **Vanúzia Almeida dos Santos Ferreira**, especialmente, ao **Milton Soares Pereira Júnior**, pelo auxílio na execução dos ensaios e pelos conhecimentos transmitidos.

A todos os bolsistas de iniciação científica que passaram por esse laboratório, principalmente ao **Égon Zanon da Silva**, pela ajuda nas horas mais “sujas” e cansativas desta pesquisa.

Aos amigos que conheci durante este curso, **Fábio Araújo Pereira, Marccone Neves Sampaio, Zélia Maria Peixoto Chispim** e principalmente a **Priscila de Almeida Cardoso Santiago**, que hoje posso dizer que é uma grande amiga e companheira de laboratório, meu muito obrigada por todas as horas em que passamos juntos e que trocamos conhecimentos.

A todos os professores e funcionários do Laboratório de Engenharia Civil, pelo carinho, dedicação e entusiasmo demonstrado ao longo do curso.

Ao Instituto Federal Fluminense na pessoa do professor **Cosme Del Pupo**, pela presteza dispensada na confecção de peças tão fundamentais para esta pesquisa.

As funcionárias do Sabor Maria, que durante esse período me apoiaram e conseguiram “sobreviver” sem mim.

Ao apoio financeiro da **Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)**, da **Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ)** e da **PETROBRAS (Petróleo Brasileiro SA)**.

E, finalmente, a **DEUS** pela a oportunidade e pelo privilégio que me foi dado em compartilhar tamanha experiência e, ao freqüentar este curso, perceber e atentar para a relevância de temas que não faziam parte, em profundidade, da minha vida.

Há muito mais a quem agradecer... A todos aqueles que, embora não nomeados, me brindaram com seus inestimáveis apoios em distintos momentos e por suas presenças afetivas, o meu reconhecido e carinhoso muito obrigada!

Todos vocês são co-autores deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	vi
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa e relevância.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Escopo do trabalho.....	4
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Histórico.....	6
2.2 Unidades Estacionárias de Produção (Plataformas Flutuantes).....	9
2.2.1 Plataformas Semi-submersíveis (SS).....	9
2.2.2 Unidade Flutuante de Produção, Estocagem e Alívio (FPSO).....	9
2.2.3 Plataforma SPAR (DDCV).....	10
2.2.4 Plataforma de Pernas Atirantadas (TLP).....	11
2.3 Sistemas de ancoragem.....	12
2.3.1 Catenária.....	13
2.3.2 <i>Taut-Leg</i>	13
2.3.3 Vertical.....	14
2.3.4 Posicionamento Dinâmico (DP).....	15
2.4 Âncoras para fundações em águas profundas.....	15
2.4.1 Âncora de Carga Vertical - <i>VLA</i>	15
2.4.2 Âncora DPA e Estaca Torpedo.....	16
2.4.3 Âncoras SEA e SEPLA	17
2.4.4 Estacas de Sucção.....	18
2.5 Conceito e aplicações das Estacas de Sucção.....	21
2.6 Modelagem física.....	28

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 Introdução	38
3.2 Equipamentos e instrumentação.....	39
3.2.1 Caixas de teste.....	39
3.2.2 Misturadores.....	40
3.2.3 Atuadores	42
3.2.4. Centrífuga geotécnica.....	44
3.2.5 Sistema de aquisição de dados.....	46
3.2.6 Célula de carga.....	48
3.3.7 Transdutor de poro-pressão.....	50
3.3.8 Transdutor de deslocamento.....	51
3.2.9 Ensaio de mini palheta (Mini Vane Shear Test).....	53
3.2.10 Adensamento do solo.....	55
3.2.11 Sistema para aplicação da sucção	57
3.2.12 Sistema de arrancamento a 1 g.....	59
3.2.12.1 Ensaio a 1 g.....	59
3.2.12.2 Ensaio a 50 g.....	60
3.3 Estudos dos materiais	61
3.4 Estudos da geometria das estacas	65
3.5 Preparação do solo.....	68
CAPÍTULO 4 PROGRAMA DE ENSAIOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	71
4.1 Introdução.....	71
4.2 Desenvolvimento de metodologias.....	71
4.2.1 Ensaio 1 g.....	71
4.2.2 Ensaio 50 g.....	86
CAPÍTULO 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	93
5.1 Ensaio a 1 g.....	93
5.1.1 Adensamento do modelo de solo.....	93
5.1.2 Instalação da estaca por sucção.....	96
5.1.3 Ensaio de arrancamento das estacas.....	98
5.2 Ensaio a 50 g.....	102

5.2.1 Adensamento do modelo de solo.....	102
5.2.2 Instalação da estaca por sucção.....	104
5.2.3 Ensaio de arrancamento das estacas.....	104
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
ANEXO 01 CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES.....	115
ANEXO 02 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	123
ANEXO 03 RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	132

RESUMO

As descobertas de novos campos de petróleo em águas profundas e “ultra profundas”, ocorridas nas últimas décadas, levaram ao desenvolvimento de novas tecnologias para a instalação de uma estrutura capaz de proporcionar uma melhor adaptação das estruturas já existentes. As estacas de sucção são uma boa alternativa para fixação destas estruturas flutuantes comparadas as estacas tradicionais. Este tipo de âncora envolve incertezas tanto em relação ao solo quanto também à instalação da estaca e às forças da natureza que atuam na estrutura. Esta pesquisa é composta de um programa experimental que tem como principal objetivo desenvolver metodologias na preparação de ensaios em escala reduzida a 1 g, assim como, investigar o desempenho de estacas de sucção sob carregamento monotônico simulando uma estrutura *offshore* ancorada com pernas tensionadas (TLP) e em sistema de ancoragem em *taut-leg*. Os modelos físicos em escala reduzida foram preparados com uma mistura de 40% de caulim e 60% de metacaulim, e a amostra foi adensada pelo processo de eletro-osmose com fluxo vertical, associado à aplicação de sobrecarga. Após o processo de adensamento foram executados ensaios de mini palheta de laboratório para obter resultados da resistência ao cisalhamento não drenada e assim avaliar o desempenho do adensamento da mistura desses dois materiais. Os resultados comprovam a eficácia da técnica de eletro-osmose para o adensamento de modelos físicos com solos moles, com um ganho considerável de resistência. As estacas utilizadas para os ensaios de modelagem física simulando uma ancoragem vertical foram feitas de alumínio, sendo uma com parede externa lisa e outra com parede externa rugosa. Estes ensaios foram realizados a 1 g e, para comprovação da eficácia das ranhuras, foram executados ensaios a 50 g na centrífuga geotécnica. Para o estudo da ancoragem em *taut-leg*, foram utilizadas estacas com diferentes pontos de fixação. Estes ensaios foram executados a 1 g e comprovaram a eficiência das estacas com ponto de ancoragem na metade inferior da estaca.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas de Sucção, Fundação *Offshore*, Modelos em Escala Reduzida, Processo de Eletro-osmose.

ABSTRACT

The discoveries of new oil fields in deep and ultra-deep waters occurred in recent decades led to the development of new technologies for installing a structure capable of providing a better adaptation of existing structures. The suction caissons are a good alternative to setting these floating structures, compared to traditional caissons. This type of anchor involves uncertainties in both the ground and the installation of the caisson, as well as the forces of nature acting on the structure. This research consists of an experimental program that has as main objective to develop methodologies for the preparation of small-scale tests to 1g, as well as to investigate the performance of suction caissons on monotonic loading, simulating an offshore structure anchored with tension legs (TLP) and with anchoring system in taut-leg. The small-scale physical models were prepared with a mixture of 40% kaolin and 60% metakaolin, and the sample was consolidated through the process of electro-osmosis with vertical flow, associated with the application of overload. After the process of consolidation, mini Vane laboratory tests were executed in order to obtain results of undrained shear strength and then evaluate the performance of the consolidation of the mixture of those two materials. The results prove the effectiveness of the technique of electro-osmosis for the consolidation of physical models with soft soils, with a considerable gain in undrained shear strength. The caissons used in the tests of physical models simulating a vertical anchorage were made of aluminum, one smooth walled and the other tooth walled. These tests were performed at 1g and, in order to prove the effectiveness of the teeth, tests were performed at 50g in the geotechnical centrifuge. For the study of the anchorage in taut-leg, caissons were used with different points of attachment. These tests were performed at 1g and proved the efficiency of caissons with anchorage in the lower half of the caisson.

KEYWORDS: Suction Caissons, Offshore Foundation, Reduced Scale Models, Process of Eletro-Osmosis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Estruturas flutuantes utilizadas em águas profundas (extraída de Moreno, 2005).....	01
Figura 1.2. Estruturas flutuantes e tipos de âncoras desenvolvidas (extraída de Moreno, 2005).....	02
Figura 1.3. Estaca de sucção (extraída de Delmar, 2010).....	03
Figura 2.1 - Campos de exploração de petróleo no Brasil (extraída de Petrobrás, 2010).....	06
Figura 2.2 - Plataforma fixa de aço (extraída de Petrobrás, 2010).....	07
Figura 2.3 - Plataforma de gravidade (extraída de USP-PEF 2506, 2003).....	08
Figura 2.4 – Plataforma Semi-submersível - P52 (extraída de www.tnpetroleo.com.br em 23-03-2010).....	09
Figura 2.5- FPSO – P50 – Campo de Albacora Leste (extraída de www.tnpetroleo.com.br em 23-03-2010).....	10
Figura 2.6 - Plataforma SPAR Stal 1 (extraída de Ramires, 2002); Plataforma Truss SPAR (TECHNIP) (extraída de Villela, 2004).....	11
Figura 2.7 - Plataforma de Pernas Atirantadas (extraída de www.dillinger.de em 06/03/10).....	12
Figura 2.8 – Esquema dos sistemas de ancoragem (extraída de Villela, 2004).....	13
Figura 2.9- Sistema de ancoragem vertical (extraída de www.petrobras.com.br em 02/03/10).....	14
Figura 2.10 – Âncora VLA (extraída de Amaral, 2008).....	16
Figura 2.11 – Âncora DPA (extraída de www.deepseaanchors.com em 03-04-2010).....	17
Figura 2.12 – (a) Âncora SEPLA (b) Âncora SEA (extraída de www.intermoor.com - www.sptoffshore.com 04/03/2010).....	18
Figura 2.13 - Estacas de sucção (extraída de Amaral, 2008).....	19
Figura 2.14 – Estaca de sucção em cluster (extraída de www.sptoffshore.com em 03/03/09).....	20
Figura 2.15 - Sistema de instalação da SIP (extraída de SPT Offshore, 2005).....	21
Figura 2.16 - Componentes básicos da estaca de sucção (extraída de Bakker et al., 2006).....	22
Figura 2.17 – Seqüência de instalação da estaca de sucção (extraída de Sukumaran, 1998).....	23

Figura 2.18 – Plataforma Gullfaks C (extraída de www.en.structurae.de em 06/03/10).....	24
Figura 2.19 - Capacidade de carga por unidade de largura versus a distância do ponto de fixação (Sukumaram, 1998).....	28
Figura 2.20– Interação da modelagem física com a modelagem numérica em um projeto (extraída de Randolph e House, 2001).....	31
Figura 2.21 – Esquema de um modelo submetido à aceleração em centrífuga (extraída de Pacheco, 2006).....	34
Figura 2.22 – Relação entre a tensão inercial do modelo e a tensão gravitacional do protótipo (extraída de Taylor, 1995).....	36
Figura 3.1 – Caixa de teste cilíndrica de acrílico.....	40
Figura 3.2– Caixa de teste cilíndrica de aço.....	41
Figura 3.3 – (a) bate-deira industrial e (b) betoneira adaptada.....	41
Figura 3.4 – Atuador servo-controlado DC.....	42
Figura 3.5 – Atuador hidráulico.....	43
Figura 3.6 – Centrífuga geotécnica da UENF.....	44
Figura 3.7– Diagrama da centrífuga geotécnica da UENF.....	46
Figura 3.8 – Sistema de aquisição de dados – NI-PXI 1052.....	47
Figura 3.9 – Painel frontal do programa de aquisição de dados da régua potenciométrica durante o adensamento do solo.....	48
Figura 3.10 – Consoles de controle e aquisição de dados da centrífuga geotécnica.....	49
Figura 3.11 – Montagem da célula de carga – ensaios a 1 g.....	50
Figura 3.12 – Montagem das células de carga – ensaios a 50 g.....	50
Figura 3.13 – Posicionamento do transdutor de poro-pressão no solo.....	51
Figura 3.14 – Régua potenciométrica.....	52
Figura 3.15 – Aparato utilizado para calibração da régua potenciométrica.....	52
Figura 3.16– Representação gráfica do teste mini palheta.....	54
Figura 3.17– Teste mini Palheta.....	54
Figura 3.18– Representação gráfica do processo de eletro-osmose (extraída de Mitchell, 1993).....	55
Figura 3.19 – Representação gráfica do processo de eletro-osmose (a) fluxo radial (b) fluxo vertical.....	57
Figura 3.20- Esquema gráfico do processo de adensamento.....	57

Figura 3.21– Aparato e esquema gráfico do sistema de aplicação da sucção.....	57
Figura 3.22– Detalhamento do sistema de arrancamento vertical a 1 g.....	58
Figura 3.23– Detalhamento do sistema de arrancamento em <i>taut-leg</i> a 1 g.....	59
Figura 3.24– Detalhamento do sistema de arrancamento vertical a 50 g.....	60
Figura 3.25 – Caulim e Metacaulim utilizados na mistura.....	61
Figura 3.26 – Curva granulométrica dos materiais.....	61
Figura 3.27 – Curva granulométrica das dosagens dos materiais.....	63
Figura 3.28 – Estaca de PVC.....	65
Figura 3.29 a – Estacas para estudo da ancoragem vertical (TLP) – (a) parede lisa)	
(b) parede rugosa.....	65
Figura 3.30 – Posição do olhal nas estacas.....	66
Figura 3.31 – Mistura dos materiais.....	67
Figura 3.32 – Aparato para preparação da água.....	70
Figura 3.33 – Preparação da camada drenante e colocação do solo na caixa de	
acrílico.....	70
Figura 4.1- Perfil da resistência ao cisalhamento não drenada.....	73
Figura 4.2- Força de resistência ao arrancamento em função do deslocamento da	
estaca.....	74
Figura 4.3- Processo de adensamento por eletro-osmose radial.....	75
Figura 4.4- Perfil da resistência ao cisalhamento não drenada após o adensamento	
por eletro-osmose radial.....	75
Figura 4.5- Formação de bolhas no processo de eletro-osmose vertical.....	76
Figura 4.6- Perfil da resistência ao cisalhamento não drenada após o adensamento	
por eletro-osmose vertical.....	77
Figura 4.7- Solo após o adensamento por eletro-osmose com aquisição da	
resistividade.	78
Figura 4.8 – Bucha de solo formada no interior das estacas.....	79
Figura 4.9 – Representação gráfica do ensaio da arrancamento vertical a 1 g.....	79
Figura 4.10- Resultados do ensaio de arrancamento vertical a 1g.....	80
Figura 4.11- Resultados do ensaio de arrancamento - modelo 06.....	81
Figura 4.12- Resultados do ensaio de arrancamento - modelo 07.....	82
Figura 4.13- Resultados do ensaio de arrancamento - modelo 08.....	83
Figura 4.14- Representação gráfica dos ensaios de arrancamento - <i>taut-leg</i> a	
1g.....	84

Figura 4.15- Curvas da força de arrancamento pelo deslocamento das estacas – modelo 09.....	84
Figura 4.16- Curvas da poro-pressão durante o arrancamento das estacas – modelo 09.....	85
Figura 4.17- Resultados do ensaio de arrancamento das estacas – modelo 10.....	85
Figura 4.18- Montagem do ensaio na centrífuga geotécnica.....	86
Figura 4.19 – Representação gráfica do ensaio da ancoragem vertical a 50 g.....	87
Figura 4.20- Poro-pressão gerada durante o ensaio em centrífuga.....	88
Figura 4.21- Resultados do ensaio de arrancamento das estacas – modelo 11.....	89
Figura 4.22 – Instalação dos transdutores de poro-pressão.....	90
Figura 4.23 – Representação gráfica do posicionamento do ensaio - modelo 12.....	91
Figura 4.24- Poro-pressão gerada durante ensaio em centrífuga.....	91
Figura 4.25- Resultados do ensaio de arrancamento das estacas – modelo 12.....	92
Figura 5.1 – Resistência ao cisalhamento não drenada após adensamento.....	94
Figura 5.2 – Perfil de umidade dos modelos utilizados nos ensaios a 1 g.....	95
Figura 5.3- Perfil do peso específico saturado dos modelos ensaiados a 1 g.....	95
Figura 5.4 – Contração volumétrica e trincas ocorridas nos modelos 06 e 08.....	97
Figura 5.5 – Eletrodos antes e depois do processo e preparados para novo ensaio.....	97
Figura 5.6 – Bucha de solo formada no interior da estaca.....	98
Figura 5.7 – Ensaio de arrancamento a 1 g.....	99
Figura 5.8- Resultados dos ensaios de arrancamento com ancoragem vertical.....	99
Figura 5.9- Resultados dos ensaios de arrancamento com ancoragem em <i>taut-leg</i>	100
Figura 5.10 - Perfil de umidade dos modelos ensaiados a 50 g.....	103
Figura 5.11- Perfil do peso específico saturado dos modelos ensaiados a 50 g.....	103
Figura 5.12- Resultados dos ensaios de arrancamento a 50 g.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resumo das estacas de sucção instaladas em águas profundas.....	25
Tabela 2.2 Estudos experimentais em estacas de sucção (extraída de Andersen et al., 2005).....	29
Tabela 2.3- Fatores de escala em modelagem convencional (1 g).....	33
Tabela 2.4– Leis de escala na modelagem centrífuga (extraída de Taylor, 1995)....	37
Tabela 3.1 – Especificação da centrífuga Wyle.....	44
Tabela 3.2 – Características dos motores Uniqore modelo 4013 ATZ.....	46
Tabela 3.3 – Características granulométricas dos materiais.....	63
Tabela 3.4 – Resultados da caracterização dos materiais.....	63
Tabela 3.5 – Características granulométricas das dosagens dos materiais.....	64
Tabela 3.6 – Resultados da caracterização das misturas.....	65
Tabela 4.1- Estudos realizados nos modelos durante a pesquisa.....	72
Tabela 5.1- Resultados dos testes de mini palheta.....	94
Tabela 5.2- Força de arrancamento das estacas submetidas à solicitação vertical.....	100
Tabela 5.3- Características da instalação da estacas por sucção – vertical.....	101
Tabela 5.4- Força de arrancamento das estacas submetidas à solicitação inclinada.....	101
Tabela 5.5- Características da instalação da estacas por sucção – <i>taut-leg</i>	102
Tabela 5.6- Força de arrancamento das estacas a 50 g.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A_r	Aceleração radial
CH	Argila de alta compressibilidade
d	Diâmetro da mini palheta
DC	<i>Direct Current</i>
DDCV	<i>Deep Draft Caisson Vessel</i>
DP	Dynamic position
DPA	<i>Deep Penetrating Anchor</i>
e	Índice de vazios
EO	Eletro-osmose
FDS	<i>Floating Developing System</i>
F_i	Força inercial que age no modelo
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Off-loading</i>
FPU	<i>Float Point Unit</i>
g	Aceleração da gravidade na Terra
GPS	Sistema de posicionamento global
h	Altura da mini palheta
h	Altura da estaca
h/H	Profundidade da amostra normalizada
h_p	Profundidade referente a uma tensão vertical no protótipo

H	Altura da amostra de solo
h_m	Profundidade referente a uma tensão vertical no modelo
HCT	<i>Hydraulic Consolidation Test</i>
IAOGP	<i>International Association of Oil and Gas Producers</i>
ISMES	<i>Istituto Sperimentale Modelli E Strutture</i>
K_i	Fator de escala
L/D	Relação de aspecto
LL	Limite de liquidez
m	Massa do modelo
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
M	Massa do protótipo
N	Razão entre as dimensões da estrutura do protótipo e do modelo
N	Fator de escala que multiplica a gravidade
NBR	Norma Brasileira Registrada
NGI	<i>Norwegian Geotechnical Institute</i>
P	Plataforma
r	distância radial entre o centro da centrífuga e o centro de massa do modelo
sat	Saturado
SEPLA	<i>Suction Embedded Plate Anchor</i>
SPT	<i>Suction Pile Technology</i>
SEA	<i>Suction Embedded Anchor</i>

SPC	<i>Suction Pile Cluster</i>
SIP	<i>Self Installing Platform</i>
SS	Semi submersível
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada do solo
T	Torque
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>
TPP	Transdutor de poropressão
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense
USCS	Sistema unificado de classificação dos solos
UWA	<i>University of Western Australia</i>
VLA	<i>Vertical Load Anchor</i>
X_m	Grandeza do modelo
X_p	Grandeza do protótipo
θ	Inclinação da força de arrancamento
ρ	Densidade
γ	Peso específico do solo
σ_v	Tensão vertical
σ_{vp}	Tensão vertical no protótipo
σ_{vm}	Tensão vertical no modelo
v_t	Velocidade tangencial
ω	Velocidade angular

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e relevância

As descobertas de novos campos de petróleo em águas profundas e “ultra profundas”, ocorridas nas últimas décadas, levaram ao desenvolvimento de novas tecnologias para a instalação de uma estrutura capaz de proporcionar uma melhor adaptação das estruturas já existentes. A experiência na área da engenharia geotécnica *offshore* tem demonstrado que a estaca convencional utilizada para a instalação de plataformas fixas não é uma opção adequada para ser implantada em águas profundas, tendo em vista os elevados custos e possíveis dificuldades durante o processo de instalação. Com isso, concluiu-se haver a necessidade de se projetar estruturas flutuantes mais complexas, dando assim mais segurança nessas novas profundidades de exploração. Essas estruturas flutuantes desenvolvidas (Figura 1.1) são as Plataformas de Pernas Atirantadas (TLP), as SPARs, os navios FPSO e as Plataformas Semi-Submersíveis. Estas plataformas vieram com a finalidade de substituir as plataformas fixas e de gravidade já utilizadas para fixação de plataformas em águas rasas.

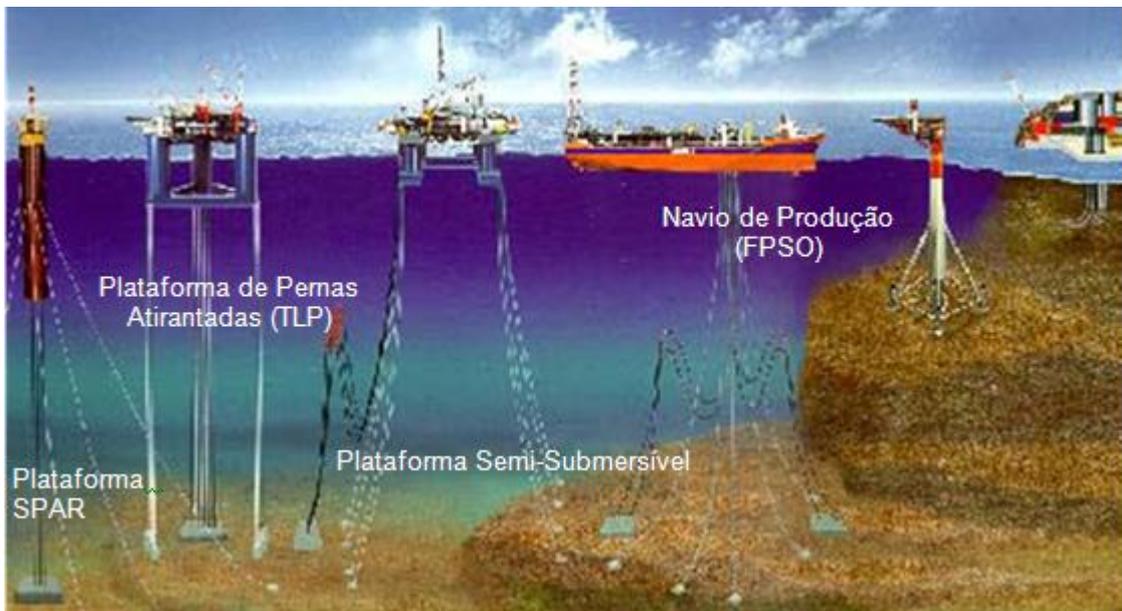


Figura 1.1. Estruturas flutuantes utilizadas em águas profundas (Moreno, 2005).

Cada uma das diferentes estruturas *offshore* demanda uma necessidade distinta e conseqüentemente um projeto de ancoragem próprio, devido a estarem sujeitas às condições ambientais como cargas de vento, onda, corrente, maré e outras forças naturais. Essas forças podem ser divididas em duas parcelas: a estática e a dinâmica.

Em águas profundas e ultra profundas, a tradicional ancoragem em catenária torna-se cara e difícil de trabalhar devido à grande área de ancoragem, já que as cargas aplicadas sobre as âncoras são predominantemente horizontais. Assim, para reduzir o comprimento das linhas de ancoragem e a largura das fundações foi desenvolvida a ancoragem em *taut-leg*, onde as âncoras estão sujeitas a forças predominantemente verticais.

A Figura 1.2 apresenta diversas soluções de âncoras que funcionam em sistemas *taut-leg* como as estacas de sucção, estacas torpedo (DPA), VLA (*Vertical Load Anchor*) e a SEPLA (*Suction Embedded Plate Anchors*).



Figura 1.2. Estruturas flutuantes e tipos de âncoras desenvolvidas (Moreno,2005).

Essas âncoras se mostram cada vez mais eficientes por darem suporte aos esforços das estruturas flutuantes e por contribuírem na diminuição dos cabos e ancoragem, evitando um congestionamento no leito marinho.

Dentre estes tipos de âncoras, a estaca de sucção foi um dos primeiros métodos a serem desenvolvidos, entre o final da década de 80 e o começo da década de 90. Hoje em dia é utilizada na indústria de petróleo e gás em todo o mundo, como Brasil, Mar do Norte, Noruega, Oeste da África e Golfo do México, sendo considerada econômica e eficaz devido a sua capacidade de resistir à combinação de cargas verticais e horizontais, e sua relativa simplicidade no procedimento de instalação (Tjelta, 2001). As estacas de sucção, (Figura 1.3), são projetadas para resistir às cargas ambientais, descritas anteriormente, durante a sua instalação e durante toda vida útil da estrutura, garantindo as condições de segurança e estabilidade do sistema solo-fundação-estrutura.

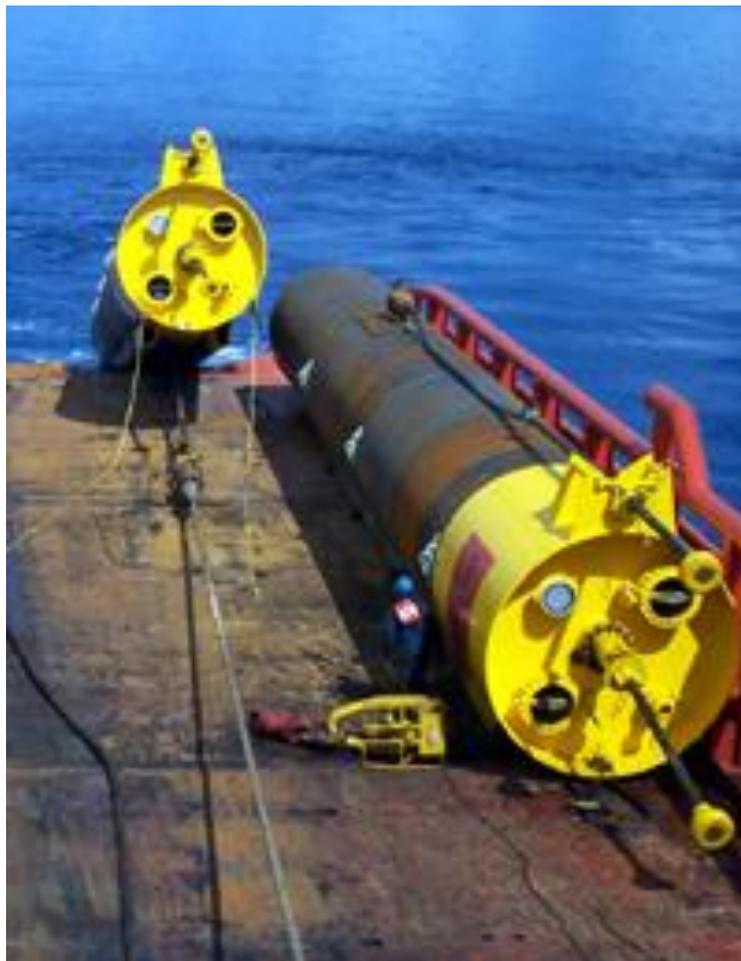


Figura 1.3. Estaca de sucção (Delmar, 2010).

Nos dias de hoje, as estacas de sucção são utilizadas também para ancoragem de plataformas em profundidades acima de 3000 metros, em fundações de quebra mar e em fundações de turbinas de vento.

1.2 Objetivos

A estaca de sucção vem sendo estudada há muitos anos como opção para ancoragem de plataformas flutuantes. Este tipo de âncora envolve incertezas tanto em relação ao solo quanto também à instalação da estaca e às forças da natureza que atuam na estrutura. Este trabalho visa desenvolver metodologias experimentais na preparação de ensaios em escala reduzida a 1g, para avaliar a capacidade de suporte das estacas de sucção sob condições de ancoragem em *taut-leg* e vertical (TLP). Com este objetivo, são feitos os estudos da sua geometria, como por exemplo, a colocação de ranhuras na parede externa da estaca para ancoragem vertical, do modo de instalação da estaca no leito marinho e conseqüentemente do sistema de bombeamento para, em um último estágio, desenvolver uma metodologia para o ensaio de arrancamento do modelo construído com as especificações pré-estabelecidas e assim obter a resposta do conjunto solo-fundação-estrutura.

1.3 Escopo do trabalho

Esta dissertação consiste em 6 capítulos, sendo estes descritos abaixo.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre estacas de sucção em argila sob várias condições de ancoragem, como também apresenta uma abordagem sobre modelagem física utilizando modelo reduzido.

O capítulo 3 descreve os estudos feitos para se determinar a mistura utilizada no modelo físico e os estudos para estabelecer o processo de adensamento do solo. São apresentados os equipamentos utilizados na modelagem física, assim como a centrífuga geotécnica e o teste mini palheta. Por fim, é descrita toda a instrumentação utilizada nas estacas e no solo, como os transdutores de poro-pressão e as células de carga.

O capítulo 4 vem descrever os programas dos ensaios realizados para se desenvolver o processo de adensamento do solo e o sistema de instalação e arrancamento das estacas. São apresentados os resultados dos estudos dos modelos executados.

O capítulo 5 apresenta as análises dos resultados obtidos nos modelos, comprovando a eficiência do processo de adensamento, do sistema de instalação e do sistema de arrancamento desenvolvido. É feita a comparação entre as geometrias da parede externa das estacas no sistema de ancoragem vertical e a comparação da força de arrancamento em função da posição da ancoragem na estaca em um sistema de ancoragem *taut-leg*.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e as recomendações para futuros trabalhos sobre modelagem física de estacas de sucção.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

As descobertas de campos de petróleo em águas profundas, ocorridas nas últimas décadas no Brasil (Figura 2.1) e no mundo, demandaram da indústria de exploração e produção de petróleo o desenvolvimento de novas tecnologias, para adequar as já existentes a estes novos desafios. Este panorama muda a concepção de exploração e produção *offshore*, mudando das estruturas pesadas e fixas utilizadas no leito marinho às estruturas flutuantes e flexíveis.

Para a exploração de petróleo no mar são utilizadas plataformas cujos tipos, dimensões e tecnologia variam de acordo com a profundidade da lâmina d'água, a vazão dos poços, as características locais do oceano e a distância do litoral. As plataformas de exploração e produção constituem verdadeiras ilhas artificiais de trabalho e tecnologia.

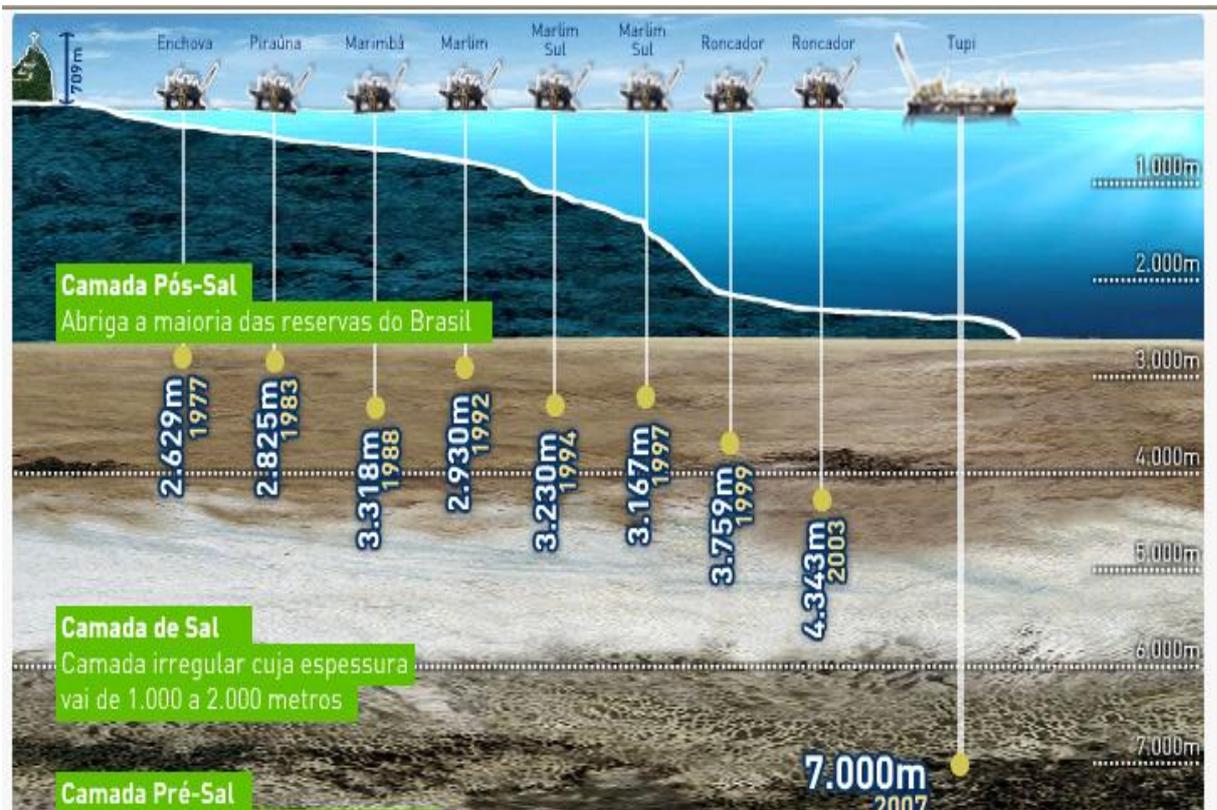


Figura 2.1 - Campos de exploração de petróleo no Brasil (Petrobrás, 2010).

As primeiras plataformas utilizadas para exploração de petróleo em águas rasas foram as plataformas fixas e de gravidade, denominadas de plataformas de primeira e segunda geração, respectivamente. Ambas são ainda utilizadas para exploração e produção em águas rasas com profundidade de até 300 metros.

As plataformas fixas são compostas de fundação (infra-estrutura), usualmente estacas cravadas, estrutura de contraventamento (meso-estruturas), ditas jaquetas, e a estrutura superior (superestrutura) denominada de convés (Figura 2.2).

As plataformas de gravidade (Figura 2.3) são estruturas robustas, de grande massa. Usualmente a fundação é um grande bloco de concreto; a meso-estrutura são pilares de grandes dimensões; e o convés uma plataforma de 30 até 120 MN. Destaca-se que estas estruturas podem suportar um convés variando de 50 até 520 MN (IAOGP, 2003).

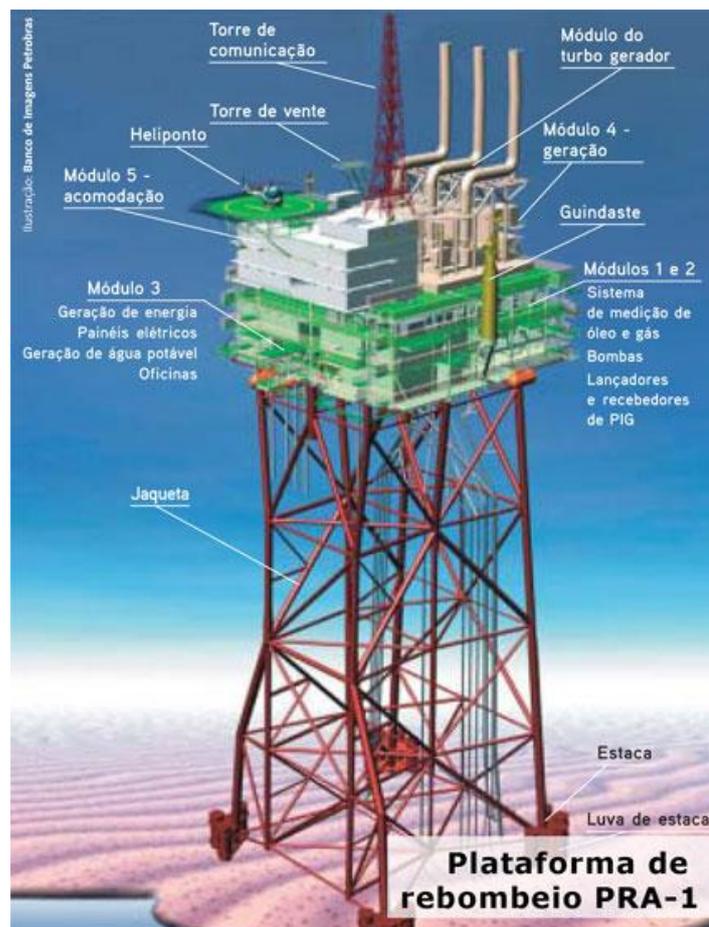


Figura 2.2 - Plataforma fixa de aço (Petrobrás, 2010).

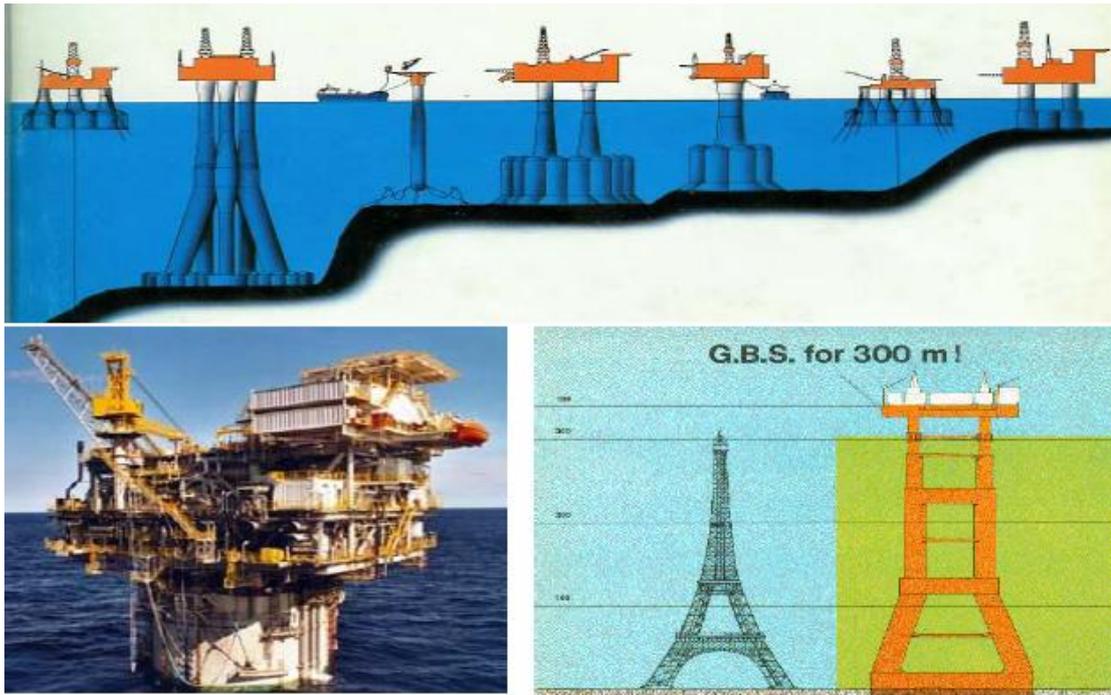


Figura 2.3 - Plataforma de gravidade (USP- PEF 2506, 2010).

Com a descoberta de petróleo em águas profundas e ultra-profundas, surgiram as plataformas de terceira geração denominadas de estruturas flutuantes. Entende-se por plataforma flutuante uma estrutura que mantém o seu posicionamento com o auxílio de ancoragens ou por posicionamento dinâmico (Moreno, 2005). Na realidade, este tipo de plataforma desloca-se horizontalmente e verticalmente, ainda que de forma restrita, estando à mercê das ações de cargas ambientais como correntes marinhas, ondas e vento. É importante destacar que os movimentos são restringidos pela ancoragem através das amarras, que fazem a ligação das âncoras até as estruturas flutuantes ou pelo sistema DP (*Dynamic Position*). Este sistema dispensa a ancoragem tradicional, permanecendo estacionária através do uso de propulsores comandados por computadores. Estes utilizam informações de posição através de sistemas GPS.

Como exemplo de plataformas de terceira geração, podem ser citadas as plataformas semi-submersíveis, os navios de produção, armazenamento e descarga (FPSOs), as plataformas de pernas atirantadas (TLPs) e as plataformas do tipo SPAR.

2.2 Unidades Estacionárias de Produção (Plataformas Flutuantes)

2.2.1 Plataformas Semi-submersíveis (SS)

As plataformas semi-submersíveis (Figura 2.4) se assemelham às de gravidade, são compostas de uma estrutura com um ou mais conveses, apoiada por colunas em flutuadores submersos denominados de *pontoons*. Apresentam grande mobilidade, sendo as mais utilizadas para a perfuração de poços exploratórios. Este tipo de unidade flutuante é mantido na posição através de linhas de ancoragem que podem ser do tipo convencional, instalada em catenária, ou do tipo *taut-leg*.



Figura 2.4 – Plataforma Semi-submersível - P52 (Tn Petróleo, 2010).

2.2.2 Unidade Flutuante de Produção, Estocagem e Alívio (FPSO)

Os FPSOs são navios modificados, normalmente um petroleiro, conforme é apresentado na Figura 2.5. Estes representam uma unidade de produção de petróleo flutuante, com unidade de armazenamento, de processamento e sistema de



Figura 2.5 - FPSO - P50 – Campo de Albacora Leste (Tn Petróleo, 2010).

transbordo do petróleo produzido. Atualmente, já são construídos navios com esta finalidade e com baixo custo de fabricação. Este tipo de plataforma é principalmente utilizada em águas profundas e ultra profundas, por oferecer maior estabilidade em condições marítimas adversas. Nas bacias sedimentares brasileiras há inúmeros exemplos de FPSOs operando, tais como as plataformas P-34, P-43, P-48, P-50 e P-53.

2.2.3 Plataforma SPAR (DDCV)

A plataforma SPAR (Figura 2.6) é basicamente uma versão ampliada da semi-submersível. É uma plataforma de perfuração e produção que opera em profundidades de até 3000 metros (www.globalsecurity.org). Sua estrutura é composta de um casco de seção transversal circular que se posiciona verticalmente na água sustentada pelos tanques de flutuação localizados na parte superior da estrutura. A plataforma SPAR é mantida na posição por meio de sistema de ancoragem do tipo *taut-leg*. Este tipo de unidade possui amplitude de movimentos bastante reduzida.

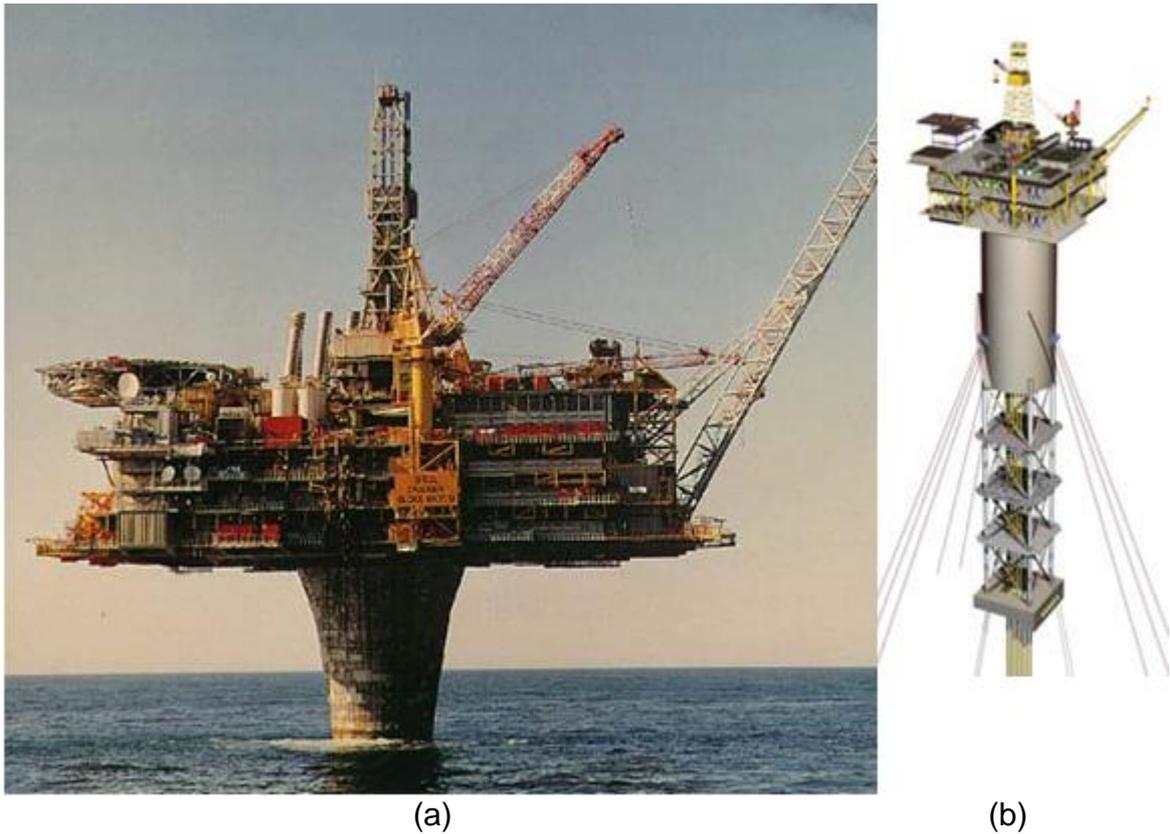


Figura 2.6 (a) - Plataforma SPAR *Stal 1* (Ramires, 2002)
 (b) Plataforma Truss SPAR (TECHNIP) (Villela, 2004).

2.2.4 Plataforma de Pernas Atirantadas (TLP)

A plataforma de pernas atirantadas (*Tension Leg Platform - TLP*) apresentada na Figura 2.7 é um tipo de unidade flutuante que apresenta uma estrutura bastante semelhante à plataforma semi-submersível, sendo mantida na posição através de tirantes feitos de tubos de metal ou materiais compósitos, que são ancorados no leito marinho. O grau de flutuação da plataforma possibilita a manutenção do tracionamento dos tendões, reduzindo drasticamente os movimentos da unidade. Devido à alta rigidez no plano vertical do sistema, as TLPs são plataformas que possuem amplitude de movimentos extremamente reduzida. Este modelo de plataforma permite que as empresas petrolíferas perfurem em profundidade acima de 2000 metros.

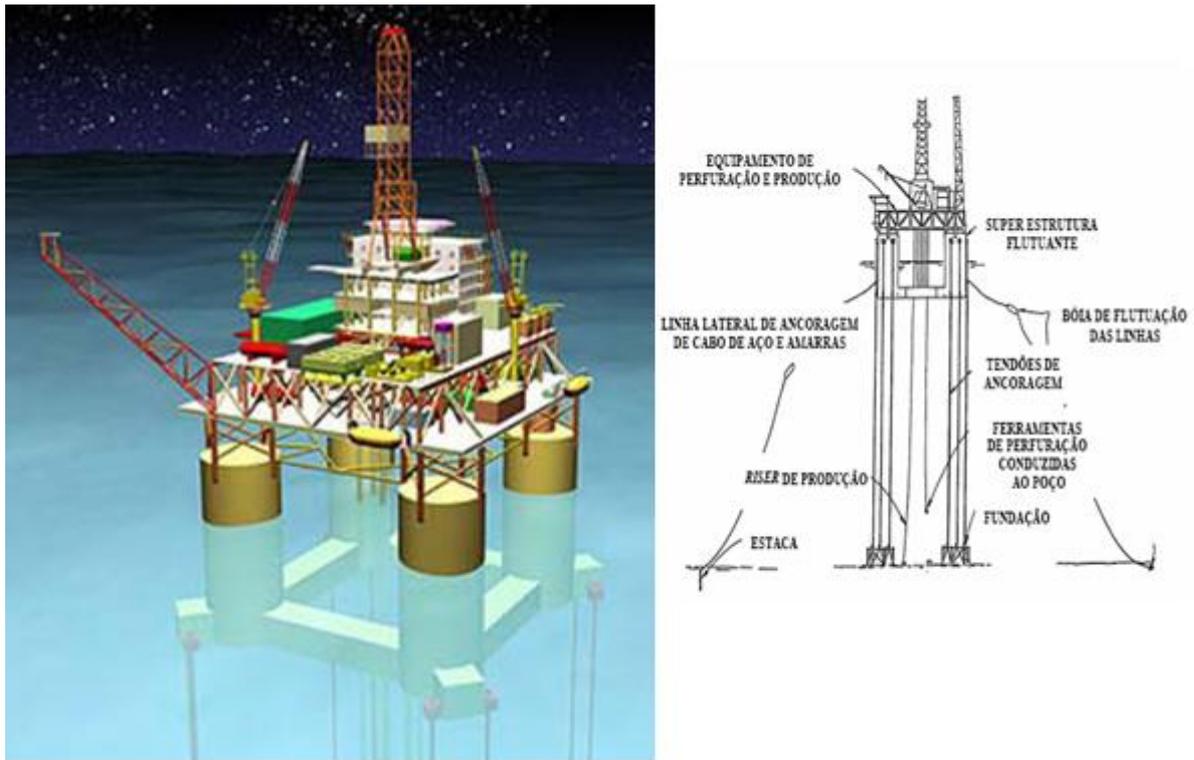


Figura 2.7 - Plataforma de Pernas Atirantadas (Dillinger, 2010).

2.3 Sistemas de ancoragem

As linhas de ancoragem são estruturas esbeltas dispostas em catenária, *taut-leg* ou tendões. Sua principal função é fornecer as forças de restauração que mantêm em posição as unidades flutuantes.

Normalmente, um sistema de ancoragem é composto por um conjunto de linhas, sendo cada uma destas composta de um ponto fixo no leito marinho (âncora) e de elementos que conectam este ponto à unidade flutuante. Estes elementos de ligação são compostos de amarras, cabos de aço e/ou cabos de poliéster, conforme é apresentado na Figura 2.8. As amarras são utilizadas geralmente nos trechos iniciais e finais das linhas de ancoragem, devido a este material ser mais resistente ao atrito com o leito marinho e com os guinchos das unidades flutuantes.

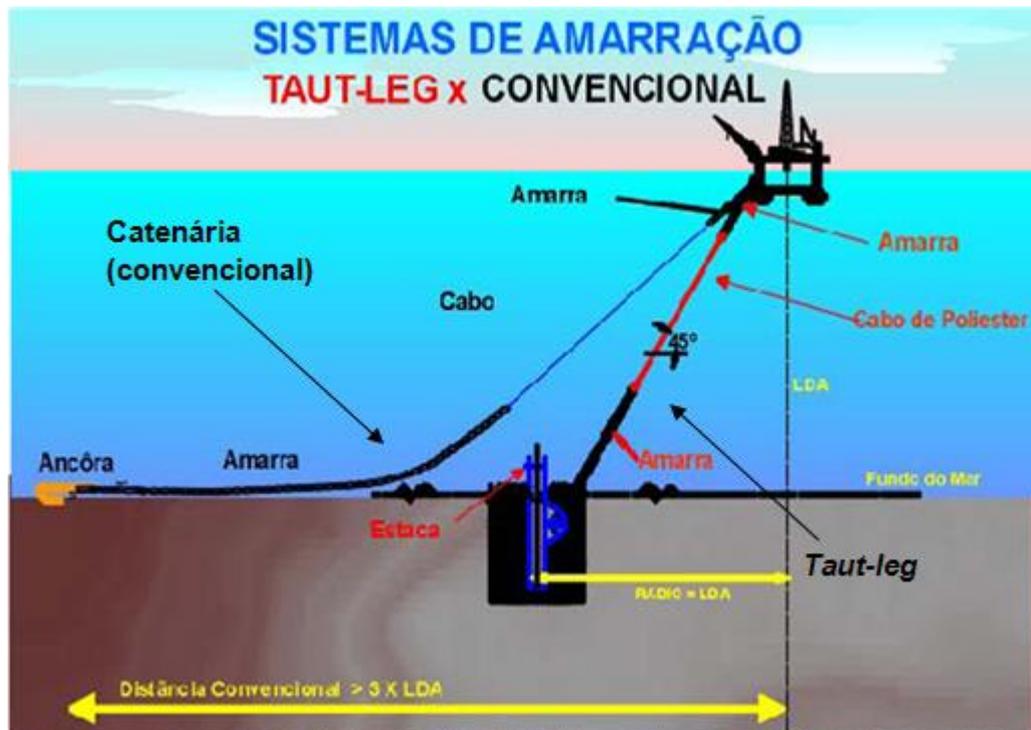


Figura 2.8 – Esquema dos sistemas de ancoragem (Villela, 2004).

2.3.1 Catenária

A ancoragem em catenária é o sistema convencional utilizado em operações de produção ou perfuração. Tem como principal vantagem possibilitar maior liberdade da estrutura flutuante sem haver a necessidade de âncoras com elevado poder de garra. Isto ocorre por este sistema ter um grande raio de ancoragem (chegando a até três vezes a altura da lâmina d'água) e devido ao atrito produzido pelo trecho da linha de ancoragem encostada no leito marinho ser responsável por absorver as solicitações do carregamento ambiental. Estes dois fatores aliviam os esforços nas âncoras em condições normais de operação (Villela, 2004). Sua principal desvantagem é o congestionamento com as linhas das unidades próximas, interferindo diretamente no posicionamento das unidades de produção.

2.3.2 Taut-Leg

Para evitar as desvantagens da ancoragem em catenária, utiliza-se a ancoragem em *taut-leg*. Neste sistema, a linha se encontra mais tensionada, com um ângulo de

aproximadamente 45° com a vertical, tendo assim uma projeção horizontal menor, para uma mesma ordem de grandeza da lâmina d'água, conforme é mostrado na Figura 2.8. Este tipo de ancoragem proporciona maior rigidez ao sistema, sendo a liberdade da estrutura limitada a *offsets* menores. Neste caso, as âncoras a serem utilizadas precisam resistir a valores elevados de cargas verticais. A ancoragem *taut-leg* é geralmente utilizada em sistemas localizados em regiões de grandes profundidades.

2.3.3 Vertical

A ancoragem vertical é baseada na utilização de tendões verticais, que estão sempre tracionados devido ao excesso de empuxo proveniente da parte submersa da embarcação. Trata-se da ancoragem usada principalmente em plataformas TLP (*Tension Leg Platform*), mas que também pode ser adotada por bóias e monobóias, dentre outras.

A Figura 2.9 apresenta um esquema de uma plataforma TLP com utilização de ancoragem vertical.

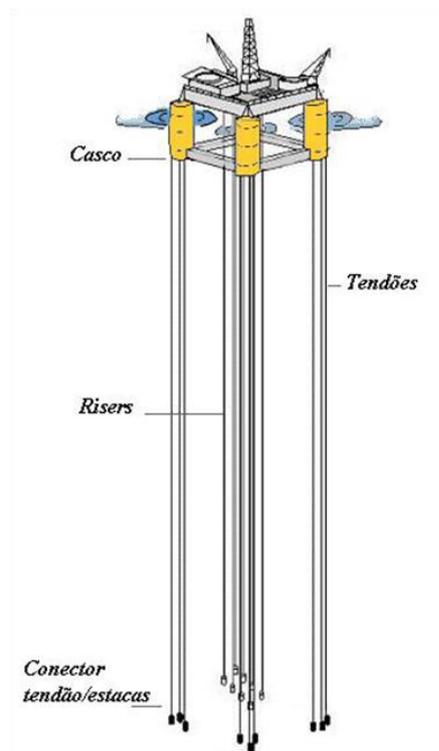


Figura 2.9- Sistema de ancoragem vertical (Petrobras, 2010).

2.3.4 Posicionamento Dinâmico (DP)

O sistema DP (*Dynamic Position*) é utilizado de forma isolada ou como auxílio para um sistema já ancorado. É um tipo de ancoragem utilizado em atividades de perfuração e intervenção em poços de petróleo. As unidades de posicionamento dinâmico podem ser constituídas de navios ou plataformas semi-submersíveis que mantêm sua localização com o auxílio de um conjunto de propulsores. Quando estas unidades trabalham muito próximas a outras unidades já ancoradas, pode-se fazer necessária a utilização de âncoras de segurança, caso sofram alguma falha na geração de energia para os propulsores (Carbono, 2005).

2.4 Âncoras para fundações em águas profundas

Para os sistemas de ancoragens citados no item anterior, foram desenvolvidas âncoras que trabalham enterradas. Estas possuem fabricação e instalação simples, têm menor custo e têm grande capacidade de suporte. Como exemplos temos a Estaca de Sucção desenvolvida pelo NGI (*Norwegian Geotechnical Institute*) e pela SPT *Offshore* (*Suction Pile Technology*), a VLA (*Vertical Load Anchor*) desenvolvida pela *Vryhof Ankers BV* denominada *Stevmanta* ®, a DPA (*Deep Penetrating Anchor*), desenvolvida pela *Deep Sea Anchors*, a Estaca Torpedo, patenteada pela Petrobrás e a SEPLA (*Suction Embedded Plate Anchor*), desenvolvida pela *Aker Maritime* e *InterMoor*, e a SEA (*Suction Embedded Anchor*) desenvolvida pela SPT *Offshore*.

2.4.1 Âncora de Carga Vertical - VLA

As âncoras submetidas à carga vertical (VLA) (Figura 2.10) são cravadas através do arraste no solo marinho. Estas âncoras possuem a forma semelhante à de uma arraia ou de uma enxada. Devido ao seu formato, penetram em torno de 25 a 20 metros no solo marinho, aumentando a resistência à carga vertical. São mais caras do que as convencionais, por haver menos concorrência no mercado. É difícil a remoção após a instalação, o que a contra-indica para uso em projetos de curta duração. Os procedimentos de arraste podem impedir seu posicionamento correto,



Figura 2.10 - Âncora VLA (Amaral, 2008).

principalmente em áreas congestionadas por muitas plataformas, além de necessitarem de embarcações de alto custo para auxiliar o processo de instalação.

2.4.2 Âncora DPA e Estaca Torpedo

A estaca torpedo (Figura 2.11) e a âncora DPA têm a forma cilíndrica sólida com ponta cônica fechada, que é cravada no solo por gravidade após lançamento de uma altura entre 20 e 40 metros (Brum Jr., 2009). Em geral, seu comprimento é 10 vezes o seu diâmetro, podendo ou não ter a presença de aletas. Estas proporcionam maior área de contato da estaca com o solo, aumentando a resistência, tanto lateral quanto axial (Gravina, 2010).

Inicialmente, as estacas torpedo foram aplicadas em ancoragem de linhas flexíveis, e posteriormente foram adotadas na ancoragem de estruturas semi-submersíveis de produção e FPSOs, possibilitando a instalação em águas com profundidades superiores a 2000 m e em locais congestionados de cabos e *risers*.

O custo de instalação desta estaca apresenta baixa sensibilidade ao aumento da lâmina d'água e o transporte é menos dispendioso devido à necessidade somente de um rebocador para o seu transporte e lançamento.



Figura 2.11 – Âncora DPA (Deep Sea Anchors, 2010).

2.4.3 Âncoras SEA e SEPLA

As âncoras *SEA* (*Suction Embedded Anchor*) e *SEPLA* (*Suction Embedded Plate Anchor*) (Figura 2.12) são inovações para águas profundas com capacidade de permanência de 50-100 vezes o seu peso. São instaladas como uma estaca de sucção. Quando alcança a posição de projeto, o corpo da estaca é retirado e a âncora se abre em forma de uma concha, formando uma âncora resistente para qualquer tipo de ancoragem, *catenária*, *taut-leg* ou vertical. Sua capacidade de suporte independe do ângulo de aplicação da carga. Estes modelos combinam uma âncora eficiente com a simplicidade da instalação de uma estaca de sucção.

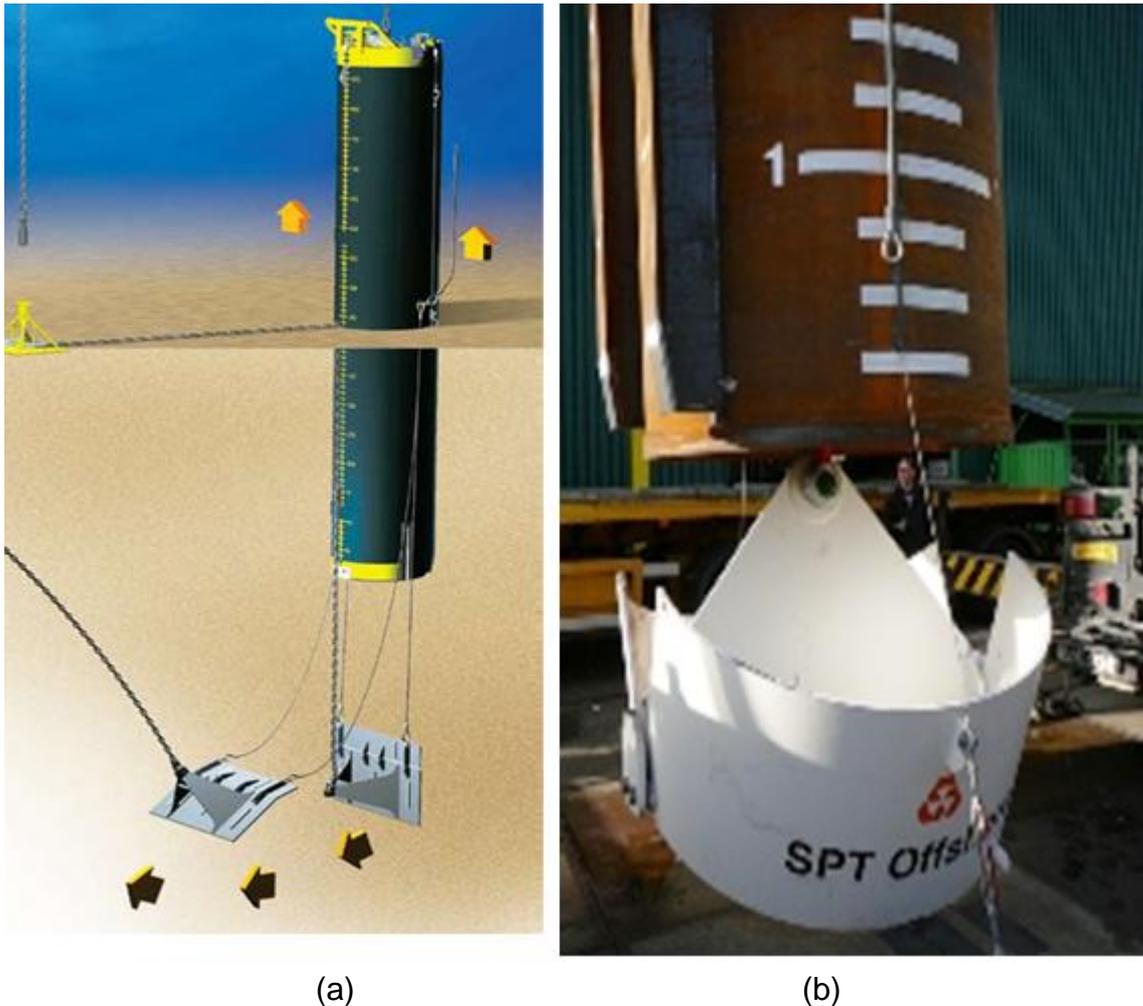


Figura 2.12 (a) – Âncora SEPLA (Inter Moor, 2010)

(b) Âncora SEA (SPT Offshore, 2010).

2.4.4 Estacas de Sucção

As estacas de sucção (Figura 2.13) são principalmente utilizadas em sistemas onde as linhas de ancoragem são mantidas tracionadas, como por exemplo em plataformas semi-submersíveis e plataformas TLP. Sendo uma melhor opção para utilização em águas profundas do que as estacas cravadas por terem um sistema de instalação mais simples.

É uma estaca com forma cilíndrica, sendo oca e com a extremidade superior fechada e a inferior aberta. Estas são inicialmente posicionadas no leito marinho por gravidade e depois um sistema de bombas retira a água de seu interior, cravando-a devido à diferença de pressão.

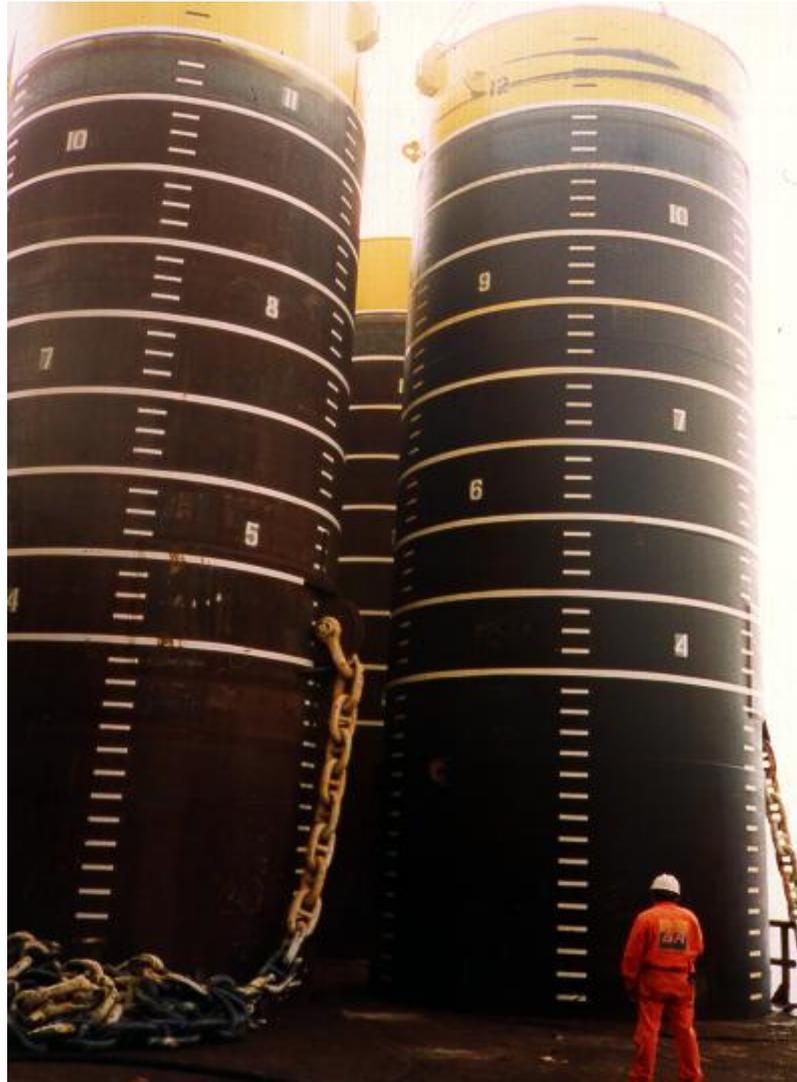


Figura 2.13 - Estacas de sucção (Amaral, 2008).

Utilizando o mesmo princípio da estaca de sucção, a empresa SPT *Offshore* desenvolveu um sistema de cluster (SPC), (Figura 2.14). Consiste em três estacas de sucção, que são interligadas no topo e na base, cada uma tendo sua válvula de sucção independente. A *Suction Pile Cluster* foi desenvolvida para estruturas que necessitam de precisão vertical. Durante a instalação, a SPC tem tolerância de 1º de desvio. Deve-se destacar que a estaca de sucção isolada não garante esse requisito, podendo o desvio chegar a 3-5º.



Figura 2.14 – Estaca de sucção em cluster - SPC (SPT *Offshore*, 2009).

É utilizada em sistemas de ancoragem em águas profundas, além do bom controle da verticalidade, fabricação mais barata e maior capacidade de suporte em comparação com a estaca de sucção simples.

A SPT *Offshore* também desenvolveu com o mesmo princípio de estaca de sucção a plataforma de auto-instalação (*Self Installing Platform*). Estas plataformas podem ser instaladas em profundidades de 10 a 100 m com o auxílio de um rebocador ou navio de instalação, sendo transportadas até a posição de instalação através de bóias acopladas na parte superior das estacas. A estrutura da plataforma de auto-instalação (SIP) é formada por um convés que se apóia numa estrutura de aço tipo jaqueta que tem acopladas na sua extremidade três estacas de sucção (Figura 2.15). Quando a estrutura é posicionada, o sistema de bóias auxilia no rebaixamento da estrutura e posiciona as estacas no leito marinho. A partir deste momento, é feita a instalação das três estacas simultaneamente pelo mesmo processo da estaca de sucção. Uma vantagem deste tipo de estrutura é que pode ser retirada e re-instalada em outro local. Esta estrutura tem o peso total em média de 300 toneladas, podendo variar de acordo com o modelo. Neste mesmo conceito foram criadas as SIP II, SIP III e SIP IV.

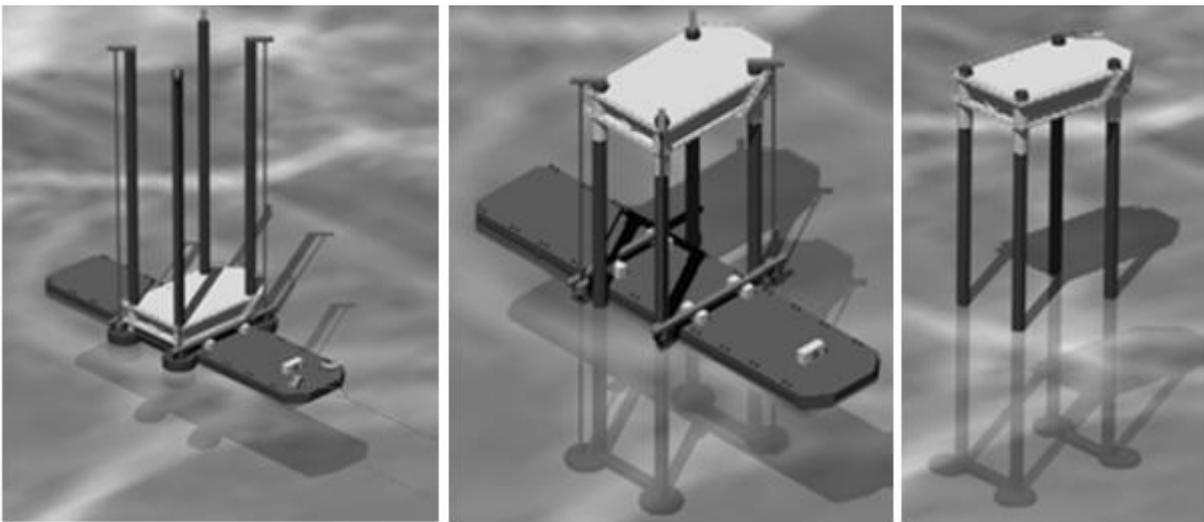


Figura 2.15 - Sistema de instalação da SIP (SPT *Offshore*, 2005).

2.5 Conceito e aplicações das Estacas de Sucção

As estacas de sucção começaram a ser desenvolvidas na década de 80, quando foi difundido o seu uso como ancoragem. Hoje em dia, as suas aplicações são amplamente conhecidas, sendo estas usadas nas principais regiões de produção, como Brasil, Oeste da África, Mar do Norte, Noruega e no Golfo do México. Podem

ser utilizadas tanto em águas rasas como ancoragem de estruturas fixas como em águas profundas como ancoragem de estruturas flutuantes.

A estaca de sucção é um cilindro metálico ou de concreto aberto na base e fechado no seu topo, onde são instaladas as válvulas de sucção e de saída de ar/água. Na Figura 2.16 é apresentado o esquema dos componentes básicos de uma estaca de sucção.

A estaca de sucção é lançada e instalada inicialmente com as saídas (válvulas) de água e ar abertos até que a cravação por peso próprio seja concluída (Figura 2.17b).

Após esta operação, as válvulas de água são fechadas e pela válvula de ar a água é bombeada para fora da estaca, criando uma pressão diferencial, na realidade uma sucção (Figura 2.17c). Então, a estaca é forçada para baixo penetrando no solo. Através deste procedimento, a estaca é cravada até a posição pré-estabelecida. Allersma et al. (2001) afirmam que este procedimento pode durar de 1 até 3 horas depois do início do bombeamento, dependendo das condições do solo, das dimensões da estaca e da capacidade de bombeamento.

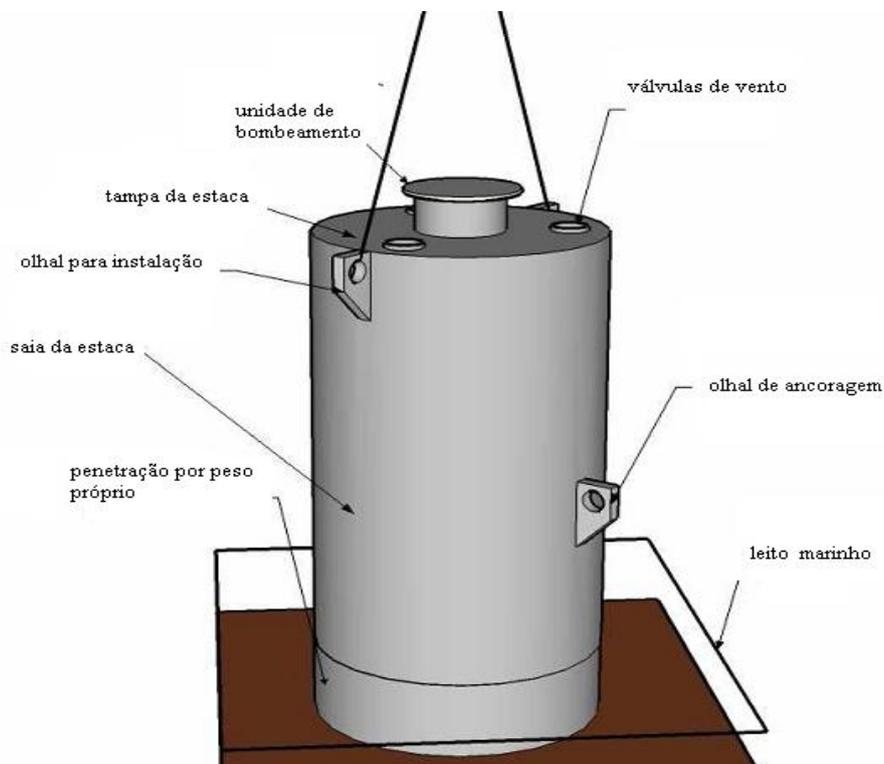


Figura 2.16 - Componentes básicos da estaca de sucção (Bakker et al., 2006).

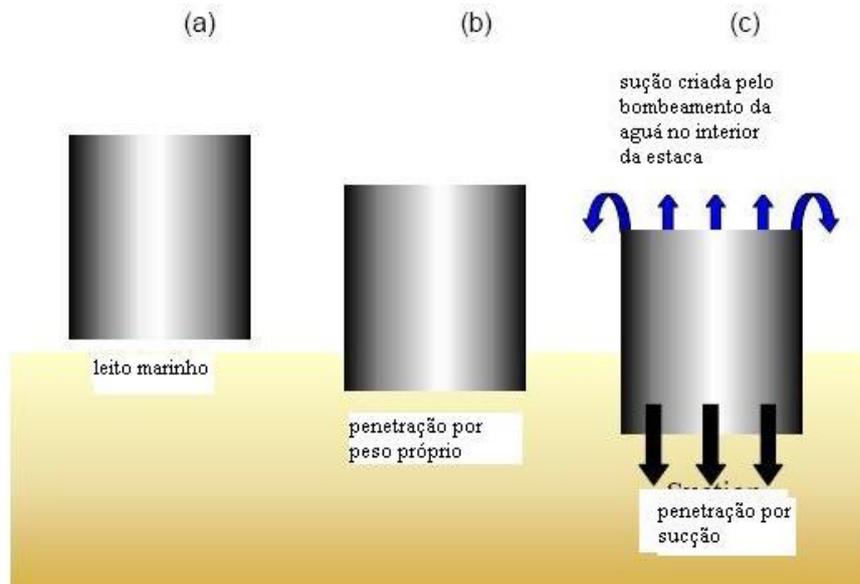


Figura 2.17 – Seqüência de instalação da estaca de sucção (Sukumaran, 1998).

É importante ressaltar que as forças de atrito lateral nas faces da estaca e a resistência de ponta se opõem a essa penetração (Moreno, 2005).

A resistência ao arrancamento da estaca quando solicitada verticalmente é formada pelos seguintes componentes: peso submerso da estaca; pressão de sucção em torno da estaca quando tracionada; peso da bucha de solo no seu interior; atrito lateral e resistência à tração do solo na base da estaca (Albert et al., 1989). Quando solicitada lateralmente, levam-se em consideração o empuxo passivo e ativo mobilizados pela translação da estaca. Nas seções mais profundas, a resistência lateral será dada pelo fluxo de solo em torno da estaca.

Tem-se que a resistência ao arrancamento da estaca é dada em função da pressão de sucção aplicada, das condições do solo *in situ*, da posição da colocação do olhal de ancoragem e da geometria da estaca utilizada (Sukumaran, 1999).

As primeiras estacas utilizadas em fundações *offshore* foram desenvolvidas pelo NGI (*Norwegian Geotechnical Institute*). Estas foram instaladas no campo de Gorm no Mar do Norte. Foram utilizadas como fundação de uma plataforma fixa com estrutura metálica do tipo jaqueta em uma profundidade de 40 m. O custo e o tempo gasto para sua execução foi alto comparado com os sistemas já existentes. A segunda utilização foi na plataforma Gullfaks C, em 1985, no Mar do Norte (Figura 2.18). A partir de então, este sistema de ancoragem foi aperfeiçoado e aceito como uma

forma segura e de menor custo comparado com as âncoras arrastadas e estacas cravadas (Fakharian & Rismanchian, 2004). Em 1999, foram instaladas pelo NGL na plataforma Diana, no Golfo do México, em um depósito de argila mole, 12 estacas de 30 m de altura por 6,5 m de diâmetro, numa profundidade aproximadamente de 1500 m de lâmina d'água. Este fato marcou o avanço tecnológico do uso da estaca de sucção na exploração de petróleo.

O sucesso da aplicação das estacas de sucção é uma realidade na ancoragem de estruturas *offshore* em águas profundas e ultra profundas. Até os dias de hoje, já foram instaladas com sucesso mais de 500 estacas de sucção em 50 locais diferentes, com lâmina d'água de até 2000 m. Um resumo das estacas instaladas é apresentado na Tabela 2.1 (Andersen et al., 2005; Ehlers et al., 2004).

O aumento da capacidade de resistência da estrutura de fundação com o uso da sucção foi reconhecido através dos anos, sendo que os primeiros estudos sobre os efeitos da sucção foram feitos a partir de estudos da obstrução no levantamento de estruturas enterradas, como navios naufragados (Muga, 1967).



Figura 2.18 – Plataforma Gullfaks C (Structurae, 2010).

Byrne e Finn (1972) realizaram os primeiros estudos para entender os fatores que governam a capacidade de ruptura da estaca de sucção, observando que esta capacidade de ruptura depende principalmente do desenvolvimento da sucção na base da estaca.

Tabela 2.1. Resumo das estacas de sucção instaladas em águas profundas.

Ano	Campo de exploração	Tipo de plataforma	Lâmina d'água (m)	Dimensões (DxL) (mxm)	Número de estacas	Empresa operadora
1991	Snorre ¹⁾	TLP	335	30x13	4	Saga
1995	N'Kossa	SBM	200	5x12.5	14	Elf
1996	Norne ¹⁾	FPSO	375	5x10	12	Statoil
1997	Marlim ³⁾ P19-P26	Semi FPU	770-1000	4.7x13	32	Petrobrás
1997	Schiehallion ⁴⁾	FPSO	400	6.5x12	14	BP
1997	Norsk Hidro's Njord	-	330	5x7-11	20	CSNOR
1997	Shell's Curlew	-	80	5-7x11	9	DSND
1997	Norsk Hidro's Visund	-	350	5x11	16	DSNS
1997	Aquila ⁵⁾	FPSO	850	4.5-5x16	8	Agip
1998	Laminaria ⁶⁾	FPSO	400	5.5x13	12	Woodside
1998	Marlim ³⁾ P18	FPSO	900	4.7X20	2	Petrobrás
1999	Marlim ³⁾ P33-P35	FPSO	810-910	4.8X17	6	Petrobrás
1999	Troll C ¹⁾	Semi FPU	350	5X15	12	Norsk Hydro
2000	Hoover-Diana ⁷⁾	SPAR	1500	6.4X32	12	Exxonmobil
2001	Girassol ²⁾	FPSO	1350	4.5X17	16	TFE
2002	Horn Montain ⁷⁾	SPAR	1650	5.5X27.4-29	9	BP
2002	Na Kika ⁷⁾	FDS	1920	4.3X23.8	16	Shell/BP
2003	Devils Tower ⁷⁾	SPAR	1700	5.8X34.8	9	Dominion
2003	Holstein ⁷⁾	SPAR	1280	5.5X36.3-38.4	16	BP
2004	Thunder Horse ⁷⁾	Semi FPU	1830	5.5X27.5	16	BP
2004	Mad Dog ⁷⁾	SPAR	1600	7.6X14.6	11	BP
2004	Atlantis ⁷⁾	Semi-PQ	2130	NA	12	BP
2006	Shar Deniz	TGP 500	100	-	1	Technip
2007	Bualang	FPSO	-	-	22	Chevron
2008	Frade ⁸⁾	FPSO	1100	-	-	GFI

¹⁾Mar do Norte ²⁾Oeste África ³⁾Brasil ⁴⁾Oeste shetlands ⁵⁾Mar Adriático ⁶⁾Mar do Timor ⁷⁾Golfo do México ⁸⁾Nigéria

Os estudos feitos na década de 90 em estacas de sucção incluem monitoração de campo, estudos experimentais em laboratório, modelagem física em 1 g, modelagem física em centrífuga e modelagem numérica.

Dois exemplos de estudos em escala real são os testes feitos pelo NGI para a empresa Saga Petróleo na plataforma Snorre (TLP), e os estudos feitos na NaKika (FDS – *Floating Developing System*), no Mississipi, em 2003.

El-Gharbawy & Oslon (1998) apresentaram um estudo experimental onde estacas foram testadas sob carregamento cíclico e estático. O objetivo deste estudo foi analisar a aplicação da técnica da estaca de sucção no Golfo do México em profundidades de 2000 a 5000 metros, em argila muito mole. Um conjunto de estacas foi projetado, fabricado e instrumentado para testes em laboratório, simulando um carregamento de uma plataforma TLP. As estacas tinham relação de aspecto (L/D) de 2, 4, 6 e 12. Essa variação foi feita para estudar o efeito do diâmetro da estaca sobre a resistência ao arrancamento. Nestes ensaios também foi mostrado que a taxa de arrancamento estático tem influência fundamental na capacidade de arrancamento da estaca. Tendo no ensaio de arrancamento não drenado a força maior do que no arrancamento drenado.

Testes com modelos reduzidos utilizando centrífuga foram feitos para estudar o comportamento das estacas de sucção durante a instalação e o arrancamento (e. g. Allersma et al., 1997, 2001).

A resistência ao arrancamento sobre carregamento inclinado com variação do ponto de ancoragem (olhal) ao longo da estaca foi estudado por Renzi et al. (1991), Randolph et al. (1998) e Andersen et al. (2003), assim como submetendo a estaca ao carregamento estático e cíclico.

A influência do ponto de ancoragem na capacidade de resistência da estaca de sucção foi estudada por Sukumaram, B. (1998). Uma estaca com 6.1 m de diâmetro e 12.2 m de comprimento foi utilizada nesta análise com elementos finitos (Abaqus). A inclinação da carga foi assumida ser de 32° com a horizontal. A Figura 2.19 mostra o gráfico da capacidade de carga versus o ponto de fixação da ancoragem, apresentando um valor máximo na metade inferior da estaca.

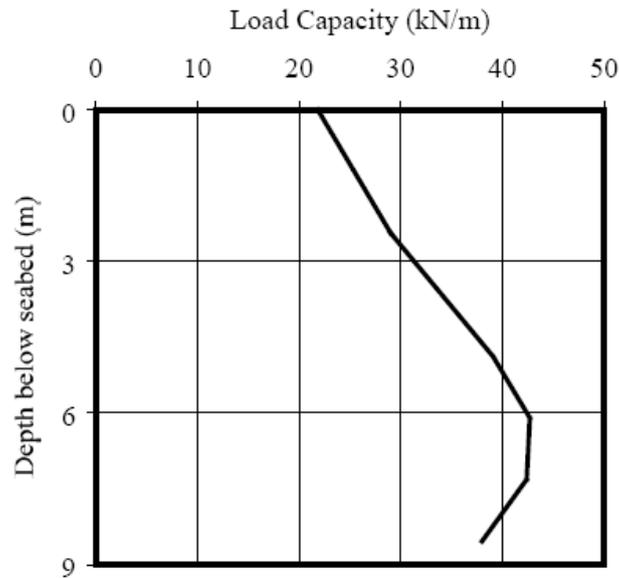


Figura 2.19 – Capacidade de carga por unidade de largura versus a profundidade do ponto de fixação (Sukumaram, 1998).

O comportamento axial da estaca de sucção durante a instalação e o arrancamento vertical em argila foram estudados em testes de campo (e. g. Hogervorst, 1980; Andersen et al., 1993; Newlin, 2003a,b) e em centrífuga (e. g. Steensen-Bach, 1992; Watson, 1999; House et al., 1999; Deng & Carter, 2000).

Andersen et al. (2004), realizaram três ensaios em centrífuga onde foi estudado a penetração das estacas de sucção em argila mole. Importantes aspectos de projeto foram analisados neste estudo como: garantir que a estaca pode ser instalada na profundidade calculada para determinada capacidade de suporte; determinar a pressão necessária para instalação da estaca e a partir deste dado dimensionar a bomba de sucção a ser utilizada; determinar a quantidade de solo necessária para formação da bucha de solo no interior da estaca; e determinar a profundidade máxima que a estaca pode ser instalada em função do seu diâmetro. Foram estudadas as propriedades da argila, como a resistência ao cisalhamento e a sensibilidade.

Luke et al. (2003) apresentaram os resultados de um estudo conduzido com modelos reduzidos cujo objetivo foi o de avaliar as componentes da capacidade de permanência de estacas de sucção. Diversos ensaios foram realizados e os respectivos resultados discutidos neste trabalho; estacas cravadas com sobrecarga, por sucção ou com sobrecarga e sucção, arrancamento de estacas com condição

drenada e não drenada na tampa e, finalmente, arrancamento rápido e lento. O peso da bucha de solo formada no interior da estaca, o atrito lateral, e a capacidade suporte da ponta são utilizadas para interpretar a capacidade de permanência dessas estruturas. Os ensaios de arrancamento rápido (não drenado) sugerem fator de atrito de 0,5 a 0,8, e fator de capacidade suporte (N'_c) variando de 13 a 21.

Na Tabela 2.2, Andersen et al. (2005) listaram vários estudos feitos para analisar o desempenho e comportamento da estaca de sucção e do solo, quando submetidos a diversas condições de carregamento, arrancamento e instalação.

Atualmente são feitos estudos tanto em condição 1 g como em centrífuga. Estes estudos visam a analisar o efeito do solo no interior da estaca de sucção quando esta apresenta a parede interna rugosa (e. g. McNamara, 2000), a estudar a variação da tensão radial na parede externa e a resistência ao arrancamento em estacas instaladas por sucção e por cravação (e. g. Chen & Randolph, 2004a, 2007) e a analisar a variação da pressão de sucção durante o processo de instalação (e. g. Tran & Randolph, 2008).

Chen & Randolph (2007), realizaram uma série de testes em centrífuga para investigar a movimentação e as tensões no solo durante a instalação das estacas por sucção e por cravação. Neste estudo foram utilizadas argilas sensíveis, normalmente adensada e pré-adensada. Os resultados mostraram que 50% do solo movimentado pela parede da estaca durante a instalação por sucção vai para o interior da estaca, enquanto que por cravação a movimentação é de 20%.

Mesmo com todos estes estudos, ainda existem incertezas a serem investigadas a respeito das estacas de sucção como, por exemplo: a tendência do fluxo de solo no interior da estaca durante a penetração; a eficácia de métodos teóricos para prever a geração da poro-pressão no exterior da estaca durante a instalação por sucção; a variação das tensões radiais externas ao redor da estaca durante o adensamento e a tensão radial efetiva na parede externa da estaca após o adensamento do solo e; finalmente, o tempo de adensamento do solo após a instalação da estaca.

2.6 Modelagem física

A modelagem física é uma ferramenta complexa para avaliar e deduzir as relações entre o modelo e o protótipo. Tem a similaridade com um conceito diretamente

relacionado à modelagem, que consiste basicamente na equivalência de experimentos ou fenômenos. Sendo os processos físicos semelhantes, é possível prever o comportamento de um deles quando se é conhecido o comportamento do outro. Utilizando a relação entre o modelo e o protótipo, torna-se mais fácil a execução do ensaio em laboratório. “Para que o modelo represente o protótipo, ou seja, para que todos os resultados obtidos nos ensaios com o modelo reduzido possam ser estendidos ao protótipo, é preciso que haja semelhança entre eles, a começar pela semelhança geométrica. Destaca-se que somente a semelhança não é suficiente” (Carneiro, 1993).

Tabela 2.2- Estudos experimentais em estacas de sucção (Andersen et al., 2005).

Ano	Local do teste	Tipo de teste	Descrição do teste	Referência
1985	Gulfaks Mar do Norte	Teste de campo em escala real	Instalação e retirada de cilindros de concreto com 2 diâmetros de largura (6.5x22 m).	Tjelta (1986)
1989	NGI/ Lysaker	Testes de campo em modelo	Carregamento cíclico e monotônico em TLP com inclinação de 10°.	Dyvik et al. (1993) Andersen et al. (1993)
1991	Focomorto	Teste de campo em modelo	Instalação de estaca com saia de concreto.	O'Neil et al. (1991)
1991	ISMES	Centrifuga	Instalação e carregamento vertical cíclico e monotônico.	Renzi et al. (1991)
1991	DGI	Centrifuga	Instalação e testes de arrancamento, dois perfis de resistência ao cisalhamento uniforme.	Fulsang et al. (1991) Steensen-Bach (1992)
1991	NGI/ Lysaker	Testes de campo em modelo	Carregamento lateral cíclico e monotônico com inclinação de 10° com a horizontal.	Keaveny et al. (1994)
1990-93	LPPC	Centrifuga	Testes de arrancamento cíclico e monotônico em duas estacas de diferentes tamanhos, sendo um teste lateral.	Clukey et al. (1993/95)
1996	Tordis	Teste de campo	Instalação e retirada da saia de ancoragem (5x8m), incluindo três meses de teste na corda.	Offshore Engr. (1996 a)
1996	Marlim	Teste de campo	Instalação, testes e remoção de uma saia de ancoragem (3.6x18m).	Offshore Engr. (1996 b)
1998	MIT	Teste em laboratório a 1 g	Instalação e capacidade de suporte em estaca em modelo reduzido em argila.	Whittle et al. (1998)
1998	UWA	Centrifuga	Carregamentos laterais cíclico e monotônico.	Randolph et al. (1998)
1996-99	UWA	Centrifuga	Instalação, capacidade de suporte cíclico e monotônico, carregamento combinado.	Watson et al. (2000)
1997-99	GeoDelft	Centrifuga	Instalação, capacidade de suporte cíclico e monotônico.	Andersen et al. (2003)
2000	C-core	Centrifuga	Instalação e arrancamento não drenado.	Cao et al. (2002 a)
1998-04	Universidade do Texas, Austin	Teste em laboratório a 1 g	Instalação, capacidade de suporte monotônico em caulim.	Oslon et al. (2003) Rauch et al. (2004)
2001	UWA	Centrifuga	Instalação e arrancamento não drenado.	House & Randolph (2001)
2002	C-Core	Centrifuga	Resistência ao arrancamento com instalação com e sem sucção em caulim.	Clukey & Philips (2002)

Nos processos físicos, os parâmetros envolvidos serão os mesmos e a relação entre as magnitudes de uma grandeza nos dois processos é também chamada por analogia de fator de escala. Esta semelhança incompleta pode nos levar a erros não desprezíveis, chamados de efeito de escala, que acontecem quando um fator de forma, que tem papel secundário ou desprezível no protótipo, passa a ter papel importante no modelo. Em muitos casos, podem também ocorrer distorções, isto é, adota-se no modelo escala diferente para grandezas de um mesmo tipo.

O uso da modelagem física na engenharia geotécnica vem sendo utilizada para validar e analisar o comportamento dos solos e rochas e também para dar suporte à modelagem numérica, pois os modelos numéricos precisam de dados dos fenômenos que acontecem no campo para sua calibração, havendo assim uma interação entre as duas modelagens. Randolph & House (2001) apresentam a interação entre a modelagem numérica e a modelagem física conforme pode ser visto na Figura 2.20.

O uso da modelagem física foi analisado por Randolph & House (2001). Neste trabalho foram enumeradas razões pelas quais a modelagem física torna-se útil em pesquisas propostas ou em situações de projeto:

- Complexidade dos processos de construção devido à geometria, a grandes deformações ou a interações complexas solo-estrutura. Por exemplo: capacidade de permanência das estacas, desempenho de âncoras enterradas e quantificação dos efeitos de *Jet Grouting*;
- *creep* ou fenômeno de adensamento secundário, tendo como exemplo estacas carregadas por aterros, *downdrag*;
- efeitos de carregamento cíclico, como exemplo temos fundações de estruturas *offshore* e liquefação induzida por terremoto;
- processo de transporte em solo, por exemplo, remediação de áreas contaminadas;
- limitações na modelagem numérica da resposta do solo, como resposta não-linear do solo, propriedade de anisotropia e acúmulo de danos dentro de materiais cimentados.

Randolph e House (2001) discorrem ainda sobre o efeito escala em modelos físicos, muito discutidos em situações dessa natureza. Na verdade, muitos autores concluíram que, respeitando alguns dos limites de redução, o efeito escala pode ser

desconsiderado. Como Oversen (1979), por exemplo, que coloca, com algumas exceções, que dimensões estruturais da ordem de 20 a 30 vezes o tamanho das partículas de solo envolvidas na análise são suficientes para evitar o efeito escala.

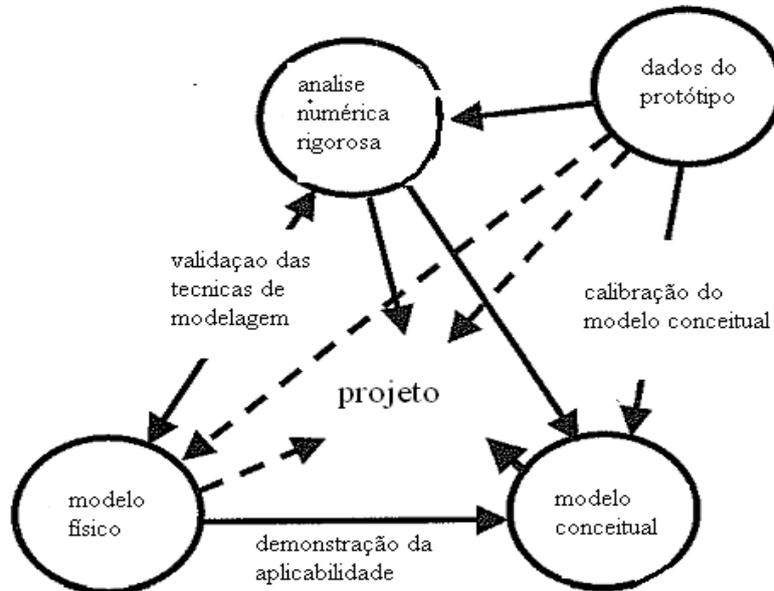


Figura 2.20– Interação da modelagem física com a modelagem numérica em um projeto (Randoph e House, 2001).

Na engenharia geotécnica, a modelagem física deve levar em consideração, além das considerações comuns da modelagem física, algumas características fundamentais do solo, tais como: os solos são originalmente depositados em camadas, tendo assim suas características estratificadas; o seu comportamento varia em função do seu estado e historia de tensões e; as tensões variam com a profundidade do solo.

Para se fazer a modelagem física, é necessário ter conhecimento de todo o contexto em que se encontra o estudo (Springman, 2007), como vemos a seguir:

- Carga e carregamento: possíveis combinações de carga e carregamentos, ponto de atuação da carga;
- propriedades do solo: projetar a sua historia de tensões e suas características e propriedades;
- geometria: interação solo-estrutura, estratificação e estrutura do solo e a forma e dimensões da estrutura;

- construção dos efeitos: modelar os aspectos chave que irão afetar a interação solo-estrutura, projetando como indicado, utilizando o estado limite para examinar as perdas estruturais bem como qualquer deformação indesejável.

Na modelagem física, o comportamento dos materiais pode ser estudado por dois modos de modelagem diferentes: a modelagem física convencional e a modelagem física em centrífuga.

Na modelagem física convencional, os modelos são ensaiados em gravidade normal, 1 g. Na modelagem centrífuga, os modelos são ensaiados sob uma gravidade artificial (n g).

Na modelagem convencional, quando se estuda um fenômeno em escala reduzida e com semelhança geométrica, é imposta a escala geométrica de redução, sendo esta sempre menor que a unidade. Em geral, a escala é apresentada como fração, tendo a unidade como numerador, e designada com o símbolo k ou λ .

$$k_i = \lambda_i = 1: (x_p / x_m) \quad (2.1)$$

Satisfeitas as condições de semelhança física, as relações adimensionais do modelo e do protótipo serão as mesmas, e será possível prever a magnitude da variável dependente, ou a incógnita do problema no protótipo, quando determinada experimentalmente sua magnitude no modelo. Só pode-se passar do comportamento do protótipo para o do modelo se estas forem multiplicadas pelos fatores de escala correspondentes (k_i), ou seja:

$$x_m = k_i \cdot x_p \quad (2.2)$$

Os fatores de escala para as variáveis dependentes, independentes e constantes físicas de modelos são listados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3- Fatores de escala em modelagem convencional (1 g).

Grandeza	Unidade	Fator de escala (k_i)
Comprimento	L	k_i
Ângulo (α)	-	1
Deformação (ε)	-	1
Deslocamento (δ)	L	k_i
Força Concentrada (F)	F	k_i^2
Pressão (p)	FL^{-2}	1
Tempo (T)	T	k_i^2
Tensão (σ)	FL^{-2}	1
Velocidade (v)	L/T	$\sqrt{1/k}$

Na modelagem em centrífuga, deve-se proceder da mesma forma do que na modelagem convencional a 1 g, impondo um fator de escala geométrica de redução e admitindo que os ensaios no modelo físico sejam realizados em um campo artificial de aceleração N vezes superior ao campo gravitacional natural, onde N será o fator de redução geométrica.

A centrífuga geotécnica é uma ferramenta na modelagem física que viabiliza o estudo e a análise de problemas complexos utilizando como material o solo. O princípio básico dos ensaios em centrífuga consiste em submeter o modelo físico a uma força inercial de magnitude igual à força gravitacional experimentada pelo protótipo (Schofield, 1980). Conforme a Figura 2.21, são apresentados os componentes que atuam num modelo físico sujeito à aceleração artificial na centrífuga (Pacheco, 2006).

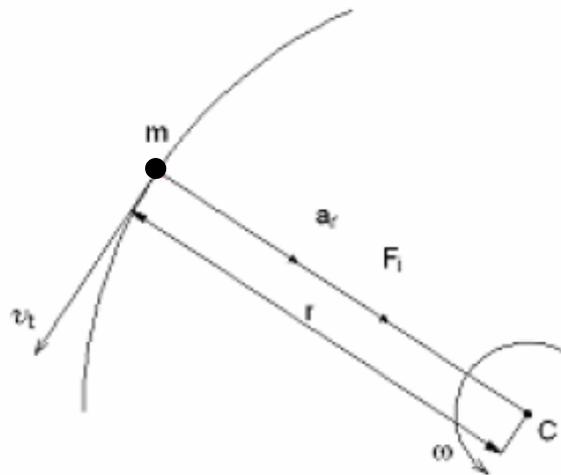


Figura 2.21 – Esquema de um modelo submetido à aceleração em centrífuga (Pacheco, 2006).

Onde,

m = massa do modelo

ω = velocidade angular

$v_t = r\omega$ (velocidade tangencial)

$a_r = r\omega^2$ (aceleração radial)

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

Do mesmo modo, em um protótipo sujeito à ação da gravidade, a força gravitacional (apresentada pelo peso próprio W) atua sobre o corpo. Para que o modelo represente o protótipo:

$$F_i = W \quad (2.3)$$

Então:

$$mr\omega^2 = Mg \quad (2.4)$$

sendo,

M = massa do protótipo

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

Se $m = M/N$, onde N_i é o fator de escala,

$$r\omega^2 = Ng \quad (2.5)$$

De acordo com a equação 2.5, nota-se que, em modelos acelerados em centrífuga, a gravidade é aumentada N vezes a gravidade terrestre, conforme é apresentado na Figura 2.22 (Schofield, 1980 e Taylor, 1995).

Por definição, a tensão vertical de um elemento de solo numa profundidade h :

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.6)$$

Portanto, a tensão vertical no modelo, σ_{vm} , em uma profundidade h_m , pode ser dada como:

$$\sigma_{vm} = \rho \cdot N \cdot g \cdot h_m \quad (2.7)$$

E a tensão vertical correspondente no protótipo será dada pela equação:

$$\sigma_{vp} = \rho \cdot g \cdot h_p \quad (2.8)$$

Sendo o mesmo solo usado no modelo e no protótipo e o histórico de tensões do solo no modelo é semelhante ao do protótipo, então $\sigma_{vp} = \sigma_{vm}$, ou seja, para que a equação 2.8 seja verdadeira:

$$h_p = Nh_m \quad (2.9)$$

onde:

h_p = profundidade referente a uma tensão vertical no protótipo;

N = é o fator de escala que multiplica a gravidade;

h_m = profundidade referente a uma tensão vertical no modelo;

σ_{vp} = tensão vertical no protótipo;

σ_{vm} = tensão vertical no modelo;

ρ = densidade;

g = aceleração da gravidade

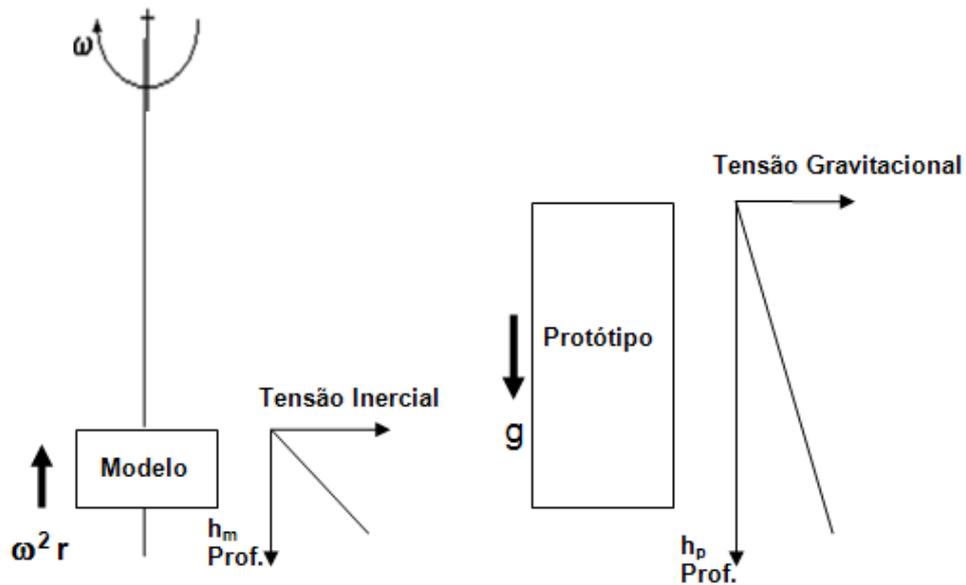


Figura 2.22 – Relação entre a tensão inercial do modelo e a tensão gravitacional do protótipo (Taylor, 1995).

Esta é a lei básica que rege a modelagem física em centrífuga. Na Tabela 2.4 são listadas as leis de escala importantes para essa pesquisa.

Tabela 2.4 – Leis de escala na modelagem centrífuga (Taylor, 1995).

Grandeza	Fator de escala (N)
Gravidade	N
Comprimento	1/N
Densidade	1
Massa	1/N ³
Força Concentrada (F)	1/N ²
Área	1/N ²
Tempo (T)	1/N ²
Tensão (σ)	1

Tabela 2.4 – Leis de escala na modelagem centrífuga (continuação).

Deformação (ϵ)	1
Velocidade (v)	1
Volume (V)	$1/N^3$
Energia	$1/N^3$
Tempo (difusão)	$1/N^2$
Tempo (relaxação)	1
Momento Fletor	$1/N^3$
Aceleração Inercial	N

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Nesta pesquisa, são apresentados os resultados do primeiro estudo de ancoragens de estruturas flutuantes realizado com estacas de sucção, conduzido no Laboratório de Engenharia Civil da UENF. Este estudo foi realizado com modelos físicos em escala reduzida em condições de 1 g e em condições de gravidade induzida na centrífuga geotécnica da UENF. Especificamente, investiga o efeito de irregularidade (rugosidade) do fuste na capacidade de permanência quando a estaca é solicitada verticalmente, e a posição do olhal lateral, quando as mesmas são solicitadas em *taut-leg*.

As estacas de sucção já foram empregadas como âncoras de plataformas no campo de Marlim (Bacia de Campos/PETROBRÁS). A sua aplicação nas áreas de exploração de campos no pré-sal, em águas ultra-profundas, pode ser uma opção viável face à facilidade de instalação, à boa capacidade de suporte e ao fato da verificação teórica da capacidade de permanência ser de fácil execução, tendo em vista a posição, profundidade e características do solo no entorno da estrutura serem conhecidas.

Deve-se destacar que o estudo em escala real no campo tem algumas desvantagens, como por exemplo: os elevados custos - pois envolve a mobilização de embarcações especiais – e riscos de acidentes - pois existem riscos nos procedimentos de lançamento e de solicitação dessas âncoras. Neste contexto, os estudos com modelos reduzidos podem ser uma alternativa para avaliar o desempenho dessas âncoras.

Neste capítulo, são apresentados os equipamentos, a instrumentação utilizada durante os ensaios e todo aparato desenvolvido para esta pesquisa. Além disso, também é apresentado o estudo realizado para determinar uma mistura adequada a ser empregada, e a sua caracterização geotécnica.

Finalizando este capítulo, são apresentados os procedimentos de preparação do modelo físico do solo, com a descrição detalhada da preparação da lama utilizada nos ensaios executados nesta pesquisa.

3.2 Equipamentos e instrumentação

3.2.1 Caixas de teste

A caixa de teste (Figura 3.1) foi confeccionada em acrílico e chempox, com o intuito de se ter a visualização do comportamento do solo durante o estudo do adensamento. Esta caixa possui diâmetro de 350 mm e altura de 500 mm. Na base, possui quatro orifícios com válvulas e um desnível onde é preparada a camada drenante. A tampa superior possui dois orifícios com válvulas. Esta caixa foi preparada para ser utilizada também em estudos do adensamento do solo por gradiente hidráulico (HCT).

Nesta caixa, foram feitos seis ensaios. Os dois primeiros foram feitos para desenvolver o processo de preparação do solo, determinar a ordem de grandeza da força necessária para arrancar a estaca e dimensionar o transdutor a ser utilizado nos ensaios de arrancamento.

Os demais ensaios feitos nesta caixa foram executados para desenvolver a metodologia do processo de adensamento, projetar o sistema da instalação da estaca por sucção e o ensaio de arrancamento simulando um sistema de ancoragem vertical utilizado em uma plataforma TLP.

Nos modelos físicos com olhal lateral, que simulam um sistema *taut-leg*, a ruptura ocorre por translação, rotação ou mesmo pela combinação desses dois mecanismos. Nestes casos, a zona de ruptura é mais ampla, podendo ter uma maior influência do efeito de borda. Este efeito ocorre quando a distância da parede da caixa para a estaca é menor que 8 vezes o diâmetro da estaca (Narasimha Rao et al., 1993). Com o objetivo de minimizar este efeito, os ensaios em que o olhal foi posicionado na lateral da estaca foram realizados em uma caixa cilíndrica de aço de maior diâmetro (Figura 3.2).

Esta caixa de aço tem 465 mm de diâmetro e altura de 480 mm. Na parte inferior da caixa, existem dois orifícios com válvulas, um para o sistema de drenagem e o outro para passar os fios dos transdutores de poro pressão e o fio da placa metálica utilizada no processo de eletro-osmose. Na parte superior há um orifício com uma válvula onde foi conectada a mangueira que faz a ligação com o sistema de drenagem na base. Esta ligação foi feita para que houvesse uma realimentação de água no topo da amostra, onde são instaladas as estacas.

Devido ao processo de adensamento ser feito por eletro-osmose, a caixa foi pintada com uma tinta especial (Plast Film da Quimatic-Tapmatic do Brasil) que isola a superfície, impedindo a energização das paredes da caixa de teste. Além disso, todas as saídas da caixa foram isoladas com conexões feitas em nylon, para evitar a passagem de corrente elétrica durante este processo. Esta caixa cilíndrica também foi utilizada nos ensaios de arrancamento vertical na centrífuga geotécnica com campo gravitacional aumentado de 50 vezes.

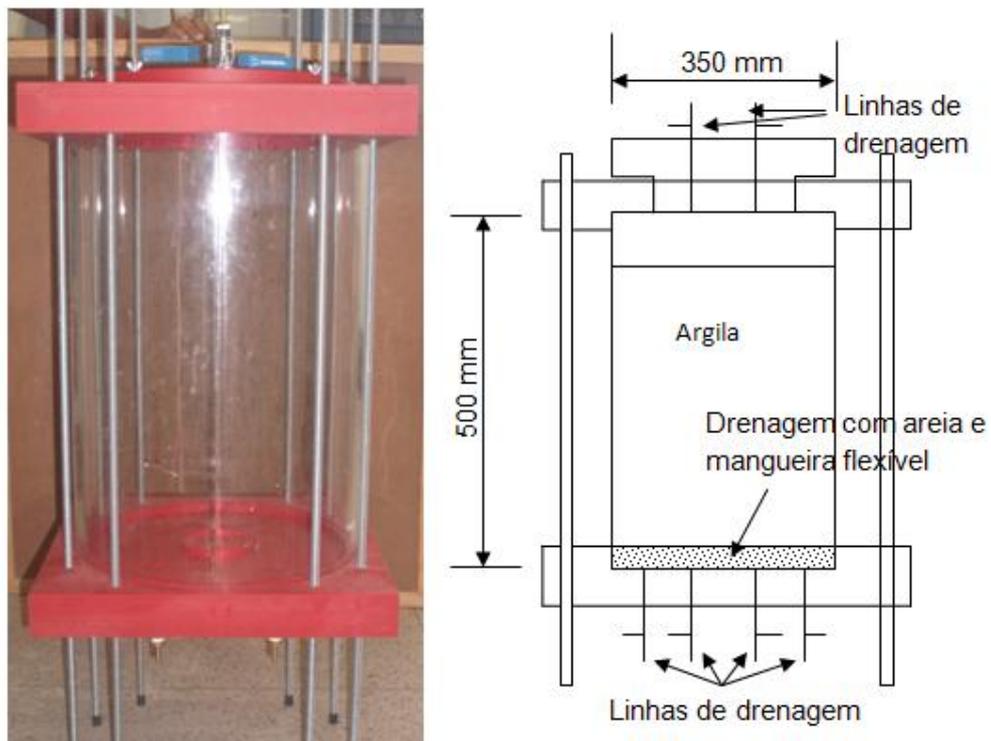


Figura 3.1 – Caixa de teste cilíndrica de acrílico.

3.2.2. Misturadores

Para preparar a lama saturada e homogênea, dois tipos de misturadores foram utilizados: uma bateadeira industrial e uma betoneira adaptada. A bateadeira industrial é de aço inox fabricada pela Alki Indústria e Comércio de Máquinas Ltda., com capacidade de 120 litros (Figura 3.3a). A betoneira de 120 litros fabricada pela empresa CSM – Componentes Sistemas e Máquinas para Construção Ltda.- foi adaptada com uma tampa de acrílico, que permite a aplicação de sucção no interior da mesma, enquanto está em funcionamento (Figura 3.3b).

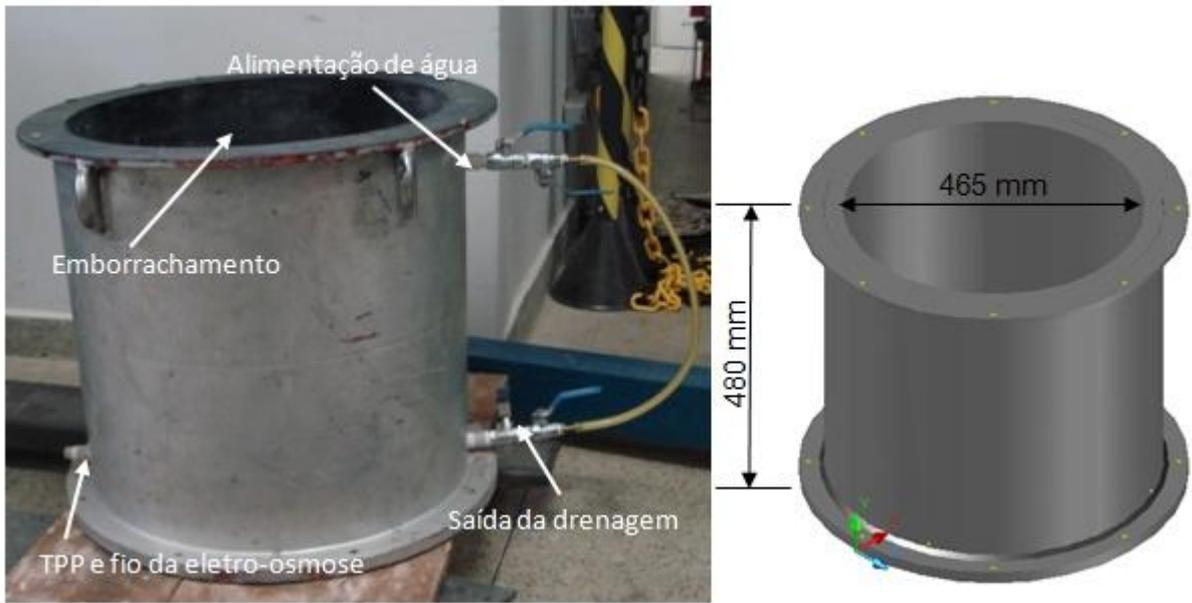


Figura 3.2– Caixa de teste cilíndrica de aço.



Figura 3.3 – (a) betoneira adaptada e (b) batedeira industrial.

3.2.3 Atuadores

- **Atuador Mecânico**

O atuador mecânico servo-controlado é acoplado a uma caixa de redução com capacidade de movimentar o braço do atuador a uma velocidade mínima de $0,1 \mu\text{m/s}$. Este equipamento foi utilizado nos ensaios para auxiliar na instalação das estacas, no ensaio de mini palheta e também nos ensaios de arrancamento das estacas com velocidade constante. A movimentação do atuador é controlada por um software instalado no NI-PXI 1052 (ver item 3.2.5.1) e por um condicionador de sinais, Gallil 740.

O controlador de motores Gallil 740, após receber os comandos oriundos do NI-PXI 1052, origina os sinais de comando necessários para movimentar até três atuadores. O motor do atuador possui um *encoder* que, operado em conjunto com o controlador Gallil 740, dão uma resolução linear de $0,1 \mu\text{m}$. A montagem do atuador é mostrada na Figura 3.4.

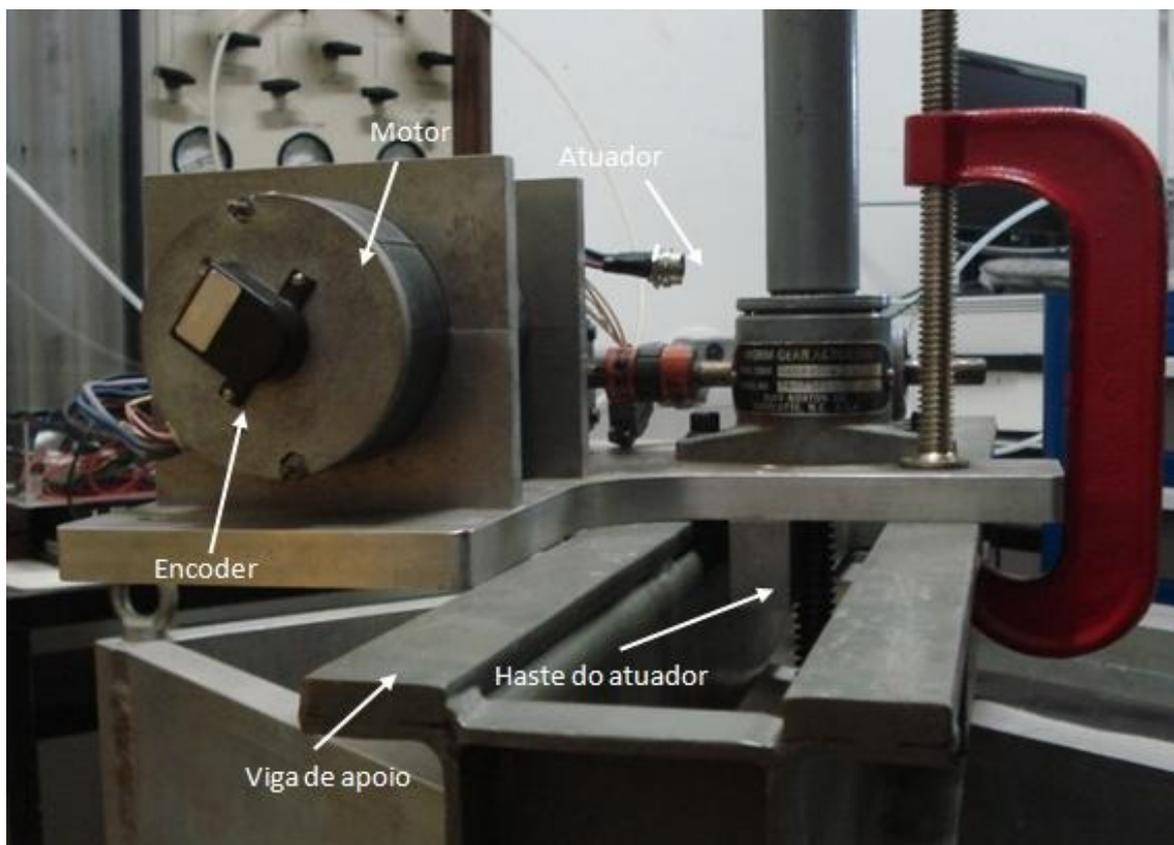


Figura 3.4 – Atuador servo-controlado DC.

- **Atuador Hidráulico**

O atuador hidráulico da marca Milwaukee Cylinder, modelo H71 (Figura 3.5) foi utilizado nos ensaios de arrancamento das estacas de sucção durante o vôo da centrífuga geotécnica. Esse atuador possui um curso máximo do pistão de 63.5 mm e pode aplicar carregamentos estáticos e dinâmicos de até 10675 N (2400 lbf). O atuador pode ser posicionado em diferentes ângulos para aplicar os carregamentos requeridos. Ele é fixado sobre uma viga de alumínio, a qual é presa no topo da caixa de teste. A célula de carga é acoplada na parte inferior do pistão.

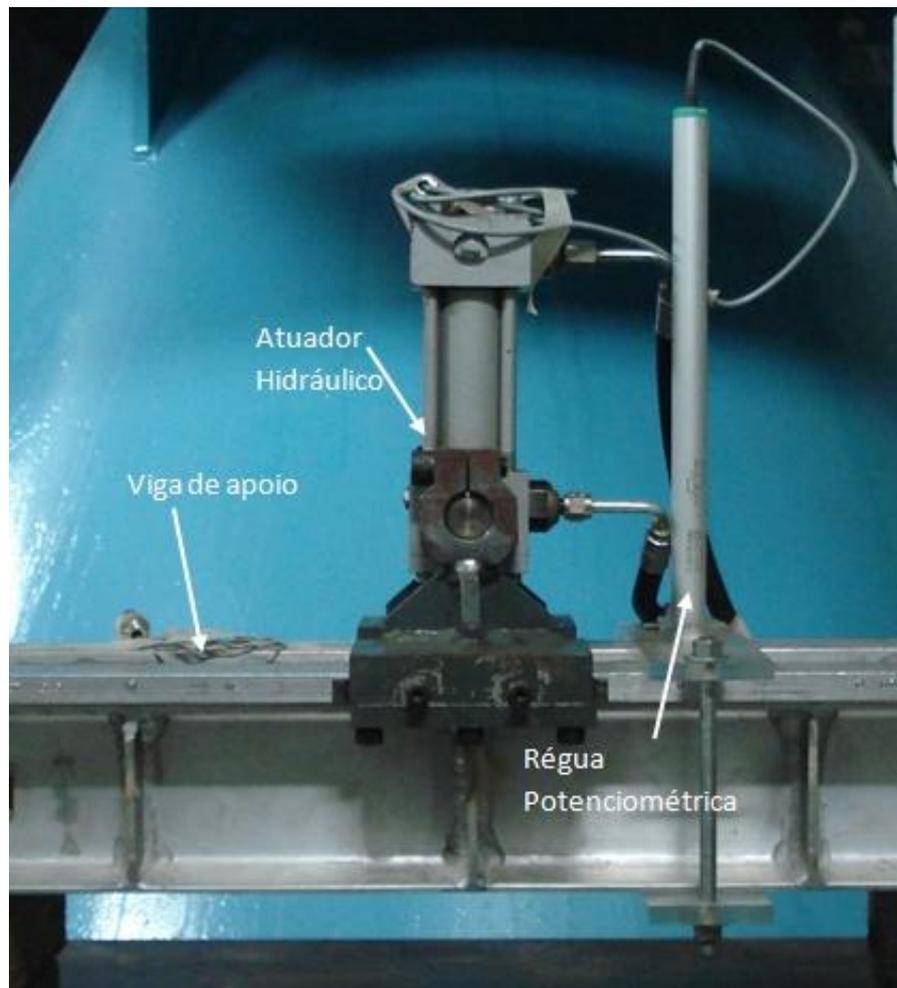


Figura 3.5 – Atuador hidráulico.

3.2.4 Centrífuga Geotécnica

A centrífuga geotécnica da UENF foi fabricada pela *Wyle Laboratories* com capacidade de 100 g-ton. A Figura 3.6 apresenta uma vista geral deste equipamento, cujas principais características são apresentadas na Tabela 3.1.



Figura 3.6 – Centrífuga geotécnica da UENF.

Tabela 3.1 – Especificação da centrífuga *Wyle*

Límite de aceleração	0-200 g
Límite de velocidade	0-277 RPM
Dimensão útil da plataforma basculante	0.9 m (largura) x 0.9 m (comprimento) x 1.0 m (altura)
Carga útil da plataforma basculante	1000 kg a 100 g 500 kg a 200 g
Sistema de acionamento	Motor DC com caixa de redução

O diagrama esquemático da estrutura básica da centrífuga está apresentado na Figura 3.7. Nesta, são indicados os principais componentes: Duas plataformas basculantes; braço de alavanca inteiriço; pedestal de fixação e apoio; eixo de transmissão; dois motores DC acoplados a uma caixa de redução; juntas de rotação de fibra ótica; conectores elétricos deslizantes; e conexões hidráulicas rotativas.

As duas plataformas basculantes possibilitam ensaiar simultaneamente dois protótipos. Estas plataformas apresentam dimensões suficientemente compatíveis para que protótipos de grandes estruturas geotécnicas possam ser modelados com uma maior representatividade.

As plataformas são conectadas ao braço de alavanca por intermédio de duas articulações. O braço é constituído por duas vigas principais, inteiriças e contra ventadas possuindo 3.80 m de comprimento total. Durante o ensaio, o braço confere ao sistema um raio de giro da ordem de 3.5 m, sendo esta distância referida do eixo de transmissão até a base da plataforma em posição de vôo.

O braço de alavanca é apoiado ao pedestal que lhe proporciona suporte estrutural e elevação adequada. O pedestal apresenta formato cônico, visando oferecer uma rigidez uniforme. Além de apoiar o braço, o pedestal também oferece suporte ao eixo de transmissão, sendo este conectado ao pedestal através de um mancal, que transfere os esforços induzidos à fundação.

A caixa de redução é de eixo ortogonal, com razão de redução de 6.307:1. Sua função é acionar o eixo de transmissão, utilizando-se da força motriz dos motores DC. A caixa de redução é conectada a dois eixos: (a) o eixo de entrada, de baixa velocidade, que é conectado ao eixo da centrífuga através de uma junta de rotação vertical; e (b) o eixo de saída, de alta velocidade, que é conectado ao eixo do motor DC através de uma junta de rotação horizontal.

As características dos motores de acionamento da centrífuga são descritos na Tabela 3.2.

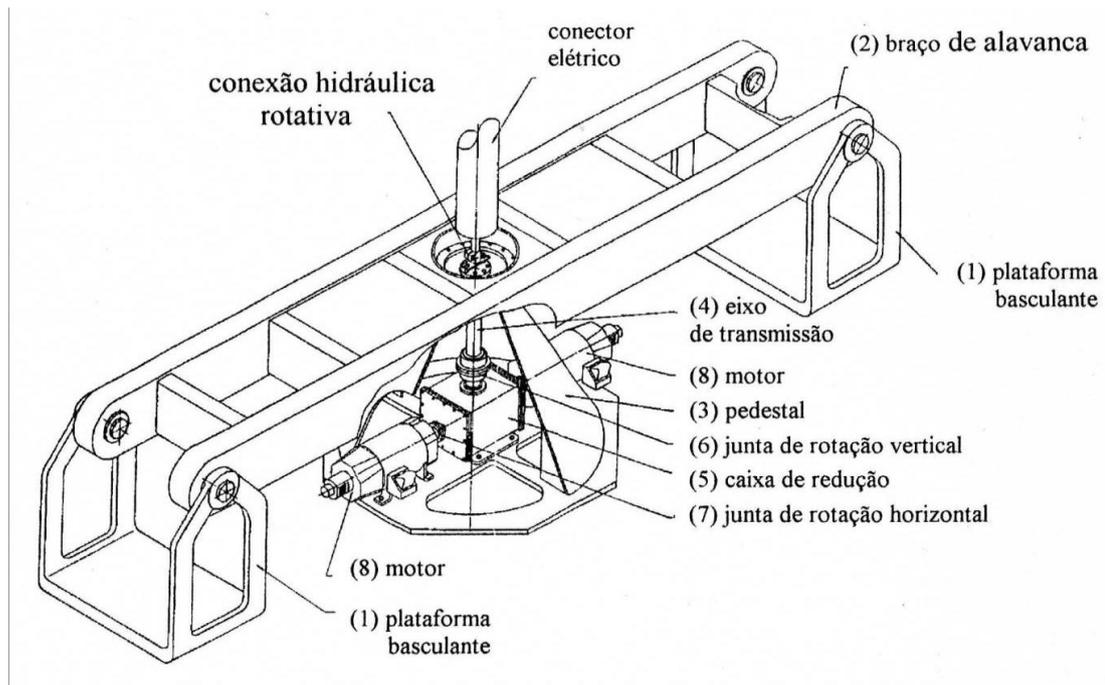


Figura 3.7– Diagrama da centrífuga geotécnica da UENF (Manual da *Wyle Laboratories*).

Tabela 3.2 – Características dos motores UNIQORE modelo 4013 ATZ

Potência	500 HP
Tensão de excitação	500 V dc
Corrente de excitação	794 A dc
Tensão de campo	300 V dc
Tensão de campo	10.4 A dc

3.2.5 Sistema de Aquisição de Dados

- **Ensaio a 1 g**

Para monitoração e aquisição de dados da instrumentação utilizada nos ensaios a 1g, foi utilizado o condicionador de sinais e aquisição de dados, modelo NI-PXI 1052, da *National Instruments* (Figura 3.8). Este sistema de aquisição de dados foi utilizado nos ensaios de instalação e arrancamento das estacas, nos testes de mini palheta e durante o processo de adensamento.

Para fazer a ligação desse sistema com o usuário, foram desenvolvidos programas através da plataforma *LabView 8.5* do mesmo fabricante.

Em cada programa desenvolvido para este estudo, era possível fazer a aquisição de até nove transdutores simultaneamente. A Figura 3.9 apresenta o painel frontal de um dos programas utilizados a 1 g.



Figura 3.8 – Sistema de aquisição de dados - NI-PXI 1052.

- **Ensaio a 50 g**

Nos ensaios na centrífuga geotécnica, os instrumentos de medição utilizados consistiram de um condicionador de sinais (Rittal), um conversor de sinais A/D da National Instruments (NI-USB 6255), uma unidade de pressurização e um controlador da MTS para acionar o atuador hidráulico.

A transmissão de sinais é feita através do Slip-Ring, uma junta rotativa que permite a transmissão de dados, imagens, energia e pressurização (Figura 3.6). Os dados tanto podem ser transmitidos por fios elétricos como por fibra ótica.

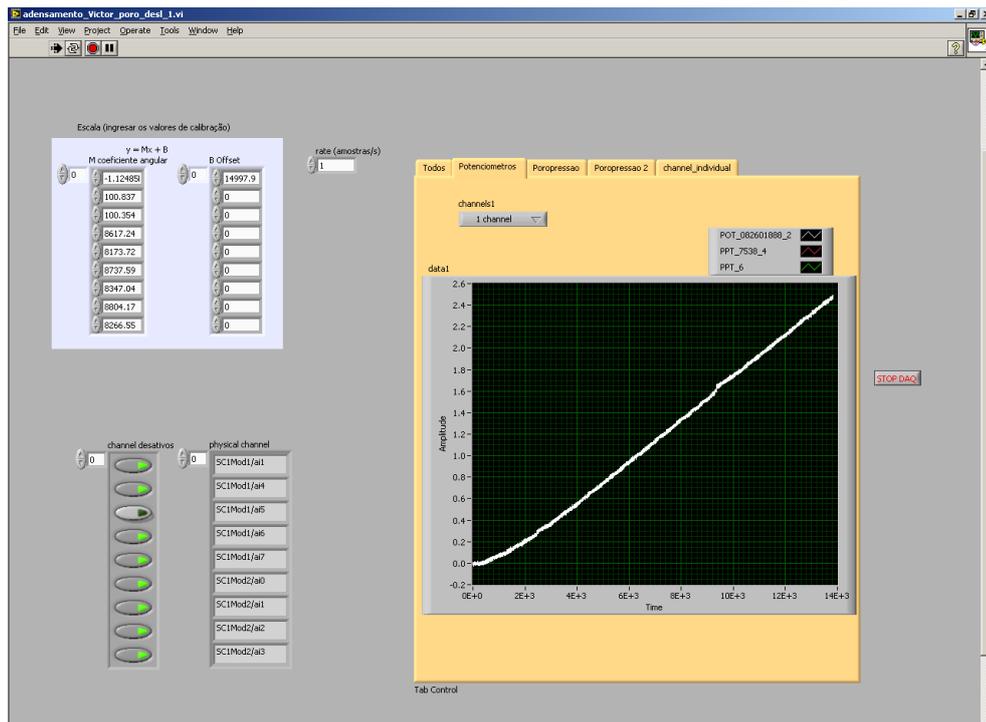


Figura 3.9 – Painel frontal do programa de aquisição de dados da régua potenciométrica durante o adensamento do solo.

A Figura 3.10 apresenta o console de controle da centrífuga geotécnica e o console onde está instalado o sistema de aquisição de dados e o sistema de segurança da centrífuga geotécnica.

3.2.6 Célula de carga

- **Ensaio a 1 g**

Nos ensaios de arrancamento a 1 g, foi empregada uma célula de carga feita em alumínio, modelo S 5 da empresa Alfa Instrumentos Ltda., cuja curva de calibração é apresentada no Anexo 01. Este instrumento é conectado ao atuador através de um adaptador fixado à extremidade superior. A parte inferior é conectada ao cabo de aço, que é fixado à estaca conforme é mostrado na Figura 3.11. O esquema gráfico do ensaio de arrancamento será apresentado no item 3.2.15.



Figura 3.10 – Consoles de controle e aquisição de dados da centrífuga geotécnica.

- **Ensaio a 50 g**

Nos ensaios de arrancamento a 50 g, as células de carga empregadas foram do modelo ELH TC 590 – 1000 da *Entran Devises, Inc.*. As células de carga foram conectadas ao atuador hidráulico na sua extremidade superior através de um adaptador projetado para fazer o arrancamento das duas estacas simultaneamente durante o voo. Esta montagem é apresentada na Figura 3.12. Na extremidade inferior de cada célula, é feita a ligação com a estaca por um cabo de aço e um pequeno adaptador.



Figura 3.11 – Montagem da célula de carga – ensaios a 1 g.

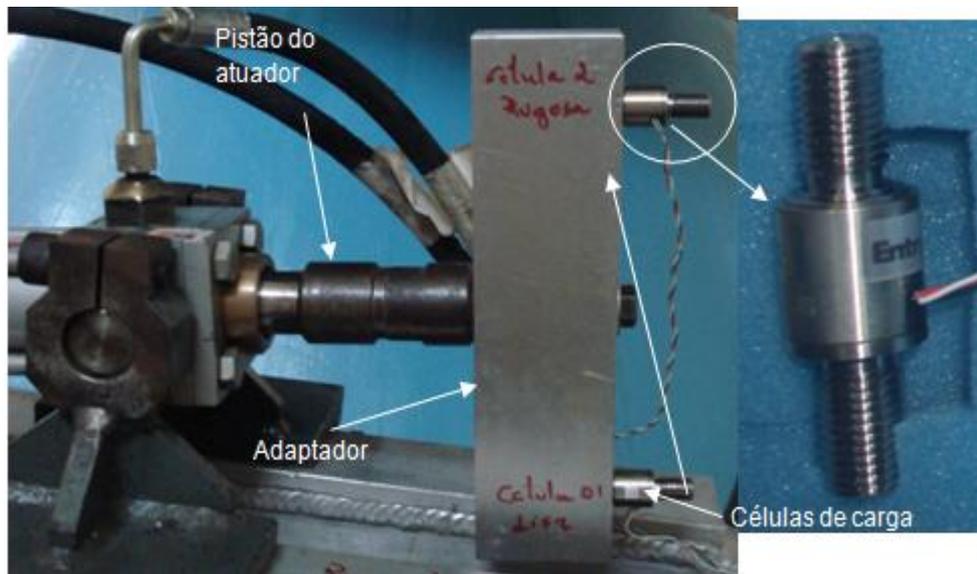


Figura 3.12 – Montagem das células de carga – ensaios a 50 g.

3.3.7 Transdutor de poro-pressão

Para as medidas de poro-pressão desenvolvidas durante os ensaios, foram utilizados transdutores de poro-pressão da marca *Druck – General Electric Company*, do modelo PDCR 81 (Figura 3.13) com capacidade de 700 kPa, trabalhando numa tensão de excitação nominal de 5 V.

Nos ensaios feitos na caixa de acrílico, não foram colocados transdutores no solo, somente no topo do interior da estaca para medir a poro-pressão na bucha de solo formada dentro da estaca.

Nos ensaios na caixa cilíndrica, foram colocados dois transdutores no solo, um a 150 mm da base e outro a 300 mm da base da caixa, sendo estes posicionados diametralmente opostos, conforme pode ser observado na Figura 3.13.

Esses transdutores foram calibrados e saturados, sendo as respectivas curvas de calibração apresentadas no Anexo 01.



Figura 3.13 – Posicionamento do transdutor de poro-pressão no solo.

3.3.8 Transdutor de deslocamento

O transdutor de deslocamento utilizado foi uma régua potenciométrica (Figura 3.14), modelo PZ34-S-250 da GEFTRAN Brasil. Esta possui 250 mm de curso útil e repetibilidade de 0.125 mm. O transdutor foi utilizado durante as etapas do processo de adensamento do solo e no ensaio de arrancamento na centrífuga geotécnica.

A régua potenciométrica foi calibrada com um micrômetro da Mitutoyo, modelo 150-189, com 25 mm de curso e resolução de 0,001 mm. A curva de calibração é apresentada no Anexo 01.



Figura 3.14 – Régua potenciométrica.



Figura 3.15 – Aparato utilizado para calibração da régua potenciométrica.

3.2.9 Ensaio de mini palheta (Mini Vane Shear Test)

O equipamento do ensaio de mini palheta é composto por três partes principais: a mini palheta e os atuadores, o sistema AD & DA (Gallil 740) e um programa para controle dos atuadores e aquisição de dados. O esquema de montagem do equipamento é mostrado na Figura 3.16. O procedimento do teste de mini palheta utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido por Brum Jr. (2009) neste laboratório.

O controlador de motores, Gallil 740, realiza toda a execução do teste, permitindo o deslocamento da haste para profundidade do ensaio (posição vertical) e a rotação da mesma na velocidade do teste.

A mini palheta é soldada em uma haste de aço inoxidável, que é conectada ao motor. Extensômetros são colados à haste, próximos à palheta, formando a ponte de *Wheatstone*. O posicionamento da palheta é feito pelo atuador vertical, que desce a palheta até a profundidade desejada. O motor, onde a barra é conectada, gira a palheta com uma velocidade controlada de 1^o/s, até alcançar 180^o.

A mini palheta foi confeccionada em aço inoxidável e possui 12.7 mm de diâmetro e 12.7 mm de altura. Na Figura 3.17 pode ser visto o equipamento do ensaio montado.

Conceitualmente, este ensaio determina o torque máximo necessário para girar a palheta a uma velocidade de 1^o/s. As medidas são feitas em profundidades previamente determinadas para que seja possível traçar o perfil da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) do modelo. O valor da resistência não drenada é dado pela equação 3.1.

$$S_u = \frac{T}{\pi d^2 \left(\frac{h}{2} + \frac{d}{6}\right)} 9,81 \times 10^{-8} \text{ kPa} \quad (3.1)$$

Onde: T (kN.m) é o torque, d (m) é o diâmetro da palheta e h (m) é a altura da palheta.

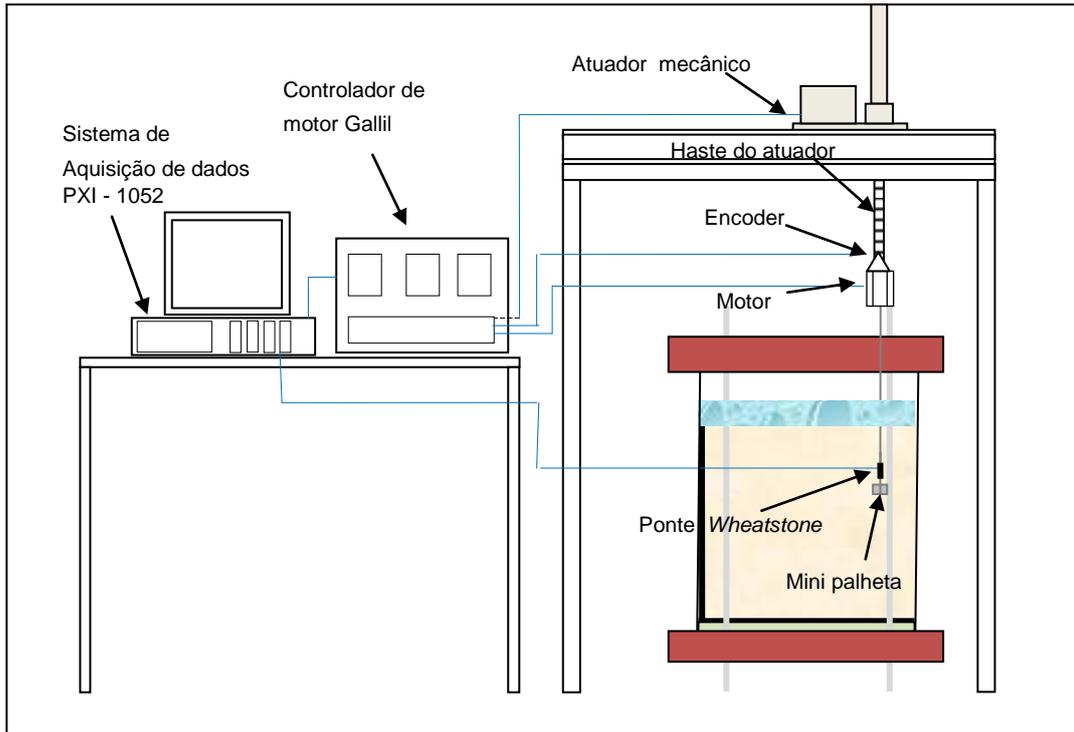


Figura 3.16– Representação gráfica do teste de mini palheta.

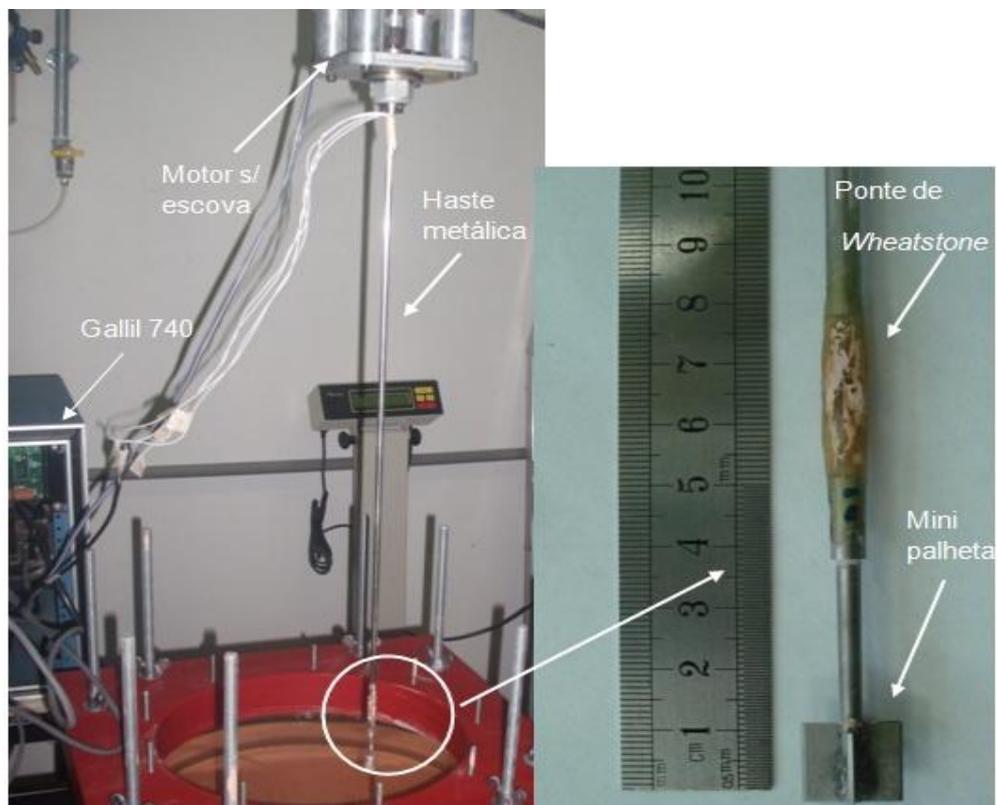


Figura 3.17–Teste de mini Palheta.

3.2.10 Adensamento do solo

O processo de adensamento estudado para ser empregado nesta pesquisa foi o de eletro-osmose. O princípio da eletro-osmose consiste na aplicação de um campo elétrico na massa de solo, através da energização de eletrodos, que são posicionados de forma a permitir a consolidação da massa de solo. A diferença de potencial entre eletrodos gera uma corrente elétrica que arrasta as moléculas de água do ânodo para o cátodo. (Figura 3.18). Devido ao fluxo de água, ocorre o adensamento do solo nas proximidades do eletrodo positivo, sendo este proporcional ao volume de água deslocado. Este processo foi descrito por Mitchell (1968).

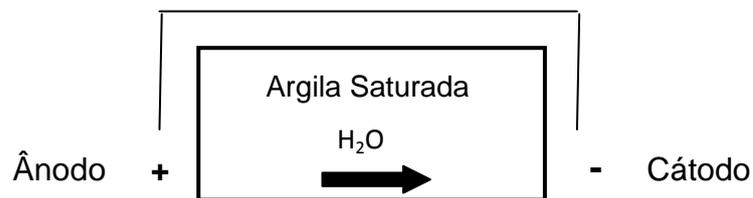


Figura 3.18– Representação gráfica do processo de eletro-osmose (Mitchell, 1993).

Tendo em vista que a poro-pressão diminui nas proximidades do ânodo com a tensão total constante, a tensão efetiva aumenta provocando o adensamento do solo. O adensamento ocorrerá até que a força hidráulica equilibre a força eletro-osmótica, que dirige a água em direção ao cátodo (Feitoza, 2007). O fluxo eletro-osmótico depende da natureza do solo, do grau de saturação, do pH, e do tipo de concentração iônica na água.

O uso do processo de eletro-osmose para adensar solos foi demonstrado através de aplicações em campo por Casagrande (1949) e Bjerrum et al. (1967), citados por Mitchell (1993). Este processo também foi utilizado na Ásia, associado a outros processos de adensamento, como sobrecarga e drenos verticais (Shang, 1998).

Neste estudo, em particular, procedeu-se à realimentação de água no topo da amostra para evitar o ressecamento na parte superior da mesma, onde seriam cravadas as estacas. Este ressecamento ocorre devido ao fluxo gerado do ânodo para o cátodo.

Inicialmente, foi realizado um teste com arranjo radial, conforme é mostrado no esquema da Figura 3.19a. O resultado da resistência ao cisalhamento não drenada da amostra foi satisfatório, demonstrando que esta técnica era apropriada para o adensamento do solo. Entretanto, algumas trincas profundas próximas às hastes de cobre foram observadas na parte superior do modelo. Assim, devido a esse problema, iniciou-se o estudo do arranjo de eletrodos que induzisse a um fluxo vertical.

Preliminarmente, avaliou-se a aplicação do campo elétrico com eletrodos posicionados na base e no topo do solo. Ainda assim, verificaram-se, com este arranjo, trincas na superfície do solo. Tendo em vista o fato de as trincas serem em menor número e superficiais, associado ao processo de eletro-osmose, foi aplicada sobrecarga sobre o solo em uma tentativa de diminuir a imperfeição da superfície do solo onde as estacas seriam instaladas. O processo de eletro-osmose com fluxo vertical é apresentado na Figura 3.19b.

A sobrecarga foi feita inicialmente com uma camada de brita sobre um geotêxtil instalado em contato com o solo para evitar a penetração da brita na massa de lama. Observaram-se, com este procedimento, alguns problemas de deformações diferenciais provocados pelo atrito entre o geotêxtil e a parede da caixa de teste. Sendo assim, a sobrecarga passou a ser feita com peso morto apoiado em uma placa de acrílico perfurada que regularizava a aplicação da sobrecarga sobre a lama.

Para obter uma distribuição mais uniforme do adensamento do solo, foi feita a inversão da polaridade do sistema vertical. Esta inversão é chamada de polaridade reversa (Feitoza, 2007). Esta técnica é utilizada para evitar o ressecamento em torno do ânodo e diminuir a corrosão do eletrodo, garantindo um ganho de resistência na camada superior da amostra, onde são cravadas as estacas.

Na Figura 3.20 é apresentado o esquema gráfico do processo de adensamento desenvolvido neste estudo.

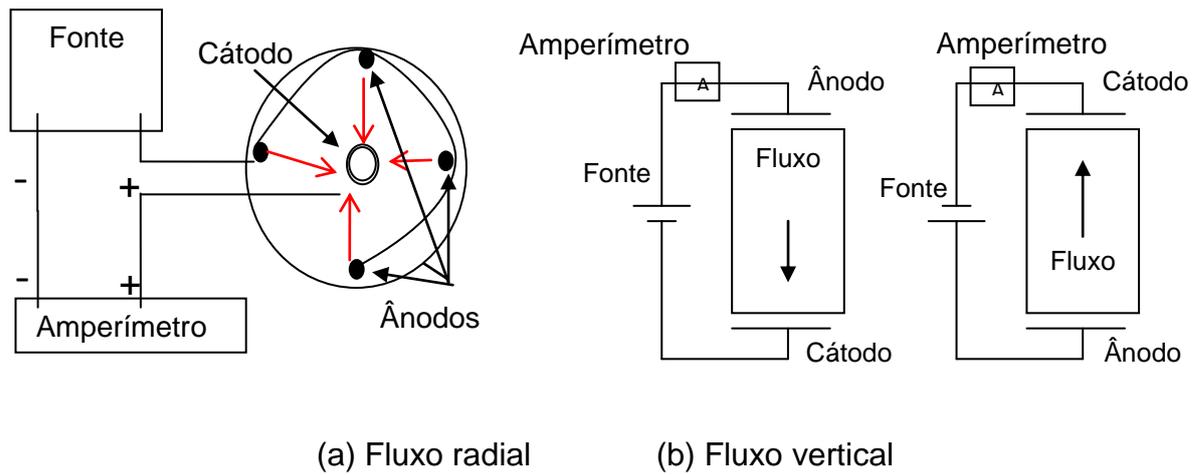


Figura 3.19 – Representação gráfica do processo de eletro-osmose

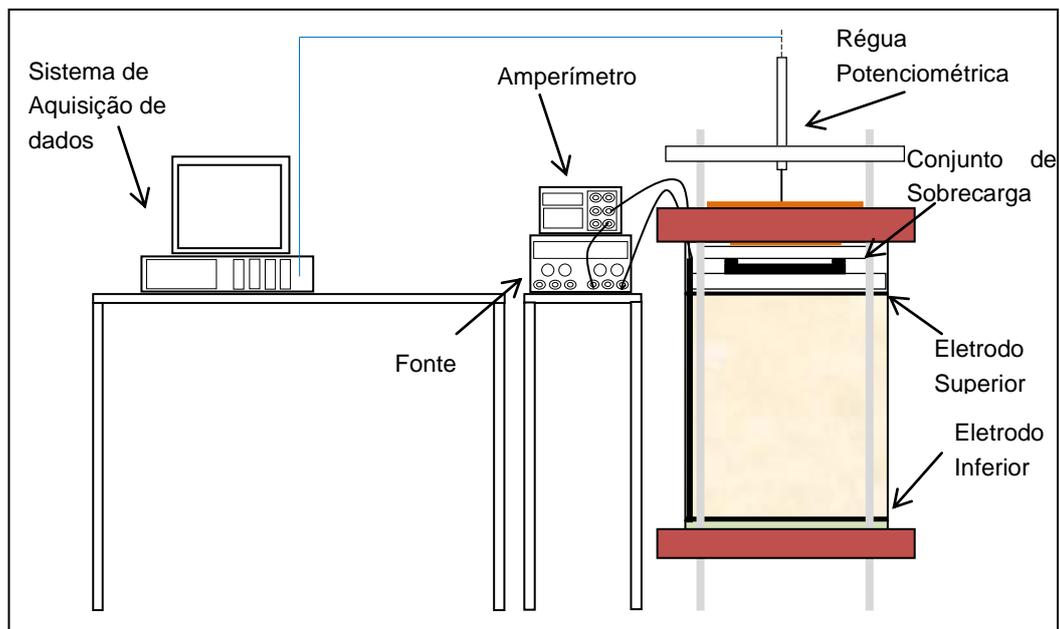


Figura 3.20- Esquema gráfico do processo de adensamento.

3.2.11 Sistema para aplicação da sucção

O aparato para aplicação da sucção apresentado na Figura 3.21 é composto de uma bomba de vácuo rotatória, da marca *Edwards*, modelo RV3, com capacidade de bombeamento de 4,5 m³/h, um vacuômetro e duas interfaces de acrílico, confeccionadas neste laboratório.

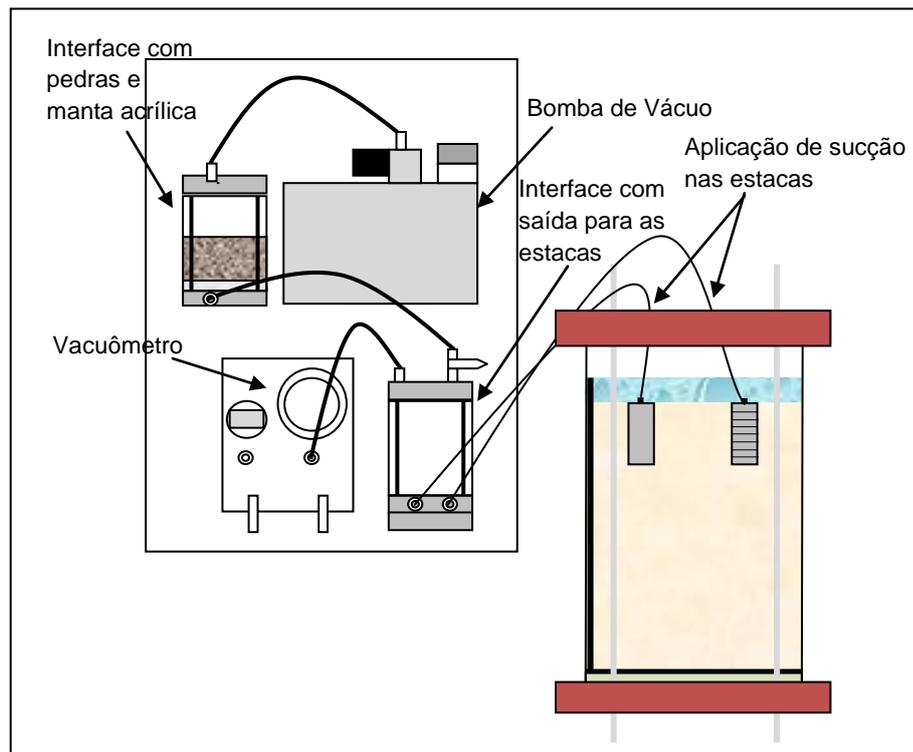
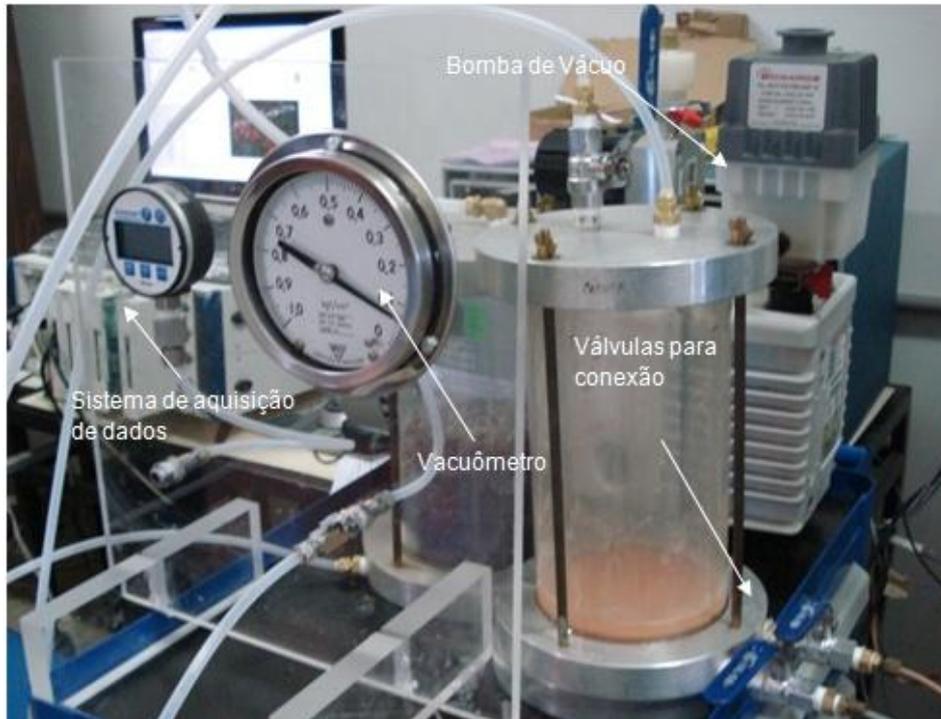


Figura 3.21– Aparato e esquema gráfico do sistema de aplicação da sucção.

3.2.12 Sistema de arrancamento a 1 g

3.2.12.1 Ensaio a 1 g

- **Ancoragem vertical**

Para o ensaio de arrancamento na vertical (plataformas TLP), foi montado um aparato composto de um atuador mecânico servo-controlado, responsável pelo deslocamento da estaca e de uma célula de carga responsável por medir a força de arrancamento. Esta foi determinada em função do deslocamento da estaca. Na montagem do ensaio, foram utilizados um pórtico e uma viga de aço para auxiliar no posicionamento do atuador. Na Figura 3.22, é apresentado o detalhamento do aparato montado para execução dos ensaios.

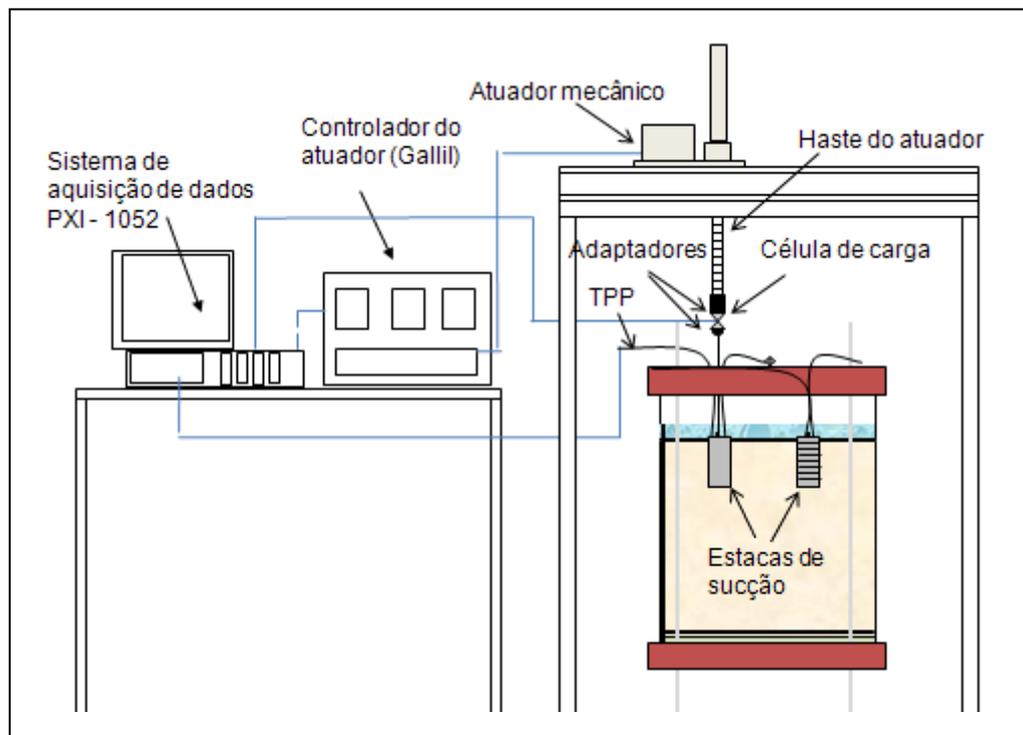


Figura 3.22– Detalhamento do sistema de arrancamento vertical a 1 g.

- **Ancoragem *Taut-Leg***

No sistema de arrancamento simulando uma ancoragem em *taut-leg*, além do sistema utilizado no item anterior, foi necessário um suporte de viga com roldana para obter um ângulo de arrancamento de 60° com a horizontal. Este sistema é apresentado na Figura 3.23.

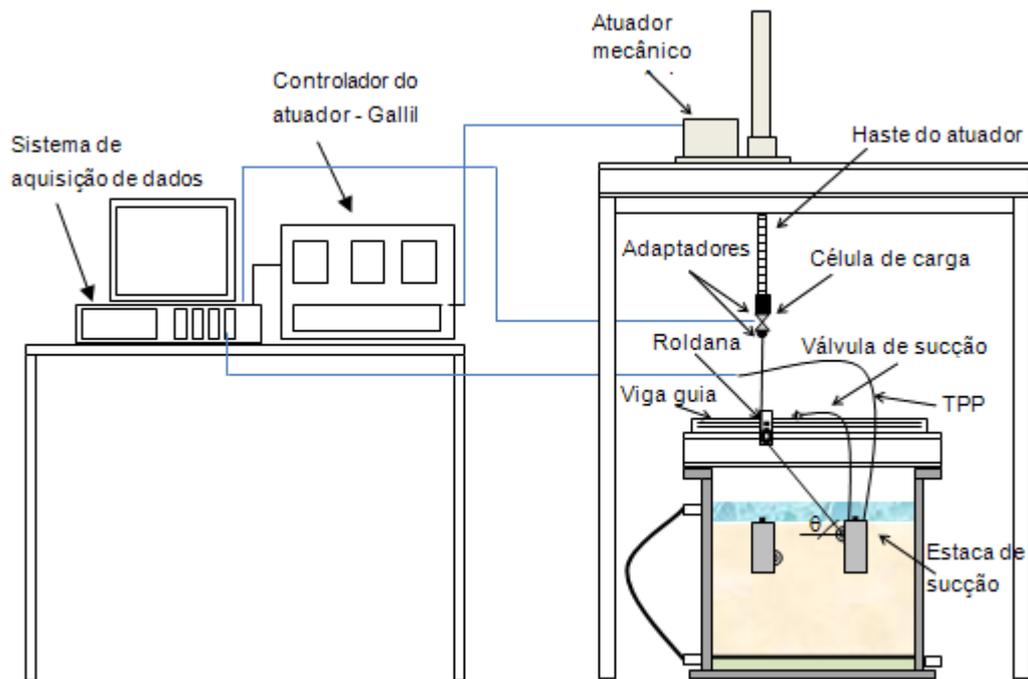


Figura 3.23– Detalhamento do sistema de arrancamento em *taut-leg* a 1 g.

3.2.12.2 Ensaios a 50 g

Para os ensaios na centrífuga geotécnica, foi montado outro aparato que permitiu a realização dos ensaios de arrancamento das estacas na centrífuga geotécnica com aceleração gravitacional de 50 g. O sistema de arrancamento é composto de um atuador hidráulico, duas células de carga, uma haste de alumínio confeccionada neste laboratório utilizada para o arrancamento simultâneo das estacas, uma régua potenciométrica e uma viga de alumínio, esta utilizada para fixar o atuador na posição do ensaio. Esta viga é presa diretamente na caixa cilíndrica.

Neste ensaio, é determinada a força de arrancamento em função do deslocamento das estacas. Na Figura 3.24 é apresentada a representação gráfica do aparato montado para execução dos ensaios.

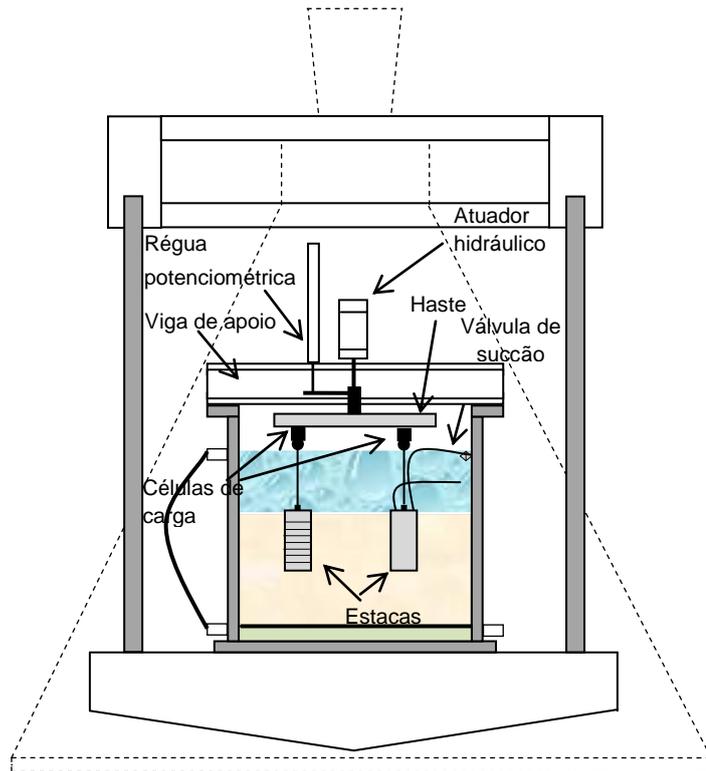


Figura 3.24– Detalhamento do sistema de arrancamento vertical a 50 g.

3.3 Estudos dos materiais

A lama foi preparada com uma mistura de Caulim (Coating 90 – da Mineração de Caulim Monte Pascoal AS) e Metacaulim HP (Metacaulim do Brasil Indústria e Com. Ltda.). Inicialmente, foi realizado um estudo com diferentes proporções desses materiais, para determinar a mistura que pudesse simular uma argila mole, material encontrado no leito marinho.

Os materiais selecionados para a mistura foram caracterizados em laboratório, com ensaios específicos, estabelecidos na literatura corrente (Anexo 03). Estas caracterizações consistiram de ensaios para determinação das propriedades físicas (distribuição granulométrica, Figura 3.26 e Tabela 3.3), determinação da densidade dos grãos, determinação dos limites de consistência e determinação da composição mineralógica (Difração de raios-X) (Tabela 3.4). Os procedimentos destes ensaios seguiram os procedimentos preconizados nas Normas Técnicas da ABNT (NBR-6457, NBR-6508, NBR-7181, NBR-6459 e NBR-7180).

O estudo das dosagens foi feito variando-se o percentual do metacaulim e do caulim na mistura. Após a dosagem, foram feitos os ensaios para determinação das propriedades físicas (distribuição granulométrica, Figura 3.27 e Tabela 3.5, determinação da densidade dos grãos e determinação dos limites de consistência).

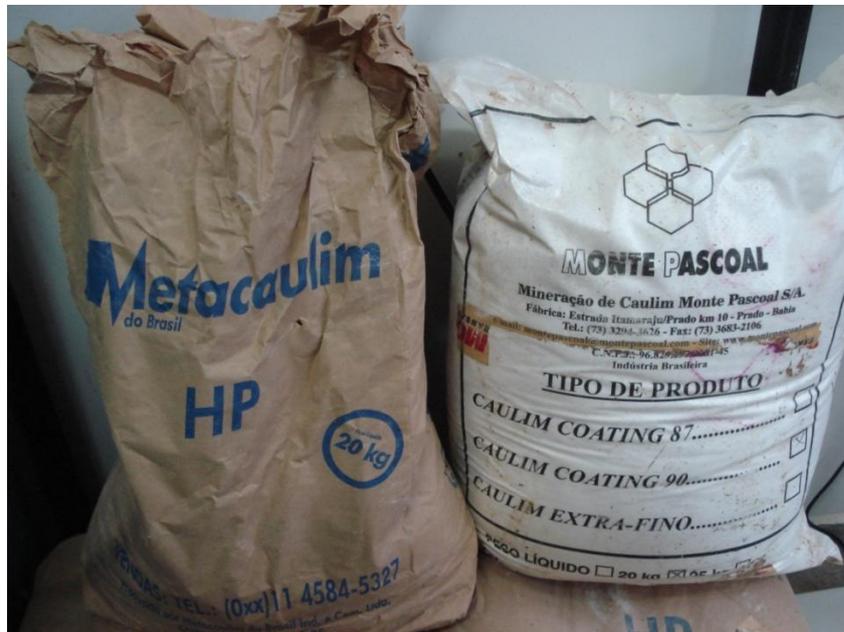


Figura 3.25 – Caulim e Metacaulim utilizados na mistura.

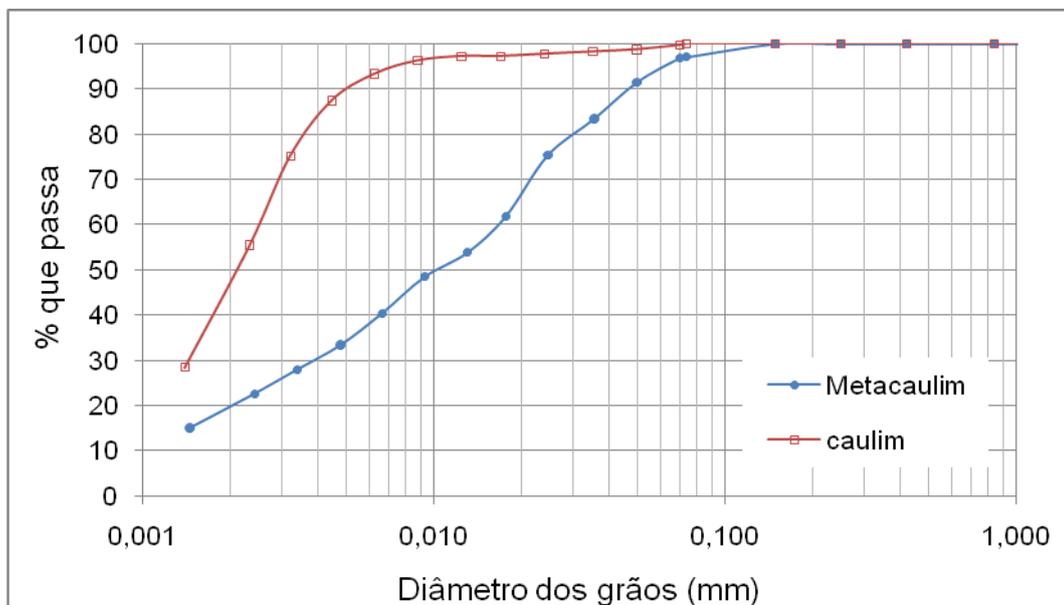


Figura 3.26 – Curva granulométrica dos materiais.

Tabela 3.3 – Características granulométricas dos materiais.

Material	Frações Granulométricas (%)				
	Areia			Silte	Argila
	Grossa	Média	Fina		
Caulim	-	-	0.8	53.5	45.7
Metacaulim	-	-	5.8	74.9	19.3

Tabela 3.4 – Resultados da caracterização dos materiais.

Material	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Densidade dos Grãos
Caulim	68.9	34.3	34.6	2.66
Metacaulim	NP	NP	NP	2.60

Com o objetivo de determinar a resistência não drenada inicial das misturas, em uma avaliação preliminar, foi adicionado um volume de água correspondente a duas vezes o teor de umidade do Limite de Liquidez. Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 3.6.

A mistura escolhida para ser utilizada nesta pesquisa foi com 60% de metacaulim, Esta foi escolhida por apresentar o índice de plasticidade semelhante a valores encontrados em depósitos de argila mole no leito marinho.

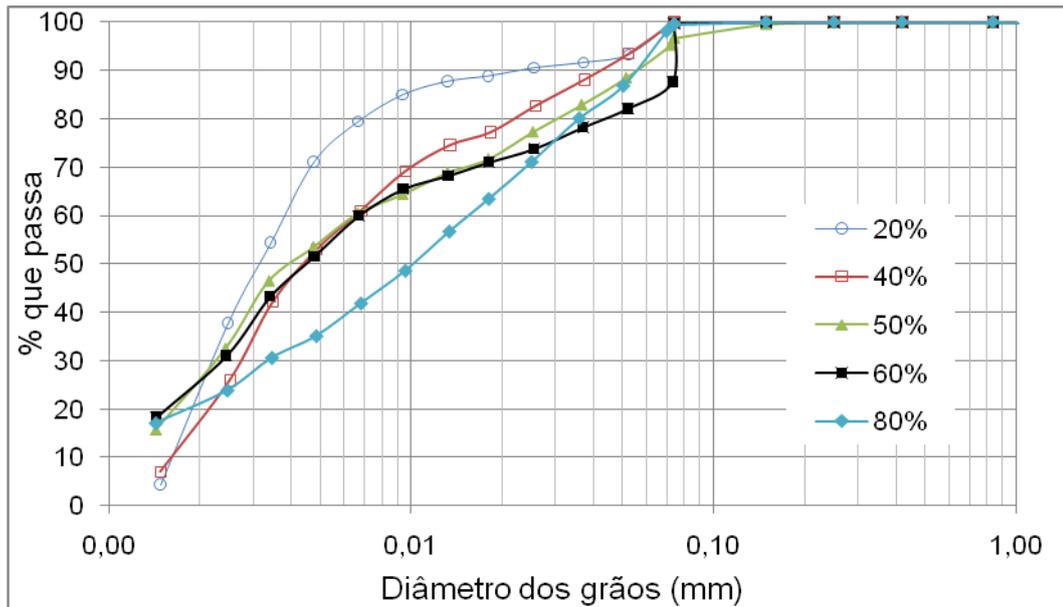


Figura 3.27 – Curva granulométrica das dosagens dos materiais.

Tabela 3.5 – Características granulométricas das misturas dos materiais.

Material	Frações Granulométricas (%) e Classificação Unificada					
	Porcentagem de metacaulim	Areia	Silte		Argila	Classificação (USCS)
			Grossa	Média Fina		
20%	-	-	4.2	73.9	21.9	CH
40%	-	-	4.2	79.4	16.4	CH
50%	-	0.3	8.4	66.0	25.3	CH
60%	-	-	15.7	58.8	25.4	CH
80%	-	-	8.0	71.2	20.7	CH

Tabela 3.6 – Resultados da caracterização das misturas.

Porcentagem de Metacaulim	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Densidade dos Grãos	S_u (kPa) (mini palheta)
20%	68.8	38.9	29.9	2.58	0.28
40%	66.2	37.3	28.9	2.56	0.30
50%	65.0	36.7	28.4	2.66	0,19
60%	62.5	35.7	26.7	2.64	0.23
80%	58.2	38.3	19.9	2.61	0.17

3.4 Estudos da geometria das estacas

Para o primeiro ensaio, foram preparadas duas estacas feitas de tubo de PVC (Figura 3.28) na escala 1:125, com 145 mm de comprimento e 40 mm de diâmetro externo, resultando numa relação de aspecto (L/D) igual a 3.6. Foi adaptado um tampão na extremidade superior onde foram feitos dois orifícios, um para aplicação da sucção e o outro para colocação do olhal. Estas estacas foram feitas para dar início aos estudos da instalação e arrancamento da estaca, assim como para analisar a colocação da instrumentação.

As estacas utilizadas para os demais ensaios foram confeccionadas em alumínio na escala 1:125, tendo 145 mm de comprimento e 40 mm de diâmetro externo, resultando numa relação de aspecto (L/D) igual a 3.6. A espessura da parede da estaca é de 1.5 mm.

Nas estacas utilizadas nos ensaios para o arrancamento vertical, o ponto de ancoragem (olhal) foi colocado no mesmo orifício onde foi apoiada a haste que auxilia na instalação, conforme pode ser visto na Figura 3.29a.

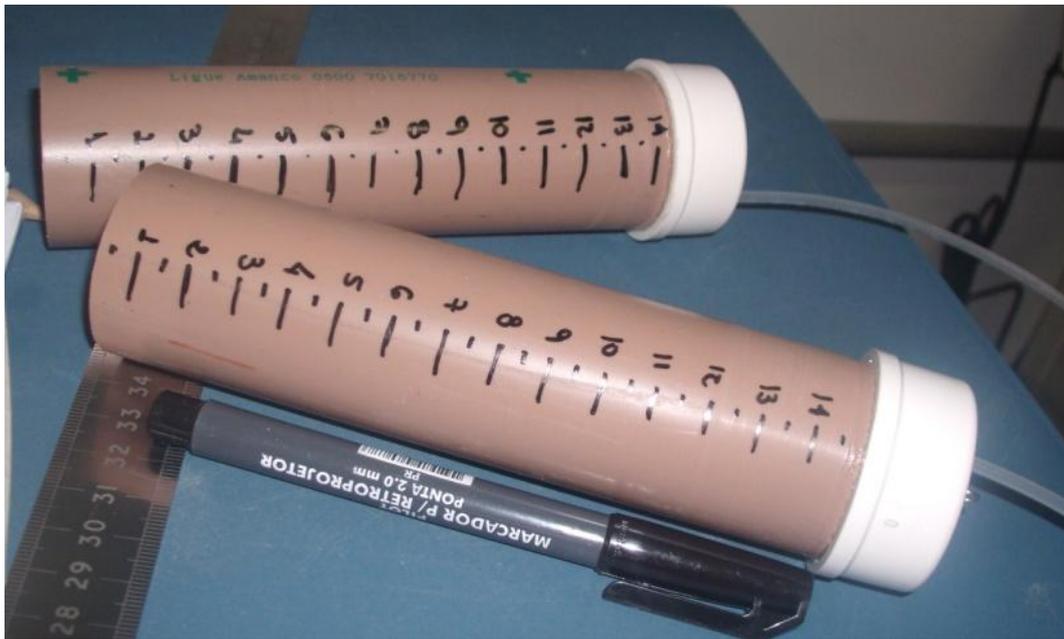


Figura 3.28 – Estaca de PVC.

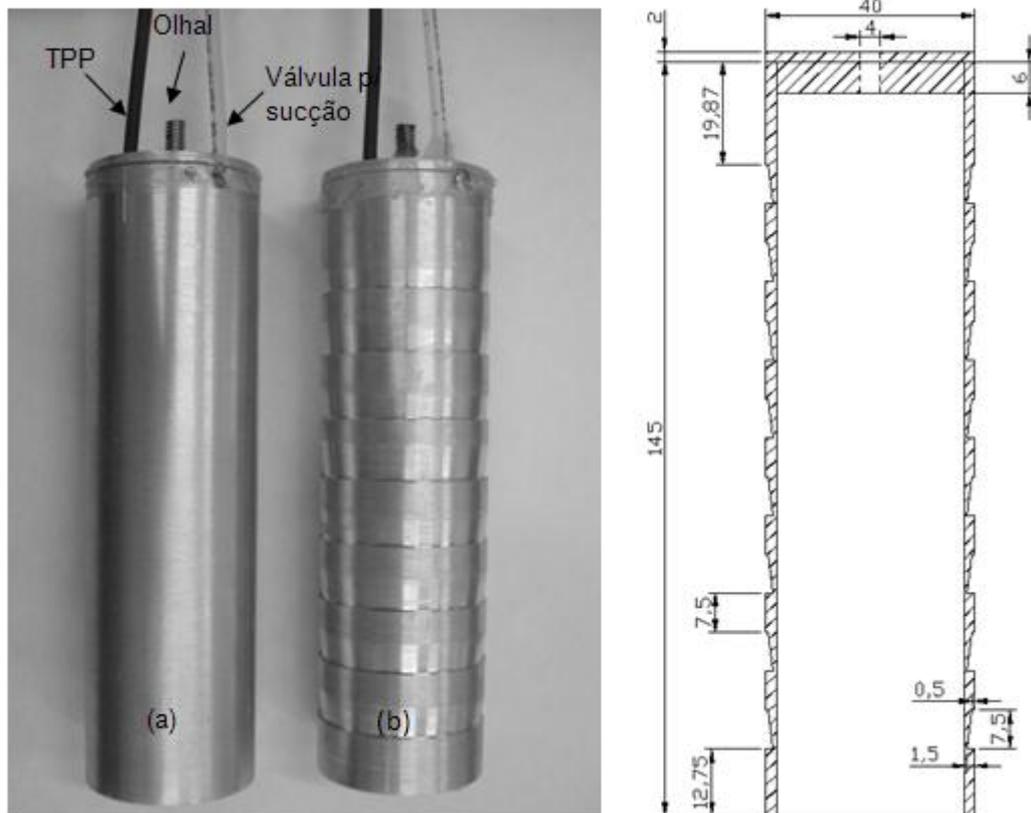


Figura 3.29 – Estacas para estudo da ancoragem vertical (TLP):

(a) parede lisa (b) parede dentada.

Ainda para a etapa de arrancamento vertical, foi confeccionada uma estaca com “dentes” na parede lateral externa. Esta diferença na geometria foi feita com o intuito de comparar a força de arrancamento estática entre os dois tipos de estacas. O detalhamento da estaca rugosa é apresentado na Figura 3.29b.

Já as estacas utilizadas nos ensaios com o arrancamento em *taut-leg* (Figura 3.30), o olhal foi colocado na lateral externa, sendo que cada estaca tinha o olhal em uma posição diferente em relação à altura do fuste, uma a $1/3$ da altura em relação a base, outra a $1/2$ da altura e a última a $2/3$ da altura.

Estes ensaios foram executados para fazer a comparação da força de resistência ao arrancamento com deslocamento constante em função da posição do olhal.



Figura 3.30 – Posição do olhal nas estacas.

3.5 Preparação do solo

A preparação do solo se inicia com a pesagem dos dois materiais secos e da água utilizada para deixar a lama com o teor de umidade correspondente a duas vezes o teor de umidade do LL. Os materiais secos são misturados antes de serem colocados na bateadeira para evitar que ocorra a formação de grumos de material durante o processo de homogeneização.

A água utilizada no ensaio é destilada e deaerada através de um sistema montado no laboratório (Figura 3.32). Este sistema é composto por um destilador, pela bomba de vácuo e por uma caixa de acrílico com tampas de chempox com válvulas na tampa e no fundo.

No início da preparação, é colocada uma pequena quantidade da água na bateadeira para depois intercalar a colocação do solo e da água. Esta mistura fica na bateadeira por 60 minutos, na velocidade de 45 RPM (Figura 3.31), tornando-se homogênea.



Figura 3.31 – Mistura dos materiais.

Após esta etapa, a lama é transferida para a betoneira adaptada com uma tampa para aplicação de vácuo, apresentada no item 3.2.2. O tempo deste processo é de 60 minutos, para que a mistura fique totalmente saturada e deaerada.

Esta lama é colocada cuidadosamente na caixa de teste sobre a camada drenante com uma altura de 20 mm de água. (Figura 3.33).

No primeiro ensaio, a camada drenante foi preparada com a colocação de um papel filtro no fundo da caixa, para impedir a passagem de partículas para as válvulas de drenagem. Na seqüência, foi colocada uma camada de 10 mm de areia e sobre esta, outro papel filtro. A camada drenante foi saturada com água destilada e deaerada, deixando uma pequena camada de água sobre esta para o início da colocação do solo.

Nos demais ensaios na caixa de acrílico, a camada drenante foi feita com uma mangueira flexível perfurada até a posição que a mesma é colada na direção do topo da caixa. A montagem com esta mangueira permite a realimentação de água no topo da caixa.

Nos ensaios na caixa cilíndrica, a camada drenante foi preparada com a mangueira flexível perfurada e sobre esta, 10 mm de areia e o papel filtro. A ligação da camada drenante com o topo da amostra foi feita pela parte externa da caixa, conforme foi mostrado na Figura 3.2. O processo de saturação da camada drenante foi o mesmo em todos os ensaios.

Após a preparação da camada drenante, a lama é colocada em pequenas porções na caixa teste. Após a colocação de todo solo, a caixa é preenchida com água destilada e deaerada até o nível da mangueira da realimentação.

A caixa de teste, os materiais que formam a camada drenante e os materiais da mistura foram pesados durante a preparação do solo. Esses valores são descritos no relatório de cada ensaio, sendo estes apresentados no Anexo 03.

Após o término da colocação do solo, este é deixado sedimentar por 72 horas. Após este tempo, inicia-se o adensamento pelo processo de eletro-osmose com sobrecarga.



Figura 3.32 – Aparato para preparação da água.



Figura 3.33 – Preparação da camada drenante e colocação do solo na caixa de acrílico.

CAPÍTULO 4 PROGRAMA DE ENSAIOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Desenvolver metodologias experimentais é uma tarefa árdua, principalmente quando o projeto é de modelagem física em escala reduzida, onde qualquer imperfeição pode gerar resultados totalmente díspares daqueles esperados.

Como já mencionado anteriormente, este trabalho de pesquisa objetivou definir uma metodologia de trabalho e avaliar o desempenho de estacas de sucção em duas situações distintas; pesquisar o efeito de rugosidade no fuste das estacas e a posição do olhal lateral na capacidade de permanência quando estas são solicitadas verticalmente ou lateralmente, respectivamente.

Neste capítulo serão descritos os doze modelos preparados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Os modelos para os ensaios a 1 g foram modelados para o desenvolvimento das metodologias do ensaio, para o estudo do efeito da rugosidade do fuste das estacas e para o estudo do ponto de fixação da ancoragem em *taut-leg*. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos estudos executados em cada modelo.

Os modelos para os ensaios a 50 g foram executados somente para o estudo do efeito da rugosidade do fuste da estaca, tendo em vista os resultados obtidos a 1 g terem apresentado valores aproximadamente iguais.

4.2 Desenvolvimento de metodologias

4.2.1 Ensaio 1 g

Modelo 01:

Este modelo foi preparado para desenvolver as metodologias do estudo, comprovar a eficácia da camada drenante, da instalação por sucção e verificar a instrumentação necessária.

Para este estudo foi desenvolvido um aparato para fazer a instalação das estacas por sucção e por atuação conforme apresentado no item 3.2.11. Esta comparação foi feita para confirmar a eficiência da sucção na formação da bucha de solo no

interior da estaca. E, finalmente, foi montado um esquema para o ensaio de arrancamento com velocidade constante.

Tabela 4. 1- Estudos realizados nos modelos durante a pesquisa.

ESTUDOS REALIZADOS NOS MODELOS					
Modelo	Adensamento da amostra	Ensaio de Mini palheta	Ensaio de arrancamento	Caracterização da amostra	Ensaio de adensamento
01	Peso próprio	x	Vertical – 1 g	-	-
02	EO radial	x	-	-	-
03	EO vertical	x	-	x	x
04	EO vertical	-	-	-	-
05	EO vertical	-	Vertical – 1 g	x	-
06	EO vertical	x	Vertical – 1 g	-	-
07	EO vertical	x	Vertical – 1 g	x	-
08	EO vertical	x	Vertical – 1 g	x	-
09	EO vertical	x	<i>Taut-leg</i> – 1 g	x	-
10	EO vertical	x	<i>Taut-leg</i> – 1 g	x	-
11	EO vertical	-	Vertical – 50 g	x	x
12	EO vertical	-	Vertical – 50 g	x	x

As estacas utilizadas neste ensaio foram feitas de PVC (já descritas no item 3.4). Neste modelo foi feito o teste de mini palheta após o processo de sedimentação e adensamento por peso próprio do solo. Confirmada a baixa resistência deste modelo, observou-se a necessidade de adensar o solo para aumentar a resistência. Tendo em vista a baixa resistência do material, o que impede o adensamento inicial com sobrecarga, optou-se por aplicar nos primeiros estágios o processo de eletro-osmose. Este foi escolhido por ser rápido, necessitar de equipamentos simples e já disponíveis no laboratório. O outro processo que poderia ser feito seria o HCT (*Hidraulic Consolidation Test*), sendo que este já tinha sido utilizado em uma pesquisa anterior e os resultados não foram satisfatórios, devido à ocorrência de ruptura hidráulica e canais preferenciais de fluxo.

A partir deste modelo, foram definidas as metodologias para a instalação das estacas por sucção e do ensaio de arrancamento com velocidade controlada, simulando uma ancoragem vertical.

A Figura 4.1 apresenta o perfil da resistência ao cisalhamento não drenada da amostra com adensamento por peso próprio e a Figura 4.2 apresenta os resultados do ensaio de arrancamento, comparando a instalação por atuação e por sucção.

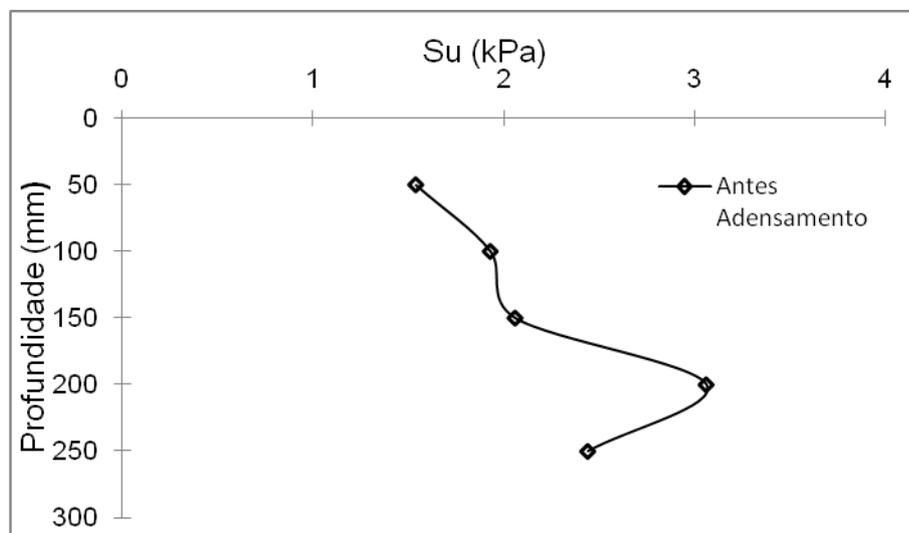


Figura 4.1- Perfil da resistência ao cisalhamento não drenada.

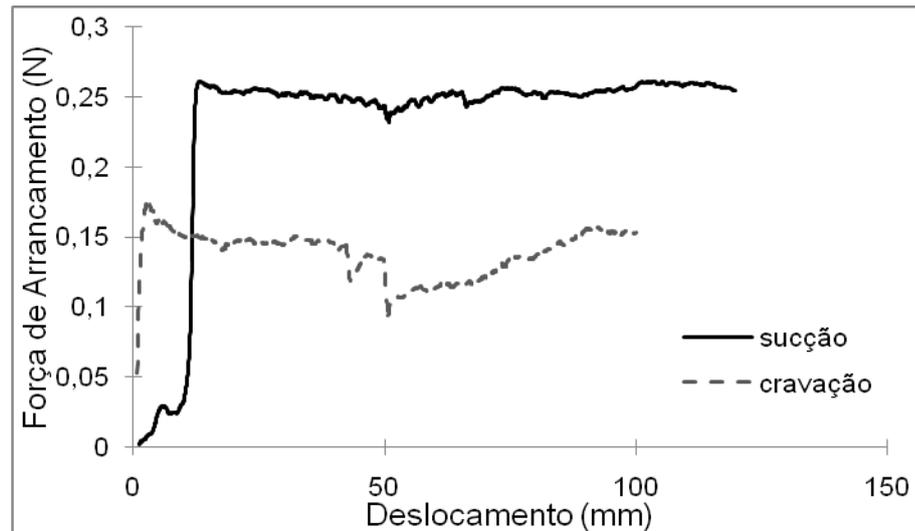


Figura 4.2- Força de arrancamento em função do deslocamento da estaca.

Modelo 02:

Este modelo foi preparado para estudar o processo de adensamento do solo por eletro-osmose com fluxo radial. Nesta amostra ocorreram várias trincas e oxidação dos eletrodos que serviam como ânodo, (Figura 4.3).

Para entender a corrosão eletroquímica nos eletrodos, faz-se uma analogia entre o processo de eletro-osmose e o da pilha eletrolítica. Nesta, ocorre uma reação de oxirredução gerada pela energia elétrica inserida no sistema; o ânodo se oxida e o cátodo se reduz pela aceitação dos elétrons liberados pelo ânodo. Do mesmo modo, o solo saturado funciona como a solução eletrolítica e os eletrodos de cobre são os eletrodos da pilha. A bateria é a fonte de alimentação usada no processo de eletro-osmose que atua como uma bomba de elétrons, criando um fluxo do ânodo para o cátodo (Feitoza, 2007).

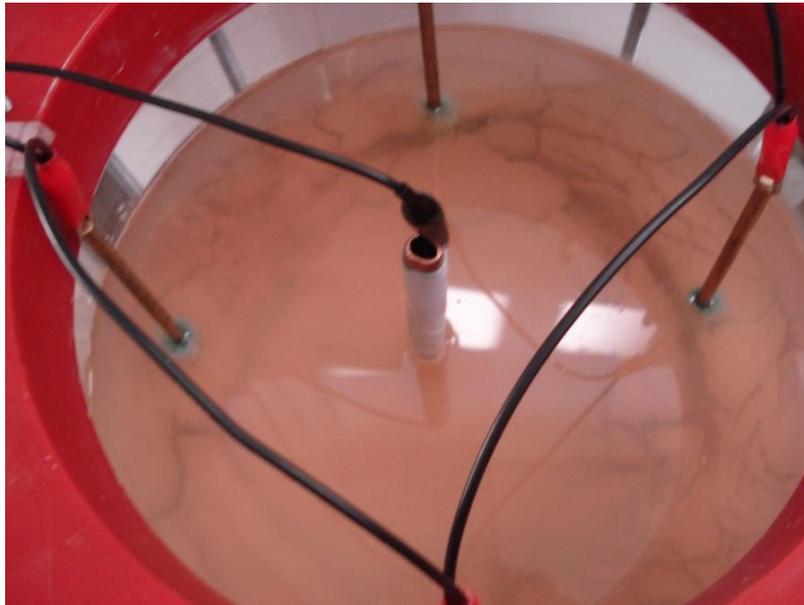


Figura 4.3- Processo de adensamento por eletro-osmose radial.

O perfil da resistência ao cisalhamento não drenada da amostra após o adensamento com fluxo radial é apresentado na Figura 4.4. O teste de mini palheta foi realizado em uma região do solo onde havia menos trincas. Houve um ganho bastante significativo na resistência ao cisalhamento não drenada da lama com este processo. Este solo não foi utilizado para o ensaio de arrancamento devido à grande ocorrência das trincas na parte superior da amostra, onde seriam cravadas as estacas.

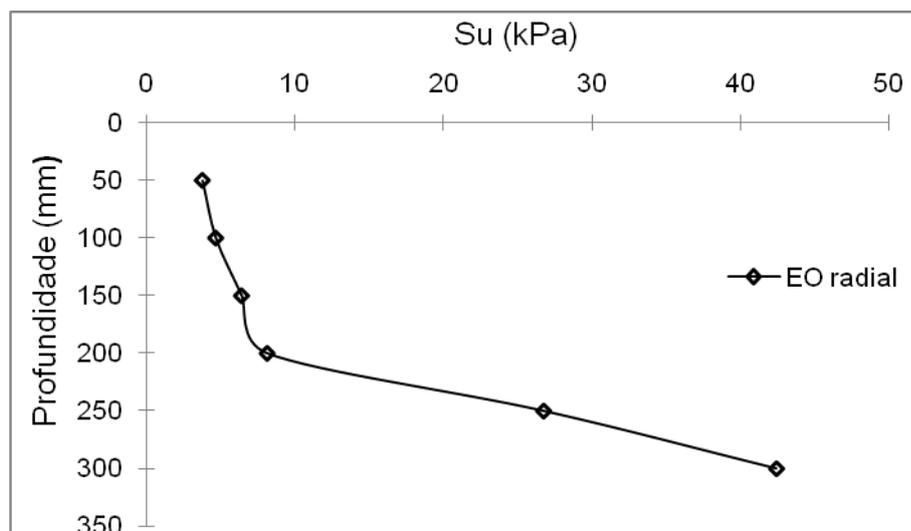


Figura 4.4- Perfil da resistência ao cisalhamento não drenada após o adensamento por eletro-osmose radial.

Modelo 03:

O terceiro modelo foi preparado para estudar o processo de adensamento por eletro-osmose com fluxo vertical. Este estudo foi realizado para evitar o aparecimento de trincas observadas no modelo anterior.

Neste modelo, as hastes metálicas foram substituídas por duas placas de cobre com orifícios para permitir a drenagem, uma foi colocada no topo da lama e a outra sobre a camada drenante. Foi utilizada uma sobrecarga para evitar a formação de trincas na parte superior da amostra. Neste ensaio, a sobrecarga foi feita com brita.

Para obter um perfil da resistência ao cisalhamento não drenada do solo mais uniforme, foi feita a inversão da polaridade dos eletrodos (placas) durante o processo de adensamento.

Neste ensaio ocorreu a formação de bolhas, conforme pode ser visto na Figura 4.5. Este fato evidencia a ocorrência do processo de eletrólise. Este processo deu-se pela formação de gás hidrogênio no cátodo.

Mesmo com a colocação da sobrecarga, observou-se a formação de trincas, sendo estas menores e superficiais.

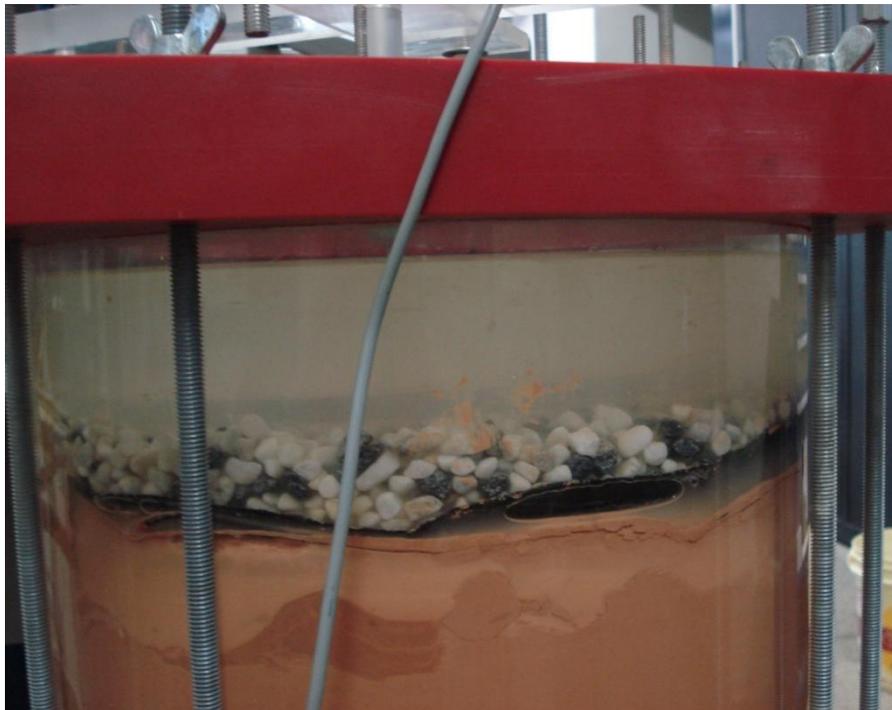


Figura 4.5- Formação de bolhas no processo de eletro-osmose vertical.

O perfil da resistência ao cisalhamento não drenada da amostra após o adensamento com fluxo vertical é apresentado na Figura 4.6.

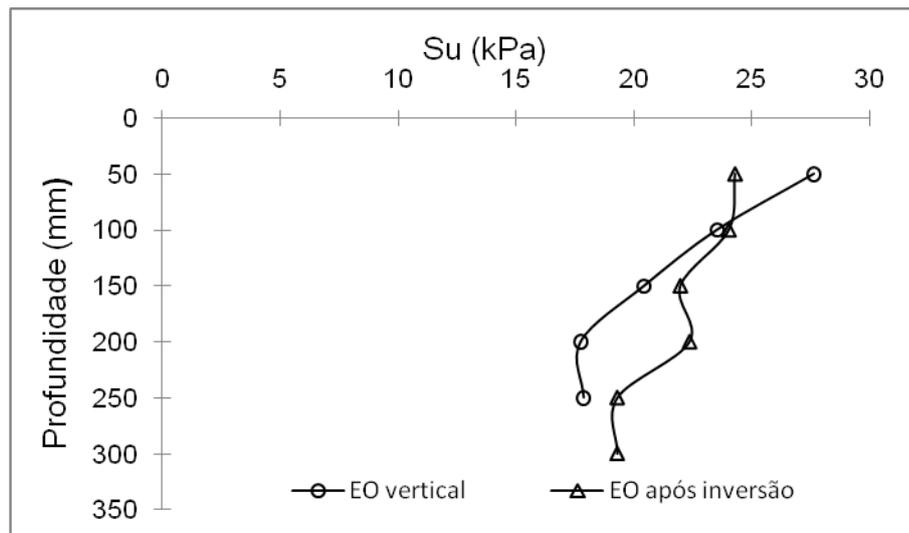


Figura 4.6- Perfil da resistência ao cisalhamento não drenada após o adensamento por eletro-osmose vertical.

Modelo 04:

Para avaliar o processo de eletro-osmose, foi construído outro modelo no qual foram inseridos eletrodos para medir a resistividade do solo, como mostrado na Figura 4.7. Esta instrumentação não foi bem sucedida, pois a perturbação dos cabos utilizados provocou o aparecimento de trincas bastantes profundas.

Modelo 05:

O quinto modelo foi preparado para iniciar o estudo da resistência ao arrancamento vertical da estaca de sucção, comparando-se as estacas com parede externa lisa e com parede externa rugosa. O olhal das estacas é posicionado no topo. Este modelo foi preparado conforme já descrito no item 3.5 e adensado pelo processo de eletro-osmose com fluxo vertical.

O teste de mini palheta não foi feito neste modelo devido a um problema ocorrido no motor do equipamento.



Figura 4.7- Solo após o adensamento por eletro-osmose com aquisição da resistividade.

A colocação de ranhuras na parede externa da estaca foi com o intuito de aumentar a parcela do atrito lateral, na força de resistência ao arrancamento da estaca.

Na caixa de acrílico foram instaladas duas estacas por modelo, para minimizar o efeito de borda e a interferência do solo mobilizado entre os arrancamentos.

Inicialmente, a estaca é posicionada no topo da amostra com a saída de ar/água aberta para a cravação dos 50 mm iniciais. Este procedimento é realizado com o atuador mecânico. Após a cravação inicial, a mangueira para aplicação da sucção é conectada na interface e inicia-se a aplicação da sucção com aparato descrito no item 3.2.11, até que a estaca penetre totalmente no solo ou se torne impenetrável.

Um tubo de PVC com 40 mm de diâmetro é cravado após a instalação das estacas para determinar-se o perfil de teor de umidade e peso específico do solo.

O arrancamento é feito após 12 horas da instalação das estacas. Este é feito de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.22, onde a estaca é arrancada a velocidade constante de 0.2 mm/s.

Após o arrancamento das estacas, são determinadas a massa das buchas formadas no interior das mesmas e a profundidade das buchas no interior das estacas. A formação da bucha é mostrada na Figura 4.8.

O posicionamento das estacas e do tubo de amostragem na caixa de teste é apresentado na Figura 4.9.

Após o ensaio de arrancamento é retirado o tubo de amostragem e é feita a caracterização do solo através do perfil de umidade e do peso específico do solo.

Os resultados dos ensaios deste modelo são apresentados na Figura 4.10.

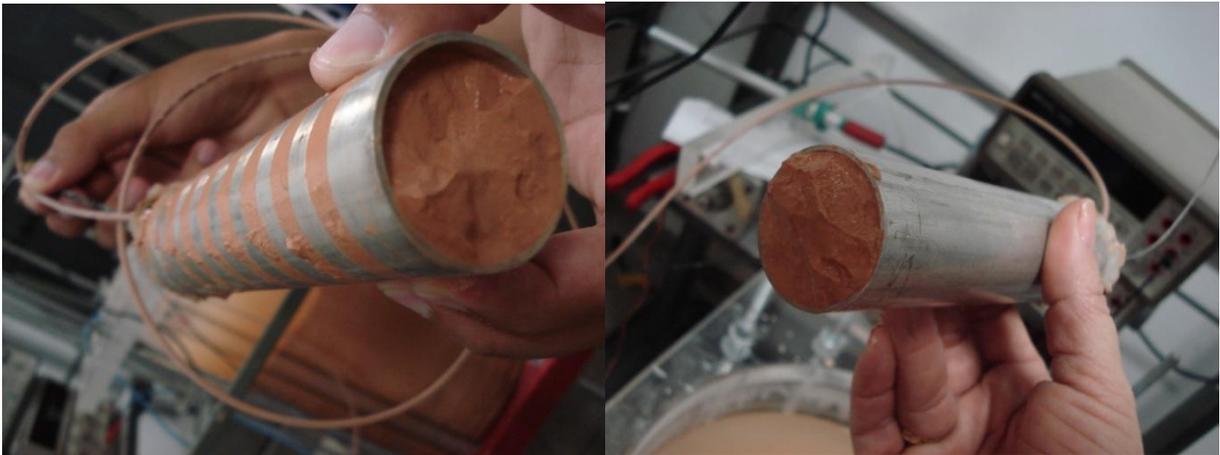


Figura 4.8 – Bucha de solo formada no interior das estacas.

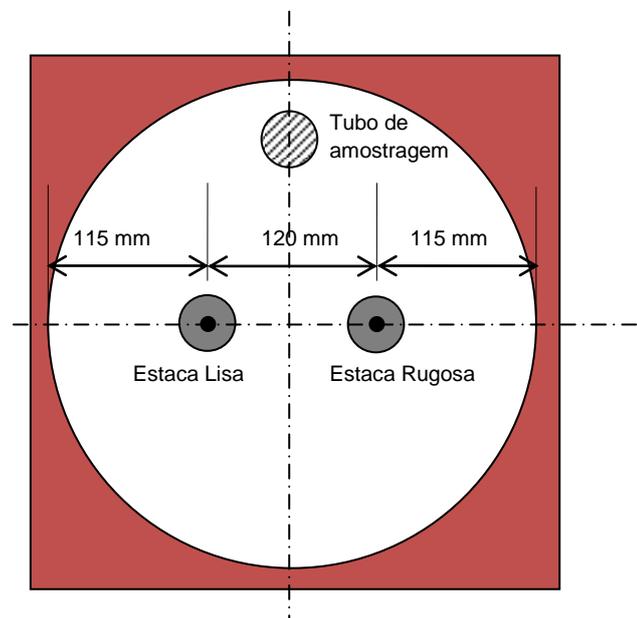


Figura 4.9 – Representação gráfica do ensaio de arrancamento vertical a 1 g.

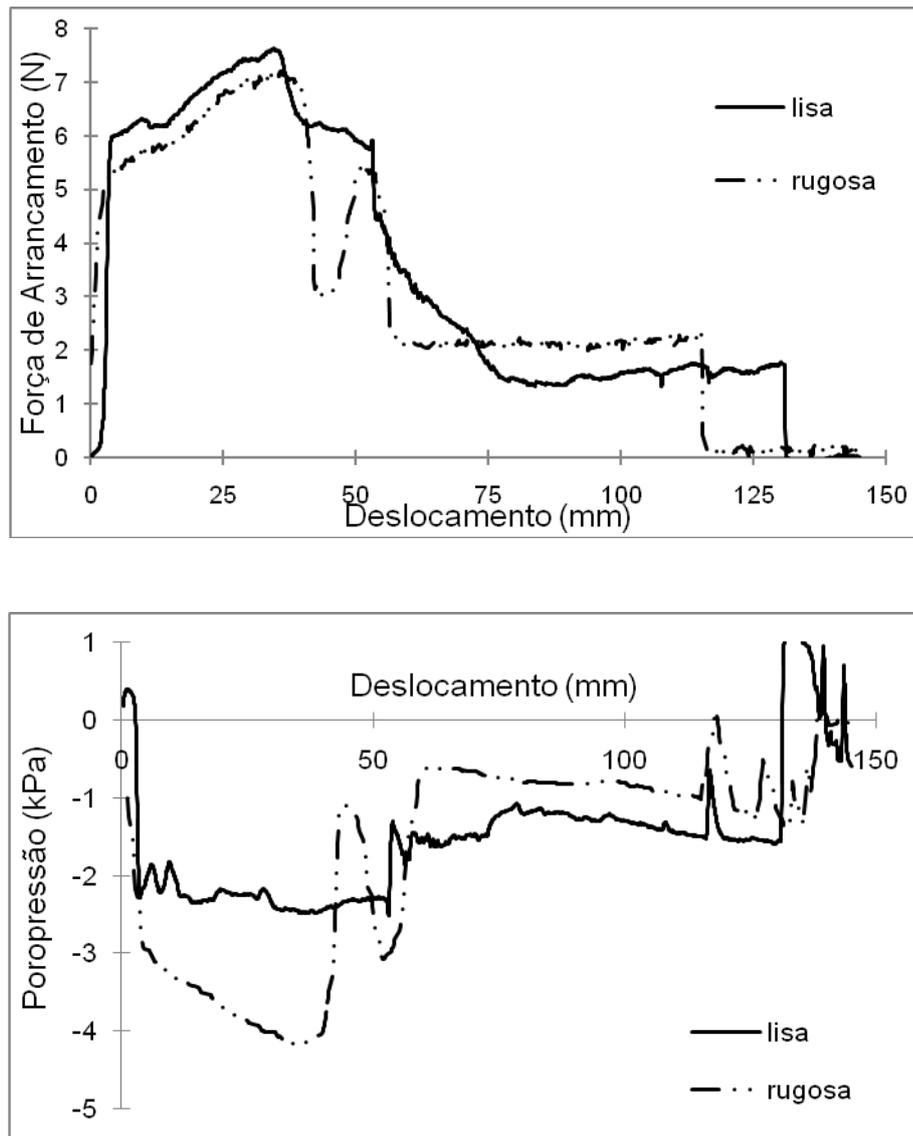


Figura 4.10- Resultados do ensaio de arrancamento- vertical a 1 g.

Modelo 06 a 08:

Estes modelos foram preparados seguindo a metodologia desenvolvida através dos modelos anteriores e as etapas do processo de adensamento foram repetidas para se confirmar a eficiência do processo.

Alguns problemas ocorreram durante os ensaios, como a falta de repetição do perfil da resistência do solo. Mesmo reproduzindo as mesmas etapas do processo de eletro-osmose, o perfil da resistência do solo não se repetia. Isto pode ter acontecido devido à ocorrência de trincas e da variação volumétrica do solo durante o ensaio, como foi visto na Figura 4.5, como também pelo desgaste dos eletrodos.

Já nos ensaios de arrancamento das estacas, houve uma constante nos valores da força de arrancamento, sendo que estas foram muito próximas, mesmo com a variação da geometria da parede externa da estaca.

O ensaio de mini palheta foi feito para verificar o ganho da resistência não drenada no solo, principalmente na parte superior da amostra, onde são cravadas as estacas. As estacas foram cravadas por sucção e o arrancamento foi feito com velocidade constante.

Após o arrancamento das estacas, foi retirada uma amostra para fazer a caracterização do solo.

Após estes estudos, viu-se a necessidade de fazer ensaios na centrífuga geotécnica a 50 g para confirmar a eficiência das ranhuras na parede externa da estaca.

As curvas de força de arrancamento e poro-pressão pelo deslocamento são apresentadas nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13. No modelo 06 não foram aquiritados os dados da poro-pressão durante o ensaio de arrancamento da estaca.

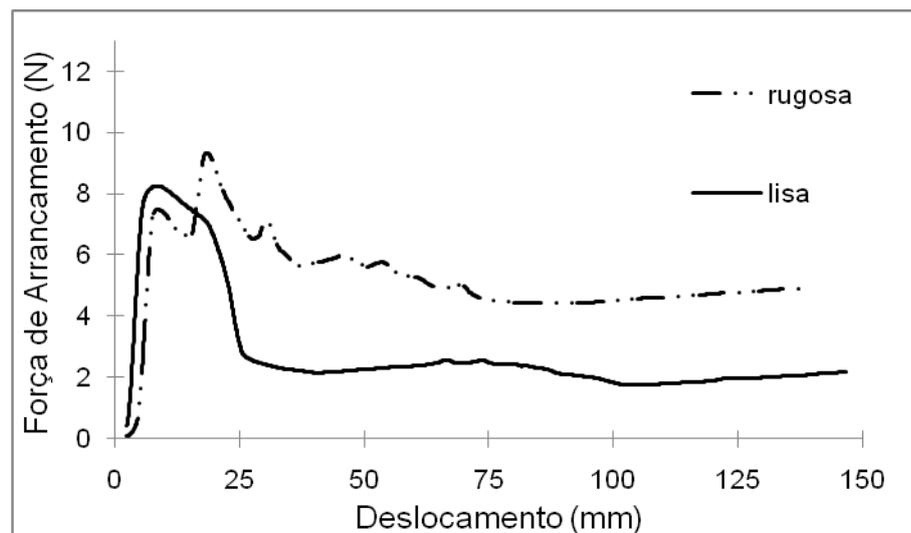


Figura 4.11- Resultados do ensaio de arrancamento - modelo 06.

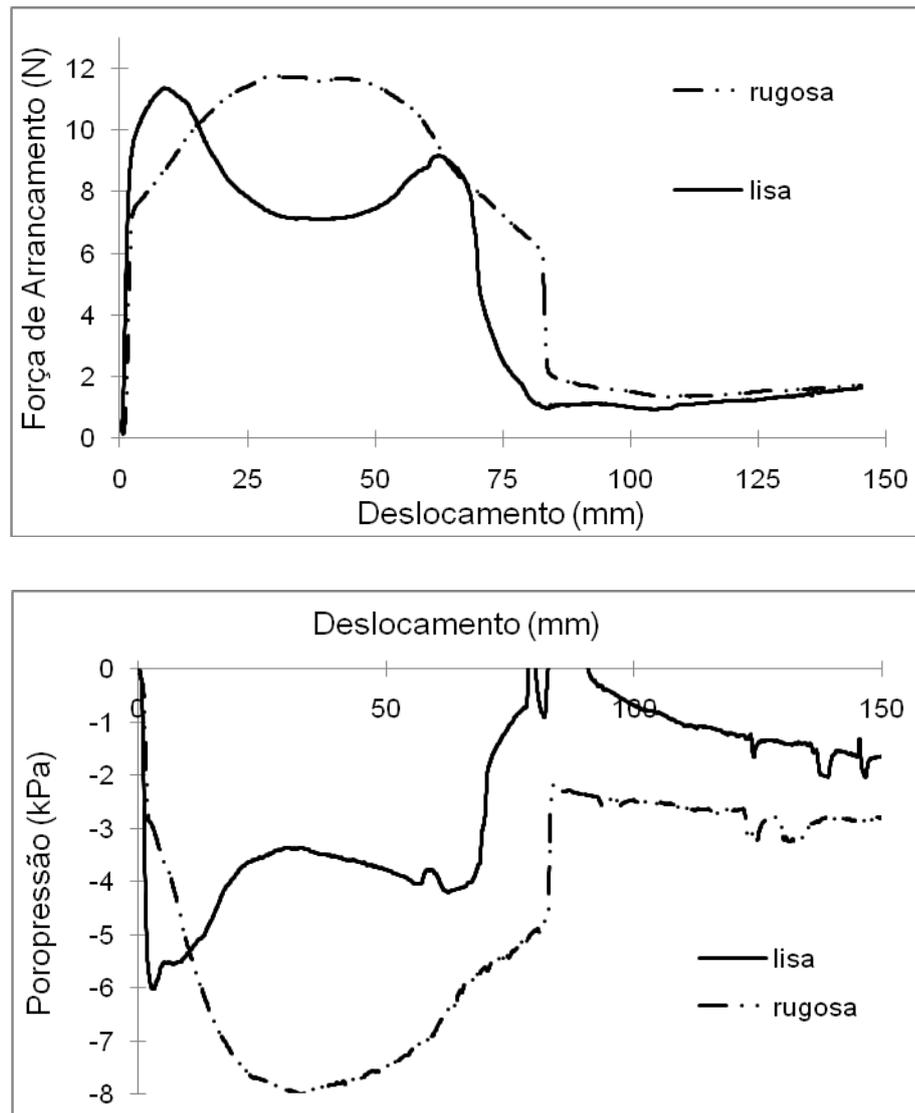


Figura 4.12- Resultados do ensaio de arrancamento - modelo 07.

Modelo 09 e 10:

Os modelos foram preparados para desenvolver a metodologia para os ensaios com arrancamento lateral (*taut-leg*) na caixa cilíndrica de aço. Estes foram utilizados para analisar o comportamento da estaca com a variação da posição do olhal de ancoragem.

Nos dois ensaios foram instaladas três estacas, sendo que uma estaca tinha o ponto de fixação no topo e as outras duas na lateral, conforme é apresentado no esquema gráfico da Figura 4.14. Este procedimento foi feito para comparar o desempenho entre a estaca com ancoragem vertical e a estaca com ancoragem em *taut-leg*.

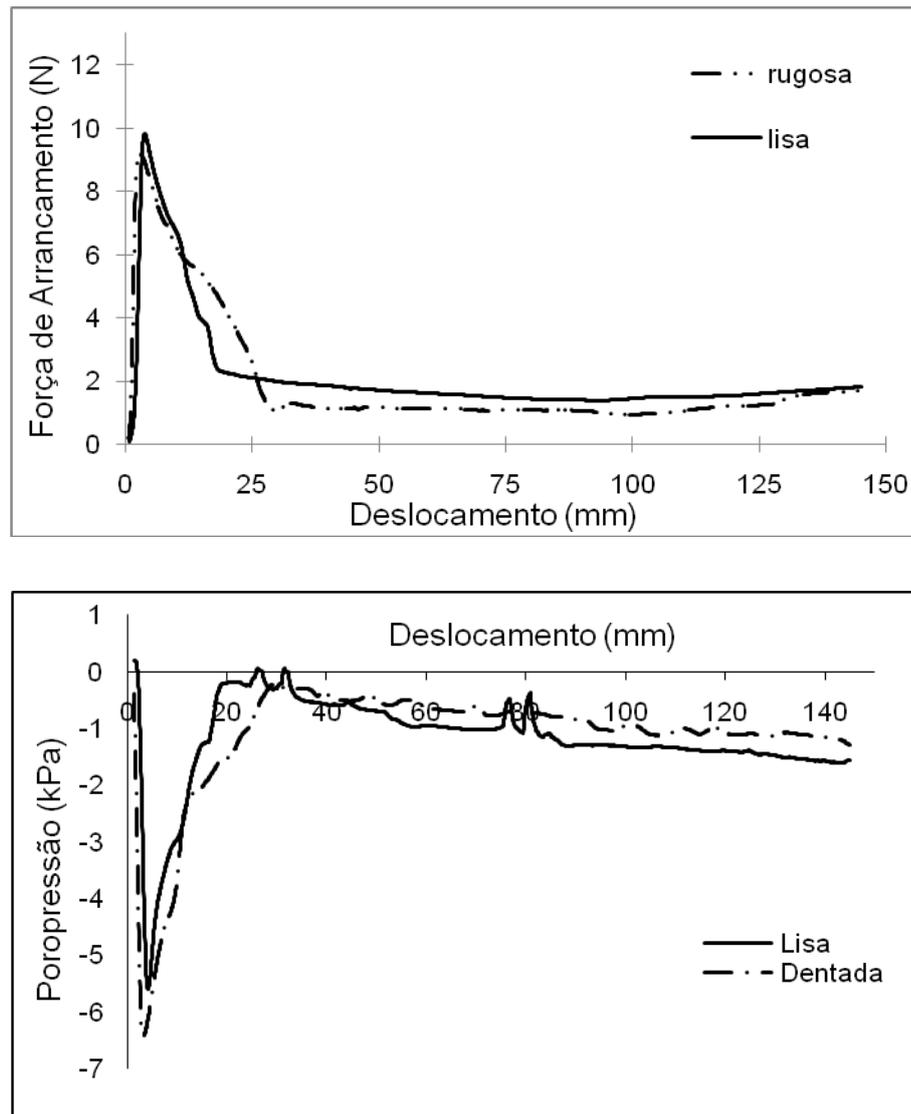


Figura 4.13- Resultados do ensaio de arrancamento - modelo 08.

Os procedimentos de preparação da lama e o processo de adensamento foram os mesmos utilizados na caixa de acrílico, assim como o processo de instalação da estaca.

Um sistema de arrancamento foi desenvolvido, adaptando a montagem dos ensaios com arrancamento vertical. Uma roldana foi colocada entre a célula de carga e a estaca, esta foi presa em uma haste para que alcançasse o ângulo de arrancamento desejado. Este esquema foi apresentado no item 3.2.12.2.

No primeiro modelo foram instaladas três estacas, uma com olhal no topo, a segunda com olhal a 1/3 h da base e a terceira a 2/3 h da base. Essas posições

foram determinadas em função da modelagem numérica feita por Sukumaran (1998).

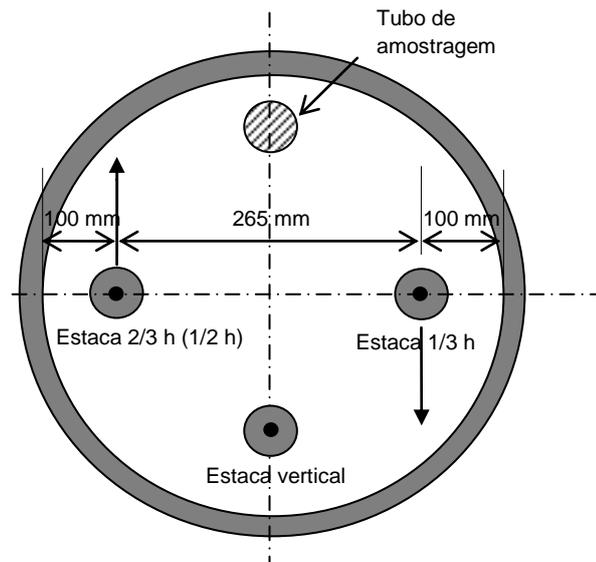


Figura 4.14 – Representação gráfica dos ensaios de arrancamento - *taut-leg* a 1 g.

Neste estudo, foi analisada a capacidade de suporte da estaca em função do ponto de ancoragem.

Os resultados do ensaio de arrancamento são apresentados nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17.

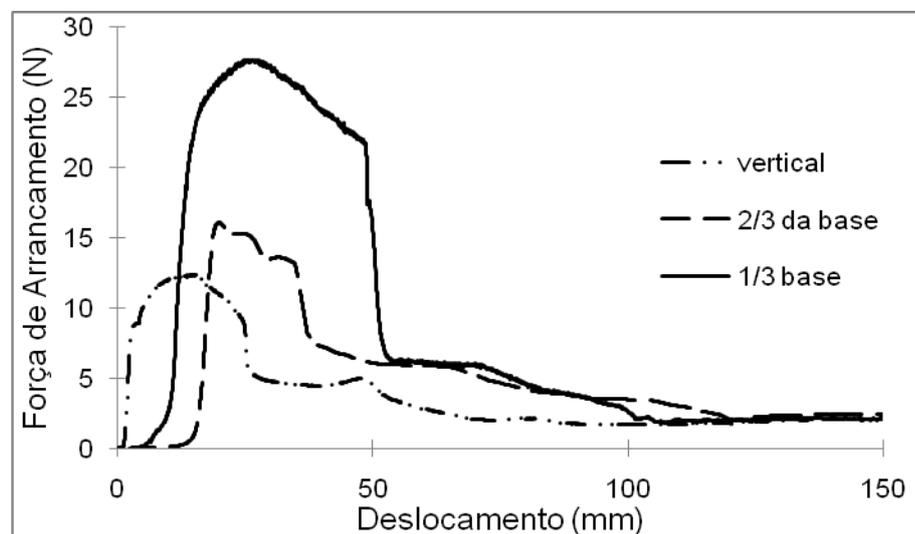


Figura 4.15- Curvas da força de arrancamento pelo deslocamento das estacas – modelo 09.

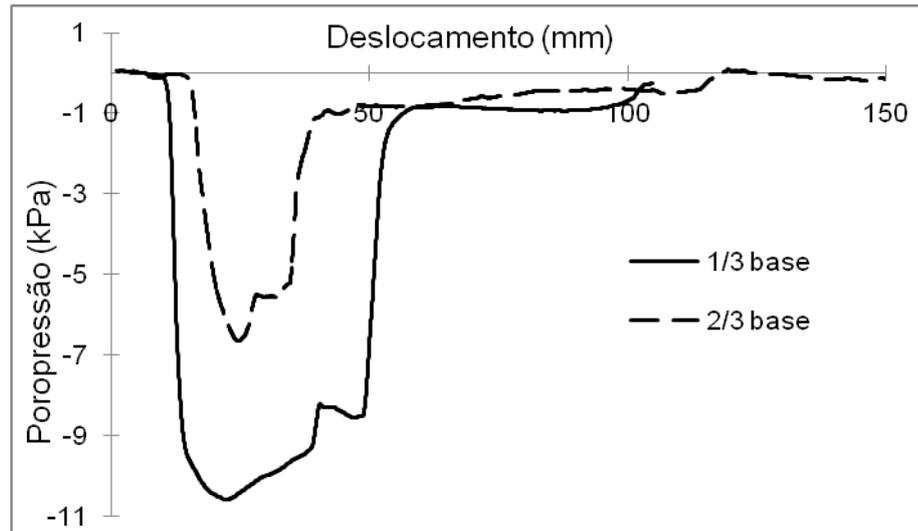


Figura 4.16- Curvas da poro-pressão durante o arrancamento das estacas – modelo 09.

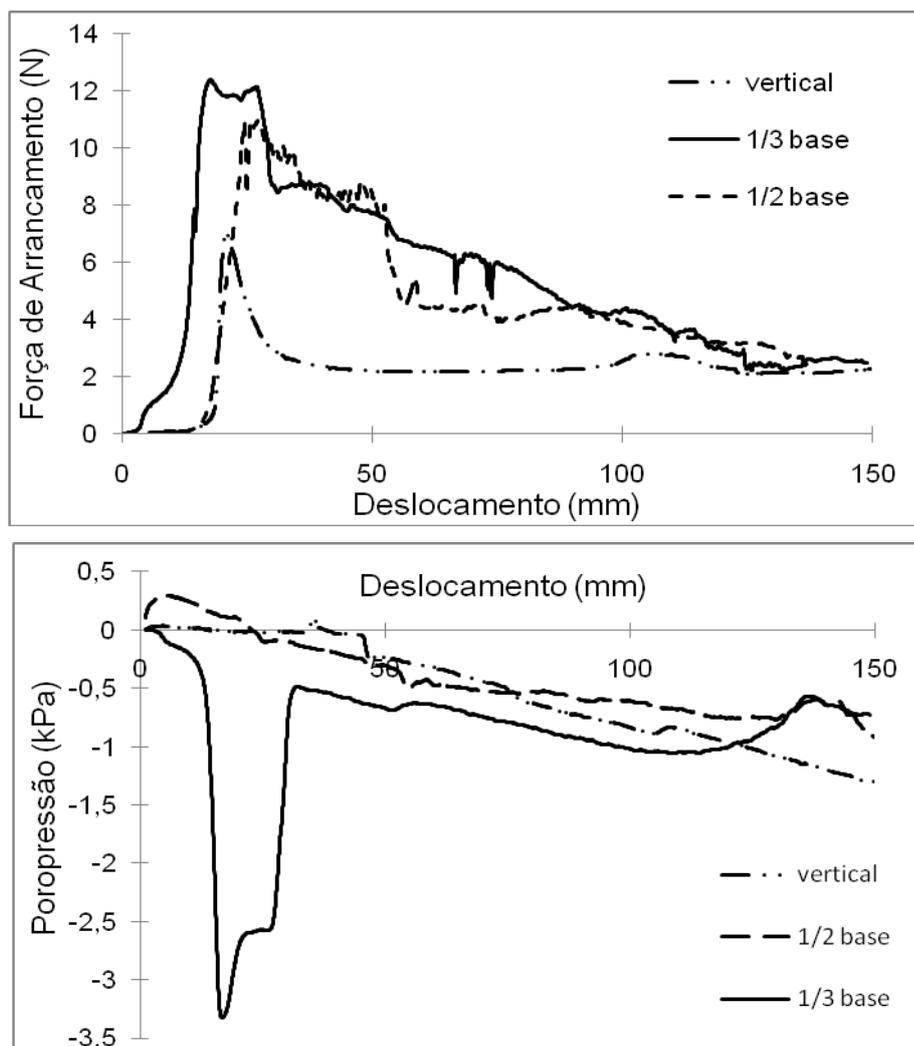


Figura 4.17- Resultados do ensaio de arrancamento das estacas – modelo 10.

4.2.2 Ensaio 50 g

Modelo 11:

Este modelo foi preparado para comparar a força de arrancamento das estacas com variação da parede externa num campo gravitacional de 50 vezes a aceleração da gravidade.

O modelo foi preparado adaptando a metodologia desenvolvida para os ensaios a 1g.

Neste modelo, foram posicionados dois transdutores de poro-pressão no solo, um na base e outro a 300 mm da base, para monitoração da poro-pressão durante o adensamento do solo e durante o ensaio de arrancamento. Para acelerar o adensamento do solo, foi colocada menor quantidade de solo na caixa de teste e o processo de eletro-osmose foi executado em etapas, conforme é apresentado no Anexo 03. O resultado do adensamento foi satisfatório e não ocorreram trincas na parte superior da amostra.

Após o adensamento, a caixa de teste foi colocada na centrífuga para o início do ensaio de arrancamento (Figura 4.18).

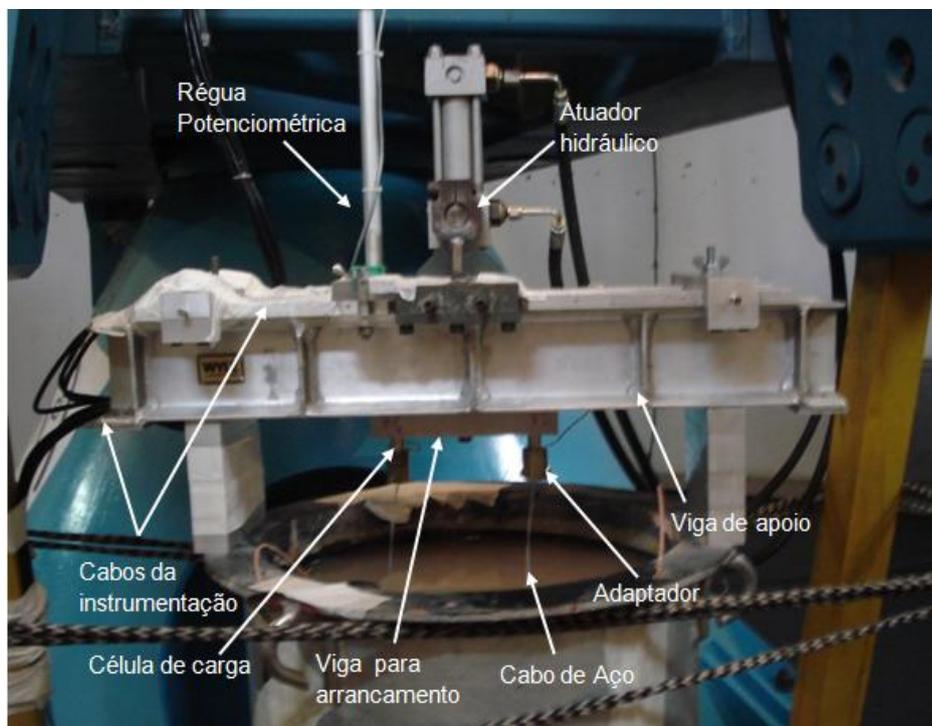


Figura 4.18- Montagem do ensaio na centrífuga geotécnica.

Não foi realizado o ensaio de mini palheta neste modelo devido a problemas na instrumentação do equipamento.

As estacas, lisa e rugosa, foram instaladas por sucção, conforme descrito no item 3.2.11. No esquema gráfico da Figura 4.19 é apresentado o posicionamento das estacas e do tubo de amostragem neste modelo.

Normalmente, a escala da modelagem centrífuga é a mesma utilizada na modelagem física, mas devido à limitação estrutural da caixa cilíndrica, os ensaios não poderiam ser feitos em acelerações inerciais superiores a 50 g.

Para evitar a diferença no comportamento do solo durante o arrancamento das estacas, resolveu-se fazer o arrancamento destas simultaneamente. Sendo o presente estudo executado para comparar a capacidade de suporte das estacas com geometrias diferentes, este procedimento garante as mesmas condições do solo para as duas estacas.

O primeiro estágio (vôo) do ensaio foi executado para finalizar o adensamento da amostra. O aumento da aceleração foi feito em incrementos de 10 g, como pode ser notado no gráfico da poro-pressão da Figura 4.20, em cada acréscimo da aceleração foi gerada um aumento da poro-pressão, sendo parte desta pelo aumento da carga hidráulica. Quando a aceleração de 50 g foi atingida, esta foi mantida por 30 minutos sem que houvesse o início da dissipação do excesso da poro-pressão gerada.

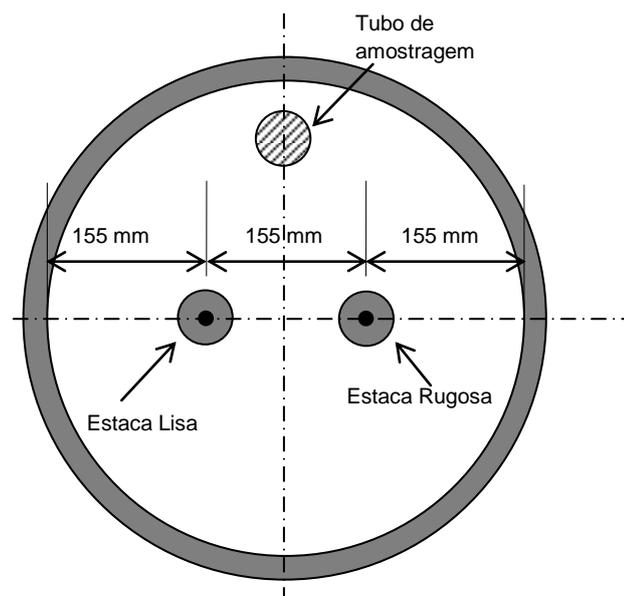


Figura 4.19 – Representação gráfica do ensaio da ancoragem vertical a 50 g.

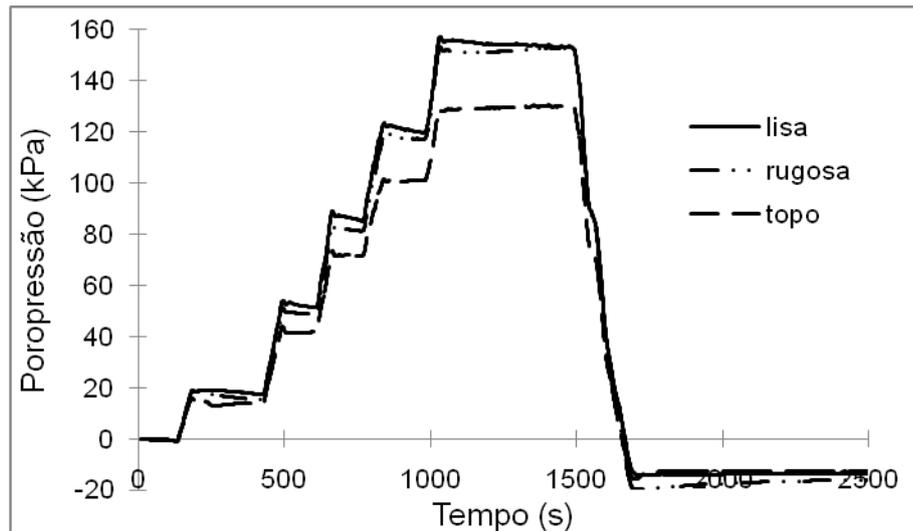


Figura 4.20- Poro-pressão gerada durante o ensaio em centrífuga.

Após este estágio, a centrífuga foi desacelerada para fazer o posicionamento do pistão do atuador hidráulico e a amarração dos cabos das estacas no adaptador (Figura 4.18). Os cabos foram presos com uma folga de aproximadamente 15 mm, devido o pistão recolher em torno de 5 mm durante o vôo. Este recuo foi notado nos ensaios de estaca torpedo feitos anteriormente neste laboratório. Este procedimento foi adotado para evitar que as estacas fossem arrancadas antes que a centrífuga alcançasse a aceleração de 50 g e fosse dissipado o excesso de poro-pressão gerado.

O ensaio de arrancamento foi iniciado quando a centrífuga atingiu novamente a aceleração de 50 g. O pistão foi totalmente recolhido com velocidade de 0.2 mm/s, a mesma utilizada nos ensaios a 1 g.

Após o arrancamento das estacas, foi feita a caracterização das buchas de solo formadas e a retirada do tubo de amostragem para fazer a caracterização do solo através do perfil de umidade e peso específico do solo. Neste ensaio foi moldado um corpo de prova para o ensaio de adensamento unidimensional. Os resultados do ensaio de arrancamento são apresentados na Figura 4.21.

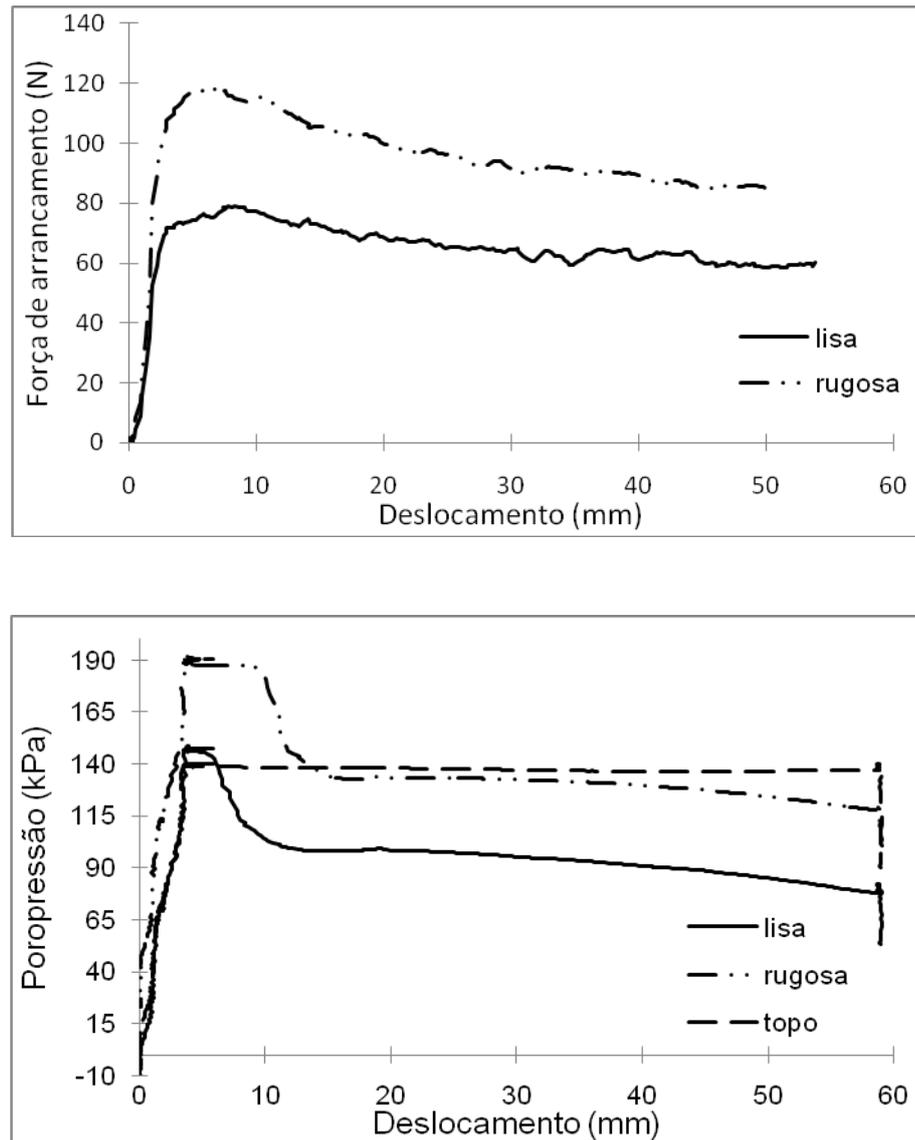


Figura 4.21- Resultados do ensaio de arrancamento das estacas – modelo 11.

A poro-pressão não pôde ser medida na base da amostra neste ensaio, devido a um problema de isolamento no transdutor.

Os resultados da caracterização do solo após a retirada das estacas são apresentados no Anexo 03.

Modelo 12:

Este modelo foi preparado conforme o modelo anterior. Toda a metodologia para a preparação da caixa de teste e as etapas do processo de adensamento foram rigorosamente repetidas.

Neste ensaio, os transdutores de poro-pressão foram colocados após o adensamento do solo por eletro-osmose, para garantir o posicionamento dos mesmos durante o ensaio de arrancamento. Foram feitos três furos, sendo dois com a profundidade de 107.5 mm ($H/2$) e o terceiro com a profundidade de 53.75 mm ($H/4$). Estes furos foram feitos através da cravação de uma haste de aço inox utilizando o atuador mecânico a uma velocidade de 0.5 mm/s.

Após o posicionamento dos transdutores devidamente saturados e calibrados (Figura 4.22), os furos foram preenchidos por uma lama preparada com a mesma composição do solo.

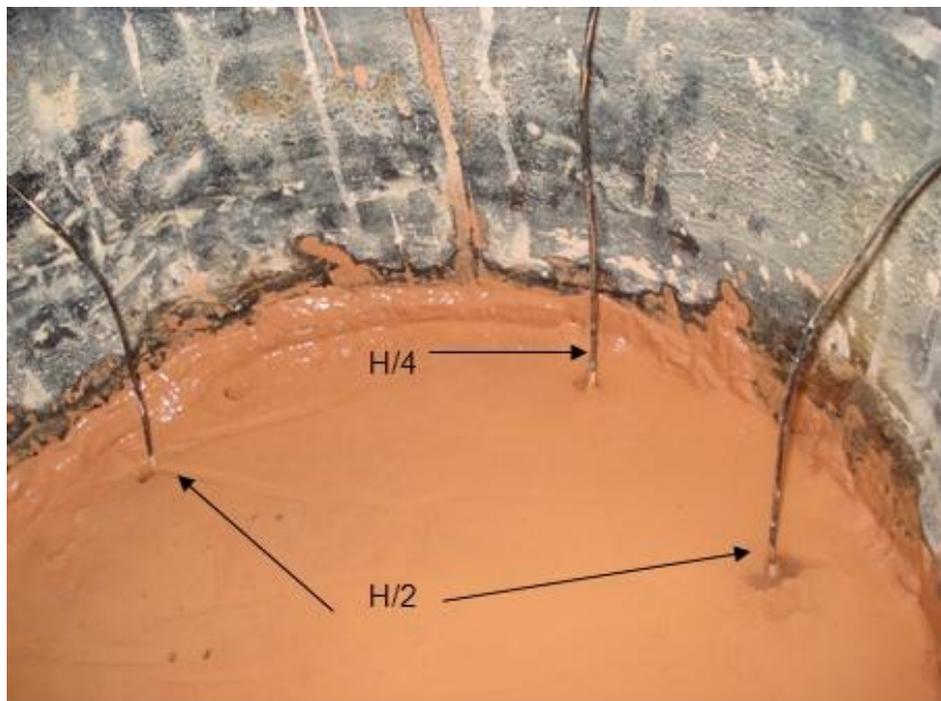


Figura 4.22 – Instalação dos transdutores de poro-pressão.

Após a instalação dos transdutores, a caixa teste foi colocada no cesto da centrífuga. As estacas foram instaladas de acordo com o esquema apresentado na Figura 4.23.

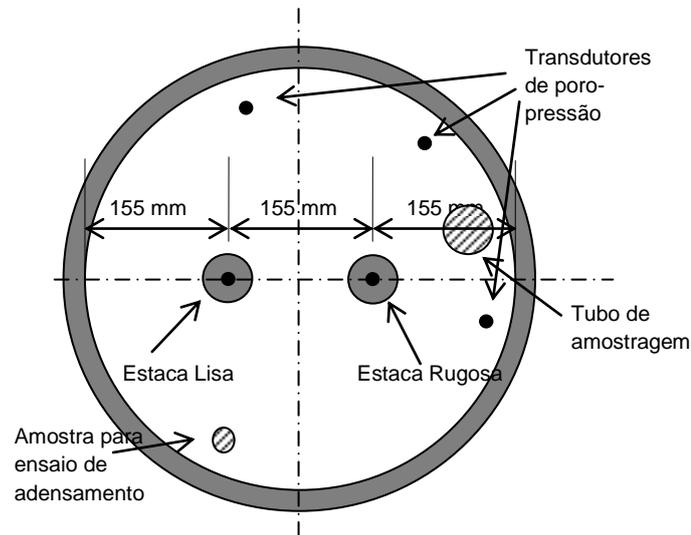


Figura 4.23 – Representação gráfica do posicionamento do ensaio - modelo 12.

As etapas do ensaio na centrífuga foram as mesmas realizadas no modelo anterior. Durante o vôo do adensamento, houve um problema com os cabos de aquisição da poro-pressão, interrompendo a aquisição de alguns transdutores durante o ensaio. Este fato pode ser notado no gráfico da Figura 4.24.

Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 4.25. No ensaio de arrancamento somente dois transdutores de poro-pressão foram aquisitados devido ao problema mencionado anteriormente, o instalado no topo da bucha da estaca lisa e o outro instalado no meio da amostra ($H/2$).

Após o ensaio de arrancamento foi retirado o tubo de amostragem e uma amostra para ensaio de adensamento. Isto foi executado para melhor avaliação dos parâmetros do solo já que não foi realizado o ensaio de mini palheta devido a problemas no equipamento.

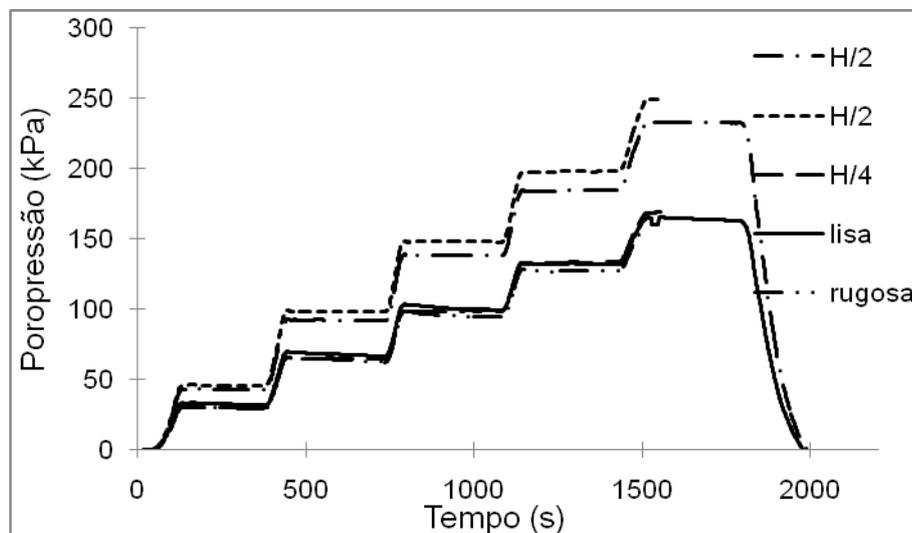


Figura 4.24- Poro-pressão gerada durante ensaio em centrífuga.

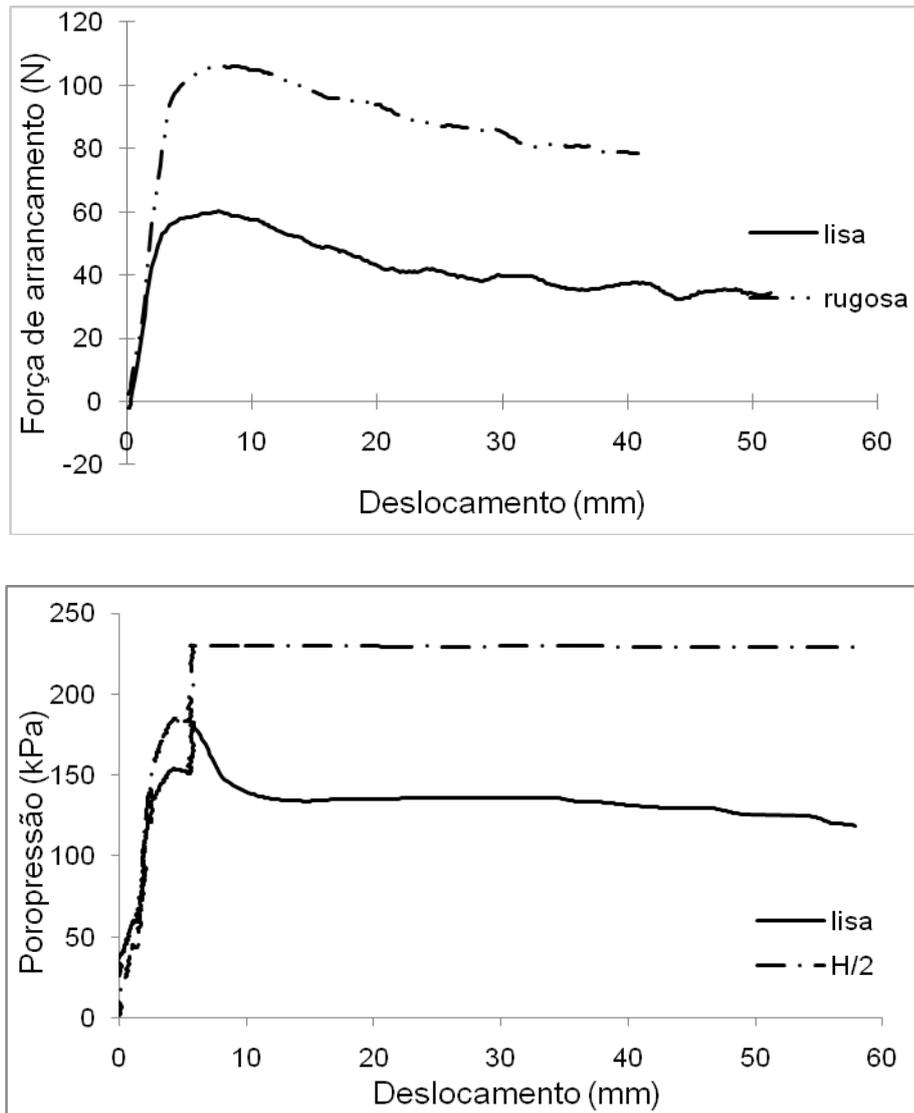


Figura 4.25- Resultados do ensaio de arrancamento das estacas – modelo 12.

CAPÍTULO 5 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas análises dos procedimentos adotados e resultados obtidos durante a execução dos ensaios.

5.1 Ensaio a 1 g

5.1.1 Adensamento do modelo de solo

Após as 72 horas iniciais de repouso do modelo, observou-se, através dos resultados obtidos durante os ensaios de mini palheta, a baixa resistência ao cisalhamento não drenada do modelo, o que dificultaria a cravação das estacas por sucção.

Desta forma, procedeu-se o adensamento por eletro-osmose induzindo fluxo vertical, inicialmente da parte superior do modelo para a inferior e, posteriormente, da parte inferior para a superior. A inversão da polaridade objetivava obter uma amostra com a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) constante com a profundidade. Destaca-se que o procedimento foi empregado associado à aplicação de uma sobrecarga no topo do modelo, como é descrito nas etapas do adensamento apresentado no Anexo 03. Esta sobrecarga mostrou garantir a “qualidade” da amostra.

Após a execução do processo de eletro-osmose, verificou-se, com base nos resultados dos ensaios de mini palheta, que a resistência ao cisalhamento não drenada aumentou consideravelmente, sugerindo que a técnica adotada atingiu as metas pré-definidas para os ensaios.

Os resultados das resistências ao cisalhamento não drenadas são apresentados na Tabela 5.1 e a Figura 5.1 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento (S_u) com a profundidade em cada modelo, incluindo os resultados obtidos no modelo o qual não houve nenhum processo de adensamento.

Com a caracterização da amostra de material extraída do modelo de solo, realizada após o ensaio de arrancamento das estacas, puderam ser traçados os perfis de umidade e de peso específico saturado, por meio dos quais se confirma o ganho de resistência da amostra. Estes resultados estão apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3.

A partir dos ensaios de adensamento unidimensional realizados com corpo de prova retirado de profundidade de 230 mm (modelo 03), foram determinada a tensão de

pré-adensamento pelo método gráfico proposto por Casagrande. O valor obtido foi 5.9 kPa.

Pode-se observar que o processo de eletro-osmose associado à aplicação de sobrecarga no topo do modelo surtiu o efeito desejado, pois a resistência não drenada aumentou consideravelmente, tanto na base da amostra, como no topo.

Tabela 5.1- Resultados dos testes de mini palheta.

Resistência ao cisalhamento não drenada - S_u (kPa)							
Profundidade (m)	Modelo 01	Modelo 03	Modelo 06	Modelo 07	Modelo 08	Modelo 09	Modelo 10
0.05	1.54	24.30	4.58	16.98	13.5	9.16	13.06
0.10	1.93	24.04	4.12	16.03	18.32	13.74	14.89
0.15	2.06	21.98	6.87	13.74	13.26	17.18	17.18
0.20	2.06	22.37	7.56	13.74	9.16	27.5	12.82
0.25	2.44	19.30	9.16	16.03	2.17	-	16.03
0.30	2.06	-	9.17	-	6.41	-	-

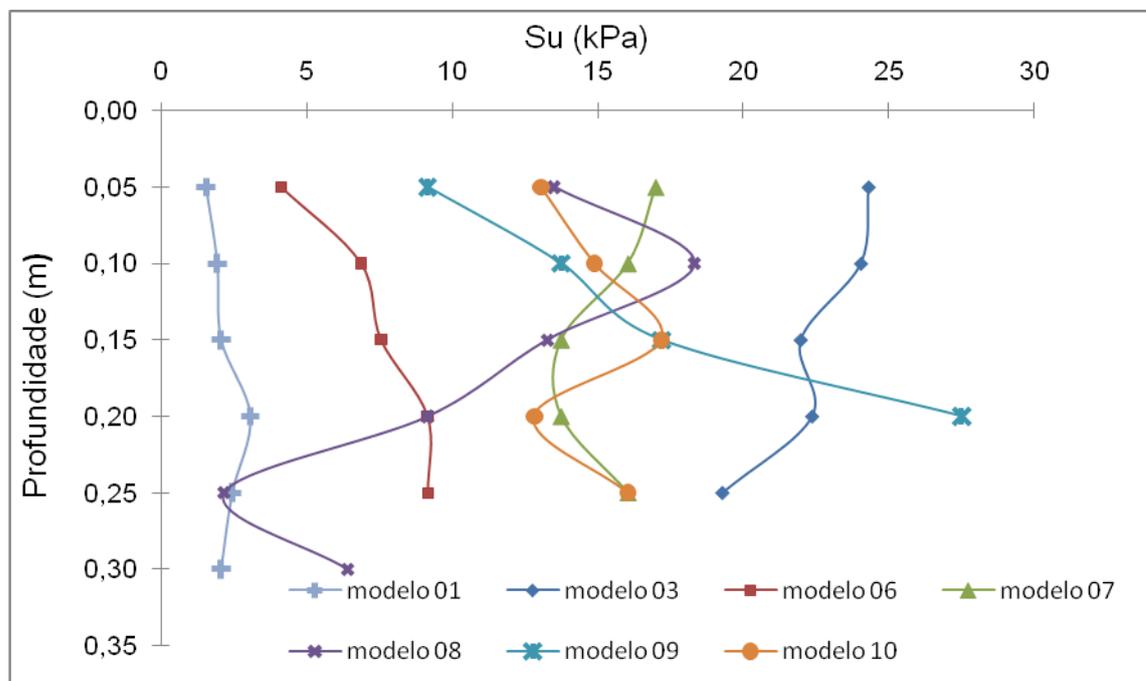


Figura 5.1 – Resistência ao cisalhamento não drenada após adensamento.

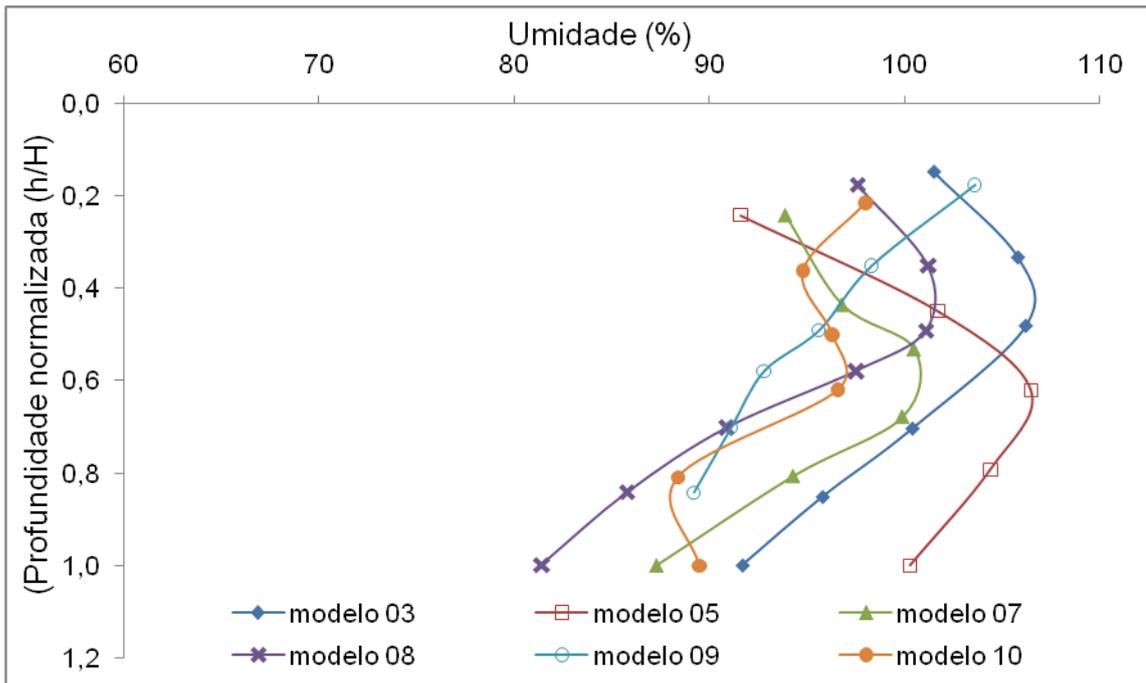


Figura 5.2 – Perfil de umidade dos modelos utilizados nos ensaios a 1 g.

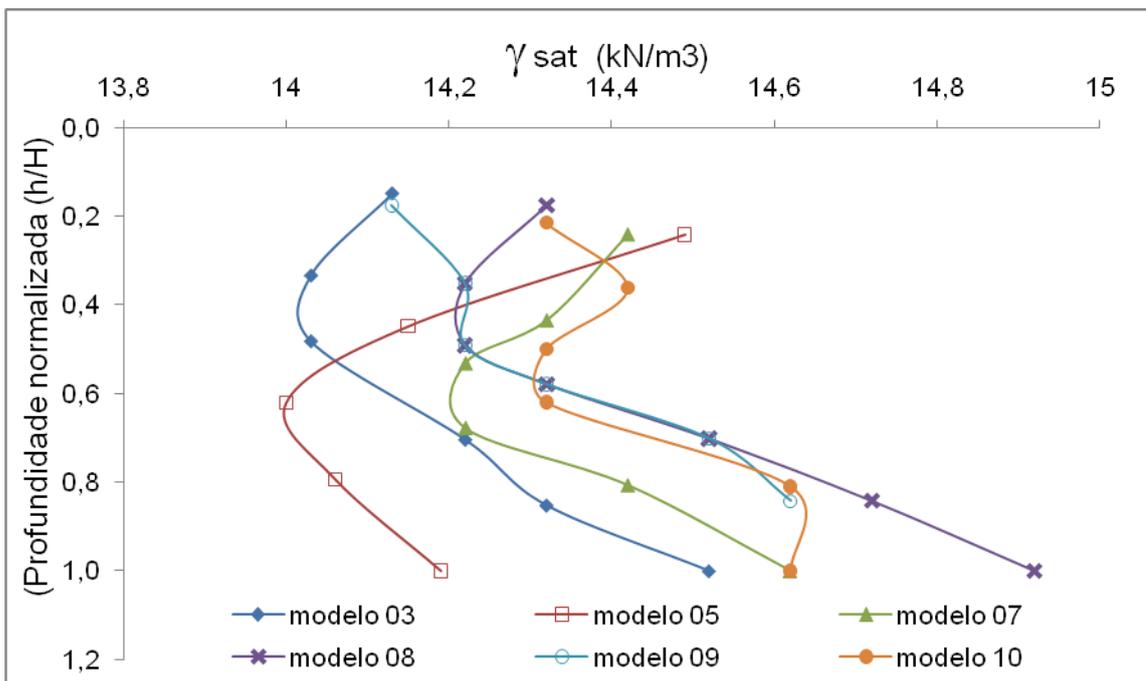


Figura 5.3- Perfil do peso específico saturado dos modelos ensaiados a 1 g.

Em alguns modelos ocorreram trincas na parte superior da amostra, observando-se uma menor resistência nesta região, como por exemplo no modelo 06 e 09. Estas

trincas podem ter sido formadas devido aos vários problemas que ocorreram em conjunto ou isoladamente, tais como: fio do eletrodo preso na caixa teste; atrito do geotêxtil utilizado na colocação da sobrecarga com a parede da caixa teste; limpeza do eletrodo; tensão alta aplicada no processo.

No modelo 08 observou-se uma trinca na parte inferior da amostra, causando um canal de fluxo e uma menor resistência na base da amostra.

Em alguns modelos ocorreu contração volumétrica, tanto na base como no topo da amostra. Esta contração foi notada após o aumento da tensão para 25 Volts.

A oxidação dos eletrodos, descrito no capítulo anterior, é considerável na eficiência da eletro-osmose como método de adensamento. Para serem re-utilizados, os eletrodos devem estar bem limpos (lixados), caso contrário, a eletro-osmose não tem a eficiência desejada. Este fato foi observado no modelo 06, pois neste não foi feita a preparação adequada das chapas metálicas re-utilizadas e, por isto, o ganho de resistência ao cisalhamento não drenado do solo foi inferior aos alcançados pelos modelos 03 e 09, onde foram usadas placas novas.

Este problema também ocorreu no modelo 12, no qual se observou, através da análise táctil-visual, a menor consistência do solo se comparado com o modelo anterior, modelo 11, que foi utilizado como referência para execução da metodologia do adensamento nos ensaios a 50 g.

Estes problemas ocorridos na modelagem dos solos estão apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5.

5.1.2 Instalação da estaca por sucção

No modelo do solo sem adensamento, foram executados dois ensaios: o primeiro com a cravação da estaca pelo atuador mecânico a uma velocidade de 0.5 mm/s e o segundo com a instalação da estaca por sucção. No primeiro ensaio, não houve a formação da bucha de solo no interior da estaca. Já no segundo, onde a estaca foi instalada por sucção, houve a formação da bucha, mesmo sendo este solo uma argila muito mole.

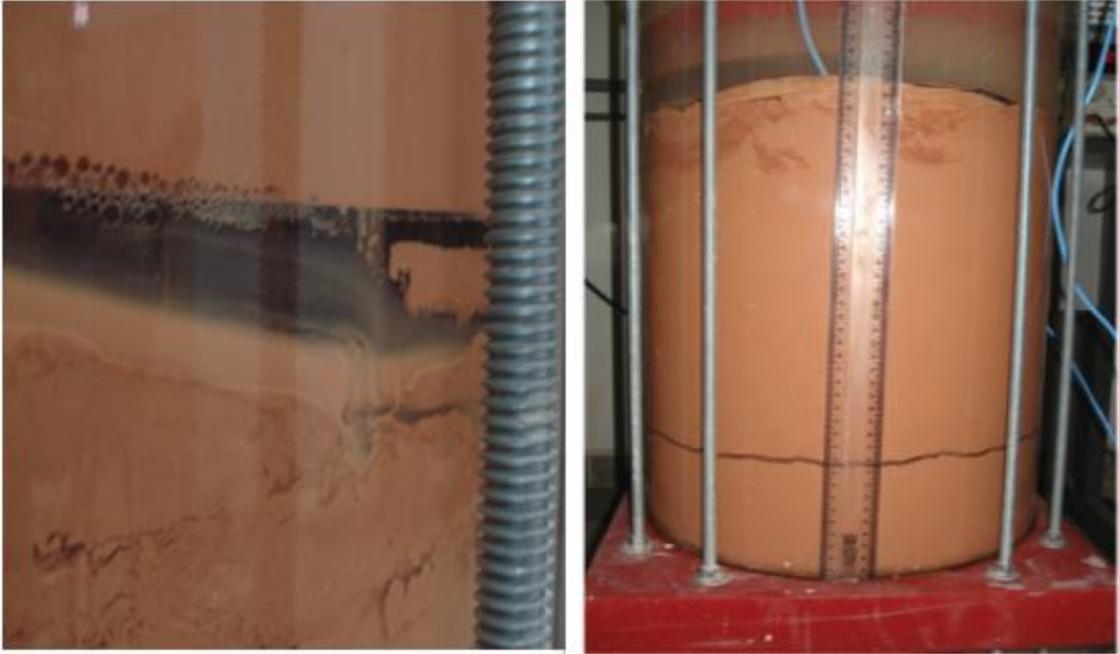


Figura 5.4 – Contração volumétrica e trincas ocorridas nos modelos 06 e 08.

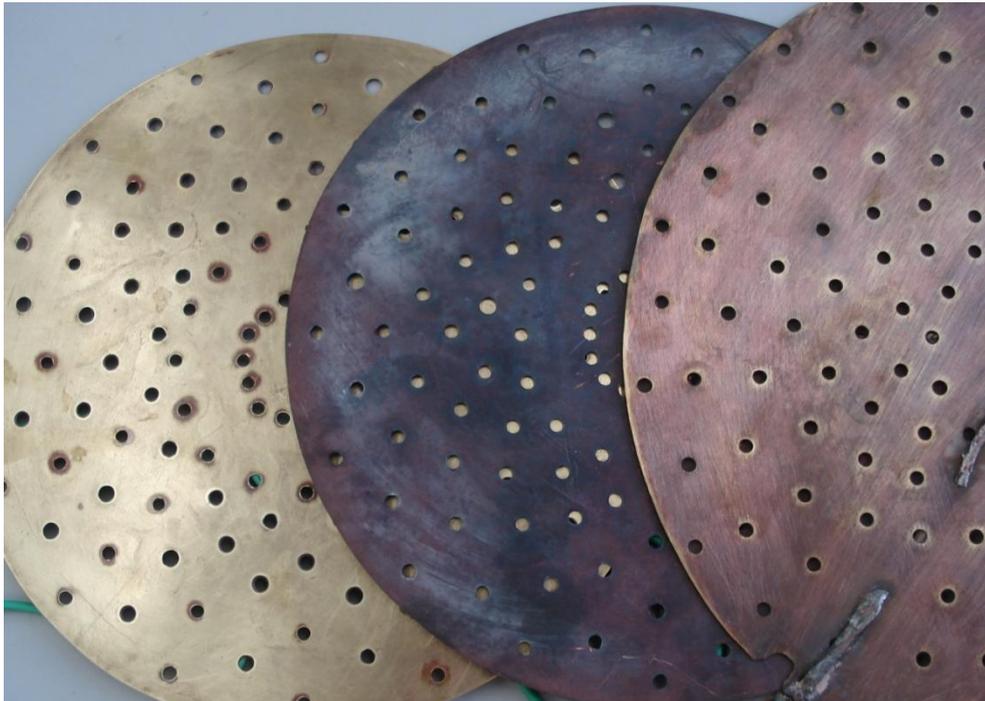


Figura 5.5 – Eletrodos antes e depois do processo e preparado para novo ensaio.

Um cuidado que deve ser tomado na instalação das estacas em solos muito moles é com a aplicação da sucção, pois a estaca pode ser cravada a uma profundidade superior à projetada para o estudo.

Nos modelos estudados, o procedimento de instalação por sucção desenvolvido foi eficiente, comprovado pela formação da bucha de solo no interior das estacas ensaiadas, tanto nos ensaios com arrancamento vertical como nos arrancamentos inclinados (*taut-leg*). Na Figura 5.6 são mostradas as buchas de solo formadas no interior das estacas em alguns modelos executados. Em algumas estacas ocorreu a presença de água no seu interior e, conseqüentemente, a formação de uma bucha parcial. Isso pode ter sido ocasionado por algum vazamento na interface de aplicação do vácuo ou falha na vedação da estaca.



Figura 5.6 – Bucha de solo formada no interior da estaca.

A existência da bucha de solo no interior da estaca confere maior força de arrancamento, pois o peso da bucha formada é adicionado ao peso da estaca no cálculo da capacidade de suporte da estaca.

Nas estacas rugosas pode ser notada a presença de solo aderido nas ranhuras (“dentes”), aumentando assim o peso da estaca durante o arrancamento. Este fato também pode ter influenciado no modo de ruptura da estaca, esta análise será proposta para estudos futuros.

5.1.3 Ensaio de arrancamento das estacas

Os sistemas de arrancamento das estacas nos ensaios a 1 g, tanto em ancoragem vertical como em *taut-leg*, tiveram o desempenho esperado. A execução dos ensaios de arrancamento das estacas é apresentada na Figura 5.7.

Os resultados da força de arrancamento das estacas lisa e rugosa são aproximadamente iguais. As comparações entre os modelos são apresentados na Figura 5.8. Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados da força de arrancamento das estacas lisa e rugosa, simulando uma ancoragem vertical, sendo estes na ordem de 10 N.



Figura 5.7 – Ensaio de arrancamento a 1 g.

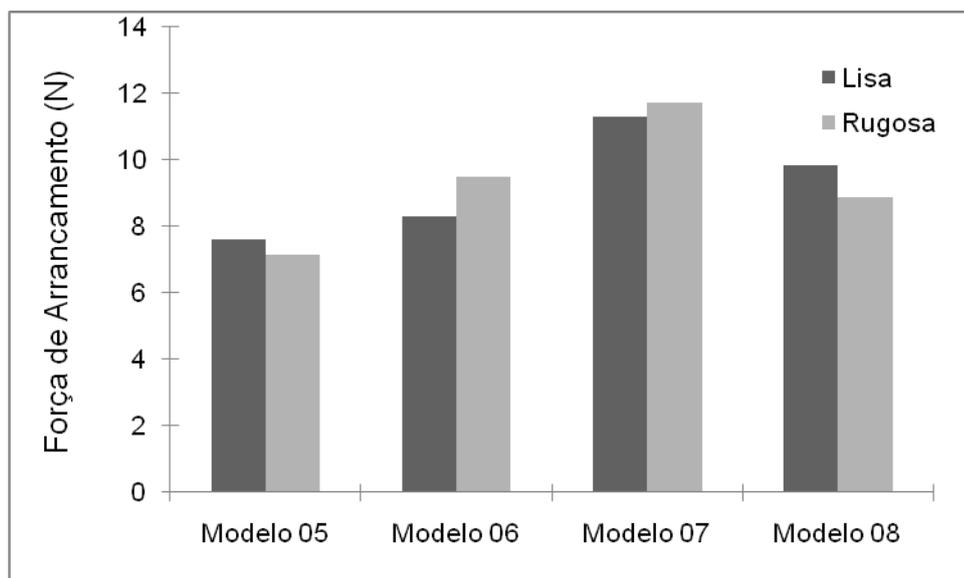


Figura 5.8- Resultados dos ensaios de arrancamento com ancoragem vertical.

A força de arrancamento das estacas rugosas não alcançou o resultado esperado pela presença das ranhuras na parede externa das estacas. Este fato motivou a realização de ensaios de arrancamento na centrífuga geotécnica, com aceleração artificial de 50 vezes a aceleração da gravidade terrestre, e assim comprovar a eficiência das ranhuras para se obter uma maior resistência ao arrancamento.

Na Tabela 5.3 são apresentadas as características das buchas de solo formadas no interior das estacas após os ensaios de arrancamento a 1 g.

Tabela 5.2- Força de arrancamento das estacas submetidas à solicitação vertical.

ESTACA	FORÇA DE ARRANCAMENTO (N)			
	MODELO 05	MODELO 06	MODELO 07	MODELO 08
Lisa	7.62	8.31	11.32	9.86
Rugosa	7.16	9.51	11.73	8.88

Nos ensaios simulando ancoragem em *taut-leg*, foi comprovado que as estacas com ponto de ancoragem na parte inferior da estaca (1/3 da altura) têm maior força de arrancamento do que as que possuem o ponto de fixação na parte superior (2/3 da altura ou no topo). Esta comparação é apresentada na Figura 5.9.

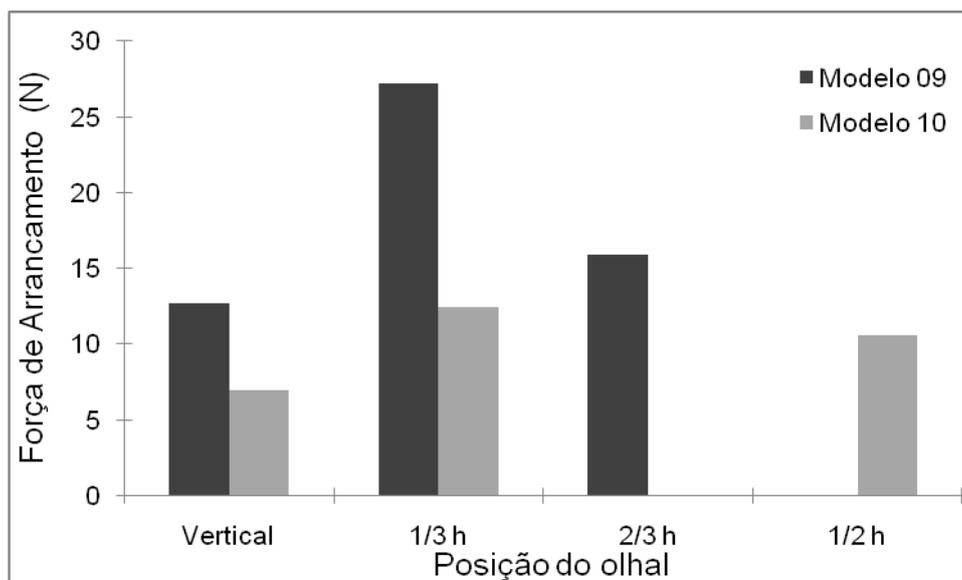


Figura 5.9- Resultados dos ensaios de arrancamento com ancoragem em *taut-leg*.

Tabela 5. 3- Características da instalação das estacas por sucção - vertical.

Características da instalação das estacas			
Modelo	Estaca	Altura cravada (mm)	Altura da bucha (mm)
05	Lisa	145	65
	Rugosa	145	143
06	Lisa	145	130
	Rugosa	145	143
07	Lisa	145	135
	Rugosa	145	143
08	Lisa	135	130
	Rugosa	145	143

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores máximos da força de arrancamento de cada estaca. Pode ser notado que as estacas quando solicitadas lateralmente têm um valor superior do que quando solicitada axialmente.

Tabela 5.4- Força de Arrancamento das estacas submetidas à solicitação inclinada.

ESTACA	FORÇA DE ARRANCAMENTO (N)	
	MODELO 09	MODELO 10
Vertical	12.70	6.96
1/3 h	27.25	12.41
2/3 h	15.91	-

1/2 h	-	10.60
-------	---	-------

Na Tabela 5.5 são apresentadas as características das buchas de solo formadas no interior das estacas após os ensaios de arrancamento.

Tabela 5.5- Características da instalação da estacas por sucção – *taut-leg*.

Características da instalação das estacas			
Modelo	Estaca	Altura cravada (mm)	Altura da bucha (mm)
09	Vertical	145	140
	1/3 h	140	143
	2/3 h	145	145
10	Vertical	145	105
	1/2 h	145	110
	1/3 h	145	145

5.2 Ensaio a 50 g

Os ensaios executados na centrífuga geotécnica foram preparados para comparar a força de arrancamento da estaca de sucção em função da geometria da sua parede externa. Nestes ensaios, tanto as estacas com parede lisa quanto as com parede rugosa foram instaladas por sucção, seguindo a metodologia desenvolvida nos ensaios a 1 g.

5.2.1 Adensamento do modelo de solo

O modelo de solo foi adensado pelo processo de eletro-osmose com fluxo vertical e aplicação de sobrecarga no topo. Este processo foi executado através de etapas, sendo estas descritas no Anexo 03.

A partir dos ensaios de adensamento unidimensional realizados com corpos de prova retirados de profundidades de 150 mm (modelo 11) e 140 mm (modelo 12), foram determinadas tensões de pré-adensamento pelo método gráfico proposto por Casagrande. Os valores obtidos foram 13 e 12 kPa.

Pela análise táctil-visual dos modelos, observou-se que o solo do modelo 11 apresentou mais consistência que o solo do modelo 12.

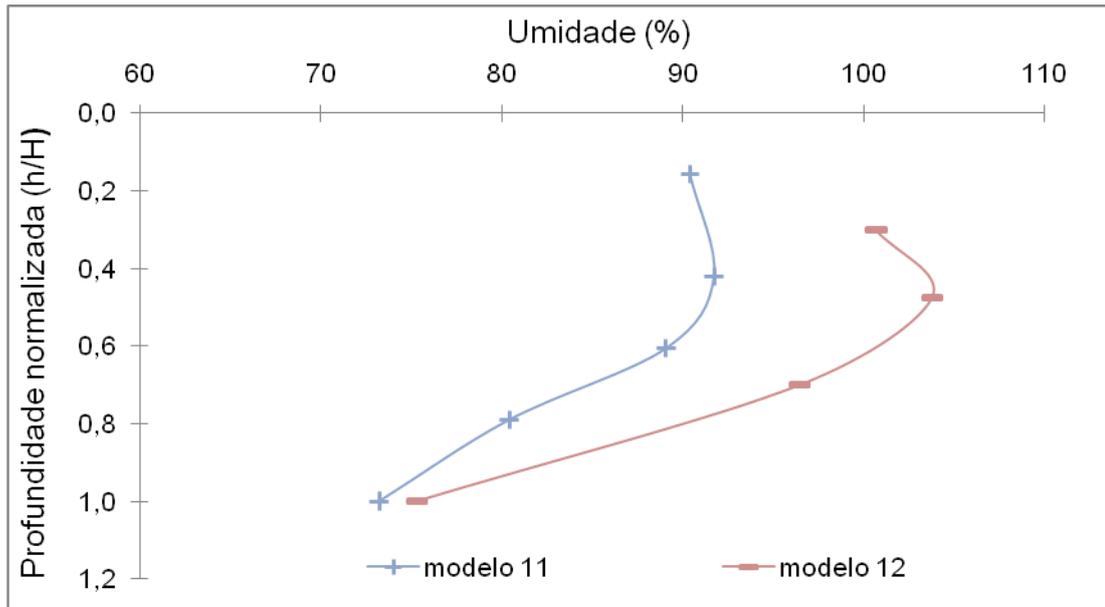


Figura 5.10 - Perfil de umidade dos modelos ensaiados a 50 g.

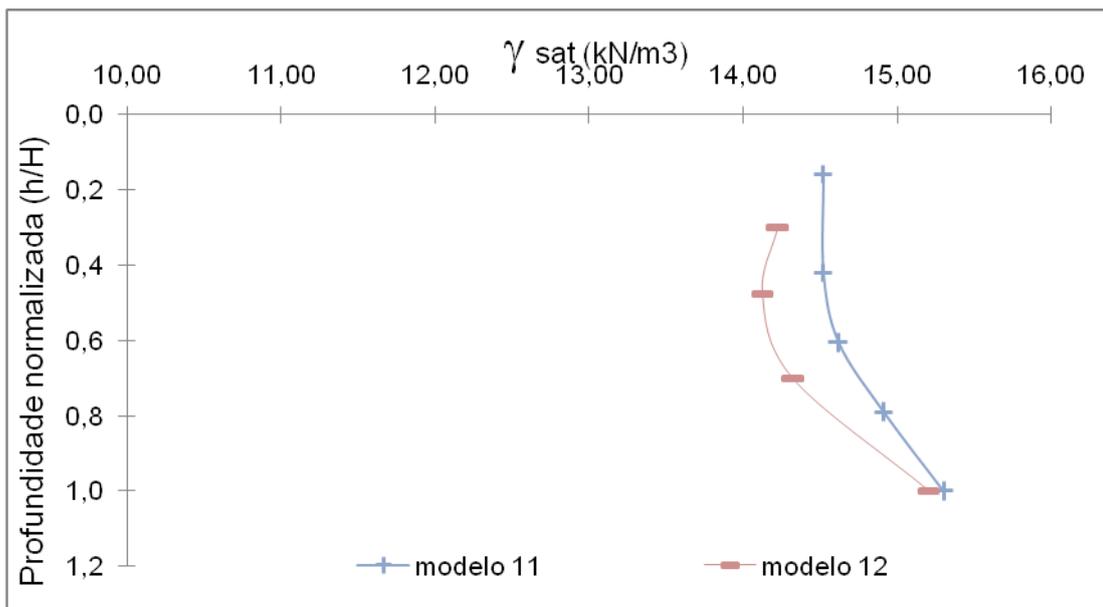


Figura 5.11- Perfil do peso específico saturado dos modelos ensaiados a 50 g.

A caracterização dos modelos 11 e 12 após o ensaio de arrancamento das estacas são apresentadas a partir dos perfis do teor de umidade e do peso específico (Figuras 5.10 e 5.11).

De acordo com os gráficos das poro-pressões durante o primeiro vôo de cada modelo (Figuras 4.18 e 4.23), nota-se que não ocorreu à dissipação da poro-pressão e, conseqüentemente, não houve o adensamento do solo durante o vôo.

5.2.2 Instalação das estacas por sucção

A instalação das estacas por sucção garantiu a formação da bucha de solo no interior da estaca. Nestes modelos, não foram caracterizadas as buchas de solo, pois não houve o arrancamento total das estacas, devido ao curso do atuador hidráulico utilizado ser menor do que a altura da estaca.

5.2.3 Ensaio de arrancamento das estacas

O sistema de arrancamento simultâneo das estacas desenvolvido para os ensaios na centrífuga alcançou o resultado esperado, garantindo as mesmas condições do solo durante o arrancamento para as duas estacas. Esse fator permite uma melhor comparação entre os valores da força de arrancamento de cada estaca.

Nos ensaios de arrancamento foi comprovado que a estaca com a parede rugosa tem uma força de arrancamento maior comparada com a de parede lisa. Esta comparação é apresentada no gráfico da Figura 5.12 e na Tabela 5.6.

A força de arrancamento da estaca de sucção é composta pela resistência de ponta, pelo peso próprio da estaca somado ao peso da bucha de solo formada no seu interior e pelo atrito lateral entre o solo e a parede da estaca. Retirando o peso da bucha de solo somado ao peso próprio da estaca e considerando que o solo é homogêneo e que as estacas estão sujeitas as mesmas condições durante o arrancamento, pode-se concluir que a diferença entre as forças de arrancamento das estacas foi devido ao atrito lateral entre a parede externa da estaca e o solo.

Os resultados alcançados nestes ensaios comprovam o aumento da força de arrancamento das estacas rugosas em comparação com as estacas lisas.

O estudo ideal seria se todas as etapas do ensaio fossem feitas durante o vôo: adensamento, instalação e arrancamento das estacas, assim como a caracterização do perfil de resistência não drenada ao cisalhamento do modelo de solo através do teste de mini palheta.

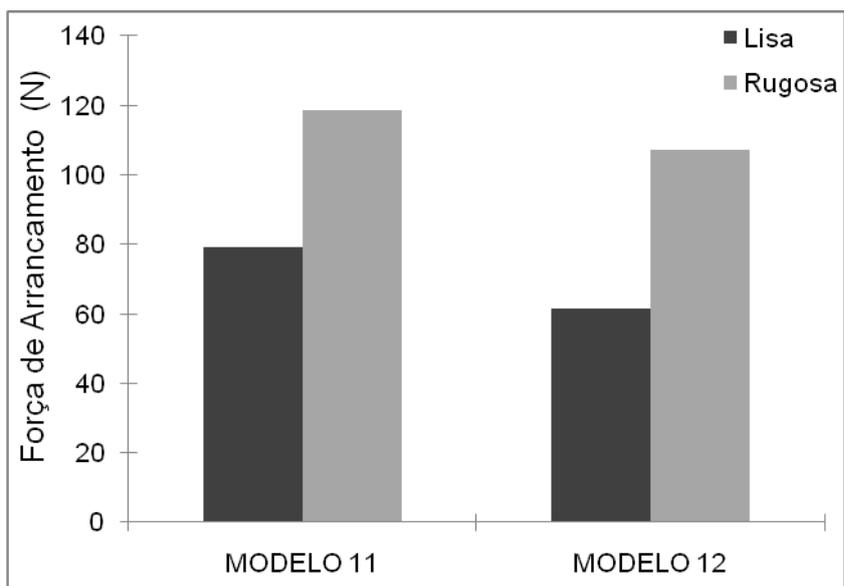


Figura 5.12 - Resultados dos ensaios de arrancamento a 50 g.

Tabela 5.6- Força de arrancamento das estacas a 50 g.

ESTACA	FORÇA DE ARRANCAMENTO (N)	
	MODELO 11	MODELO 12
Lisa	79.04	61.57
Rugosa	118.80	107.20

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foram apresentados os procedimentos e resultados de uma pesquisa experimental que teve como objetivos: desenvolver uma metodologia para a modelagem física em escala reduzida em ensaios a 1 g; avaliar o desempenho das estacas de sucção, comparando a geometria da parede externa quando submetida a esforços verticais e, quando submetidas a um sistema de ancoragem *taut-leg*, comparar a resistência ao arrancamento em função do ponto de fixação da ancoragem.

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que:

- o adensamento por eletro-osmose com fluxo vertical associado à colocação de sobrecarga no topo da amostra é eficiente para o adensamento de lamias;
- a metodologia desenvolvida para ensaios em escala reduzida, para arrancamento de estacas de sucção submetidas a esforços verticais e combinados, em condição 1 g, funcionou satisfatoriamente;
- o sistema de sucção desenvolvido foi satisfatório, criando no interior das estacas uma bucha de solo, mesmo nos solos mais moles;
- o sistema de arrancamento desenvolvido possibilitou o ensaio em qualquer posição na caixa de teste, tanto em solicitação axial, como em solicitação combinada;
- a estaca com a parede rugosa nos ensaios a 1 g não ofereceu uma eficiência maior comparada a estaca com parede lisa, quando estas foram solicitadas axialmente. Após os ensaios realizados na centrífuga geotécnica em condições de 50 vezes a aceleração da gravidade terrestre, foi comprovada a eficiência da colocação dos “dentes” na parede externa da estaca, aumentando a resistência ao arrancamento vertical.
- o ponto de fixação da ancoragem em *taut-leg*, quando posicionada na metade inferior do comprimento da estaca, possui uma eficiência maior comparada com a fixação na terça parte superior da estaca.

ESTUDOS PROPOSTOS

- aperfeiçoar a metodologia desenvolvida neste trabalho, no que diz respeito à preparação e caracterização dos modelos físicos;
- ensaios com carregamento inclinado (*taut-leg*) sob carregamento dinâmico e cíclico, simulando as condições ambientais em 1 g e na centrífuga geotécnica a 50 g;
- avaliar o desempenho de estacas de sucção com diferentes geometrias, utilizando instrumentos específicos para determinação de grandezas físicas necessárias à definição dos mecanismos de ruptura, e confrontar os ensaios em centrífuga com modelos numéricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albert, L.F.; Holtz, R.D.; Magris, E. (1989). Super pile system, a feasible alternative foundation for TLP in deep water. *Marine Geotechnology*. 8:135-158.
- Allersma, H.G.B.; Plenevaux, F.J.A.; Wintgeas J.F.C.M.E. (1997). Simulation of Suction Pile Installation in Sand in a Geocentrifuge. *7th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu, USA. p.761-766.
- Allersma, H.G.B.; Kirstein, A.A.; Brinkgreve, R.B.J. (2001). Centrifuge and numerical modelling of suction pile behavior under various loading conditions. *15th Int. Conf. for Soil Mech. And Foundation Eng.*, Istanbul, pp.1327-1330.
- Allersma, H.G.B.; Hogervorst, J.R.; Pimouille, M. (2001). Centrifuge modelling of suction pile installation using a percussion technique. *International Offshore and Polar Engineering Conference ISOPE 2001*, Stavanger, pp.260-265.
- Amaral, C.S., (2008). A Geotecnia Marinha Aplicada à Engenharia Offshore na indústria de Óleo e Gás no Brasil. *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Búzios – RJ, Brasil, V 1: 62-74
- Andersen, K.H.; Dyvik, R.; Schroeder, K.; Hsndteen, O. E.; Bysveen, S. (1993). Field tests of anchors in clay II: Predictions and interpretation. *J. of Geotech. Engrg. ASCE*, 119 (10), 1532-1549.
- Andersen, K.H.; Jeanjean, P.; Luger, D.; Jostad, H.P. (2003). Centrifuge Tests on Installation of Suction Anchors in Soft Clay. *Int. Symp. On Deepwater Mooring Systems*, Houston, Texas, USA, 13-27.
- Andersen, K.H.; Jeanjean, P.; Luger, D.; Jostad, H.P. (2004). Centrifuge Tests on Installation of Suction Anchors in Soft Clay. *Ocean Engineering* 32: 845-863.
- Andersen, K.H.; Murff, J.D.; Randolph, M. F.; Erbrich, C.; Jostad, H.P.; Hansen, B.C., Albeny, C.; Sharma, P.; Supachawarote, C. (2005). Suction Anchors for deepwater applicarions. *Proc. Fo International Symposium of Frontiers in Offshore Geotchnics*. ISFOG' 05, Perth, Australia, 3-30.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Determinação do limite de Liquidez: NBR 6459-84. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986) Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização, NBR 6457-86. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). Análise Granulométrica: NBR 7181. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Determinação da massa específica dos grãos. NBR 6508. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). Ensaio de adensamento unidimensional: ABNT – MB 3336-90, Rio de Janeiro.

Bakker, T.T.; Heer, M.A.; Heerema, A.E.; Smeets, P. (2006). Theory of a vertically loaded suction pile in clay. *Offshore Engineering*; TU Delft; <http://www.offshoremoorings.org/moorings> em 15/04/2009.

Bjerrum, L.; Moum, J.; Eide, O. (1967). Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian Quick Clay. *Geotechnique* 17: 214-235.

Brum Jr, S.A. (2009). Ensaio de centrifugação para avaliação do desempenho de penetrômetros dinâmicos para ancoragens de estruturas *offshore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goitacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 128p.

Byrne, P.M.; Finn, W.D. (1978). Breakout of submersed structure buried to a shallow depth. *Canadian Geotechnical Journal*. V. 15:146-154.

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

Carbono, A.J. J. (2005). Otimização da disposição de linhas de ancoragem utilizando algoritmos genéticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 91 p.

Casagrande, I. L. (1949). Electro-Osmosis in soils. *Geotechnique*. v.1, p.1959-1977.

Chen, W.; Randolph, M.F. (2004a). Radial Stress Changes around caissons installed in Clay by jacking and by suction. *Proc. Of 14th Int. Offshore and Polar Engng. Conference ISOPE 2004, Toulon, France, 493-499.*

Chen, W.; Randolph, M.F. (2007). External Radial Stress Changes and Axial Capacity for Suction Caissons in Soft Clay. *Géotechnique*. 57: 499-511.

Deep Sea Anchors, Deep Sea Anchors AS. Disponível em <http://www.deepseaanchors.com/index.html>. Acesso em 03/04/2010.

Delmar, Delmar North Sea Ltda. Disponível em <http://www.delmarus.com/site66.php>. Acesso em 06/03/10.

Deng, W. & Carter J. P. (2000). A theoretical study of the vertical uplift capacity of suction caissons. *Proc. Of 10th Int. Offshore and Polar Engng. Conf., ISOPE' 2000, Seattle, USA, 342-349.*

Dillinger, Dillinger Hüte GTS, Alemanha. Disponível em <http://www.dillinger.de/dh/referenzen/offshore/01634/index.shtml.en>. Acesso em 06/03/10.

Ehlers, C.J.; Young, A.G.; Chen, J.H. (2004). Technology assessment of deepwater anchors. CD-ROM *Proceedings of the 2004 Offshore Technology Conference*, Houston: Houston's Reliant Center at Reliant Park, paper nº OTC 16840.

El-Gharbawy, S.L.; Olson, R.E. (1998). Laboratory Modeling of Suction Cassion Foundation, *Proceedings of the 8th International Offshore and Engineering Conference*, Montreal, Canada, 24-29 de maio, 1998,v1, pp. 531-536.

Fakharian, K.; Rismanchian, A. (2004). A New Method for Reduction of Trial and Error in Design of Suction Piles and its Application in Caspian Sea. *Proc. Of 14th Int. Offshore and Polar Engng. Conference ISOPE 2004, Toulon, France, 545-552.*

Feitoza, J. S. (2007). Consolidação de Solos Moles com uso de Célula Eletro-Osmótica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Brasília – DF. Universidade de Brasília, 108p.

Gravina, E.M.C.S. Disponível em www.ceunes.ufes.br/downloads/.../erikagravina-Aula1_Inst_Prod.ppt. Acesso em 03/04/2010.

Heuvel, R.J.; Riemers, M.E. (2005). Self/Barge Installing Platform, SIP II: The Calder Experience. *SPT Offshore*, Woerden, Netherlands.

Hogervorst, J.R. (1980). Field trials with large diameter suction piles. *Proc. 12th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, USA, Paper OTC 3817, 217-224.

House, A.; Randolph, M. F.; Borbas, M. E. (1999). Limiting aspect ratio for suction caisson installation in clay. *Proc. 9th Int. Offshore and Polar Engng. Conf. – ISOPE`99*, Brest, France, 676-683.

IAOGP, International Association of Oil & Gas Producers (2003). Disposal of Disused Offshore Concrete Gravity Platforms in the SPAR Maritime Area, Report 338.

Intermoor, Acteon Linking Subsea Services. Disponível em <http://www.intermoor.com/Images/Interior/brochures/sepla-bro-final-sml.1.pdf>. Acesso em 04/03/2010.

Luke, A.M.; Rauch, A.F.; Olson, R.E.; Cecham, E.C. (2003). Components of Suction Caisson Capacity Measured in Axial Pullout Tests, Deepwater Mooring 2003, Copyright ASCE 2004.

McNamara, A.P. (2000). Behaviour of soil around the internal stiffeners of suction caissons and the effect on installation and pullout resistance, *Australian Geomechanics*, 35, pp 23-30.

Mitchell, J. K. (1968). Fundamentals Aspects of Electro-Osmosis in Soils. *American Society of Civil Engineers from Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, vol. 93, SM 6, pp. 209-236.

Mitchell, J. K. (1993). Fundamentals of Soil Behavior. 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, 436pp.

Moreno, J.S. (2005). Proposta de Metodologia para Critério de Projeto de Fundações de Estacas de Sucção para TLP. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 214p.

Muga, B.J., (1967). Bottom breakout forces. *ASCE – Convention Civil Engineering in the Oceans*, p. 569-600.

Narasimha Rao, S.; Prasad, Y.V.S.N.; Veeresh, C. (1993). Behavior of Embedded Model Screw Anchors in Soft Clays. *Géotechnique*. 43: 605-614.

Newlin, J.A. (2003a). Suction anchor piles for the Na Kika FDS mooring system, part 1. Site characterization and design. *Deepwater Mooring Systems. Concepts, Design, Analysis, and Materials*, ASCE. Houston, USA, Oct., 2003, 28-54.

Newlin, J.A. (2003b). Suction anchor piles for the Na Kika FDS mooring system, part 2. Installation performance.. *Deepwater Mooring Systems. Concepts, Design, Analysis, and Materials*, ASCE. Houston, USA, Oct., 2003, 55-57.

NGI Norwegian Geotechnical Institute. Noruega. Disponível em <http://www.ngi.no/en/Areas-of-research-and-development>. Acessado em 06/03/2010.

Oversen, J.H. (1979). Contribution to discussion on the use of physical models in design. *7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brighton, Inglaterra. V. 4, p. 319-323.

Pacheco, L.A. (2006). Modelagem física e Numérica de um Duto Enterrado em Areia Sujeito a Deslocamento Lateral. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 114p.

Petrobrás, Petróleo Brasileiro SA., Brasil. Disponível em <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/atividades/exploracao-producao-petroleo-gas/default.asp>. Acesso em 02/03/2010.

Ramires, R.S. (2002). Instrumentação para Avaliação do Comportamento de Estacas de Sucção em Sistemas Oceânicos Utilizando Centrífuga. Tese (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – São Paulo - SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 109p.

Randolph, M.F.; House, A.R. (2001). The Complementary roles of physical and computational modeling. Report n. G: 1522, The University of Western Australia, Australia.

Randolph, M.F.; O'Neill, M.P.; Stewart, D.P.; Erbrich, C. (1998). Performance of suction anchors in fine-grained calcareous soils. *Proc. 30th Annual Conference*, Houston, Paper OTC 8831.

Renzi, R.; Maggioni, W.; Smiths, F. (1991). Centrifuge Study on the Behavior of Suction Piles. *Proceeding of the International Conference Centrifuge*, V. Manes. ENEL-DCO, Roma, Italia.

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

Shang, J. Q. (1998). Electroosmosis-Enhanced Preloading Consolidation Via Vertical Drains. *Canadian Geotechnical Journal*. 35: 491–499.

Springman, S. (2007). Modelling in Geotechnics – Part 1, Institute of Geotechnical Engineering.

SPT Offshore. Disponível em

<http://www.sptoffshore.com/bin/ibp.jsp?ibpDispWhat=zone&ibpPage=S8>. Acesso em 03/03/2009.

SPT Offshore. Disponível em

<http://www.sptoffshore.com/bin/ibp.jsp?ibpDispWhat=zone&ibpPage=S8>. Acesso em 04/03/2010.

Steensen-Bach, J.O. (1992). Recent models tests with suction piles in clay and sand. *Proc. 24th Offshore Technology Conference* Houston, 320-330.

Structurae, Nicolas Janberg ICS. Disponível em <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=2047>. Acesso em 06/03/2010.

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

Sukumaran, B.; McCarron, W.O.; Jeanjean, P.; Abouseeda, H. (1999). Efficient finite element techniques for limit analysis of suction caissons under lateral loads. *Computers & Geotechnics*, 24(2), 89-107.

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

Tjelta, T.I. (2001). Suction Piles. Their position and application today. *Proc. 11th Int. Offshore and Polar Engng. Conf. – ISOPE`2001*, Stavanger, Norway, 2, 1-6.

TnPetróleo, Newsletter TN Petróleo, Brasil. Disponível em http://www.tnpetroleo.com.br/banco_de_imagens/banco4. Acesso em 23/03/2010.

Tran, M.N.; Randolph, M.F. (2008). Variation of Suction Pressure during Caisson Installation in Sand. *Géotechnique* 58: 1-11.

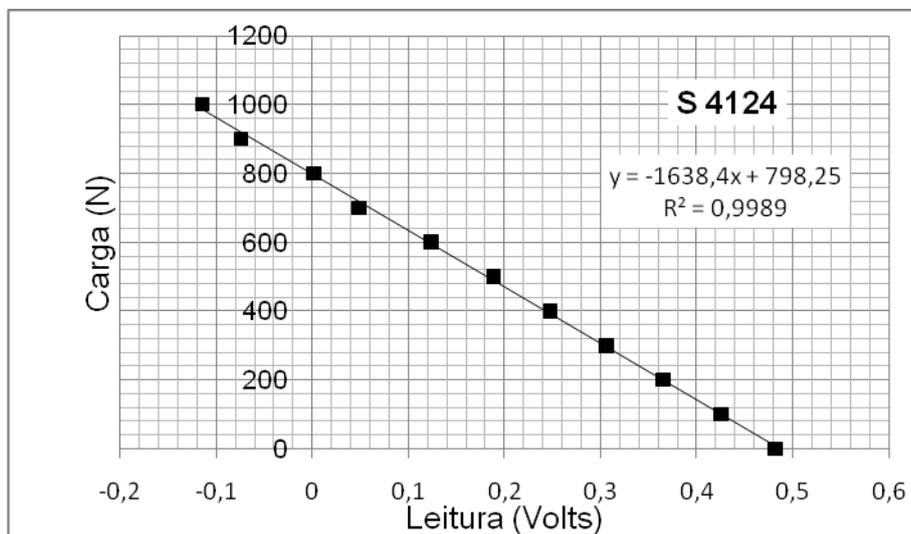
USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Estruturas e Fundações. Disponível em <http://www.lem.ep.usp.br/pef418/tipos.pdf>. Acesso em 23/3/2010.

Villela, M.J.R. (2004). Análise do comportamento da temperatura em sistemas de produção de petróleo : comparação entre completação seca e molhada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 130 p.

Watson, P.G. (1999). Performance of skirted foundations for offshore structures, Ph.D. thesis, The University of Western Australia, Australia.

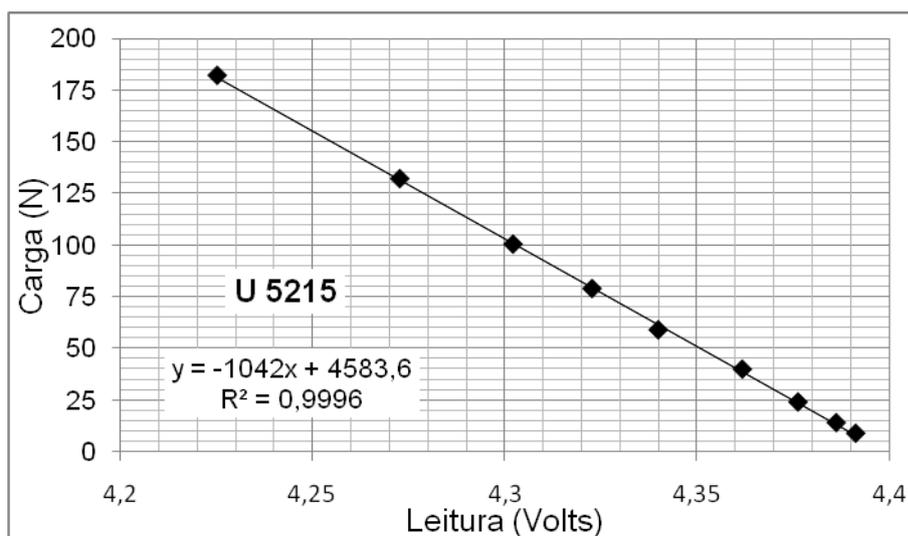
ANEXO 01 - CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES

- Curvas de calibração dos instrumentos
- 1. Célula de carga
 - Rittal



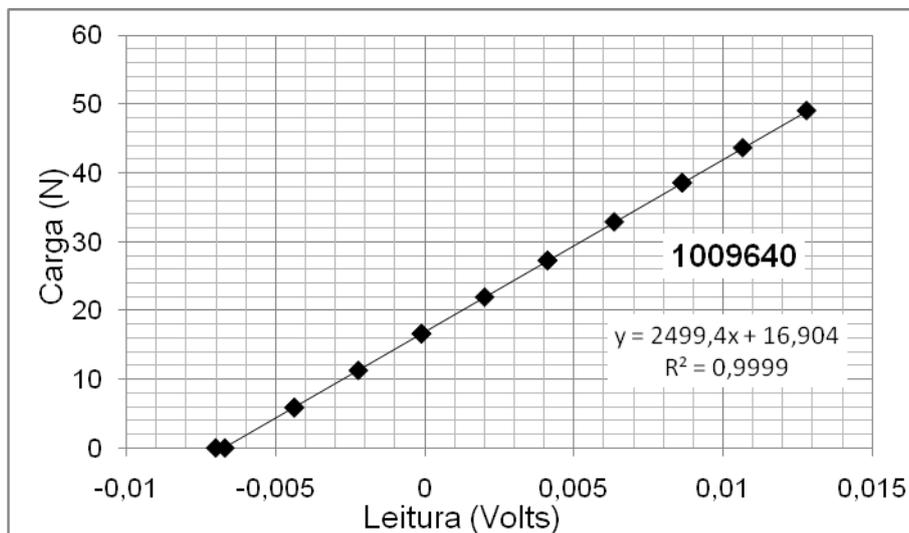
Excitação: 8 V

Data calibração: 03/4/2009



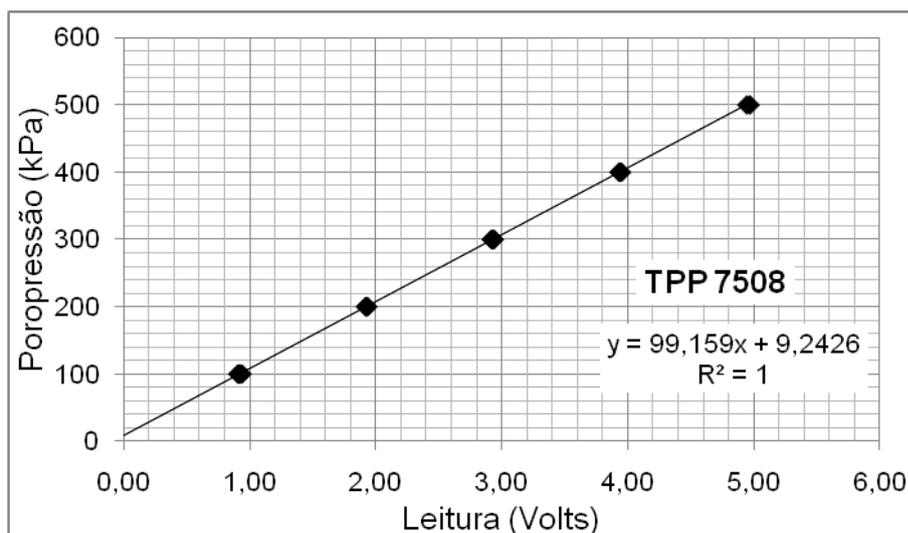
Excitação: 8 V

Data calibração: 05/3/2010

➤ **NI PXI - 1052**

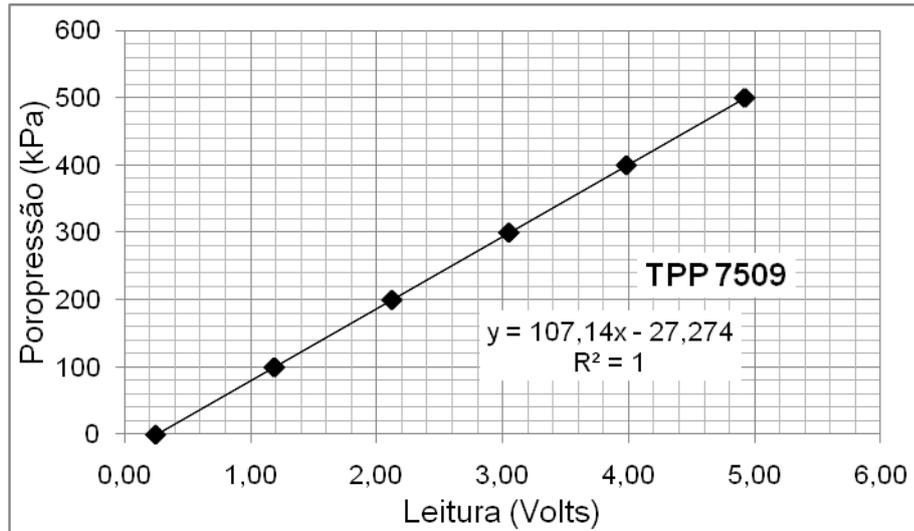
Excitação: 8 V

Data calibração: 19/6/2009

2. **Transdutor de poro-pressão:**➤ **Rittal**

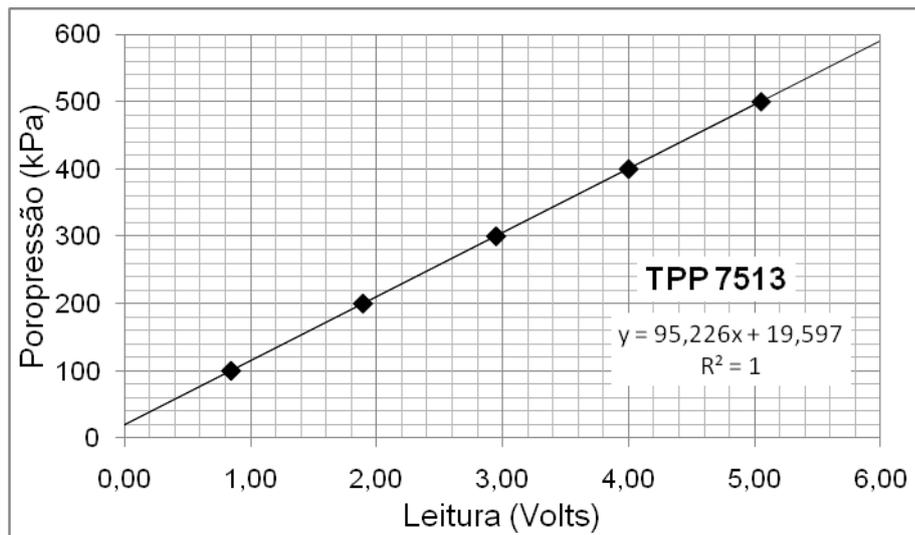
Excitação: 5 V

Data calibração: 14/4/2010



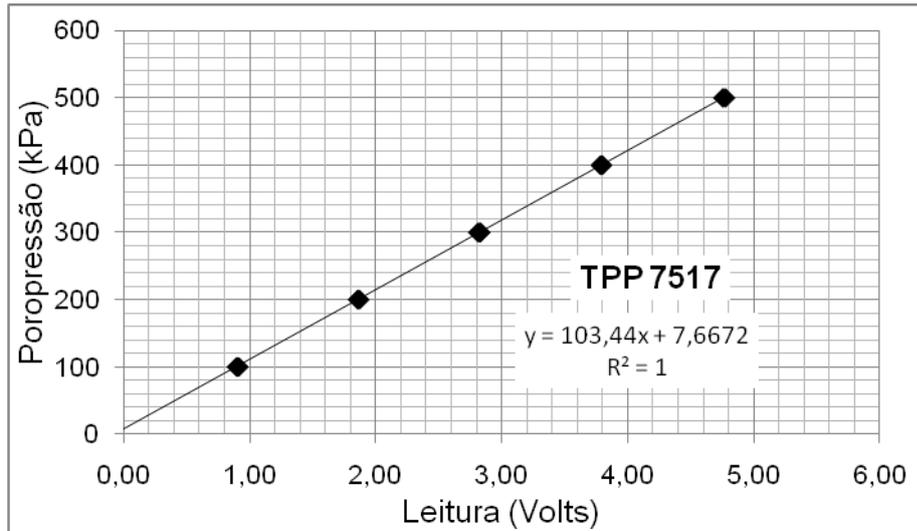
Excitação: 5V

Data calibração: 5/4/2010



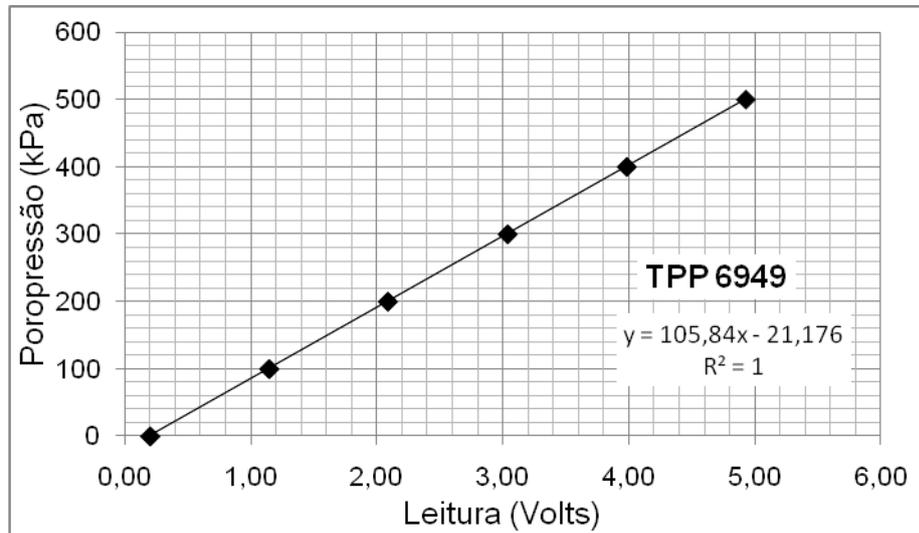
Excitação: 5V

Data calibração: 5/4/2010



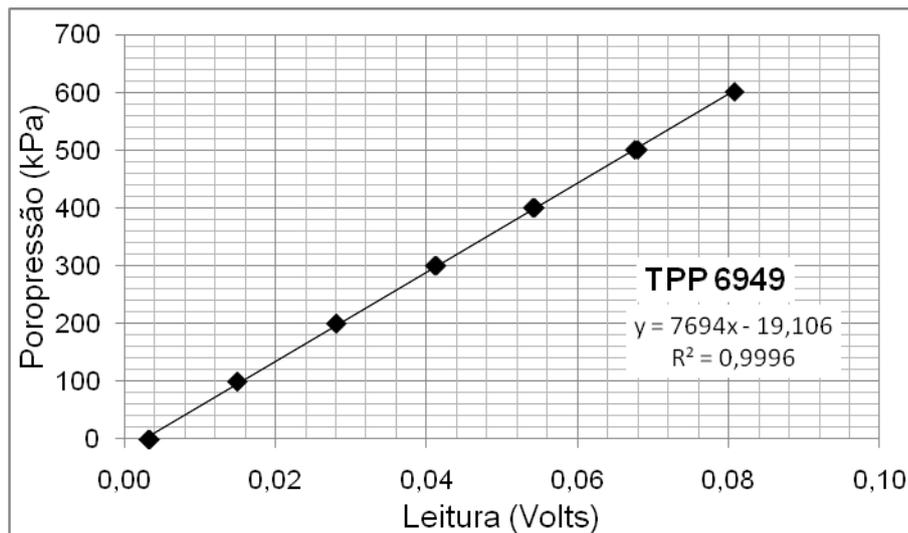
Excitação: 5V

Data calibração: 15/4/2010



Excitação: 5V

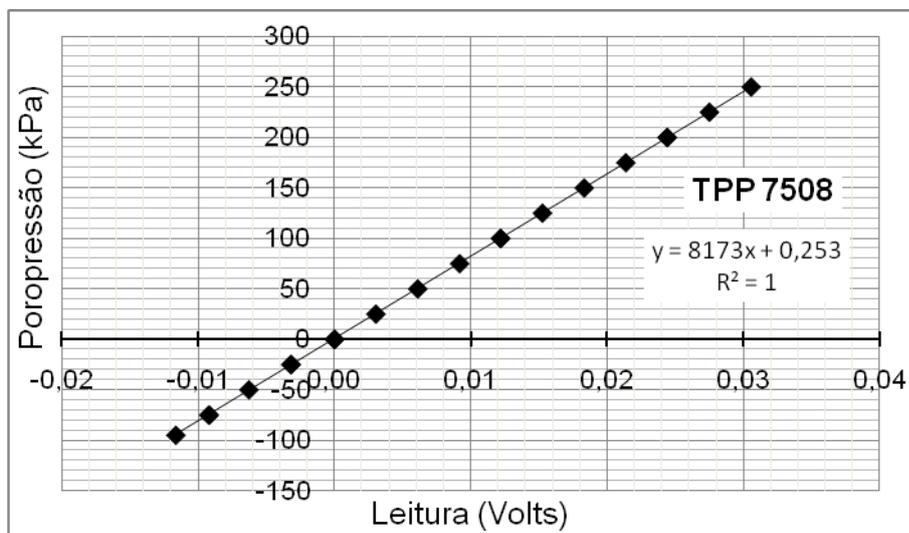
Data calibração: 5/4/2010



Excitação: 5V

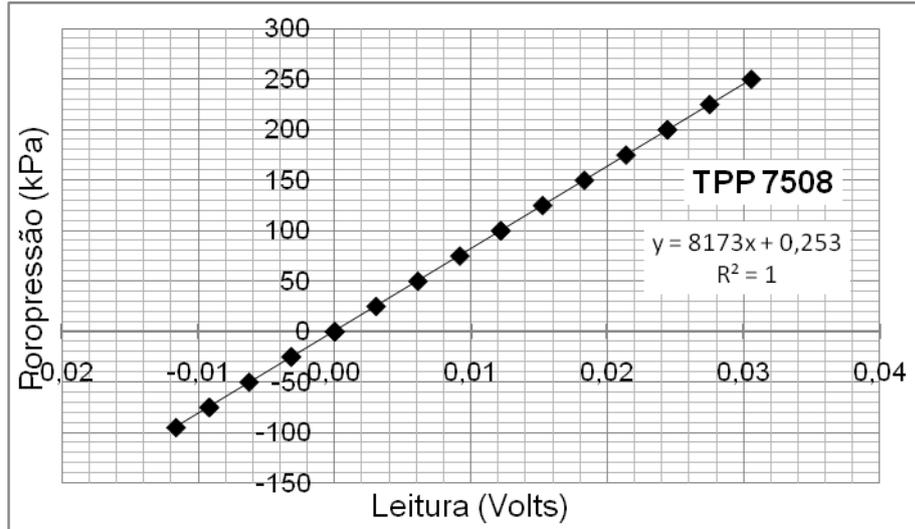
Data calibração: 19/11/2009

➤ **NI PXI - 1052**



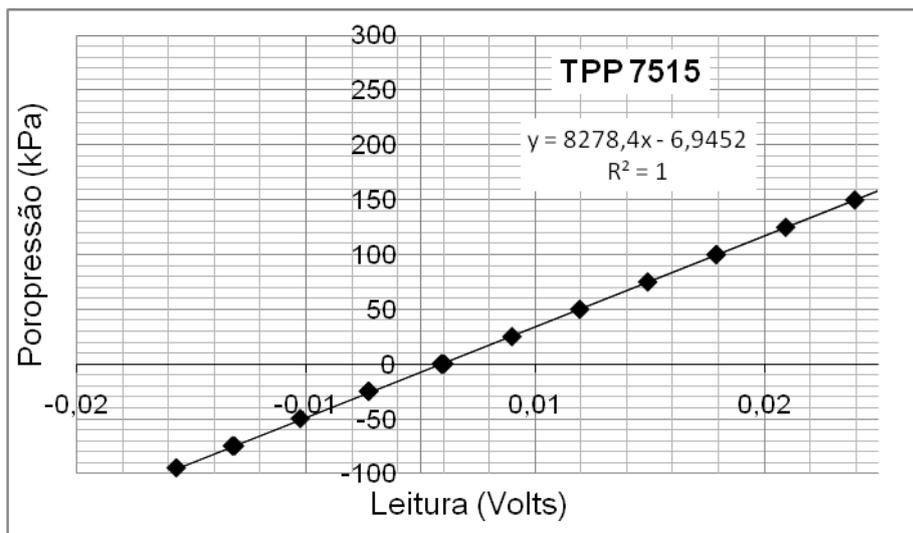
Excitação: 5V

Data calibração: 5/5/2009



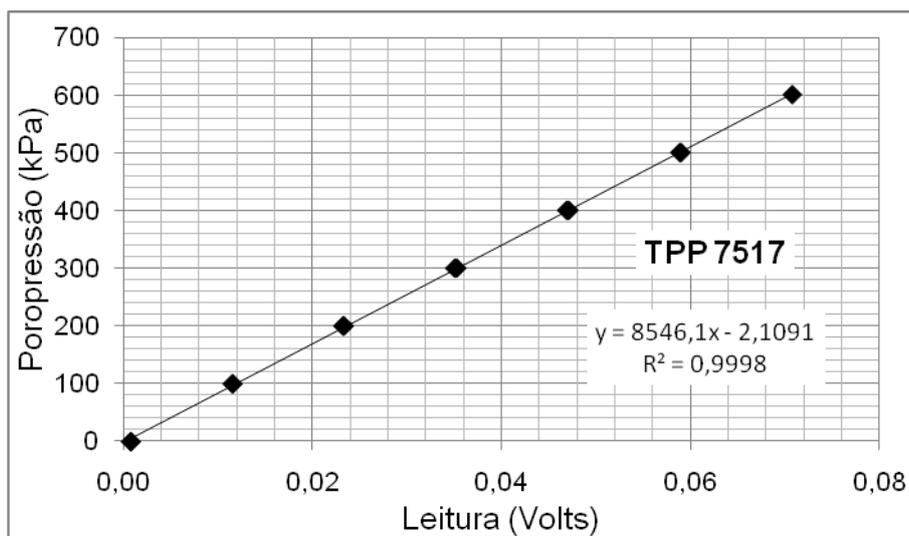
Excitação: 5 V

Data calibração: 5/5/2009



Excitação: 5 V

Data calibração: 5/5/2009

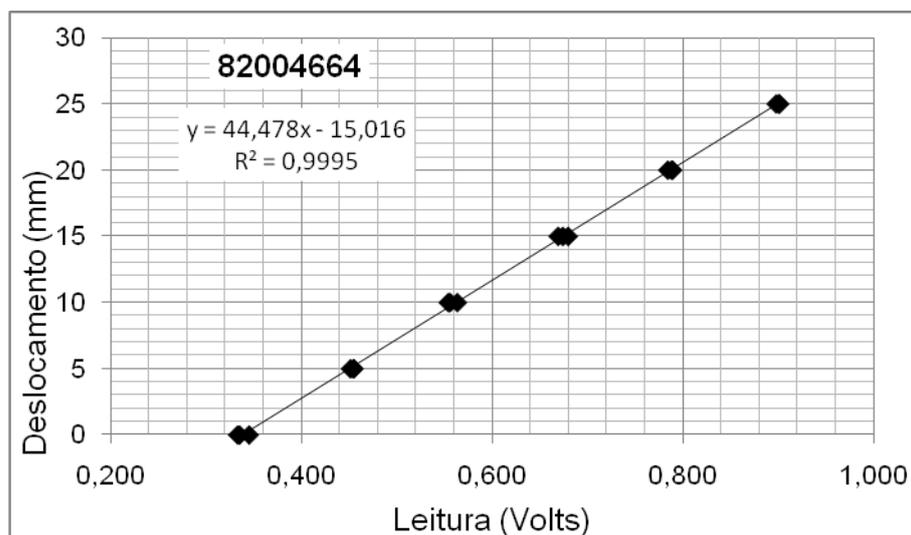


Excitação: 5 V

Data calibração: 5/5/2009

3. **Transdutor de deslocamento (Régua potenciométrica):**

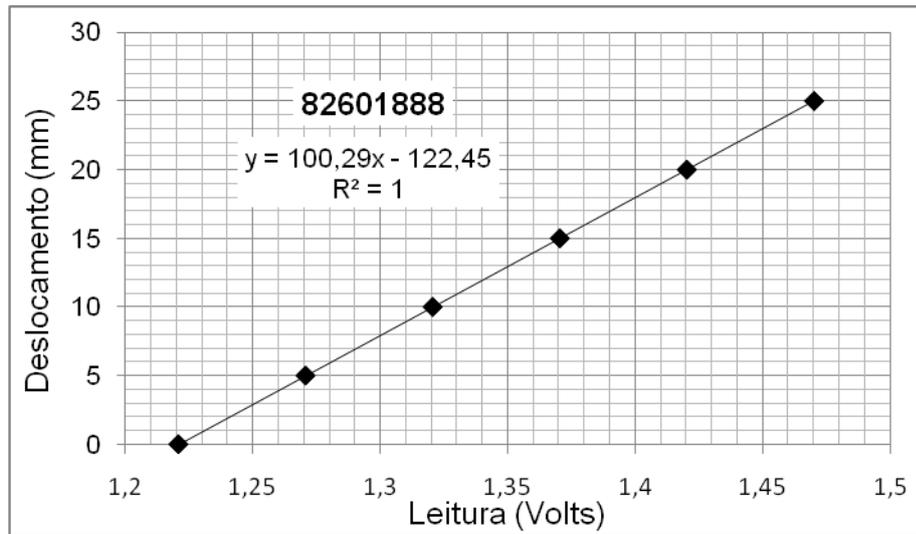
➤ **Rittal**



Excitação: 10 V

Data calibração: 11/5/2009

➤ **NI PXI -1052**

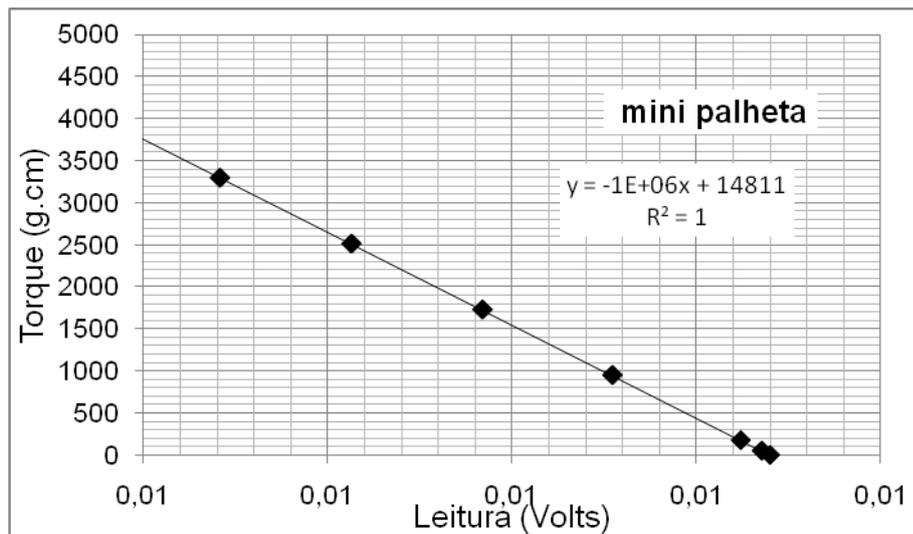


Excitação: 10 V

Data calibração: 11/5/2009

4. **Mini Palheta**

➤ **NI PXI - 1052**



Excitação:

Data calibração: 13/4/2009

ANEXO 02 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

- CAULIM

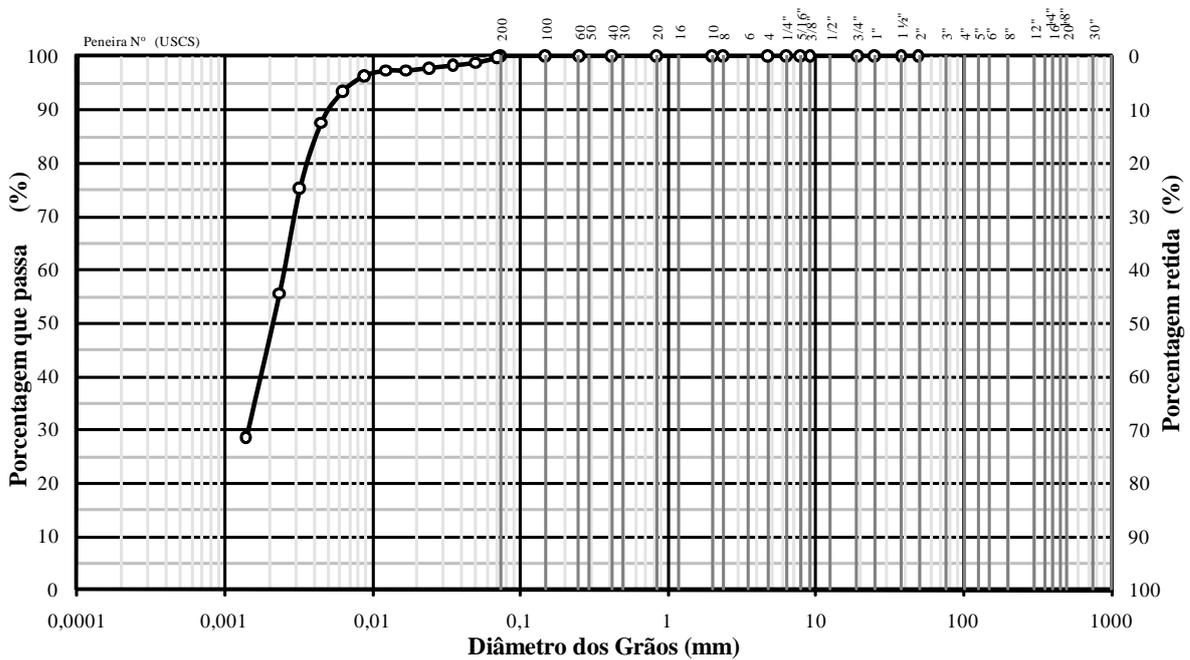
Características Granulométricas Equivalentes

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	-	-	-	0,8	53,5	45,7	CH

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	Cc	Cu
-	-	-	-	-	-	-	-



Propriedades Físicas

Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 1,00 g/cm³

Umidades:

Umidade Natural = - %

Umidade higroscópica = 2,0 %

Índices de Atterberg:

Límite de Liquidez = 34,3 %

Límite de Plasticidade = 0,0 %

Índice de Plasticidade = 0,0 %

Índice de Consistência = - %

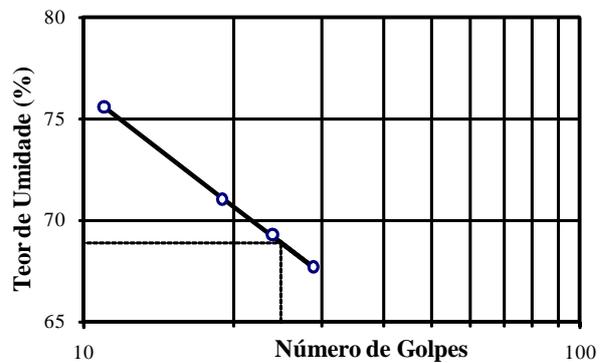
Atividade Skempton:

Atividade Coloidal =

Atividade Skempton:

Atividade Coloidal =

Límite de Liquidez



• METACAULIM

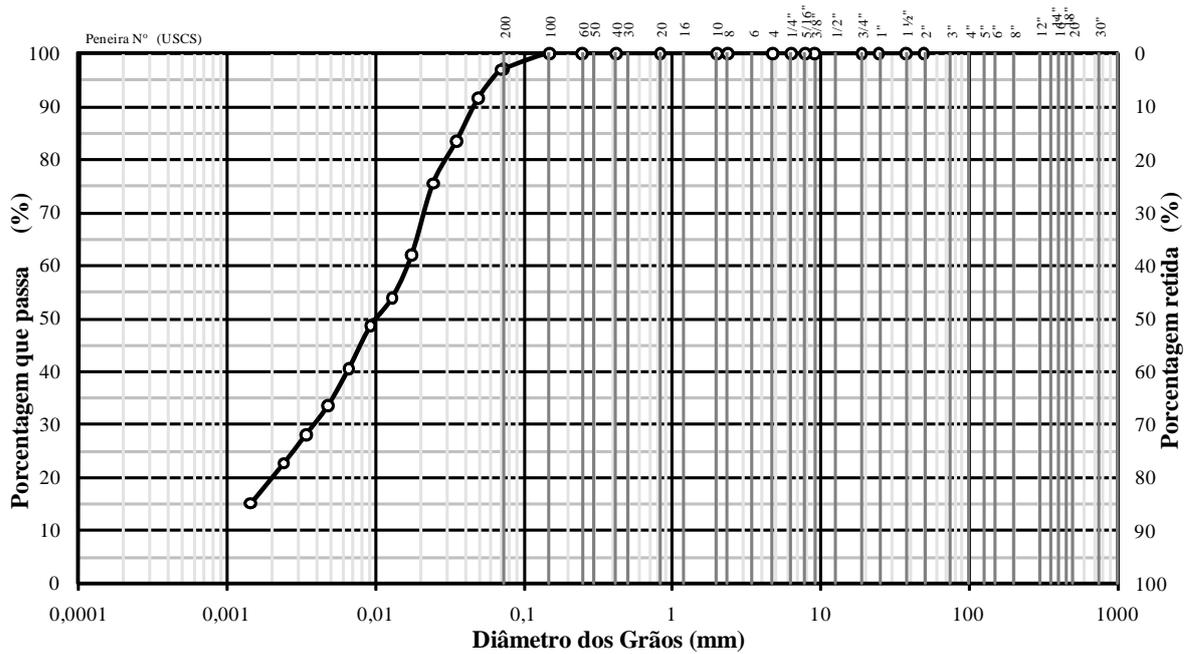
Características Granulométricas

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	-	-	-	5,8	74,9	19,3	-

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	Cc	Cu



Propriedades Físicas

Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,60 g/cm³

Umidades:

Umidade Natural = 8,8 %

Umidade higroscópica = 1,0 %

Índices de Atterberg:

Límite de Liquidez = - %

Límite de Plasticidade = NP %

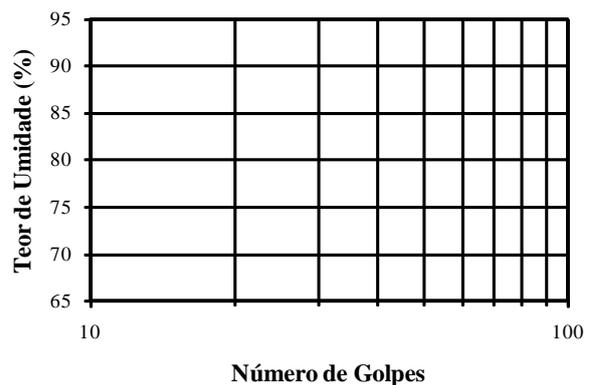
Índice de Plasticidade = NP %

Índice de Consistência = - %

Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = -

Límite de Liquidez



Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X (EDX)

Análise	Porcentagem	
	Caulim	Metacaulim
SiO_2	49.361	48.597
Al_2O_3	46,720	43,453
Fe_2O_3	0,755	3,207
K_2O	1,187	2,008
SO_3	1,502	1,114
TiO_2	0,348	1,387
CuO	0,017	-
Tm_2O_3	0,041	-
Ac	0,015	-
Ag_2O	0,009	-
SrO	0,006	0.005
Ir_2O_3	0.039	-
CaO	-	0.117
V_2O_5	-	0,084
ZrO_2	-	0,018
ZnO	-	0,010

• 20% METACAULIM

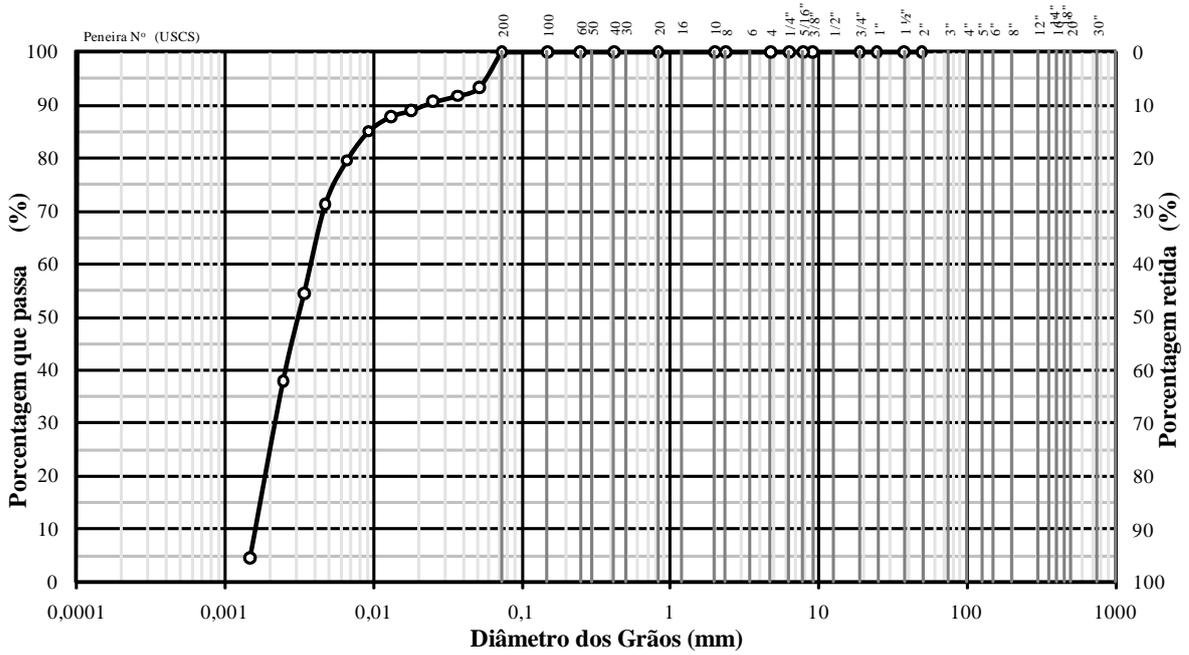
Características Granulométricas

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	-	-	-	4,2	73,9	21,9	CH

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	Cc	Cu
-	-	-	-	-	-	-	-



Propriedades Físicas

Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,58 g/cm³

Umidades:

Umidade Natural = - %

Umidade higroscópica = 5,5 %

Índices de Atterberg:

Limite de Liquidez = 68,8 %

Limite de Plasticidade = 38,9 %

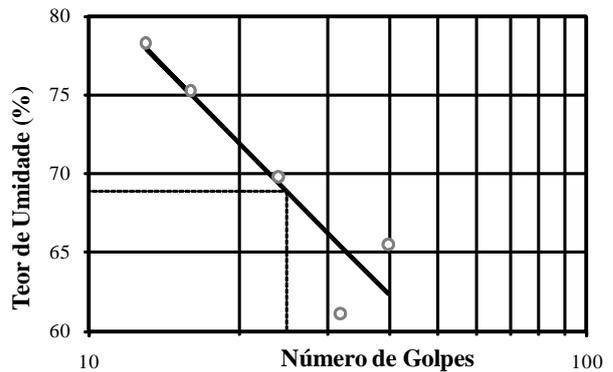
Índice de Plasticidade = 29,9 %

Índice de Consistência = - %

Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 1,37 (ativa)

Limite de Liquidez



• 40% METACAULIM

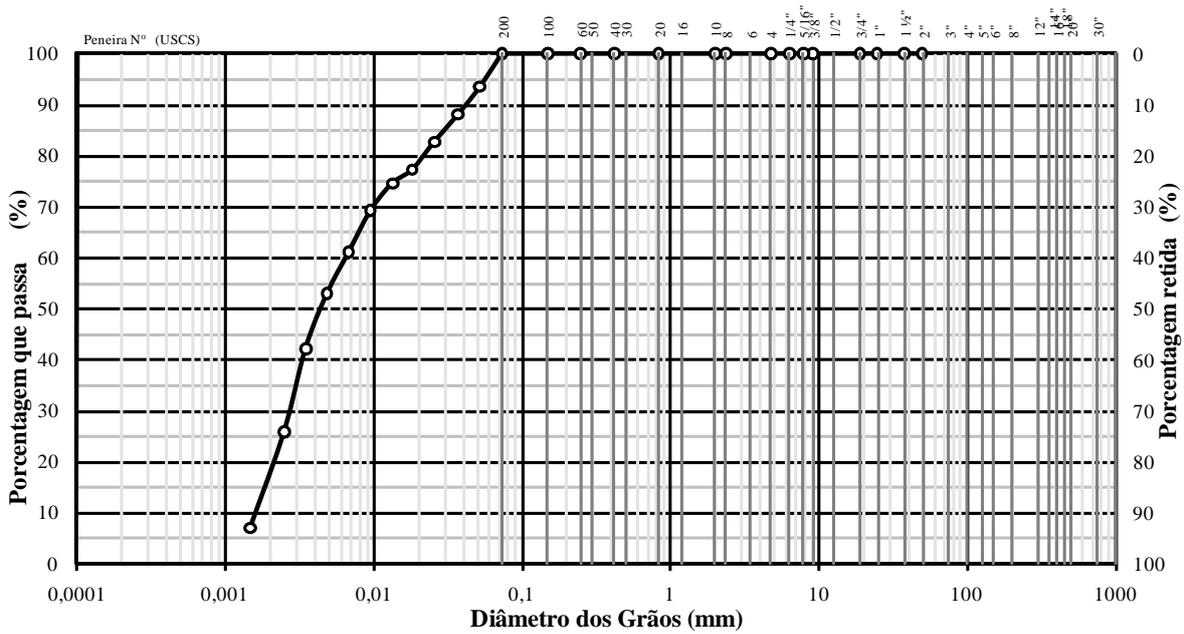
Características Granulométricas

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	-	-	-	4,2	79,4	16,4	CH

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	Cc	Cu
-	-	-	-	-	-	-	-



Propriedades Físicas

Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,56 g/cm³

Umidades:

Umidade Natural = - %

Umidade higroscópica = 4,2 %

Índices de Atterberg:

Limite de Liquidez = 66,2 %

Limite de Plasticidade = 37,3 %

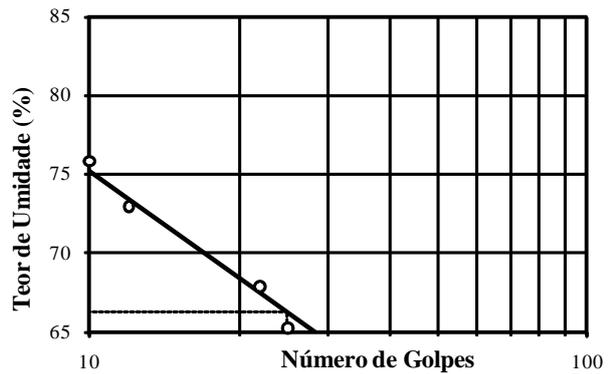
Índice de Plasticidade = 28,9 %

Índice de Consistência = - %

Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 1,76 (ativa)

Limite de Liquidez



• 50% METACAULIM

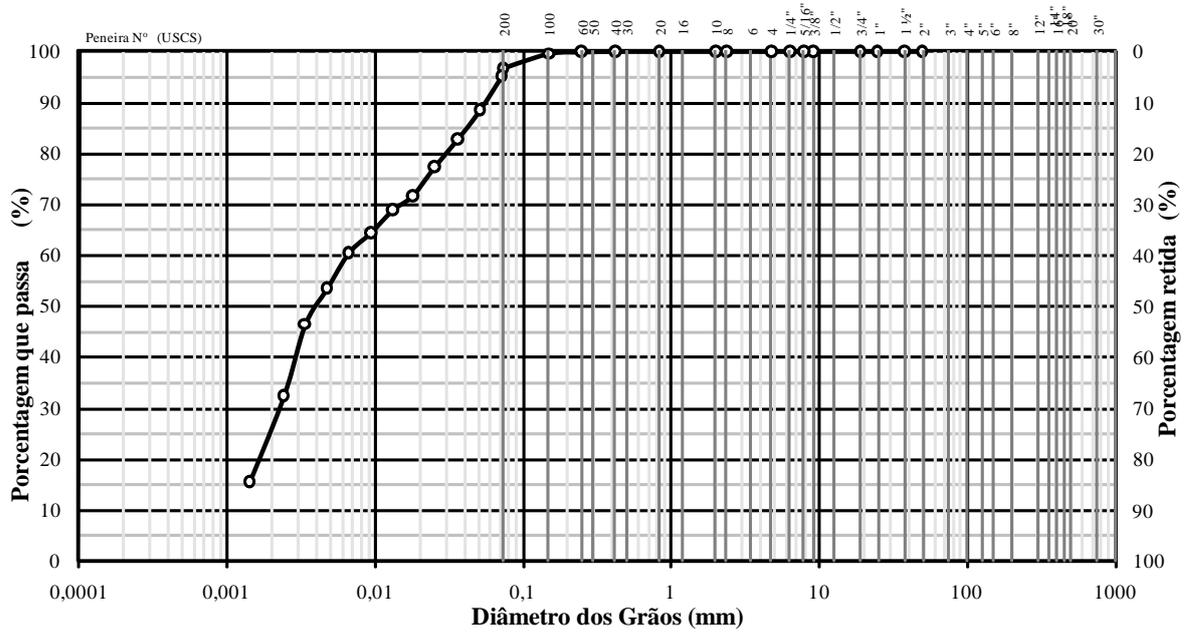
Características Granulométricas

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	-	-	0,3	8,4	66,0	25,3	CH

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	Cc	Cu
-	-	-	-	-	-	-	-



Propriedades Físicas

Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,66 g/cm³

Umidades:

Umidade Natural = - %

Umidade higroscópica = 2,0 %

Índices de Atterberg:

Limite de Líquidez = 65,0 %

Limite de Plasticidade = 36,7 %

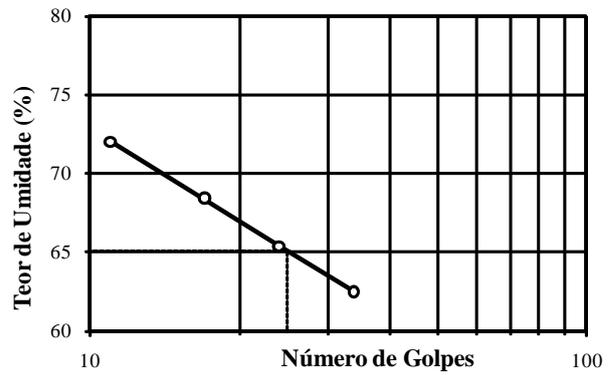
Índice de Plasticidade = 28,4 %

Índice de Consistência = - %

Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 1,12 (normal)

Limite de Líquidez



• 60% METACAULIM

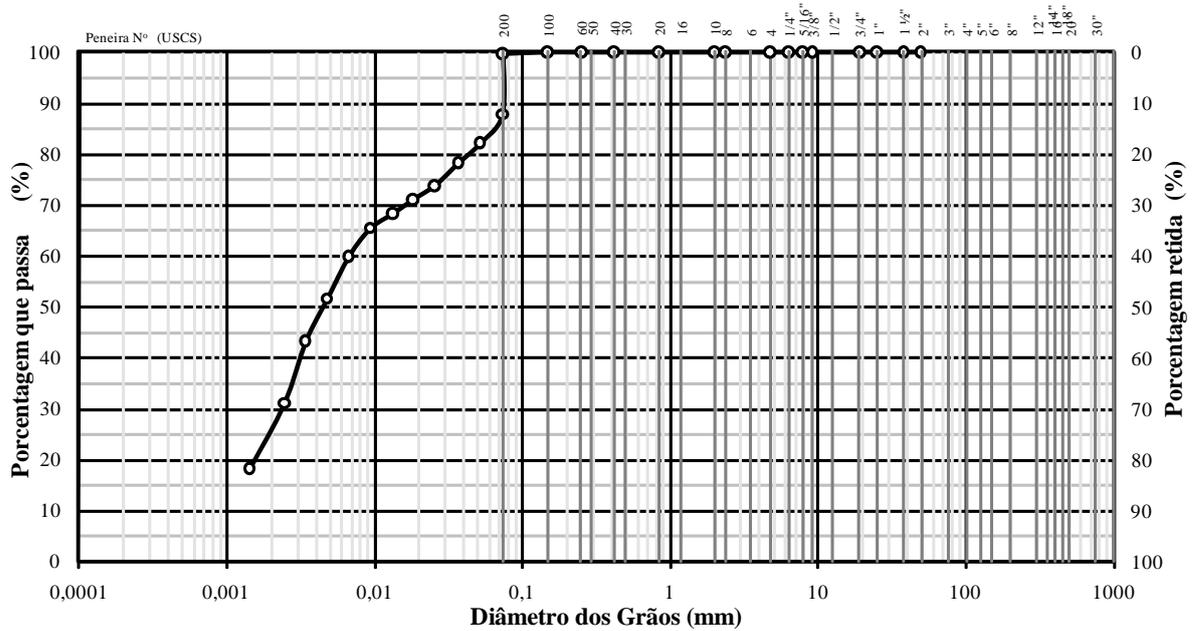
Características Granulométricas

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	-	-	-	15,7	58,8	25,4	CH

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	Cc	Cu
-	-	-	-	-	-	-	-



Propriedades Físicas

Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,63 g/cm³

Umidades:

Umidade Natural = - %

Umidade higroscópica = 2,1 %

Índices de Atterberg:

Limite de Liquidez = 62,5 %

Limite de Plasticidade = 35,7 %

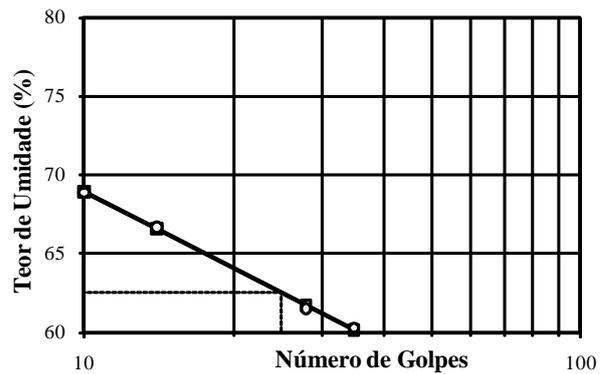
Índice de Plasticidade = 26,7 %

Índice de Consistência = - %

Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 1,05 (normal)

Limite de Liquidez





UENF

Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Laboratório de Engenharia Civil

LECIV/ CCT

Resultados de Ensaio de Adensamento Oedométrico

Interessado: Cássia

Obra: Centrífuga

Furo: -

Data: 13/4/09

Ensaio: 02

Amostra: 60% de metacaulim

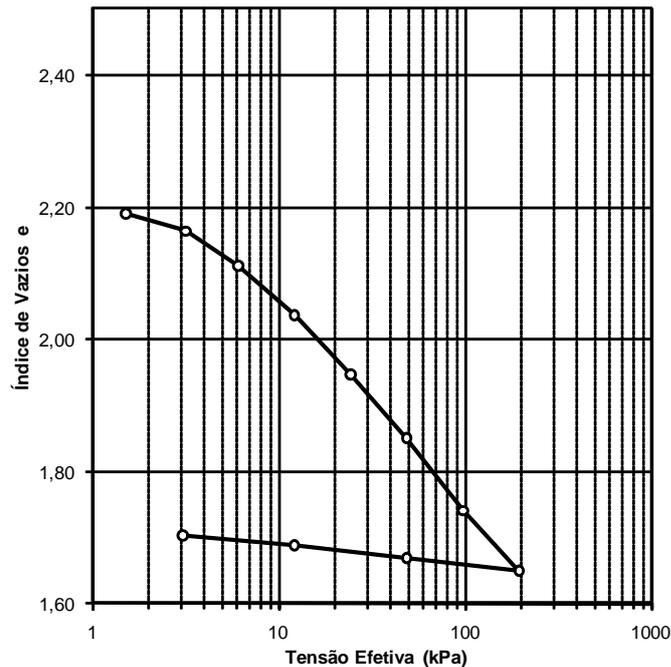
Dados do Corpo de Prova

Diâmetro: 4,99 cm	Área inicial: 19,56 cm ²	Peso específico dos grãos: 25,87 kN/m ³
Altura inicial: 1,91 cm	Umidade inicial: 87,3 %	Peso total da amostra: 56,000 g
Volume da amostra: 37,35 cm ³	Índice vazios inicial: 2,30	Peso da amostra seca: 29,900 g
Volume de sólidos: 11,33 cm ³	Grau saturação inicial: 100,3 %	Peso específico: 14,69 kN/m ³
Volume de vazios: 26,03 cm ³	Porosidade inicial: 69,7 %	Peso específico seco: 7,85 kN/m ³
Volume de água: 26,10 cm ³	Umidade final: 61,9 %	Peso específico saturado: 14,67 kN/m ³

Planilha de Resultados do Ensaio

Est. (no.)	Tensão normal σ_n (kPa)	Altura inicial: H_0 (mm)	Altura final: H_f (mm)	Varição da altura: ΔH (mm)	Altura média H_m (mm)	t_{90} (s)	c_v (cm ² /s)	e	e/e_0	a_v (1/kPa)	m_v (1/kPa)	k (cm/s)
-	0,00	-	-	-	-	-	-	2,2980	1,000	-	-	-
1	1,52	19,100	18,475	0,625	18,788	-	-	2,1901	0,953	7,10E-02	2,2E-02	-
2	3,19	18,475	18,320	0,155	18,398	-	-	2,1633	0,941	1,61E-02	5,1E-03	-
3	6,13	18,320	18,015	0,305	18,168	-	-	2,1107	0,918	1,79E-02	5,8E-03	-
4	12,26	18,015	17,585	0,430	17,800	73	9,25E-03	2,0364	0,886	1,21E-02	4,0E-03	3,62E-06
5	24,52	17,585	17,060	0,525	17,323	65	9,80E-03	1,9458	0,847	7,39E-03	2,5E-03	2,41E-06
6	49,04	17,060	16,505	0,555	16,783	52	1,15E-02	1,8499	0,805	3,91E-03	1,4E-03	1,55E-06
7	98,08	16,505	15,870	0,635	16,188	44	1,25E-02	1,7403	0,757	2,24E-03	8,2E-04	1,00E-06
8	196,17	15,870	15,345	0,525	15,608	60	8,61E-03	1,6496	0,718	9,24E-04	3,5E-04	2,94E-07
9	49,04	15,345	15,450	-0,105	15,398	-	-	1,6678	0,726	1,23E-04	4,6E-05	-
10	12,26	15,450	15,565	-0,115	15,508	-	-	1,6876	0,734	5,40E-04	-	-
11	3,07	15,565	15,648	-0,083	15,607	-	-	1,7020	0,741	1,56E-03	-	-

Varição do índice de vazios e com a tensão efetiva



• 80% METACALIM

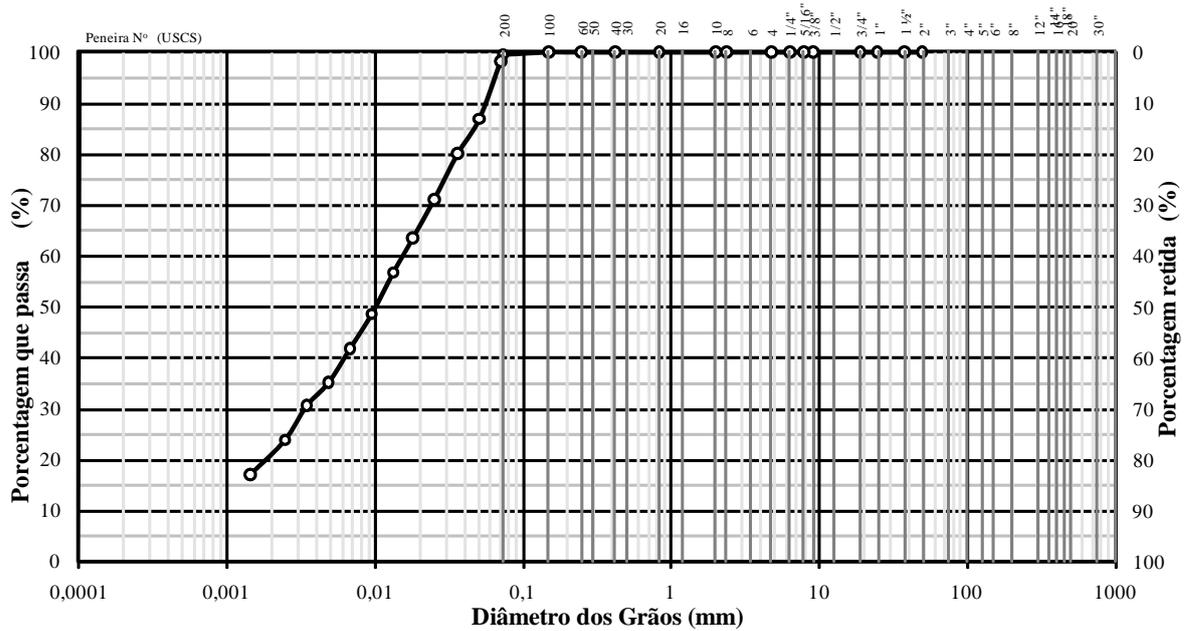
Características Granulométricas

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	-	-	-	8,0	71,2	20,7	CH

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	C _c	C _u
-	-	-	-	-	-	-	-



Propriedades Físicas

Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,61 g/cm³

Umidades:

Umidade Natural = - %

Umidade higroscópica = 1,6 %

Índices de Atterberg:

Límite de Liquidez = 58,2 %

Límite de Plasticidade = 38,3 %

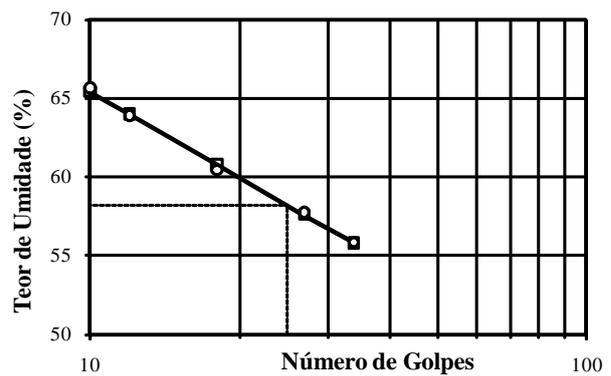
Índice de Plasticidade = 19,9 %

Índice de Consistência = - %

Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 0,96 (normal)

Límite de Liquidez



ANEXO 03 – RESULTADOS DOS ENSAIOS

- **Ensaio 01**

Data Inicial: 22/04

Data Final: 06/05

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	13,5
Caulim	9,0
Água destilada	28,125
Container	20,6
Camada drenante	4,00
Container + camada drenante + solo	74,25
Solo	49,65

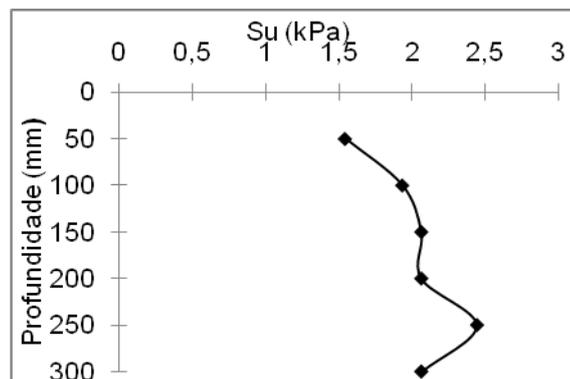
Resultados do Vane Test

Profundidade do ensaio (m)	Torque (N.m)		Resistência não drenada (kPa)	
	Pico	Residual	Pico	Residual
0.05	0.00066	0.00020	1.54	0.48
0.10	0.00083	0.00077	1.93	1.8
0.15	0.00088	0.00088	2.06	2.06
0.20	0.00088	0.00072	2.06	1.97
0.25	0.00105	0.00083	2.44	1.93
0.30	0.00088	0.00072	2.06	1.67

Dados da Instalação

Estaca	Tipo de instalação	Observação
Lisa	Cravação – 0.5 mm/s	Cravação total do fuste
Lisa	Sucção - 0,70 kgf/cm ²	Cravação total do fuste

Perfil da resistência não drenada



- **Ensaio 02**

Data Inicial: 11/5

Data Final: 20/5

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	13.5
Caulim	9.0
Água destilada	28.125
Container	24.0
Camada drenante	4.00
Container + camada drenante + solo + eletrodos	76.4
Solo	47.4

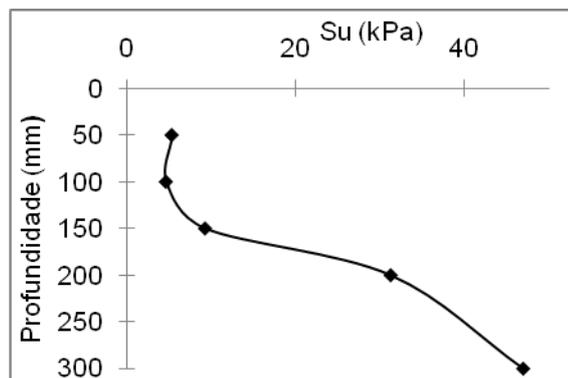
Adensamento da Amostra

Etapa do processo de adensamento	Dia / Horário	Altura final da amostra (mm)
Após colocação do solo	11/5 / 13:50	0.448
Sedimentação	14/5 / 17:00	0.415
Eletroosmose 30VDC	15/5 / 08:00	0.370

Resultados do Vane Test

Profundidade do ensaio (m)	Torque (N.m)		Resistência não drenada (kPa)	
	Pico	Residual	Pico	Residual
0.06	0.00228	0.00204	5.31	4.76
0.12	0.00198	0.00066	4.63	1.54
0.18	0.00397	0.00117	9.26	2.70
0.24	0.01338	0.00578	31.24	13.5
0.30	0.02010	0.00584	46.93	13.63

Perfil da resistência não drenada



- **Ensaio 03**

Data Inicial: 28/5

Data Final: 06/6

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	13.5
Caulim	9.0
Água destilada	28.125
Container	24.0
Camada drenante	4.20
Container + camada drenante + solo + eletrodos	75.6
Solo	46.4

Adensamento da Amostra

Etapa do processo de adensamento	Dia / Horário	Altura final da amostra (mm)
Após colocação do solo	28/5 / 13:00	0.45
Sedimentação	01/6 / 07:00	0.42
Sobrecarga 0,6 kPa	02/6 / 08:00	0.39
Eletro-osmose 5 VDC	03/6 / 08:00	0.395
Eletro-osmose 10 VDC	04/6 / 11:00	0.395
Eletro-osmose 20 VDC	04/6 / 15:00	0.393
Eletro-osmose 30 VDC	05/6 / 08:00	0.39
Inversão Eletro-osmose 20 VDC	05/6 / 12:00	0.39

Resultados do Vane Test

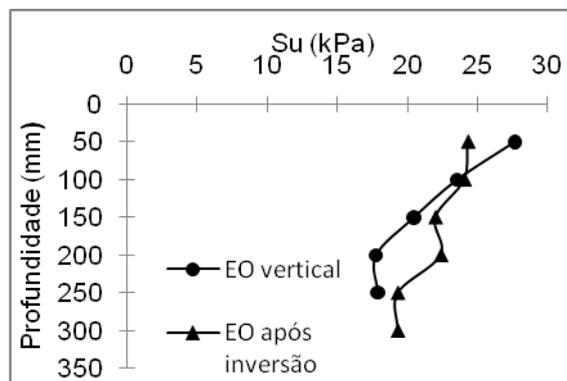
- **Antes da inversão**

Profundidade do ensaio (m)	Torque (N.m)		Resistência não drenada (kPa)	
	Pico	Residual	Pico	Residual
0.05	0.01184	0.00578	27.64	13.50
0.10	0.01008	0.00308	23.53	7.20
0.15	0.00876	0.00242	20.44	5.66
0.20	0.00760	0.00215	17.74	5.01
0.25	0.00763	0.00221	17.87	5.15
0.30	0.00667	0.00209	15.57	4.88

- Após a inversão

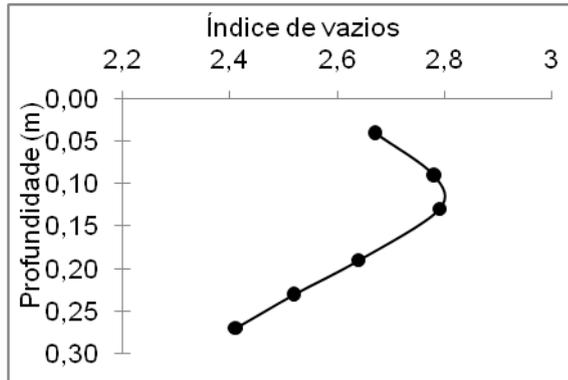
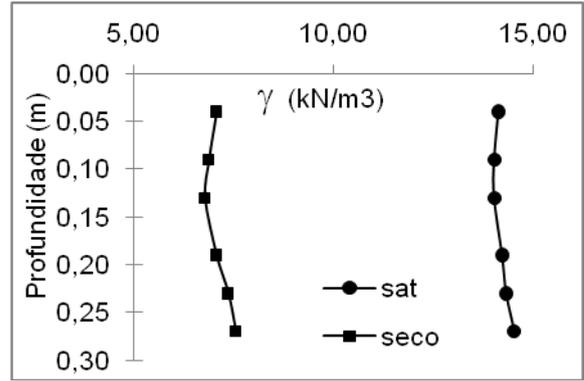
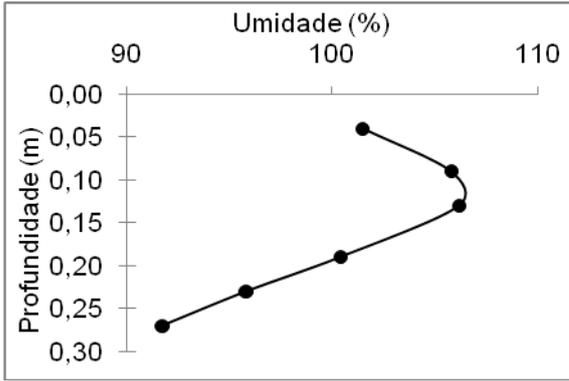
Profundidade do ensaio (m)	Torque (N.m)		Resistência não drenada (kPa)	
	Pico	Residual	Pico	Residual
50	0.01041	0.00402	24.30	9.39
100	0.01030	0.00275	24.04	6.43
150	0.00942	0.00215	21.98	5.02
200	0.00958	0.00242	22.37	5.66
250	0.00827	0.00259	19.30	6.04
300	-	-	-	-

Perfil da resistência não drenada



. Caracterização após arrancamento

Amostra	Altura (m)	Profundidade (m)	Peso Total (kg)	Peso seco (kg)	Umidade (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Índice de vazios
1	0.04	0.04	0.076	0.045	101.5	14.13	7.06	2.67
2	0.05	0.09	0.077	0.045	105.8	14.03	6.87	2.78
3	0.04	0.13	0.091	0.051	106.2	14.03	6.77	2.79
4	0.06	0.19	0.106	0.059	100.4	14.22	7.06	2.64
5	0.04	0.23	0.081	0.048	95.8	14.32	7.36	2.52
6	0.04	0.27	0.076	0.046	91.7	14.52	7.55	2.41



Resultados de Ensaio de Adensamento Oedométrico

Interessado: Cássia

Obra: Centrífuga

Furo: -

Data: 8/7/09

Ensaio: 04

Amostra:

60% de metacaulim -após EO vertical

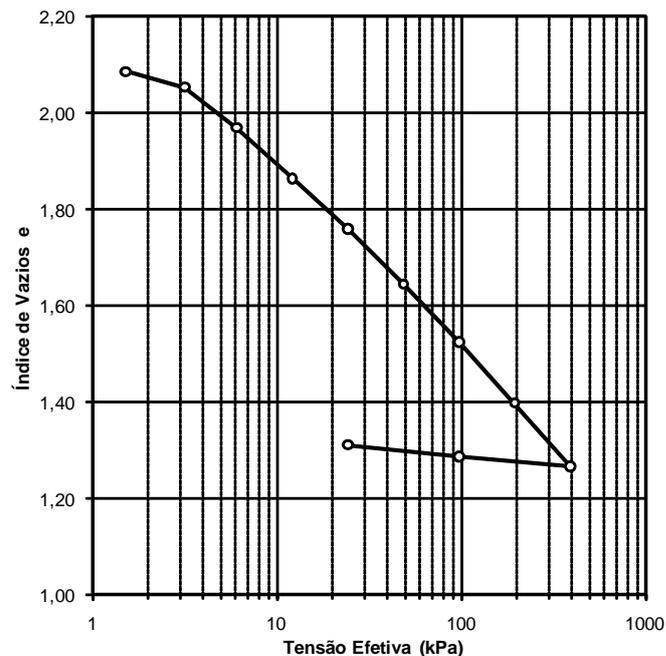
Dados do Corpo de Prova

Diâmetro: 4,99 cm	Área inicial: 19,56 cm ²	Peso específico dos grãos: 24,99 kN/m ³
Altura inicial: 1,91 cm	Umidade inicial: 91,7 %	Peso total da amostra: 56,000 g
Volume da amostra: 37,35 cm ³	Índice vazios inicial: 2,26	Peso da amostra seca: 29,213 g
Volume de sólidos: 11,46 cm ³	Grau saturação inicial: 103,4 %	Peso específico: 14,69 kN/m ³
Volume de vazios: 25,90 cm ³	Porosidade inicial: 69,3 %	Peso específico seco: 7,67 kN/m ³
Volume de água: 26,79 cm ³	Umidade final: 61,2 %	Peso específico saturado: 14,46 kN/m ³

Planilha de Resultados do Ensaio

Est. (no.)	Tensão normal σ_n (kPa)	Altura inicial: H_0 (mm)	Altura final: H_f (mm)	Varição da altura: ΔH (mm)	Altura média H_m (mm)	t_{90} (s)	c_v (cm ² /s)	e	e/e_0	a_v (1/kPa)	m_v (1/kPa)	k (cm/s)
-	0,00	-	-	-	-	-	-	2,2606	1,000	-	-	-
1	1,52	19,100	18,070	1,030	18,585	9	8,14E-02	2,0847	0,922	1,16E-01	3,7E-02	2,99E-04
2	3,19	18,070	17,880	0,190	17,975	16	4,28E-02	2,0523	0,908	1,95E-02	6,4E-03	2,68E-05
3	6,13	17,880	17,390	0,490	17,635	20	3,30E-02	1,9687	0,871	2,84E-02	9,6E-03	3,10E-05
4	12,26	17,390	16,775	0,615	17,083	29	2,17E-02	1,8637	0,824	1,71E-02	6,0E-03	1,27E-05
5	24,52	16,775	16,155	0,620	16,465	137	4,20E-03	1,7578	0,778	8,63E-03	3,1E-03	1,29E-06
6	49,04	16,155	15,490	0,665	15,823	71	7,45E-03	1,6443	0,727	4,63E-03	1,8E-03	1,28E-06
7	98,08	15,490	14,785	0,705	15,138	51	9,57E-03	1,5240	0,674	2,45E-03	9,7E-04	9,12E-07
8	196,17	14,785	14,045	0,740	14,415	48	9,18E-03	1,3976	0,618	1,29E-03	5,4E-04	4,83E-07
9	392,34	14,045	13,280	0,765	13,663	41	9,65E-03	1,2670	0,560	6,66E-04	2,9E-04	2,78E-07
10	98,08	13,280	13,390	-0,110	13,335	-	-	1,2858	0,569	6,38E-05	-	-
11	24,52	13,390	13,535	-0,145	13,463	-	-	1,3106	0,580	3,36E-04	-	-
12	6,13	13,535	13,650	-0,115	13,593	-	-	1,3302	0,588	1,07E-03	-	-

Varição do índice de vazios e com a tensão efetiva



- **Ensaio 04**

Data Inicial: 30/7

Data Final: 09/8

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	14.5
Caulim	9.6
Água destilada	30.0
Container	24.0
Camada drenante	4.20
Container + camada drenante + solo + eletrodos	64.60
Solo	41.6

Adensamento da Amostra

Etapa do processo de adensamento	Dia / Horário	Altura final da amostra (mm)
Após colocação do solo	30/7 / 17:30	357
Sedimentação	31/7 / 07:30	356
Sobrecarga 0,6 kPa	03/8 / 08:30	330
Eletro-osmose 5 VDC	05/8 / 08:00	329
Eletro-osmose 10 VDC	05/8 / 11:00	327
Eletro-osmose 20 VDC	06/8 / 15:00	300
Eletro-osmose 30 VDC	07/8 / 08:00	287
Inversão da Eletro-osmose 20 VDC	08/8 / 08:00	287

OBSERVAÇÃO: Neste modelo não foi feito ensaio de mini Vane e nem a caracterização da amostra devido a ocorrência de muitas trincas.

- **Ensaio 05**

Data Inicial: 01/9

Data Final: 09/9

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	13.5
Caulim	9.0
Água destilada	28.125
Container	24.0
Camada drenante	4.50
Container + camada drenante + solo + eletrodos	72.7
Solo	44.2

Adensamento da Amostra

Etapa do processo de adensamento	Dia / Horário	Altura final da amostra (mm)
Após colocação do solo	01/9 / 13:00	403
Sedimentação	04/9 / 07:00	385
Sobrecarga 0,6 kPa	04/9 / 11:00	380
Eletro-osmose 5 VDC	04/9 / 13:00	377
Eletro-osmose 10 VDC	04/9 / 15:00	375
Eletro-osmose 20 VDC	04/9 / 17:40	369
Eletro-osmose 30 VDC	05/9 / 06:30	325
Inversão da Eletro-osmose 30 VDC	05/9 / 19:30	325

Dados da Instalação

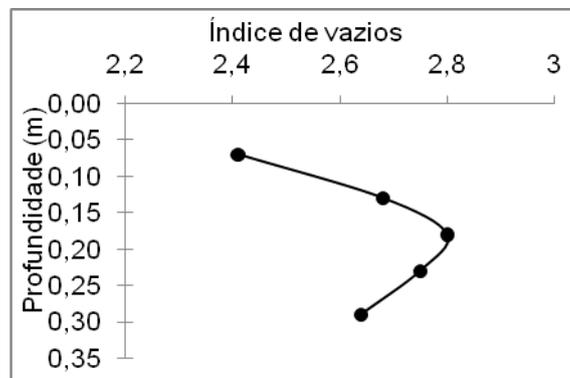
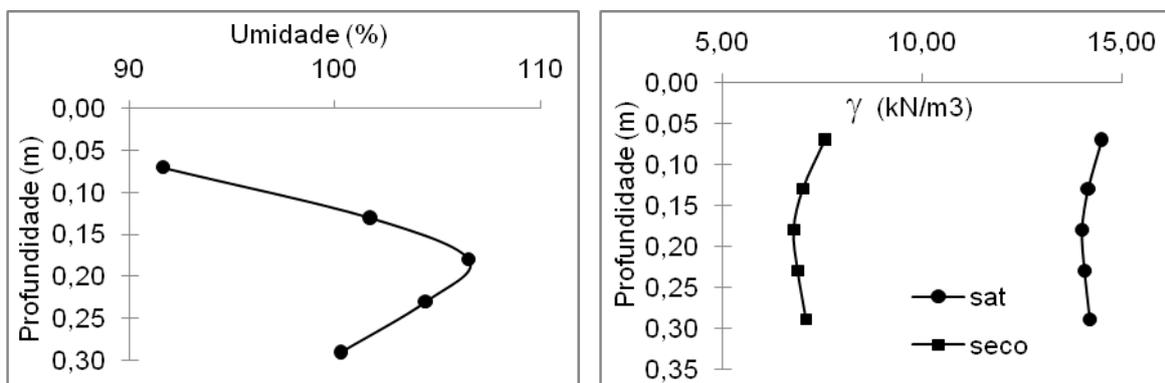
Estaca	Sucção (kgf/cm ²)	Observação
lisa	0.35	Cravação total do fuste
rugosa	0.50	Cravação total do fuste

Dados do Arrancamento

Estaca (tipo)	Peso da Estaca (g)	Peso total da Estaca (g)	Peso da bucha (g)	Caracterização da bucha	Altura da bucha (mm)
rugosa	91,00	283.35	192.35	completa	145
lisa	110,15	250.15	140.00	pequena com presença de água	65

Caracterização após arrancamento

Amostra	Altura (m)	Profundidade (m)	Peso Total (kg)	Peso seco (kg)	Umidade (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Índice de vazios
1	0.07	0.07	0.127	0.072	91.6	14.49	7.56	2.41
2	0.06	0.13	0.093	0.053	101.7	14.15	7.01	2.68
3	0.05	0.18	0.109	0.062	106.5	14.00	6.78	2.80
4	0.05	0.23	0.085	0.048	104.4	14.06	6.88	2.75
5	0.06	0.29	0.107	0.060	100.3	14.19	7.09	2.64



OBSERVAÇÃO: Neste modelo não foi feito ensaio de mini Vane devido a problema no motor do equipamento.

- **Ensaio 06**

Data Inicial: 18/9

Data Final: 01/10

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	16,5
Caulim	10,0
Água destilada	33,1
Mangueira furada	0,60
Container	20,6
Eletrodo inferior	0,58
Camada drenante	4,00
Container + camada drenante + eletrodo inferior	25,60
Container + camada drenante + eletrodo inferior + solo	74,00
Solo	48,40

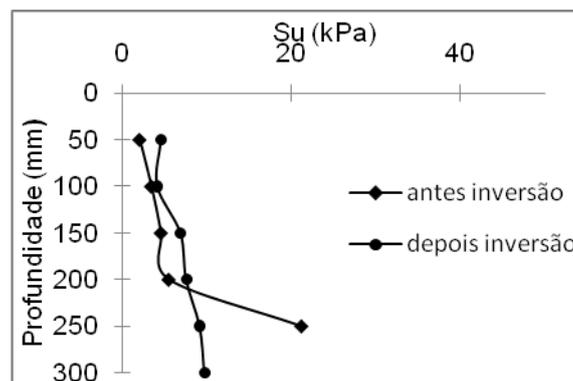
Leitura dos ensaios

Etapas	Data final	Horário final	Leitura da amostra (cm)	Deslocamento (cm)
após colocação do solo	18/set	12:00	46,2	-
Sedimentação	21/set	08:20	43,4	3,05
Colocação da sobrecarga inicial (5kg)	22/set	09:00	42,1	1,45
Eletrocinese 10VDC (positivo superior) + sobrecarga 10kg	22/set	15:00	40,8	0,95
Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 10kg	23/set	15:00	36,6	4,35
Inversão da Eletrocinese 20VDC (positivo inferior)+ sobrecarga 20 kg	24/set	08:30	36,5	-0,05
Inversão Eletrocinese 25VDC + sobrecarga 10 kg	24/set	18:30	36,5	0
Sobrecarga 10 kg	25/set	10:10	36,5	0
Sobrecarga 20 kg	28/set	08:00	36,5	-0,05
Inversão da Eletrocinese 25VDC (positivo inferior)+ sobrecarga 20 kg	28/set	10:35	36,5	0,05
Leitura final			31,8	4,6

Resultados do Vane Test

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Pico (g.cm)		Resistência não drenada Pico (kPa)	
	Antes inversão 23/09	Depois inversão 28/09	Antes inversão 23/09	Depois inversão 28/09
50	-	20	-	4.58
100	9	18	2.06	4.12
150	15	30	3.44	6.87
200	20	33	4.58	7.56
250	24	40	5.50	9.16
300	92.5	42.5	21.18	9.73

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Residual (g.cm)		Resistência não drenada Residual (kPa)	
	Antes inversão 23/09	Depois inversão 28/09	Antes inversão 23/09	Depois inversão 28/09
50	3	2	0.69	0.46
100	7	3	1.60	0.69
150	10	-	2.29	-
200	13	-	2.98	-
250	18	-	4.12	-
300	26	-	5.95	-



Dados da Instalação

Estaca	Sucção (kgf/cm ²)	Observação
lisa	0.51	Cravação total do fuste
rugosa	0.70	Cravação total do fuste

Dados do Arrancamento

Estaca (tipo)	Peso da Estaca (g)	Peso total da Estaca (g)	Peso da bucha (g)	Caracterização da bucha	Altura da bucha (mm)
rugosa	91.0	306.10	187.75	Bucha completa	145
lisa	110.15	289.70	175.90	Bucha com pequena quantidade de água	130

OBSERVAÇÃO: Neste modelo não foi feita a caracterização da amostra, pois, este solo foi utilizado para iniciar os estudos de eletro-osmose entre as estacas.

- **Ensaio 07**

Data Inicial: 9/10

Data Final: 22/10

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	13.5
Caulim	9.0
Água destilada	28.125
Container	20.6
Camada drenante (água+ mangueira)	4.00
Container + camada drenante + solo + eletrodos	73.8
Solo	48.2

Leitura dos ensaios

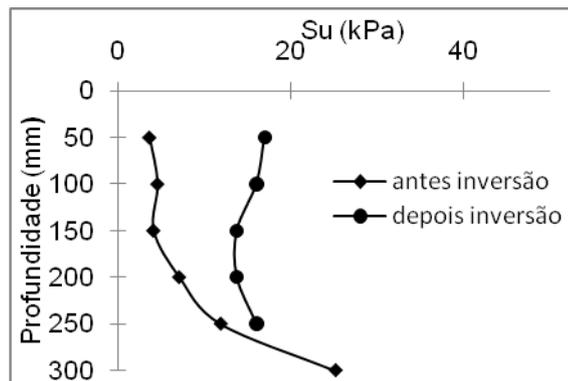
Etapas	Data final	Horário final	Leitura da amostra (cm)	Deslocamento (cm)
após colocação do solo	09/out	12:30	46,5	-
Sedimentação	12/out	08:45	40.7	5.8
Colocação da sobrecarga inicial (5kg)	12/out	16:00	40.6	0.1
Eletrocinese 10VDC (positivo superior) + sobrecarga 10kg	13/out	8:45	38.8	1.8
Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 10kg	13/out	15:00	38.1	0.7
Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 20kg	13/out	17:50	37.8	0.3
sobrecarga 20 kg	14/out	8:00	36.9	0.9
Inversão Eletrocinese 20VDC +	14/out	14:00	36.1	0.5

sobrecarga 20 kg				
Sobrecarga 20 kg	16/out	8:00	33.4	2.7
Eletrocinese 25VDC + sobrecarga 20 kg	16/out	10:00	33.1	0.3
Eletrocinese 30VDC + sobrecarga 20 kg	16/out	15:00	33.1	0.0
Sobrecarga 20 kg	19/out	8:00	33.1	0.0
Inversão Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 20 kg	20/out	8:00	32.9	0.2
Inversão Eletrocinese 25VDC + sobrecarga 20 kg	20/out	12:00	31.8	0.9
Leitura final	20/out	12:00	31.8	0.0

Resultados do Vane Test

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Pico (g.cm)		Resistência não drenada Pico (kPa)	
	Antes inversão 15/10	Depois inversão 20/10	Antes inversão 15/10	Depois inversão 20/10
50	16	74	3.66	16.98
100	20	70	4.58	16.03
150	18	60	4.12	13.74
200	31	60	7.10	13.74
250	52	70	11.91	16.03
300	110	-	25.19	-

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Residual (g.cm)		Resistência não drenada Residual (kPa)	
	Antes inversão 15/10	Depois inversão 20/10	Antes inversão 15/10	Depois inversão 20/10
50	39	40	8.93	9.16
100	38	30	8.70	6.87
150	35	20	8.02	4.58
200	40	15	9.16	3.44
250	45	15	10.31	3.44
300	60	-	13.74	-



Dados da Instalação

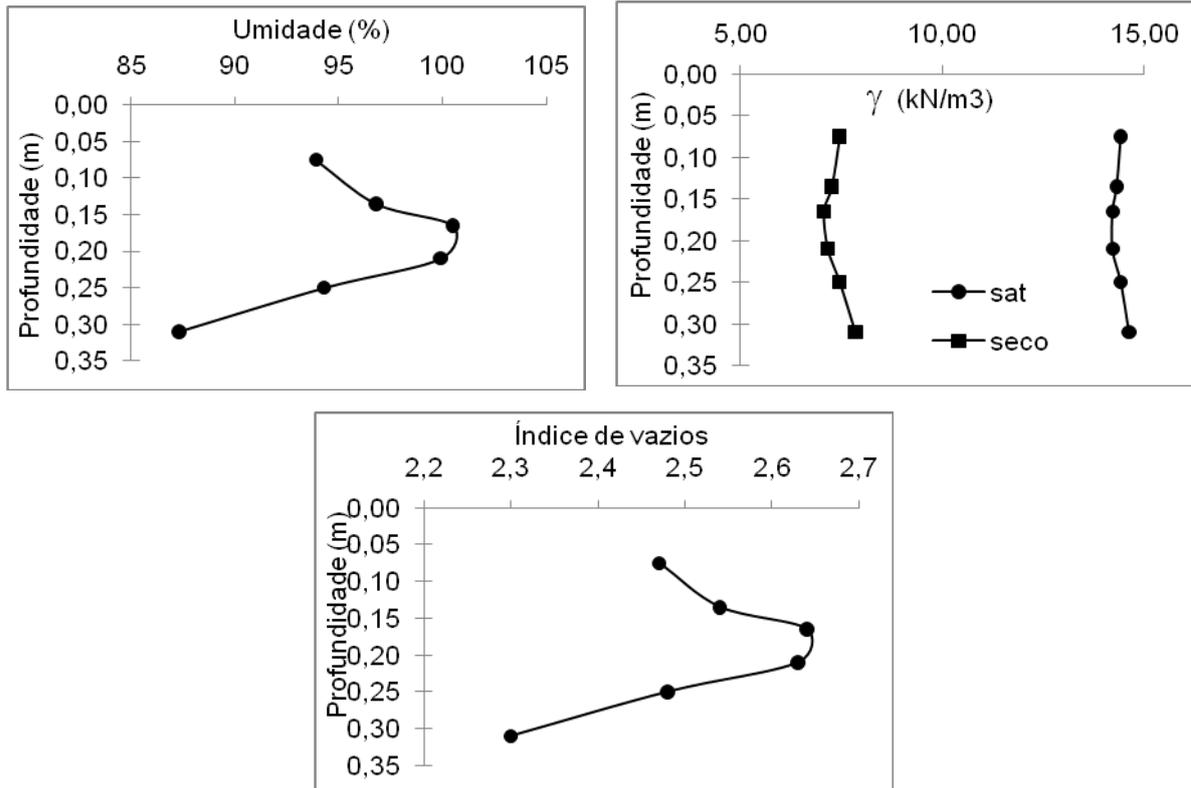
Estaca	Sucção (kgf/cm ²)	Observação
lisa	0.90	Cravação total do fuste
rugosa	0.95	Cravação total do fuste

Dados do Arrancamento

Estaca (tipo)	Peso da Estaca (g)	Peso total da Estaca (g)	Peso da bucha (g)	Caracterização da bucha	Altura da bucha (mm)
rugosa	91.00	292.5	201.5	completa	145
lisa	110.15	304.7	194.55	pequena quantidade de água	130

Caracterização após arrancamento

Amostra	Altura (m)	Profundidade (m)	Peso Total (kg)	Peso seco (kg)	Umidade (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Índice de vazios
1	0.075	0.075	0.129	0.076	93.9	14.42	7.46	2.47
2	0.060	0.135	0.102	0.059	96.8	14.32	7.26	2.54
3	0.030	0.165	0.075	0.045	100.5	14.22	7.06	2.64
4	0.045	0.210	0.086	0.049	99.9	14.22	7.16	2.63
5	0.040	0.250	0.077	0.046	94.3	14.42	7.46	2.48
6	0.060	0.310	0.106	0.063	87.3	14.62	7.85	2.30



- **Ensaio 08**

Data Inicial: 23/10

Data Final: 05/11

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	13.5
Caulim	9.0
Água destilada	28.125
Container	20.6
Camada drenante (água+ mangueira)	4.40
Container + camada drenante + solo + eletrodos	74.0
Solo	48.50

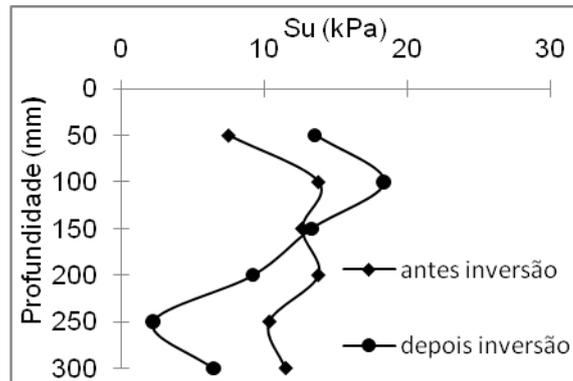
Leitura dos ensaios

Etapas	Data final	Horário final	Leitura amostra (cm)	Deslocamento (cm)
após colocação do solo	23/out	12:00	46.5	-
Sedimentação	27/out	08:00	41.7	4.95
Colocação da sobrecarga inicial (5kg)	27/out	16:00	40.7	1.0
Eletrocinese 10VDC (positivo superior) + sobrecarga 10kg	28/out	8:00	39.0	1.7
Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 10kg	28/out	16:00	36.8	2.2
Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 20kg	29/out	14:00	36.1	0.7
Eletrocinese 25VDC + sobrecarga 20 kg	29/out	16:00	33.2	2.9
Eletrocinese 30VDC + sobrecarga 20 kg	29/out	18:00	32.4	0.8
Sobrecarga 20 kg	30/out	8:40	31.9	0.5
Inversão Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 20 kg	20/out	8:00	31.7	0.2
Inversão Eletrocinese 25VDC + sobrecarga 20 kg	31/out	12:00	31.6	0.1
Sobrecarga 20 kg	31/out	8:00	31.6	0.0
Leitura final	03/nov	8:00	31.6	0.0

Resultados do Vane Test

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Pico (g.cm)		Resistência não drenada Pico (kPa)	
	Antes inversão 30/10	Depois inversão 03/11	Antes inversão 30/10	Depois inversão 03/11
50	32.5	50	7.44	13.50
100	60	80	13.74	18.32
150	55	60	12.60	13.26
200	60	40	13.74	9.16
250	45	14	10.31	2.17
300	50	28	11.45	6.41

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Residual (g.cm)		Resistência não drenada Residual (kPa)	
	Antes inversão 30/10	Depois inversão 03/11	Antes inversão 30/10	Depois inversão 03/11
50	20	30	4.58	6.68
100	36	40	8.24	9.16
150	35	24	8.02	5.50
200	40	10	9.16	2.29
250	25	5	5.74	1.45
300	13	11	2.98	2.52



Dados da Instalação

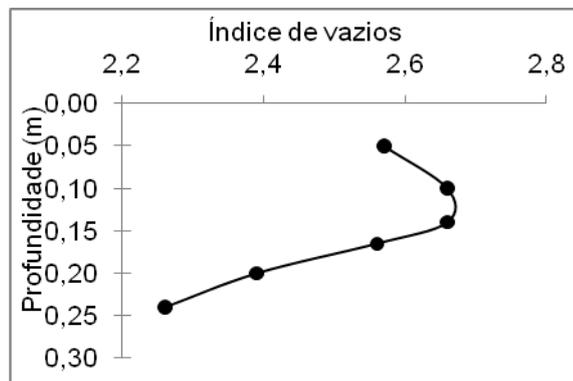
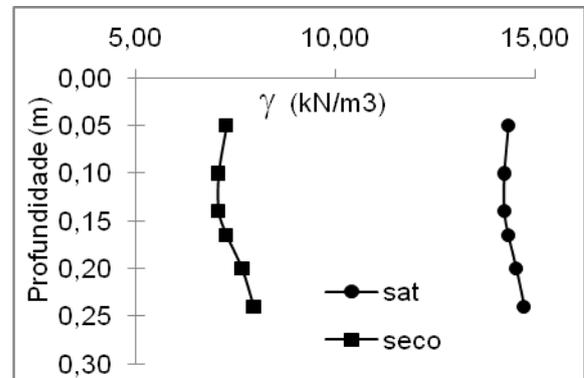
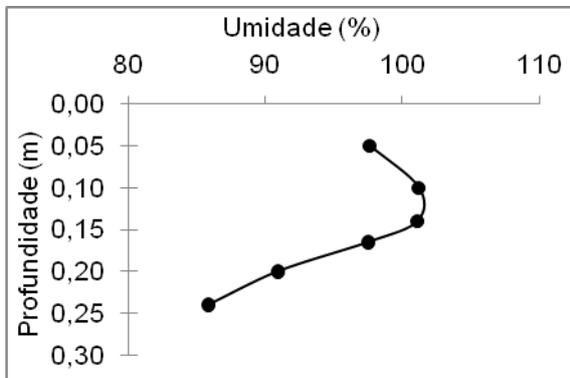
Estaca	Sucção (kgf/cm ²)	Observação
lisa	0.95	Cravação parcial do fuste (10 mm acima do topo da amostra)
rugosa	0.80	Cravação total do fuste

Dados do Arrancamento

Estaca (tipo)	Peso Estaca (g)	Peso total Estaca (g)	Peso da bucha (g)	Caracterização da bucha	Altura da bucha (mm)
rugosa	91.00	298.00	207.00	completa	145
lisa	110.15	290.30	180.15	pequena quantidade de água	130

Caracterização após arrancamento

Amostra	Altura (m)	Profundidade (m)	Peso Total (kg)	Peso seco (kg)	Umidade (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Índice de vazios
1	0.050	0.050	0.091	0.053	97.6	14.32	7.26	2.57
2	0.050	0.100	0.103	0.058	101.2	14.22	7.06	2.66
3	0.040	0.140	0.082	0.051	101.1	14.22	7.06	2.66
4	0.025	0.165	0.060	0.037	97.5	14.32	7.26	2.56
5	0.035	0.200	0.069	0.043	90.9	14.52	7.65	2.39
6	0.040	0.240	0.070	0.044	85.8	14.72	7.95	2.26
7	0.045	0.285	0.086	0.053	81.4	14.92	8.24	2.14



- **Ensaio 09**

Data Inicial: 19/11

Data Final: 01/12

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	22.0
Caulim	14.7
Água destilada	45.8
Container	156.0
Camada drenante (água+ mangueira)	9.35
Container + camada drenante + solo + eletrodos	255.2
Solo	89.85

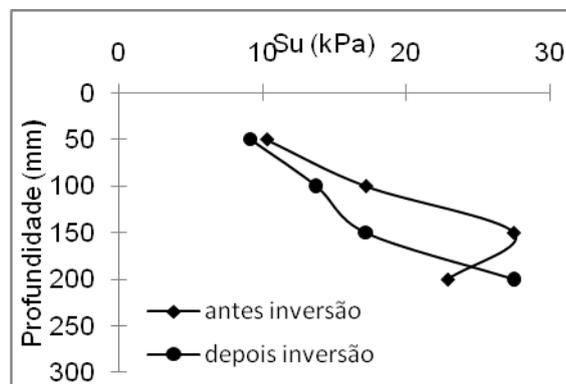
Leitura dos ensaios

Etapas	Data final	Horário final	Leitura da amostra (cm)	Deslocamento (cm)
após colocação do solo	19/nov	15:00	42.1	-
Sedimentação	23/nov	18:00	42.0	0.1
Colocação da sobrecarga inicial (12kg)	24/nov	11:00	40.8	1.2
Eletrocinese 10VDC (positivo superior) + sobrecarga 10kg	24/nov	17:00	38.9	1.9
Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 20kg	25/nov	8:00	36.5	2.4
Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 40kg	26/nov	8:00	34.4	2.1
Eletrocinese 25VDC + sobrecarga 40 kg	26/nov	10:00	34.3	0.1
Eletrocinese 30VDC + sobrecarga 40 kg	26/nov	13:00	34.3	0.0
Sobrecarga 40 kg	27/nov	7:30	34.3	0.0
Inversão Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 40 kg	28/nov	8:00	33.2	1.1
Inversão Eletrocinese 25VDC + sobrecarga 40 kg	28/nov	12:00	32.8	0.4
Sobrecarga 40 kg	30/nov	15:00	32.8	0.0
Leitura final	30/nov	15:00	32.8	-

Resultados do Vane Test

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Pico (g.cm)		Resistência não drenada Pico (kPa)	
	Antes inversão 27/11	Depois inversão 01/12	Antes inversão 27/11	Depois inversão 01/12
50	45	40	10.3	9.16
100	75	60	17.2	13.74
150	120	75	27.5	17.18
200	100	120	22.9	27.50

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Residual (g.cm)		Resistência não drenada Residual (kPa)	
	Antes inversão 27/11	Depois inversão 01/12	Antes inversão 27/11	Depois inversão 01/12
50	-	20	-	4.58
100	-	26	-	5.95
150	-	27.5	-	8.59
200	-	60	-	13.74



Dados da Instalação

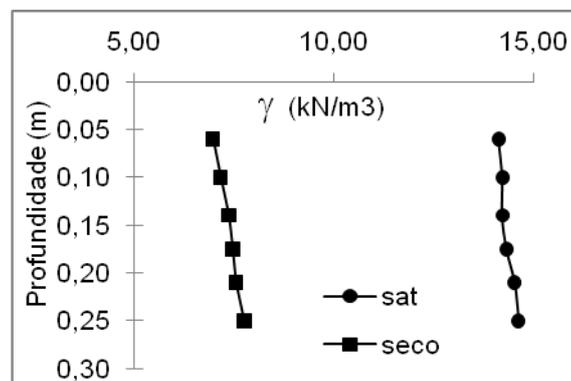
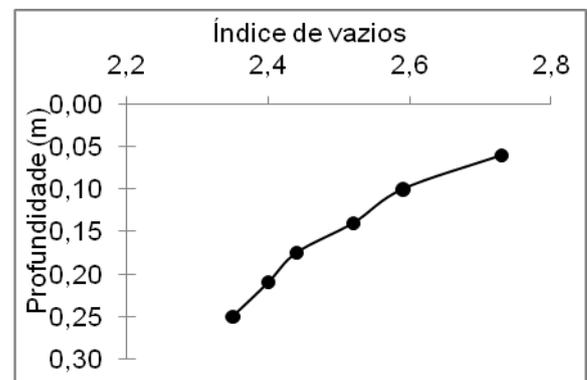
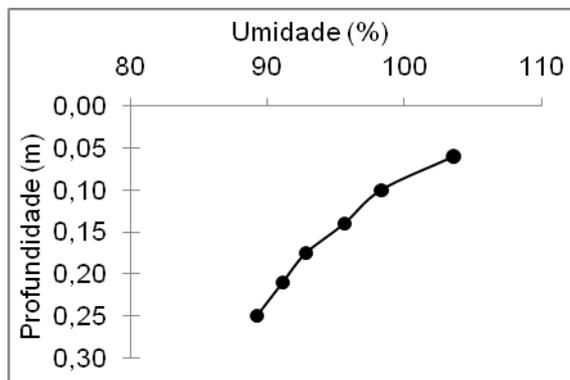
Estaca	Sucção (kgf/cm ²)	Observação
1/3 h da base	0.90	Cravação total do fuste
2/3 h da base	0.95	Cravação parcial do fuste (10 mm acima do topo da amostra)
vertical	0.90	Cravação total do fuste

Dados do Arrancamento

Estaca (tipo)	Peso da Estaca (g)	Peso total da Estaca (g)	Peso da bucha (g)	Caracterização da bucha	Altura da bucha (mm)
1/3 h da base	114.95	302.00	187.05	completa	145
2/3 h da base	112.90	290.00	177.10	pequena quantidade de água	135
vertical	114.90	291.00	176.10	pequena quantidade de água	140

Caracterização após arrancamento

Amostra	Altura (m)	Profundidade (m)	Peso Total (kg)	Peso seco (kg)	Umidade (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Índice de vazios
1	0.060	0.060	0.116	0.067	103.6	14.13	6.97	2.73
2	0.040	0.100	0.071	0.043	98.3	14.22	7.16	2.59
3	0.040	0.140	0.073	0.044	95.6	14.22	7.36	2.52
4	0.035	0.175	0.073	0.047	92.8	14.32	7.46	2.44
5	0.035	0.210	0.065	0.043	91.1	14.52	7.55	2.40
6	0.040	0.250	0.066	0.043	89.2	14.62	7.75	2.35



- **Ensaio 10**

Data Inicial: 19/11

Data Final: 01/12

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	25.0
Caulim	16.7
Água destilada	52.0
Container	156.0
Camada drenante (água+ mangueira)	21.6
Container + camada drenante + solo + eletrodos	262.4
Solo	84.8

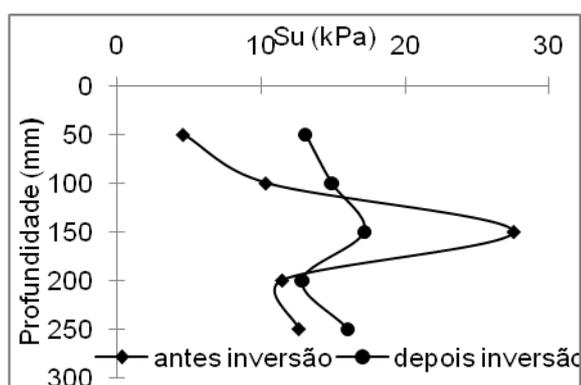
Leitura dos ensaios

Etapas	Data final	Horário final	Leitura da amostra (cm)	Deslocamento (cm)
após colocação do solo	7/dez	17:00	37.9	-
Sedimentação	8/dez	16:00	35.2	2.7
Colocação da sobrecarga inicial (12kg)	9/dez	08:00	33.2	2.0
Eletrocinese 10VDC (positivo superior) + sobrecarga 10kg	9/dez	14:00	32.9	0.3
Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 20kg	10/dez	8:00	29.8	3.1
Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 40kg	11/dez	7:30	27.7	2.1
Eletrocinese 25VDC + sobrecarga 40 kg	11/dez	10:00	27.6	0.1
Eletrocinese 30VDC + sobrecarga 40 kg	11/dez	13:30	27.4	0.2
Sobrecarga 40 kg	11/dez	20:00	27.4	0.0
Inversão Eletrocinese 20VDC + sobrecarga 40 kg	12/dez	17:30	27.2	0.2
Inversão Eletrocinese 25VDC + sobrecarga 40 kg	12/dez	22:00	27.2	0.0
Sobrecarga 40 kg	13/dez	15:00	27.2	0.0
Leitura final	13/dez	15:00	27.2	-

Resultados do Vane Test

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Pico (g.cm)		Resistência não drenada Pico (kPa)	
	Antes inversão 11/12	Depois inversão 13/12	Antes inversão 11/12	Depois inversão 13/12
50	20	57	4.58	13.06
100	60	65	10.31	14.89
150	45	75	27.50	17.18
200	50	56	11.45	12.82
250	55	70	12.6	16.03

Profundidade do ensaio (mm)	Torque Residual (g.cm)		Resistência não drenada Residual (kPa)	
	Antes inversão 11/12	Depois inversão 13/12	Antes inversão 11/12	Depois inversão 13/12
50	30	18	6.87	4.12
100	40	32	9.16	7.33
150	10	14	2.29	3.21
200	9	20	2.06	4.58
250	25	16	5.73	3.66



Dados da Instalação

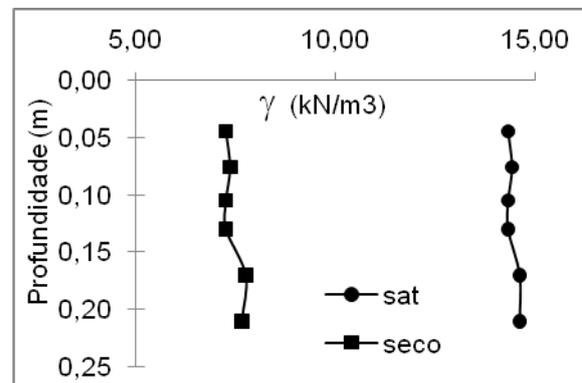
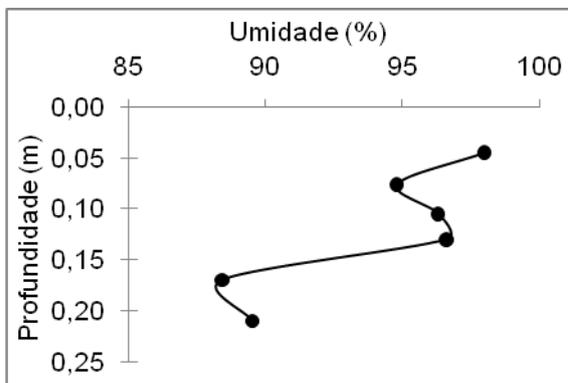
Estaca	Sucção (kgf/cm ²)	Observação
1/3 h da base	0.95	Cravação total do fuste
1/2 h da base	0.98	Cravação total do fuste
vertical	0.90	Cravação total do fuste

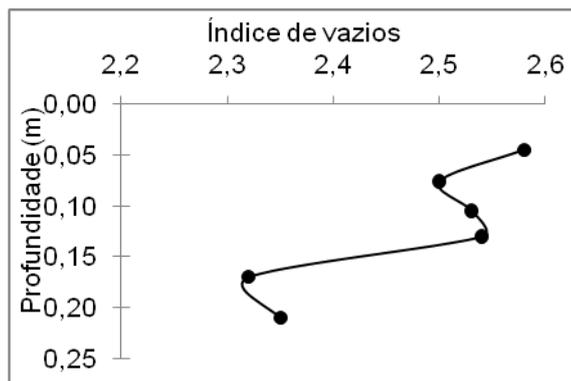
Dados do Arrancamento

Estaca (tipo)	Peso da Estaca (g)	Peso total da Estaca (g)	Peso da bucha (g)	Caracterização da bucha	Altura da bucha (mm)
1/3 h da base	112.90	312.50	199.60	completa	145
1/2 h da base	124.60	253.60	129.00	pequena quantidade de água	111
vertical	114.90	214.71	99.81	Incompleta com água	105

Caracterização após arrancamento

Amostra	Altura (m)	Profundidade (m)	Peso Total (kg)	Peso seco (kg)	Umidade (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Índice de vazios
1	0.045	0.045	0.183	0.113	98.0	14.32	7.26	2.58
2	0.031	0.076	0.067	0.044	94.8	14.42	7.36	2.50
3	0.029	0.105	0.070	0.042	96.3	14.32	7,26	2.53
4	0.025	0.130	0.067	0.043	96.6	14.32	7.26	2.54
5	0.040	0.170	0.071	0.047	88.4	14.62	7.75	2.32
6	0.040	0.210	0.073	0.045	89.5	14.62	7.65	2.35





- **Ensaio 11**

Data Inicial: 19/3

Data Final: 09/4

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	18.0
Caulim	12.0
Água destilada	37.5
Container	155.6
Camada drenante (água+ mangueira)	18.0
Container + camada drenante + solo + eletrodos	238.4
Solo	64.8

Leitura dos ensaios

Etapas	Data final	Horário final	Leitura da amostra (cm)	Deslocamento (cm)
Após colocação do solo	19/mar	13:00	32.0	-
Sedimentação	22/mar	08:00	30.1	1.9
Colocação da sobrecarga inicial (10kg)	22/mar	11:30	28.2	0.5
Sobrecarga 20kg	22/mar	14:30	27.7	0.9
Eletro-osmose 20VDC + sobrecarga 20kg	23/mar	8:00	26.8	3.7
Inversão Eletro-osmose 20VDC + sobrecarga 40kg	24/mar	7:30	23.1	0.3
Eletro-osmose 20VDC + sobrecarga 40 kg	25/mar	7:30	22.8	0.0
Sobrecarga 40 kg	09/abr	08:00	22.8	0.0
Leitura final	09/abr	08:00	22.8	-

Dados da Instalação

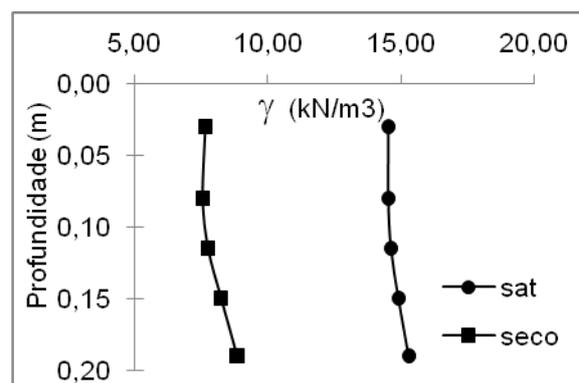
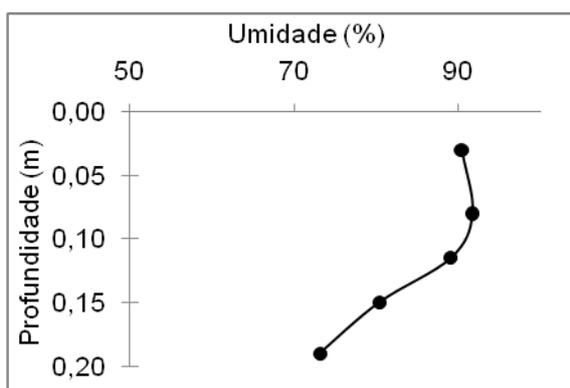
Estaca	Sucção (kgf/cm ²)	Observação
Lisa	0.95	Cravação total do fuste
Rugosa	0.95	Cravação parcial do fuste (10 mm acima do topo da da amostra)

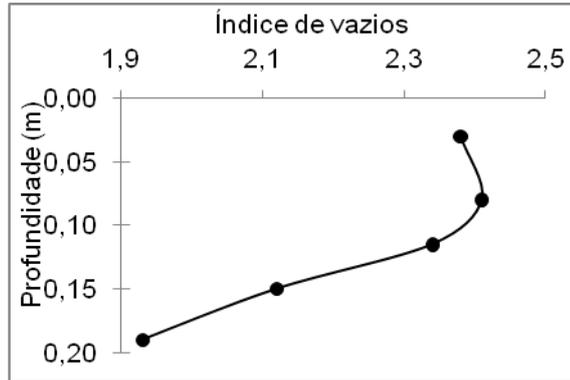
Dados do Arrancamento

Estaca (tipo)	Peso da Estaca (g)	Peso total da Estaca (g)	Peso da bucha (g)	Caracterização da bucha	Altura da bucha (mm)
Lisa	105.50	315.62	200.12	completa	145
Rugosa	95.50	291.90	196.44	pequena quantidade de água	-

Caracterização após arrancamento

Amostra	Altura (m)	Profundidade (m)	Peso Total (kg)	Peso seco (kg)	Umidade (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Índice de vazios
1	0.030	0.030	0.078	0.048	90.4	14.52	7.65	2.38
2	0.050	0.080	0.090	0.056	91.7	14.52	7.55	2.41
3	0.035	0.115	0.076	0.047	89.1	14.62	7.75	2.34
4	0.035	0.150	0.073	0.047	80.4	14.91	8.24	2.12
5	0.040	0.190	0.077	0.051	73.2	15.30	8.83	1.93





Resultados de Ensaio de Adensamento Oedométrico

Interessado: Cássia
Obra: Centrífuga
Furo: -

Data: 17/5/10
Ensaio: 11
Amostra: 60% de metacaulim -após EO vertical

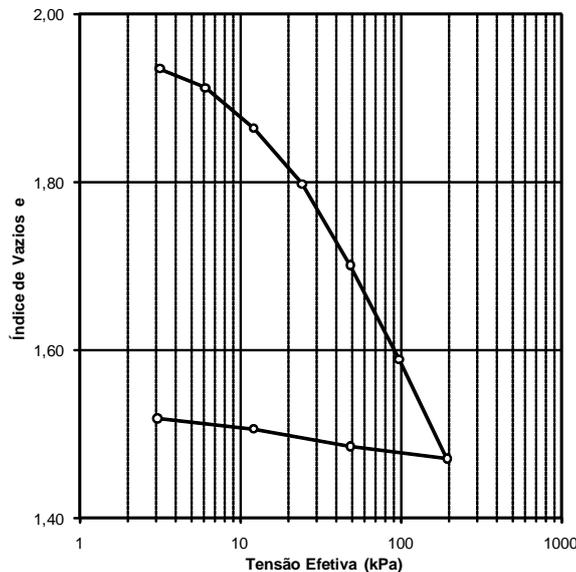
Dados do Corpo de Prova

Diâmetro: 4,99 cm	Área inicial: 19,56 cm ²	Peso específico dos grãos: 24,99 kN/m ³
Altura inicial: 1,91 cm	Umidade inicial: 77,4 %	Peso total da amostra: 56,000 g
Volume da amostra: 37,35 cm ³	Índice vazios inicial: 2,02	Peso da amostra seca: 31,571 g
Volume de sólidos: 12,38 cm ³	Grau saturação inicial: 97,8 %	Peso específico: 14,69 kN/m ³
Volume de vazios: 24,97 cm ³	Porosidade inicial: 66,9 %	Peso específico seco: 8,28 kN/m ³
Volume de água: 24,43 cm ³	Umidade final: 57,2 %	Peso específico saturado: 14,84 kN/m ³

Planilha de Resultados do Ensaio

Est. (no.)	Tensão normal σ_n (kPa)	Altura inicial: H_0 (mm)	Altura final: H_f (mm)	Varição da altura: ΔH (mm)	Altura média: H_m (mm)	t_{90} (s)	c_v (cm ² /s)	e	e/e_0	a_v (1/kPa)	m_v (1/kPa)	k (cm/s)
-	0,00	-	-	-	-	-	-	2,0170	1,000	-	-	-
1	3,19	19,100	18,580	0,520	18,840	17	4,43E-02	1,9349	0,959	2,58E-02	8,8E-03	3,81E-05
2	6,13	18,580	18,435	0,145	18,508	43	1,69E-02	1,9120	0,948	7,78E-03	2,7E-03	4,43E-06
3	12,26	18,435	18,130	0,305	18,283	64	1,11E-02	1,8638	0,924	7,86E-03	2,7E-03	2,98E-06
4	24,52	18,130	17,710	0,420	17,920	81	8,43E-03	1,7975	0,891	5,41E-03	1,9E-03	1,60E-06
5	49,04	17,710	17,100	0,610	17,405	89	7,19E-03	1,7011	0,843	3,93E-03	1,5E-03	1,03E-06
6	98,08	17,100	16,390	0,710	16,745	118	5,05E-03	1,5890	0,788	2,29E-03	8,8E-04	4,38E-07
7	196,17	16,390	15,640	0,750	16,015	128	4,25E-03	1,4705	0,729	1,21E-03	4,9E-04	2,04E-07
8	49,04	15,640	15,735	-0,095	15,688	-	-	1,4855	0,736	1,02E-04	4,1E-05	-
9	12,26	15,735	15,865	-0,130	15,800	-	-	1,5060	0,747	5,58E-04	2,2E-04	-
10	3,07	15,865	15,945	-0,080	15,905	-	-	1,5187	0,753	1,37E-03	-	-

Varição do índice de vazios e com a tensão efetiva



- **Ensaio 12**

Data Inicial: 20/4

Data Final: 07/5

Pesagem Material

Componente	Quantidade (Kg)
Metacaulim	18.0
Caulim	12.0
Água destilada	37.5
Container	155.6
Camada drenante (água+ mangueira)	24.4
Container + camada drenante + solo + eletrodos	243.2
Solo	63.2

Leitura dos ensaios

Etapas	Data final	Horário final	Leitura da amostra (cm)	Deslocamento (cm)
Após colocação do solo	20/abr	17:00	32.0	-
Sedimentação	23/abr	13:30	30.1	1.9
Colocação da sobrecarga inicial (10kg)	23/abr	16:30	29.6	0.5
Sobrecarga 20kg	23/abr	20:00	28.7	0.9
Eletro-osmose 20VDC + sobrecarga 20kg	24/abr	13:00	25.0	3.7
Inversão Eletro-osmose 20VDC + sobrecarga 40kg	25/abr	12:30	24.7	0.3
Eletro-osmose 20VDC + sobrecarga 40 kg	26/abr	12:30	24.4	0.0
Sobrecarga 40 kg	06/5	08:00	24.4	0.0
Leitura final		08:00	24.4	-

Dados da Instalação

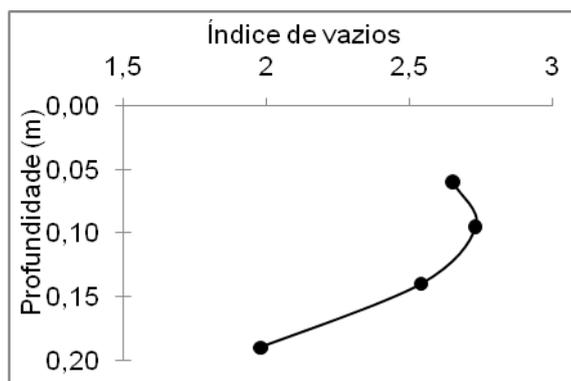
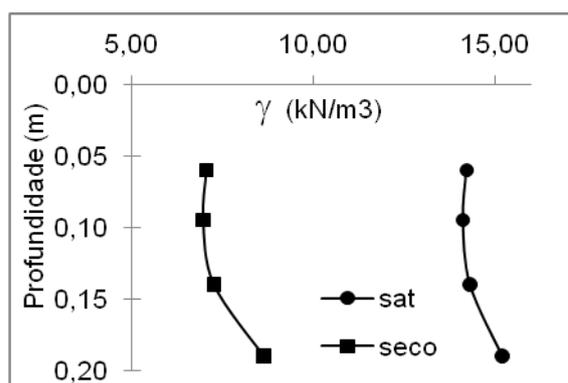
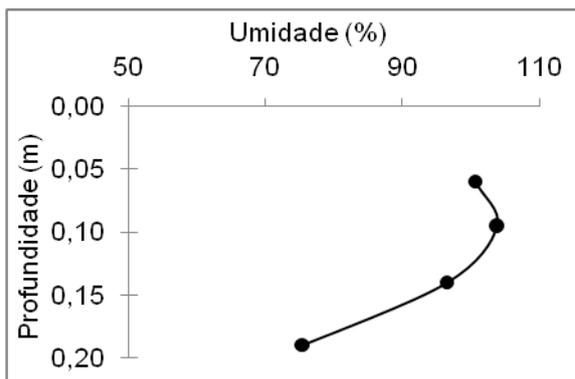
Estaca	Sucção (kgf/cm ²)	Observação
Lisa	0.95	Cravação total do fuste
Rugosa	0.95	Cravação parcial do fuste (10 mm acima do topo da da amostra)

Dados do Arrancamento

Estaca (tipo)	Peso da Estaca (g)	Peso total da Estaca (g)	Peso da bucha (g)	Caracterização da bucha	Altura da bucha (mm)
Lisa	105.50	315.62	200.12	completa	145
Rugosa	95.50	291.90	196.44	pequena quantidade de água	-

Caracterização após arrancamento

Amostra	Altura (m)	Profundidade (m)	Peso Total (kg)	Peso seco (kg)	Umidade (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Índice de vazios
1	0.060	0.060	0.011	0.059	100.7	14.22	7.06	2.65
2	0.035	0.095	0.068	0.041	103.8	14.13	6.97	2.73
3	0.035	0.140	0.077	0.045	96.5	14.32	7.26	2.54
4	0.050	0.190	0.104	0.066	75.3	15.21	8.63	1.98



Resultados de Ensaio de Adensamento Oedométrico

Interessado: Cássia

Obra: Centrifuga

Furo: -

Data: 18/5/10

Ensaio: 12

Amostra:

60% de metacaulim -após EO vertical

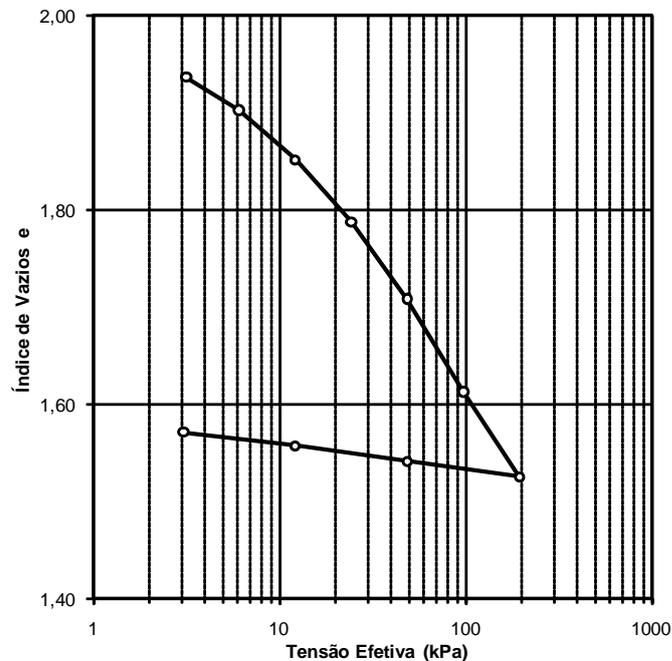
Dados do Corpo de Prova

Diâmetro: 4,99 cm	Área inicial: 19,56 cm ²	Peso específico dos grãos: 24,99 kN/m ³
Altura inicial: 1,91 cm	Umidade inicial: 78,9 %	Peso total da amostra: 56,000 g
Volume da amostra: 37,35 cm ³	Índice vazios inicial: 2,04	Peso da amostra seca: 31,301 g
Volume de sólidos: 12,27 cm ³	Grau saturação inicial: 98,5 %	Peso específico: 14,69 kN/m ³
Volume de vazios: 25,08 cm ³	Porosidade inicial: 67,1 %	Peso específico seco: 8,21 kN/m ³
Volume de água: 24,70 cm ³	Umidade final: 60,4 %	Peso específico saturado: 14,79 kN/m ³

Planilha de Resultados do Ensaio

Est. (no.)	Tensão normal σ_n (kPa)	Altura inicial: H_0 (mm)	Altura final: H_f (mm)	Varição da altura: ΔH (mm)	Altura média: H_m (mm)	t_{90} (s)	c_v (cm ² /s)	e	e/e_0	a_v (1/kPa)	m_v (1/kPa)	k (cm/s)
-	0,00	-	-	-	-	-	-	2,0430	1,000	-	-	-
1	3,19	19,100	18,430	0,670	18,765	19	3,93E-02	1,9363	0,948	3,35E-02	1,1E-02	4,39E-05
2	6,13	18,430	18,215	0,215	18,323	89	8,00E-03	1,9020	0,931	1,16E-02	4,0E-03	3,15E-06
3	12,26	18,215	17,895	0,320	18,055	105	6,58E-03	1,8511	0,906	8,32E-03	2,9E-03	1,88E-06
4	24,52	17,895	17,495	0,400	17,695	85	7,81E-03	1,7873	0,875	5,20E-03	1,9E-03	1,43E-06
5	49,04	17,495	17,000	0,495	17,248	69	9,18E-03	1,7085	0,836	3,22E-03	1,2E-03	1,07E-06
6	98,08	17,000	16,400	0,600	16,700	54	1,09E-02	1,6129	0,789	1,95E-03	7,5E-04	7,99E-07
7	196,17	16,400	15,850	0,550	16,125	69	8,02E-03	1,5252	0,747	8,93E-04	3,5E-04	2,78E-07
8	49,04	15,850	15,950	-0,100	15,900	-	-	1,5412	0,754	1,08E-04	4,3E-05	-
9	12,26	15,950	16,050	-0,100	16,000	-	-	1,5571	0,762	4,33E-04	1,7E-04	-
10	3,07	16,050	16,140	-0,090	16,095	-	-	1,5715	0,769	1,56E-03	-	-

Varição do índice de vazios e com a tensão efetiva



Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X (EDX)

Análise	Porcentagem	
	Modelo 11	Modelo 12
SiO ₂	49.237	48.123
Al ₂ O ₃	44.083	44.512
Fe ₂ O ₃	2.527	2.469
K ₂ O	1.642	1.871
SO ₃	1.250	1.790
TiO ₂	1.047	1.072
CaO	0.103	0.117
V ₂ O ₅	0.061	0.030
ZrO ₂	0.016	0.012
SrO	-	0.004
Ir ₂ O ₃	0.034	-