

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DA PROPOSTA DE UMA CENTRÍFUGA
GEOTÉCNICA PARA A UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

ARIANE BARRETO SOARES DO P. LOPES

ORIENTADOR: GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL – SEGUNDA ETAPA**

BRASÍLIA / DF: JULHO – 2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DA PROPOSTA DE UMA CENTRÍFUGA
GEOTÉCNICA PARA A UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

ARIANE BARRETO SOARES DO P. LOPES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**PROF. GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, D.Sc. (ENC/FT/UNB)
(ORIENTADOR)**

**PROF. JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, D.Sc. (ENC/FT/UNB)
(EXAMINADORA INTERNO)**

**ENG. DANIEL SOSTI PERINI, M.SC. (MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 01 de julho de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

LOPES, ARIANE BARRETO SOARES DO PATROCÍNIO

Estudo da Proposta de uma Centrífuga Geotécnica Para a Universidade de Brasília

2016

xi, 86 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final – Primeira Etapa - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Centrífugas Geotécnicas

2. Modelagem

3. Leis de Escala

4. Ensaios centrífugos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Lopes, A. B. S. P. (2016). Estudo da Proposta de uma Centrífuga Geotécnica Para a Universidade de Brasília. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ariane Barreto Soares do Patrocínio Lopes

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo da Proposta de uma Centrífuga Geotécnica Para a Universidade de Brasília

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final – Primeira Etapa e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final – Primeira Etapa pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Ariane Barreto Soares do Patrocínio Lopes

AOS 1, bloco G, apt. 401

70660-017 – Brasília/DF – Brasil

RESUMO

Este trabalho tem o intuito de estudar a proposta de aquisição de uma centrífuga geotécnica para o Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. Para tanto, foi realizado um estudo do conceito de modelagem física e sua importância. Ensaio centrífugo faz parte dessa grande área de estudo e cada vez mais se tornam presentes nesse meio.

Apresentou-se então a centrífuga geotécnica, máquina que rotaciona ao redor de um eixo, criando dentro de um espaço amostral, uma aceleração radial que simula a atuação da gravidade, mas a valores N vezes maiores. Isso permite que modelos físicos N vezes inferiores ao protótipo possam simular os fenômenos geotécnicos que acontecem. Basicamente, existem centrífugas de viga e de tambor, e as características de cada uma são apresentadas no trabalho.

Posteriormente, foi discutido o processo de modelagem para definição das grandezas a serem utilizadas no modelo e em seguida foram definidos os efeitos de escala, maior crítica à prática de estudo em modelos reduzidos, para ressaltar que há medidas para evita-los ou reduzi-los, de modo que os fenômenos do protótipo sejam corretamente simulados.

Considerações práticas dos ensaios centrífugos definidas por PHILLIPS (1995) foram listadas e discutidas para maior entendimento do funcionamento dessa máquina. Uma visita ao laboratório de ensaios centrífugos da Universidade Federal do Rio de Janeiro permitiu verificar grande parte do que foi estudado enquanto se acompanhava um voo de um modelo na mini-centrífuga de viga.

Compreendido o conceito de ensaios centrífugos e aceito que as centrífugas são equipamentos bastante úteis e de aplicação comum no meio científico geotécnico, foi estudada sua adequação aos temas de estudo da UnB. Para isso, foram realizados estudo de casos com pesquisas que abordaram reforços com geossintéticos, desenvolvimento de penetrômetros CPT e Barra-T e de aterros de resíduos sólidos.

Em seguida, apresentou-se a proposta de uma centrífuga de tambor basculante da empresa Thomas Broadbent & Sons Ltd., listando-se aspectos técnicos e econômicos da mesma, sem a quebra dos critérios de sigilo do contrato. Considerando tudo que foi estudado, foi feita uma análise da proposta e da sua adequação as condições da universidade. Por fim, concluiu-se que a proposta é adequada para desenvolvimento e crescimento das pesquisas geotécnicas na UnB, mas que não poderá ser adotada por falta de financiamento.

SUMÁRIO

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. | OBJETIVOS | 1 |
| 1.2. | METODOLOGIA..... | 2 |
| 1.3. | ESTRUTURA DO TRABALHO | 2 |
| 2. | MODELAGEM FÍSICA EM CENTRÍFUGAS GEOTÉCNICAS | 3 |
| 2.1. | MODELAGEM FÍSICA E ANÁLISE NUMÉRICA..... | 4 |
| 2.2. | MODELAGEM CENTRÍFUGA..... | 5 |
| 3. | CENTRÍFUGAS..... | 6 |
| 3.1. | HISTÓRIA | 7 |
| 3.2. | TIPOS DE CENTRÍFUGA | 8 |
| 3.2.1 | CENTRÍFUGA DE VIGA | 8 |
| 3.2.2 | CENTRIFUGA DE TAMBOR | 10 |
| 3.2.3 | CENTRÍFUGA MODULAR | 13 |
| 3.3. | CENTRÍFUGAS BRASILEIRAS..... | 14 |
| 3.4. | CENTRÍFUGAS DO MUNDO..... | 16 |
| 4. | MODELAGEM | 20 |
| 4.1. | MOVIMENTO CIRCULAR..... | 21 |
| 4.2. | LEIS DE ESCALA..... | 23 |
| 4.2.1. | DIMENSÕES LINEARES | 23 |
| 4.2.2. | ADENSAMENTO..... | 26 |
| 4.2.3. | FORÇA E TRABALHO | 27 |
| 4.2.4. | PRINCIPAIS LEIS DE ESCALA..... | 28 |
| 4.3. | EFEITO DE ESCALA | 30 |
| 4.3.1. | “MODELAGEM DE MODELOS” | 30 |
| 4.3.2. | EFEITO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS | 31 |
| 4.3.3. | EFEITO DO CAMPO DE ACELERAÇÃO ROTATIVO..... | 32 |
| 4.3.4. | EFEITO DO CAMPO GRAVITACIONAL TERRESTRE..... | 34 |
| 5. | CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS | 35 |

| | |
|---|----|
| 5.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO..... | 35 |
| 5.2. DESIGN DO ENSAIO | 39 |
| 5.3. PREPARO DO MODELO | 41 |
| 5.4. CONTROLE DE FLUÍDOS..... | 44 |
| 5.5. ATUAÇÃO..... | 45 |
| 5.6. INSTRUMENTAÇÃO | 46 |
| 5.7. AQUISIÇÃO DE DADOS | 48 |
| 5.8. REALIZAÇÃO DO ENSAIO | 50 |
| | |
| 6. VISITA AO LABORATÓRIO DA COPPE..... | 51 |
| 6.1. VISÃO GERAL..... | 51 |
| 6.2. CENTRIFUGAS DA COPPE | 55 |
| 6.3. ÁREAS DE PESQUISA..... | 57 |
| | |
| 7. ENSAIOS CENTRÍFUGOS | 59 |
| 7.1. GEOSSINTÉTICOS..... | 60 |
| 7.1.1 VALIDAÇÃO EM CENTRÍFUGA DE ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA PLATAFORMA ESTAQUEADA REFORÇADA COM GEOSSINTÉTICOS..... | 61 |
| 7.1.2. ANCORAGEM DE DUTOS ENTERRADOS COM GEOGRELHAS..... | 64 |
| 7.2. DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS PARA ENSAIO CPT E BARRA-T 66 | |
| 7.2.1. PENETRÔMETRO DE BARRA-T E CPT PARA INVESTIGAÇÃO EM ENSAIOS CENTRÍFUGOS | 67 |
| 7.3. ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS | 71 |
| 7.3.1. COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE RESÍDUOS SÓLIDO URBANOS 72 | |
| | |
| 8. PROPOSTA APRESENTADA A UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA..... | 75 |
| 8.1. CENTRÍFUGA DE TAMBOR BASCULANTE..... | 76 |
| 8.2. ANÁLISE DA PROPOSTA..... | 79 |
| | |
| 9. CONCLUSÕES | 81 |
| | |
| 10. REFERÊNCIAS..... | 82 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1. Centrífuga de viga assimétrica (UNIVERSIDADE DO COLORADO, 2012). | 9 |
| Figura 3.2. Centrífuga de viga simétrica (NUS, 2015). | 9 |
| Figura 3.3. Centrífuga com plataforma acoplada por dobradiças do Instituto Politécnico Rensselaer (NEES, 2015). | 10 |
| Figura 3.4. Centrífuga geotécnica da Universidade da Austrália Ocidental - COFS/UWA (CASSIDY e BYRNE, 2001). | 10 |
| Figura 3.5. Secionamento do canal de uma centrífuga de tambor, para funcionamento semelhante a uma de viga (FAGUNDES, 2010). | 11 |
| Figura 3.6. a) Atuador radial e b) Atuador angular (OLIVEIRA, 2005). | 11 |
| Figura 3.7. Mudança do eixo do atuador da posição (1) para a (2), enquanto este rotaciona simultaneamente com o modelo. | 12 |
| Figura 3.8. Posições do eixo de rotação (OLIVEIRA, 2005). | 13 |
| Figura 3.9. Centrífuga Modular Broadbent, Modelo GMB/D GT50/1.7 GT880/2.2, a) Ambiente de teste em viga e b) ambiente de teste em tambor (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009). | 14 |
| Figura 3.10 Centrífuga da UENF (KOPSCHITZ, 2013). | 15 |
| Figura 3.11. Centrífuga para ensaio de modelos reduzidos IPT (IPT, 2015). | 16 |
| Figura 4.1. Tensões inerciais do modelo centrífugo induzidas pela rotação e tensões gravitacionais no protótipo. | 21 |
| Figura 4.2. Esquema de um corpo de massa m em movimento circular. | 22 |
| Figura 4.3. Descrição das forças no movimento circular em uma centrífuga geotécnica: a) Força Centrípeta e b) Força Centrífuga. | 23 |
| Figura 4.4. Comparação da variação de tensões com a profundidade de um modelo centrífugo e o protótipo (CALLE, 2007). | 25 |
| Figura 4.5. Princípio da modelagem de modelos (KO, 1988). | 31 |
| Figura 4.6. Comparação da aceleração radial do modelo em três pontos distintos (a) vista lateral e (b) planta. | 33 |
| Figura 4.7. Representação gráfica do efeito Coriolis. | 33 |
| Figura 5.1. Vista da plataforma da centrífuga de viga da UENF com a caixa teste com janela de visualização (SANTIAGO, ALBUQUERQUE, <i>et al.</i> , 2010). | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.2. a) Set de caixas de teste para a centrífuga de tambor da empresa Broadbent G-Max e b) a instalação das mesmas no canal da centrífuga (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009)..... | 36 |
| Figura 5.3. Movimento ao redor de um túnel visto a) em um modelo inteiro e b) em metade de um modelo, através de um plano transparente. | 37 |
| Figura 5.4. Caixa retangular com divisória e container laminar circular, ambos do Centro de Simulação de Engenharia Sísmica do Instituto Politécnico Rensselaer (NEES, 2015). | 38 |
| Figura 5.5. Comparação do protótipo e do modelo de Hartmann (a e b) e foto do platô móvel perfurado (HARTMANN, 2012)..... | 39 |
| Figura 5.6. Despejo de areia seca em centrífuga de tambor por tubo (LAUE, 2001)..... | 42 |
| Figura 5.7. Disco rotativo espalhando areia no canal da centrífuga de tambor da ETHZ (LAUE, 2001)..... | 43 |
| Figura 5.8. Diferenças no aspecto da camada final pelos processos de grumo e lama (OLIVEIRA, 2005). | 44 |
| Figura 5.9. Colocação da lama em voo (OLIVEIRA, 2005)..... | 44 |
| Figura 5.10. Seção transversal do canal de amostras (OLIVEIRA, 2005)..... | 45 |
| Figura 5.11. Esboço de um sistema de aquisição de dados típico (PHILLIPS, 1995)..... | 49 |
| Figura 5.12. Componentes de um anel deslizante (CATÁLOGO MOOG COMPONENTS, 2015)..... | 50 |
| Figura 6.1. Talha elétrica para auxílio no transporte de equipamentos..... | 52 |
| Figura 6.2 Centrífuga de viga de tambor da COPPE/UFRJ..... | 52 |
| Figura 6.3. Painéis de Parada de Emergência, <i>No break</i> , Controle da Centrífuga e Aquisição de dados da Centrífuga de Viga | 53 |
| Figura 6.4 Placa coberta com geotêxtil não tecido para aplicação de tensões em áreas e adensamento na centrífuga de tambor. | 53 |
| Figura 6.5 Barra T para caracterização de solo mole em centrífugas de tambor. | 54 |
| Figura 6.6 Placa para execução de grupo de estacas em centrífuga de tambor..... | 54 |
| Figura 6.7 Montagem de atuador de movimentação vertical, célula de carga e duto. | 54 |
| Figura 6.8. Câmera para monitoramento do ensaio na centrífuga de viga. | 55 |
| Figura 6.9. Caixa utilizada na centrífuga de tambor (MACHADO, 2016). | 55 |
| Figura 6.10. Sistema de aquisição de dados e instrumentação (local da mesa central) da centrífuga de tambor..... | 56 |
| Figura 6.11. Caixa da centrífuga de braço. | 56 |
| Figura 6.12. Funil para despejo de areia na centrífuga de viga..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.13 a) Carrinho e malha de aço para distribuição da areia e b) Carrinho preenchido com o material..... | 58 |
| Figura 7.1 Mecanismo de transferência de cargas em aterros estaqueados reforçados com geossintéticos (BLANC, DIAS, <i>et al.</i> , 2014)..... | 62 |
| Figura 7.2. MT dentro da caixa da centrífuga de viga (BLANC, DIAS, <i>et al.</i> , 2014)..... | 62 |
| Figura 7.3. Visão superior da bandeja perfurada (BLANC, DIAS, <i>et al.</i> , 2014)..... | 64 |
| Figura 7.4. Representação ilustrativa da montagem do modelo (SANTIAGO, SABOYA, <i>et al.</i> , 2010). | 66 |
| Figura 7.5. Barra-T (ALMEIDA, OLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2011)..... | 68 |
| Figura 7.6 Barra-T em posição para penetração (ALMEIDA, OLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2011). | 69 |
| Figura 7.7. Visão geral do mini-CPT (ALMEIDA, OLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2011)..... | 70 |
| Figura 7.8. Modelagem de modelos para o mini-CPT com rejeitos siltosos na análise do protótipo com profundidade Z e carga medida q_c (ALMEIDA, OLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2011)..... | 71 |
| Figura 7.9. Equipamentos da modelagem a) Caixa com a câmera e b) lâminas de montagem dos taludes (CALLE, 2007). | 73 |
| Figura 7.10. Talude montado na centrífuga com as linhas de açúcar (CALLE, 2007)..... | 74 |
| Figura 7.11. Talude deformado em ruptura (CALLE, 2007)..... | 74 |
| Figura 7.12. Análise da Ruptura (CALLE, 2007). | 75 |
| Figura 8.1. Set de caixas de teste para a centrífuga de tambor da empresa Broadbent G-Max (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009)..... | 76 |
| Figura 8.2. a) Configuração vertical b) configuração horizontal (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009)..... | 77 |
| Figura 8.3. Janelas de acrílico da chapa lateral auxiliar do canal (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009)..... | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 Centrífugas Geotécnicas em utilização no mundo | 17 |
| Tabela 4.1 Resumo das leis de escala na modelagem (CALLE, 2007) | 29 |
| Tabela 7.1. Características do Geossintético utilizado no modelo centrífugo (BLANC, DIAS, <i>et al.</i> , 2014)..... | 63 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|---|
| a | Aceleração |
| a_r | Aceleração radial |
| c_v | Coefficiente de adensamento |
| F | Força |
| g | Aceleração da gravidade |
| H | Altura de camada adensada |
| h_i | Profundidade onde as tensão modelo e protótipo são iguais |
| h_m | Profundidade do modelo |
| h_p | Profundidade do protótipo |
| m | Massa do modelo |
| N | Relação entre o Campo Inercial e o Campo Gravitacional (Fator de Escala) |
| r | Raio de rotação |
| R_e | Raio efetivo |
| r_o | Índice de máxima sobre-tensão |
| r_u | Índice de máxima sub-tensão |
| T_v | Coefficiente adimensional de tempo usado para indicar o grau de adensamento |
| t | Tempo |
| W | Trabalho |
| z | Profundidade da camada de solo |
| σ | Tensão |
| ρ | Massa específica |
| ω | Velocidade angular |

SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| COPPE | Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia |
| EUA | Estados Unidos da América |
| Fapesp | Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo |
| HKUST | <i>The Hong Kong University of Science and Technology</i> |
| IFSTTAR | <i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'Aménagement et de Réseaux</i> |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas |
| LPT | <i>Load Platform Transfer</i> |
| Petrobras | Petróleo Brasileiro S. A |
| UNEF | Universidade do Estadual do Norte Fluminense |
| UFRJ | Universidade Federal do Rio de Janeiro |
| UnB | Universidade de Brasília |

1. INTRODUÇÃO

As particularidades de comportamento dos diversos tipos de solo e das variadas obras geotécnicas tornam fundamental a instrumentação para adequada observação de seu comportamento. Sobre esse aspecto, laboratórios de geotecnia estão sempre evoluindo com novas pesquisas e tecnologias para tornar cada vez mais eficiente e menos oneroso o estudo do solo. A centrífuga geotécnica é um equipamento presente em centros de pesquisas do mundo todo e busca auxiliar os pesquisadores na análise de modelos físicos reduzidos de maneira a economizar recursos caso fossem construídas obras em tamanho real.

O laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília possui infraestrutura que busca atender as exigências dos programas de graduação e pós-graduação oferecidos pela faculdade. Entretanto, tal laboratório ainda apresenta carência de certas áreas de pesquisa, como no caso da simulação física. Dentre os 285 trabalhos de mestrado e doutorado realizados entre 2000 e 2015, menos de 6 % mencionavam técnicas de modelagem física, sendo que nem sempre essas eram adotadas, optando por análises numéricas ou computacionais (UNB, 2015).

A compra de uma centrífuga geotécnica para o laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília apresenta a possibilidade de igualá-lo a laboratórios dessa linha de pesquisa. Contudo, a aquisição desse equipamento não é simples, pois é um maquinário caro, que requer modificações no layout do laboratório e que demanda alto consumo elétrico. Desta forma, a proposta desse trabalho é estudar o que é uma centrífuga geotécnica e os ensaios que nela podem ser realizados para averiguar suas vantagens de modo que se justifique sua compra e utilização.

1.1. OBJETIVOS

Define-se como o objetivo geral aprender sobre os ensaios centrífugos e sobre as máquinas conhecidas como centrífugas geotécnicas. O objetivo específico é analisar os tipos de obras que podem ser estudadas com esse tipo de equipamento e averiguar a vantagem da aquisição, hipotética, de uma centrífuga para o laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília.

1.2. METODOLOGIA

Para a realização dos estudos acerca da temática de ensaios físicos em centrífugas geotécnicas, almejando levantar um conjunto de referências bibliográficas a respeito do assunto, foram feitas pesquisas em livros e artigos de autores consagrados no assunto; dissertações de mestrado e teses de doutorado e consultas em catálogos ou publicações de empresas do mercado de equipamentos correlatos. Por meio da metodologia citada, deseja-se apresentar um trabalho com um embasamento teórico capaz de auxiliar e subsidiar informações para futuros trabalhos ou pesquisas. Realizou-se também uma visita ao laboratório de ensaios centrífugos da Universidade Federal do Rio de Janeiro para conhecer as características gerais das suas instalações, funcionamento e acompanhar a realização de um ensaio.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em oito capítulos, apresentando-se a seguir uma breve descrição de cada um deles:

O *Capítulo 1* é uma introdução geral ao tema abordado no trabalho, apresentando o conceito de modelagem para estudos geotécnicos e da utilização das máquinas denominadas centrífugas geotécnicas. Além disso, há a apresentação dos objetivos, da metodologia de estudo e da própria estrutura do trabalho.

No *Capítulo 2* é aprofundado um pouco mais o conceito de modelagem física e suas aplicações e críticas. Nesse capítulo é apresentado como essa metodologia é adotada dentro das centrífugas geotécnicas, procedimento denominado de modelagem centrífuga.

O *Capítulo 3* aborda as próprias centrífugas geotécnicas, com um breve histórico do desenvolvimento dos maquinários, apresentando os tipos mais comuns existentes na atualidade, com exemplos de centrífugas de diversas instituições de pesquisa ao redor do mundo.

No *Capítulo 4* faz-se um estudo do procedimento de modelagem, ou seja, das considerações que devem ser feitas ao se propor um modelo de escala reduzida, as leis de escalas que devem ser obedecidas e os efeitos de escalas que devem ser evitados.

O *Capítulo 5* discorre sobre as considerações práticas de um ensaio centrífugo. Assim, apresenta-se os equipamentos utilizados, como eles são manuseados e preparados e os sistemas de atuação, instrumentação e aquisição de dados.

O *Capítulo 6* é o registro da visita ao laboratório de ensaios centrífugos da COPPE/UFRJ, com descrição dos equipamentos, dos procedimentos acompanhados e das pesquisas que se desenvolvem com o auxílio da centrífuga geotécnica.

No *Capítulo 7* é apresentado resumos de algumas pesquisas que adotaram ensaios centrífugos para diferentes situações, escolhidas e citadas no presente trabalho por tratarem de temas abordados pelo Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB.

O *Capítulo 8* apresenta a proposta de uma centrífuga de tambor basculante para o laboratório de geotecnia da UnB, com uma análise dessa proposta sobre o aspecto de tudo que foi estudado.

O *Capítulo 9* apresenta as conclusões desse trabalho, com propostas de futuras pesquisas.

2. MODELAGEM FÍSICA EM CENTRÍFUGAS GEOTÉCNICAS

A modelagem física incide em reproduzir eventos de obras de tamanho real, em um modelo de escala, geralmente, reduzida. Ela tem um importante papel nos estudos geotécnicos modernos, uma vez que permite a compreensão dos fenômenos físicos associados a problemas reais. Apesar de ser condição básica da modelagem que exista semelhança geométrica entre protótipos e modelo, esse último não é simplesmente uma maquete do primeiro (CARNEIRO, 1993).

O conceito fundamental da modelagem física é o da similitude. Consiste no princípio de que, tendo-se dois processos físicos semelhantes, é possível prever o comportamento de um quando se é conhecido o comportamento do outro. Na modelagem física, tais processos são o protótipo e seu modelo (NOREÑA, 2015). Para tal fim, é primeiramente necessário estabelecer certas relações bem definidas entre o modelo e o protótipo. Estas relações são chamadas leis de modelagem ou condições de projeto do modelo, que podem ser obtidas utilizando os princípios de similitude (KOBAYASHI, 1993, HARRIS e SABNIS, 1999). Os ensaios são, em geral, conduzidos no modelo por apresentar maior facilidade de execução.

É difícil reproduzir todas as condições impostas pela semelhança física. Se um modelo e protótipo forem constituídos de mesmo material, as forças de gravidade serão reproduzidas

em escala diferente da escala da resistência, por exemplo. Tais dificuldades, no entanto, não implicam na condenação do uso de modelos reduzidos. De fato, as discrepâncias existentes incentivam a melhoria dos modelos e das avaliações dos seus resultados (CARNEIRO, 1993).

Foi sob tais condições que surgiu o conceito de modelagem em centrífuga. Como será discutido mais à frente nesse trabalho, ao ensaiarmos o modelo dentro de um ambiente rotacional é possível representar, ou representar com maior acurácia, certos aspectos do protótipo que, em condições normais, não seriam satisfatórias em escalas tão reduzidas.

2.1. MODELAGEM FÍSICA E ANÁLISE NUMÉRICA

Por vezes, ao se examinar trabalhos e artigos de ensaios geotécnicos, é possível encontrar situações onde a modelagem física seria uma abordagem adequada, mas não era aplicada por não ser viável ou por preferência de aplicação de análises numéricas. Não é de interesse do presente projeto questionar as decisões tomadas em outras pesquisas, muito menos criticar a escolha da abordagem analítica, uma vez que essa é importante para os estudos geotécnicos. Contudo, uma vez que é objetivo do trabalho estudar as vantagens de um tipo de modelagem física, torna-se importante ressaltar as diferenças entre as duas e os aspectos que podem tornar a modelagem física mais interessante.

A modelagem numérica é aqui interpretada como qualquer metodologia de estudo dos fenômenos geotécnicos que não requerem modelos físicos para obter resultados representativos. Ou seja, são os softwares de simulação, equações e aproximações numéricas. A validade dessas abordagens foi consolidada com o tempo, através de experiência e estudo de casos que permitiam calibrar os parâmetros e as variáveis que as regem. De fato, o crescente desenvolvimento das técnicas computacionais aliado aos custos relativamente baixos dos sistemas informatizados têm tornado essa alternativa cada vez mais viável (OLIVEIRA, 2005).

Entretanto, a modelagem numérica possui limitações. Em condições muito complexas, os resultados podem se afastar da realidade devido às hipóteses simplificadoras e limitação dos parâmetros envolvidos, além de não permitir análises de fenômenos secundários ou desconhecidos (OLIVEIRA, 2005). Nessas situações o papel da modelagem física se torna mais evidente, pois, ao se garantir condições de escala e carregamentos adequados, é possível simular o mesmo estado de tensões que seria observado no protótipo (SCHOFIELD, 1980).

Além disso, visto que alguns modelos matemáticos se baseiam na mecânica do contínuo, existe a dificuldade de incorporação dos efeitos de partícula, essenciais no

desenvolvimento de alguns fenômenos geotécnicos, como a propagação de trincas. Portanto, dados obtidos do monitoramento da estrutura real ou de modelos físicos devem ser usados para calibrar e adequar modelos conceituais, aumentando a confiabilidade de seus resultados, aproximando-os da realidade.

Ao discutirem o papel conjunto dos tipos de modelagem, Randolph & Mark (2001) listaram situações em que a modelagem física se tornaria mais interessante que a numérica. Trata-se de uma enumeração com caráter simplesmente ilustrativo, para incentivar a reflexão sobre os métodos, listando os fenômenos ligados a relaxação e adensamento secundário, processos construtivos complexos, os efeitos de carregamentos cíclicos, os processos de transporte através do solo e a limitação às respostas do solo.

Uma das maiores críticas aos modelos físicos é a existência dos efeitos de escala, que serão discutidos mais adiante. Esses efeitos podem levar a distorções do resultado, sendo usado como justificativa para a não adoção da modelagem física. Porém, OVESEN (1979) *apud* OLIVEIRA (2005) discorre sobre esses efeitos, defendendo que, obedecendo a limites de redução, o efeito pode ser desconsiderado. Por exemplo, 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.

Por fim, é válido salientar que os dois métodos são bem distintos e deviam ser abordados, quando possível, como complementares. Uma vez dispondo-se de equipamentos eficientes, fica a critério do engenheiro geotécnico avaliar e decidir corretamente como cada metodologia pode ser aplicada para se obter os resultados mais apurados.

2.2. MODELAGEM CENTRÍFUGA

A modelagem centrífuga consiste em montar modelos de solo dentro de um maquinário rotacional. Seu princípio é submeter um modelo N vezes inferior ao protótipo a uma aceleração inercial igual a N vezes a aceleração gravitacional (SCHOFIELD, 1980). Ela permite a simulação de diversos problemas, sem implicar na variação de parâmetros críticos e sua crescente aplicação deve-se à grande variedade de problemas geotécnicos onde a instabilidade é causada pelo peso próprio. RANDOLPH & MARK (2001) citam exemplos onde tal simulação apresenta grande aplicabilidade:

- Estudo de adensamento em solos moles;
- Estimativa da resistência;

- Barragens de enrocamento;
- Estabilidade em argilas moles;
- Efeitos de carregamento cíclico;
- Muros de contenção e muros de gravidade;
- Estruturas Ancoradas;
- Túneis;
- Escavações profundas;
- Fundações (ex. rasas, profundas, grupos de estacas, sistemas de cravação);
- Modelagens dinâmicas (ex. terremotos);
- Comportamento de aterros.

Entre os benefícios dos ensaios em centrífugas geotécnicas temos que eles permitem a modelagem de estruturas em tamanhos relativamente pequenos, com dimensões que não seriam adequadas em nenhum outro tipo de modelagem física. Além disso, o uso das centrífugas também permite acelerar ensaios que, executados de maneira convencional, levariam um tempo consideravelmente maior. Isso pode ser observado principalmente nos fenômenos decorrentes do adensamento.

3. CENTRÍFUGAS

As máquinas chamadas de centrífugas são aplicadas em diversas áreas de estudo. Citações mais comuns desse tipo de equipamento ocorrem na medicina, na separação de componentes em soluções, e nos estudos aeroespaciais. Estão presentes também no cotidiano das pessoas: máquinas de lavar, centrifugadores de alimentos e até em parques de diversões. Contudo, sua aplicação geotécnica ainda não é tão conhecida, mesmo no meio acadêmico.

O princípio básico das centrífugas em qualquer aplicação é o mesmo: são equipamentos capazes de promover a rotação em um eixo, à velocidade relativamente elevada. As centrífugas geotécnicas, no entanto, são em geral de natureza mais rústica e com grande capacidade de carregamento.

A consequência de maior interesse dessa rotação é que o campo de aceleração inercial radial gerado impõe sobre o modelo uma aceleração gravitacional equivalente muito superior à do protótipo. Para qualquer estrutura na qual o peso próprio seja fundamental para o

funcionamento e estabilidade, essa consequência permite obter similaridades de resultados entre um modelo reduzido e o que acontece em escala real da obra. Além disso, com o avanço tecnológico de equipamentos e de instrumentação, atualmente é possível realizar ensaios de modelagem centrífuga para estruturas mais complexas (CRAIG, 1995).

3.1. HISTÓRIA

A utilização de centrífugas na modelagem geotécnica não é um conceito tão atual quanto se possa imaginar. Em 1869, EDOUARD PHILLIPS apresentou o artigo “*De l'équilibre des solides élastiques semblables*” no qual reconhecia as limitações da teoria elástica contemporânea na análise de estruturas complexas e, principalmente, no qual desenvolveu apropriadas relações de escala, as quais apontavam a necessidade de uma centrífuga para obter similaridades de tensões entre modelos e protótipos (CRAIG, 1989). Contudo, a ideia não chegou a ser efetivamente desenvolvida por pelo menos sessenta anos e, apesar de terem registros de modelagens centrífugas geotécnicas datadas de 1931, na Universidade de Columbia, EUA, o desenvolvimento maior da tecnologia ocorreu na Ex-União Soviética (Ex-URSS) entre 1939 e 1973, e ficou inacessível durante o período da Guerra Fria.

A preferência norte americana por modelos analíticos e desenvolvimentos de programas computacionais durante esse período ofuscava as tentativas de desenvolvimento de técnicas de modelagem física (CRAIG, 1995). Em outros países, no entanto, a ideia não foi completamente esquecida. No Japão, professor Mikasa da Universidade da Cidade de Osaka buscou na modelagem centrífuga a instrumentação necessária para confirmar sua teoria de consolidação de depósitos de argilas moles (KIMURA, 1988). Na Inglaterra, Dr. A.N. Schofield, após contato com antigos trabalhos russos, iniciou um programa de modelagem centrífuga em seu laboratório, cujos trabalhos iniciais centravam-se na estabilidade de taludes de solos argilosos (CRAIG, 1995).

W. H. CRAIG no seu artigo “Centrifuges: Past, Present and Future” (1989) aponta que há evidente paralelismo entre os trabalhos apresentados em 1969 sobre centrífugas geotécnicas por pesquisadores da Inglaterra, do Japão e da antiga União Soviética, todos abordando a estabilidade de taludes. Para CRAIG (1989) é uma abordagem óbvia, pois taludes geralmente são estruturas onde o peso próprio é a principal força que gera instabilidade. Outras estruturas geotécnicas eram consideradas mais complexas, como muros de contenção, e inicialmente não pareciam aplicáveis ao método.

A modelagem centrífuga voltou a ter espaço na oitava conferência da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, sediada em Moscou em 1973. Nessa conferência os soviéticos mostraram que, diferente dos Estados Unidos, continuaram a focar no campo de modelagem física e acumularam consideráveis conhecimentos e especialistas na área. Seguindo-se esse evento o avanço dessa tecnologia deu-se de forma mais rápida. De fato, apesar dos avanços da Ex-URSS na modelagem centrífuga, o atraso nos métodos numéricos e de instrumentação dos soviéticos limitou a capacidade da mesma. Desse modo o enfraquecimento da chamada “cortina de ferro” permitiu novo estímulo e divulgação, e a partir de 1985 a técnica e suas vantagens foram reconhecidas e adotadas em diversos países (CRAIG, 1995).

No Brasil, os primeiros esforços para aquisição de centrífugas geotécnicas só começaram na década de 90. A Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) comprou uma máquina de porte médio em 1993, mas sua instalação só foi finalizada em 2007, com a construção de um prédio próprio para o equipamento (UENF, 2014). Além dessa, existem somente mais três máquinas operantes no país. Duas na COPPE-UFRJ, uma de braço e outra de viga, ambas de pequeno porte (HARTMANN, 2012), e outra no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2015).

3.2. TIPOS DE CENTRÍFUGA

Atualmente, as máquinas mais utilizadas rotacionam em um plano horizontal por meio de um sistema motor agindo no eixo de rotação (CRAIG, 1995). Essas máquinas podem ser divididas em centrífugas de viga (ou braço) e centrífugas de tambor.

3.2.1 CENTRÍFUGA DE VIGA

Esse modelo representa maioria das centrífugas geotécnicas em funcionamento e, geralmente, são máquinas massivas que exigem bastante espaço e energia elétrica para funcionamento. Como o nome sugere, consistem de um eixo central conectado a um braço simétrico ou não (Figura 3.1 e Figura 3.2), tendo as extremidades fixadas a uma plataforma para acoplar a caixa teste. A utilização de braços simétricos é a alternativa mais tradicional, e possibilita a análise simultânea de dois modelos com massa e dimensões semelhantes, cada um localizado em cada extremidade da viga.

No entanto, a preferência é concentrar esforços no preparo e instrumentação de um único modelo e evitar conflitos de modelagem dupla (CRAIG, 1995). Por isso, modelos mais modernos costumam adotar braços assimétricos, com a caixa teste a uma distância maior do centro, equilibrada por um contrapeso mais pesado, com um braço menor (Figura 3.1). Outra vantagem é que essa configuração exige menos material e tempo para execução dos modelos sendo uma alternativa mais econômica.



Figura 3.1. Centrifuga de viga assimétrica (UNIVERSIDADE DO COLORADO, 2012).



Figura 3.2. Centrifuga de viga simétrica (NUS, 2015).

Outra consideração sobre esse tipo de centrífuga remete à plataforma na extremidade do braço, onde é posicionada a caixa de teste. Quando em funcionamento, o campo de aceleração atuante no modelo é a resultante da aceleração centrífuga (horizontal) e da aceleração da gravidade (vertical). Assim a orientação da caixa em relação a essa resultante é fundamental para a realização dos testes.

Chama-se centrífuga de braço fixo aquela cuja base da plataforma está fixada perpendicularmente ao eixo do braço. São simples e possivelmente mais baratas, mas para ensaios com fluidos e solos não coesivos uma contenção artificial seria necessária para manter

os componentes na posição adequada enquanto a centrífuga não estiver funcionando (CRAIG, 1989). A alternativa padrão é adotar uma centrífuga com plataforma oscilante, ligada ao braço por uma ou mais dobradiças, como apresentado na Figura 3.3. É uma configuração mais cara, mas com menos complicações para realização dos ensaios (PHILLIPS, 1995). Nela, a superfície da plataforma será sempre perpendicular à resultante de aceleração.

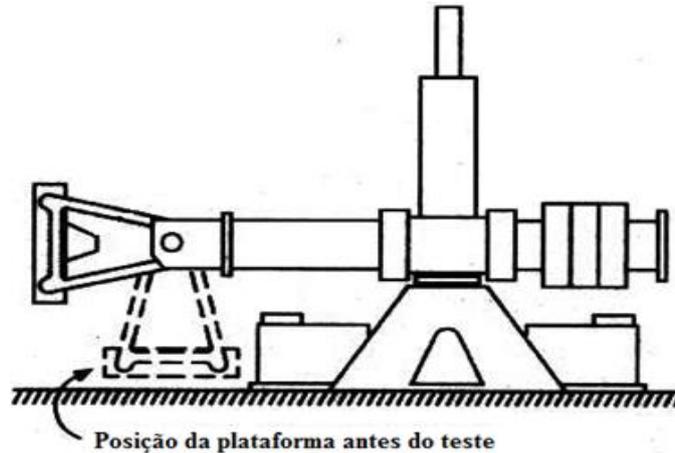


Figura 3.3. Centrífuga com plataforma acoplada por dobradiças do Instituto Politécnico Rensselaer (NEES, 2015).

3.2.2 CENTRIFUGA DE TAMBOR

Nas centrífugas de tambor o solo é depositado em um cilindro rotacional em relação a seu eixo central (Figura 3.4). MADABHUSHI (2014) associa ao conceito de uma centrífuga de viga com infinitos braços simétricos e com caixas interconectadas em todas as extremidades, formando um canal de amostra.

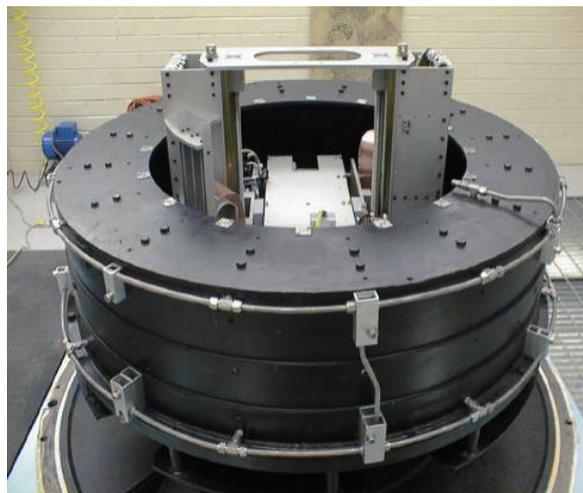


Figura 3.4. Centrífuga geotécnica da Universidade da Austrália Ocidental - COFS/UWA (CASSIDY e BYRNE, 2001).

Em geral, são menores que as de viga e, se partes desse canal forem seccionadas, podem funcionar de maneira análoga a essas (Figura 3.5). Na região central, equipamentos de atuação podem ser solidarizados, fazendo com que eles girem juntamente com o modelo. A centrífuga da COPPE/UFRJ possui dois sistemas nessa região: o atuador radial e o atuador angular (Figura 3.6 a e b).

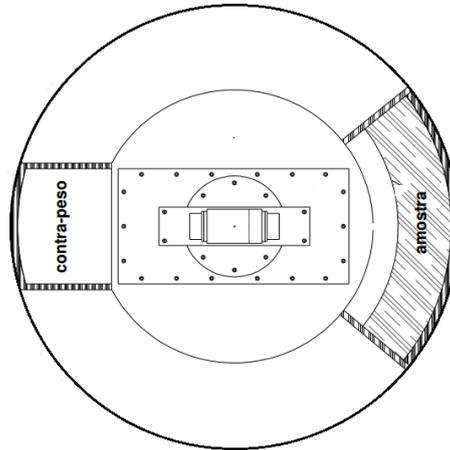


Figura 3.5. Secionamento do canal de uma centrífuga de tambor, para funcionamento semelhante a uma de viga (FAGUNDES, 2010).

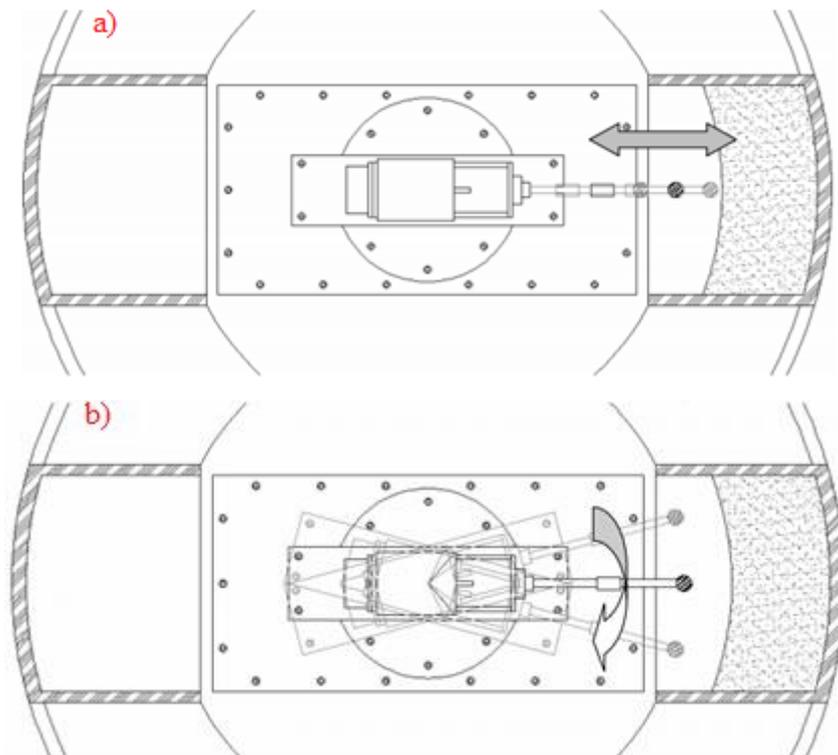


Figura 3.6. a) Atuador radial e b) Atuador angular (OLIVEIRA, 2005).

O sistema de atuação radial permite um movimento de aproximação e afastamento em relação ao eixo da centrífuga. Já o sistema de atuação angular permite movimentos relativos

somente ao canal, também em movimento. Uma das vantagens das centrífugas de tambor é que, se completamente preenchida, permite-se uma extensão maior de solo para ensaios, mantendo maior uniformidade nas características. Por exemplo, esforços diferentes podem ser aplicados no mesmo modelo de solo, sem necessidade de desmontar ou remontar o ensaio, ao rotacionar o eixo de aplicação do atuador (Figura 3.7).

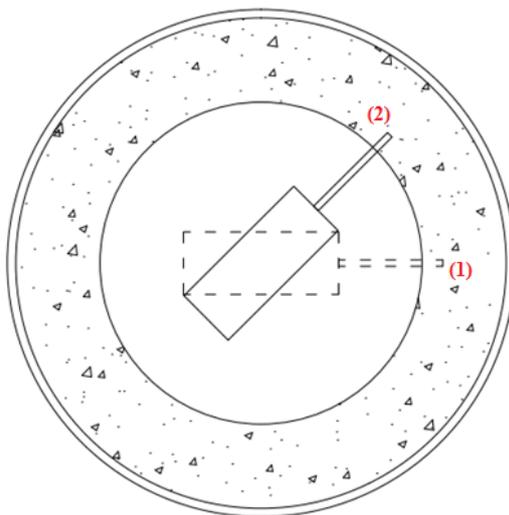


Figura 3.7. Mudança do eixo do atuador da posição (1) para a (2), enquanto este rotaciona simultaneamente com o modelo.

A dificuldade da utilização de centrífugas de tambor está muito relacionada à montagem do modelo. Este é construído enquanto as centrífugas estão em funcionamento e deve-se prever a contenção do solo caso seja necessário instalar algum dispositivo. Além disso, uma centrífuga de 2 metros de raio pode acomodar até 1,5 toneladas de solo, de modo que a retirada do material se torna um processo oneroso (MADABHUSHI, 2014).

A adaptação de centrífugas de tambor menores, chamadas de mini-centrífugas, reduz esse trabalho, mas em troca de perda de espaço disponível para ensaios. Existem também máquinas que adotam sistemas basculares que permitem movimentar a direção do eixo dos tambores para uma posição mais conveniente (Figura 3.8). Isso permite que a rotação também possa ocorrer no plano vertical, onde a ação da gravidade terrestre gera uma componente cíclica na aceleração radial, que pode ser usada para simular movimentos da água no solo (PHILLIPS, 1995).



Figura 3.8. Posições do eixo de rotação (OLIVEIRA, 2005).

3.2.3 CENTRÍFUGA MODULAR

Apresentada pela empresa Thomas Broadbent & Sons Ltd., especializada em desenvolver e disponibilizar centrífugas geotécnicas, esse novo tipo de máquina é uma combinação da centrífuga de tambor e de viga. Tradicionalmente deve-se escolher o modelo da centrífuga antes de sua aquisição, fundamentado nas características dos ensaios e testes a serem realizados. Mas, se posteriormente forem propostas diferentes pesquisas, pode ser necessário adquirir outro tipo.

Por serem equipamentos massivos, não só o custo de aquisição seria muito elevado, mas também o de instalação, manutenção e até de espaço físico para comportar dois aparelhos. O novo equipamento chamado Centrífuga Modular afirma contornar esse problema. Resumidamente o equipamento possui um motor de rotação comum a dois ambientes de teste: a plataforma, similar a centrífugas de viga (Figura 3.9.a) e o canal, de centrífugas de tambor (Figura 3.9.b). Dois *shafts* centrais permitem controle separado da região central e do canal.



Figura 3.9. Centrífuga Modular Broadbent, Modelo GMB/D GT50/1.7 GT880/2.2, a) Ambiente de teste em viga e b) ambiente de teste em tambor (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009)

3.3. CENTRÍFUGAS BRASILEIRAS

Apesar da proposta da aquisição de uma centrífuga geotécnica para o laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília (UnB) ser revolucionária, tal iniciativa não é pioneira na área de pesquisas geotécnicas brasileiras. Como foi comentado no item 3.1, já foram instaladas 4 centrífugas em laboratórios nacionais. Isso, no entanto, consiste de uma vantagem para a iniciativa da UnB, pois significa que já existem técnicos e pesquisadores brasileiros especializados nesse tipo de ensaio. Isso implica também que existem artigos e trabalhos, com desenvolvimento de equipamentos e softwares de aquisição de dados, nacionais. Outra vantagem é que permitiu a realização de visita a um desses laboratórios para acompanhamento de ensaio e averiguação das instalações físicas de um laboratório centrífugo. O laboratório visitado foi o da COPPE/UFRJ, e suas centrífugas serão apresentadas mais detalhadamente no Capítulo 7.

A centrífuga geotécnica da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) é uma centrífuga de viga simétrica de porte médio desenvolvida pela empresa *Wyles Laboratories* (Figura 3.10). O motor de 800 A que movimenta a centrífuga é capaz de fazê-la girar a velocidade de 270 rpm e é essa velocidade que permite alcançar uma aceleração radial de 100g com a capacidade máxima da centrífuga de 1 tonelada (SABOYA, TIBANA e REIS, 2013). De acordo com o professor Fernando Saboya (UENF, 2014), do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF, a proposta inicial para aquisição da centrífuga era adquirir um equipamento de alta tecnologia, ainda não presente em demais laboratórios

nacionais, que viesse a complementar os demais cursos de engenharia civil do estado do Rio de Janeiro e do restante do país.



Figura 3.10 Centrífuga da UENF (KOPSCITZ, 2013).

Comprada em 1993 a um custo de 770 mil dólares, o equipamento chegou ao Brasil em 1995, porém ficou retido por dois anos no porto por problemas de ordem burocrática (JÜRGENS, 2008). Quando finalmente chegou à universidade ficou à espera de uma infraestrutura necessária para seu funcionamento, que só foi executada após o interesse do Centro de Pesquisa da Petrobrás (Cenpes) em 2006. Deste modo, somente em 2007 a centrífuga foi devidamente instalada e os primeiros ensaios realizados.

É interessante para este projeto ressaltar que não é desejável nem adequado essa demora tão expressiva entre compra e a utilização do equipamento, pois acarreta perda de garantia, obsolescência dos equipamentos, gastos de manutenção para manter um equipamento não funcional e outros problemas. Mesmo que a proposta da centrífuga para a UnB venha a ser de porte inferior ao da centrífuga da UENF, o que reduz alguns contratemplos enfrentados por essa última (como a construção de um novo prédio), é importante refletir sobre esse caso, principalmente para listar aspectos que poderiam gerar dificuldades para a instalação da centrífuga em Brasília, tais como:

- Transporte do equipamento;
- Remodelagem do layout do laboratório;
- Nova instalação elétrica;
- Verificação e, se necessário, reforço da estrutura do laboratório;

Ainda assim, atrasos e imprevistos não são, para critério desse trabalho, considerados como uma desvantagem que influencie na decisão da compra da centrífuga, pois não são inerentes ao equipamento e podem ser evitados com um planejamento adequado antes e durante a aquisição do equipamento.

O financiamento promovido pela Petrobrás também é um ponto relevante. Economicamente, é vantajoso que haja o interesse de empresas para financiar pesquisas e investir em laboratórios. Com esse tipo de financiamento privado os ensaios acabam ficando vinculados à empresa, o que não é necessariamente ruim. No caso da UENF, e também da COPPE/UFRJ, o investimento da Petrobrás inclinou os primeiros ensaios, dissertações e teses para a área de petróleo e gás. O tema da primeira bateria de estudos foi à fixação de plataformas com Estacas Torpedos e Estacas de sucção e a segunda etapa constituiu de estudos sobre o comportamento geotécnico de dutos enterrados submetidos a sub-pressão (SABOYA, TIBANA e REIS, 2013). São pesquisas relevantes para a empresa e importantes para a geotecnia.

Por fim, não foi possível encontrar muito sobre a centrífuga do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). O endereço eletrônico da instituição afirma que eles possuem o equipamento e que este é utilizado na avaliação de modelos físicos reduzidos, mas não foram encontrados artigos, teses ou dissertações disponíveis que descreviam o equipamento. Eles também afirmam autoria da primeira centrífuga de modelos reduzidos construída no país, através de uma parceria do IPT com a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), mas não se dispõem de informações técnicas do equipamento (Figura 3.11).



Figura 3.11. Centrífuga para ensaio de modelos reduzidos IPT (IPT, 2015).

3.4. CENTRÍFUGAS DO MUNDO

Para ampliar o estudo sobre as centrífugas geotécnicas e ilustrar a sua aplicação, a Tabela 3.1 traz uma listagem de máquinas instaladas e em funcionamento de laboratórios de

várias partes do mundo. A tabela foi construída com informações obtidas em toda a literatura utilizada no presente projeto, mas principalmente com auxílio dos endereços eletrônicos da UNIVERSIDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE HONG KONG (HKUST) e do COMITÊ TÉCNICO DE MODELAGEM FÍSICA EM GEOTECNIA (ISSMGE - TC104) da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

Tabela 3.1 Centrífugas Geotécnicas em utilização no mundo

| Instituição | País | Tipo | R (m) | N (g) | Carga (Kg) | g_x ton | Informações adicionais e áreas de pesquisa |
|-------------------------------------|-----------|------|-------|-------|------------|-----------|--|
| C-CORE | Canada | Viga | 5,5 | 200 | 2200 | 220 | Pesquisas em simulações sísmicas, carregamentos elevados, fundações <i>offshore</i> , instabilidade de taludes submarinos, interação gelo-solo e tubo-solo |
| Deltares | Holanda | Viga | 5,5 | 300 | 3500 | 1050 | Caixas com capacidade de 2 m ³ e operação a vácuo. Pesquisas em colisão em pontes, fundações profundas, ancoragem e barragens em turfas |
| Universidade da Califórnia | EUA | Viga | 9,0 | 75 | 5000 | 400 | Ensaio de simulação sísmica, liquefação, melhoramento do solo e problemas na interação solo-fundação |
| Universidade da Austrália Ocidental | Austrália | Viga | 1,8 | 200 | 200 | 40 | Pesquisas com estruturas <i>offshore</i> , ensaios de caracterização e interação |

| | | | | | | | |
|--|-----------|--------|-----|-----|------|-----|--|
| | | | | | | | solo-estruturas |
| Universidade da Austrália Ocidental | Austrália | Tambor | 0,6 | 400 | 300 | 120 | Semelhantes as pesquisas da mesma universidade com a centrífuga de viga |
| Instituto Politécnico Rensselaer | EUA | Viga | 3,0 | 160 | 1500 | 150 | O espaço disponível para carregamento tem 1 m de comprimento, 1 de largura e altura máxima de 1,2 m. É utilizada em pesquisas sobre fenômenos relacionados a terremotos, estruturas <i>offshore</i> e caracterização do solo |
| Instituto Suíço de Tecnologia em Zurique | Suíça | Tambor | 1,1 | 440 | 2000 | 880 | Segunda maior centrífuga geotechnica do mundo (ETH, 2012) |
| Universidade de Delft | Holanda | Viga | 1,2 | 300 | 40 | -- | Utilizada em pesquisas de estruturas <i>offshore</i> , diques e aterros, tuneis, comportamento de solos não saturados, efeitos dinâmicos, entre outros. A instituição ainda possui uma centrífuga menor de raio de 0,5 m, usada principalmente para consolidação de amostras |
| Universidade Columbia | EUA | Viga | 3,0 | 200 | 1500 | 160 | A universidade desenvolveu uma das primeiras centrífugas do mundo, contudo não é a utilizada atualmente. As |

| | | | | | | | |
|--|-----|------|-----|-----|----|----|---|
| | | | | | | | pesquisas envolvem temas como carregamentos laterais em estacas, instabilidade de taludes, reforço de muros de contenção, entre outros |
| Instituto Massachussetts de Tecnologia | EUA | Viga | 1,3 | 200 | 91 | -- | As dimensões máximas do modelo para ensaio são, em metros, 0,56x0,54x0,54. Os trabalhos mais recentes estão relacionados a geotecnia ambiental, incluindo modelagem do transporte de líquidos densos não aquosos. |

Dessa listagem pode-se concluir que existe uma preferência pelas centrífugas de vigas de médio e grande porte. Porém, destaca-se que todas essas centrífugas de viga são em torno de uma década mais velhas do que as centrífugas de tambor, com uma grande parte tendo sua inauguração na década de 80 (HKUST, 2002). Até 1995, as centrífugas de tambor ainda não tinham sido exploradas em seu máximo potencial (CRAIG, 1995), e é possível que a falta de equipamentos de dimensões reduzidas para atuação e instrumentação tenham levado a preferência por máquinas maiores.

Além disso, a listagem não é completa. Ela consiste, principalmente, das centrífugas cujas especificações estavam disponíveis. A empresa Broadbent Ltd. ainda faz uma listagem de pelo menos mais onze centrífugas que já estão instaladas e em funcionamento, das quais oito são centrífugas de tambor, contudo a disponibilidade de informações técnicas é restrita.

A penúltima coluna da Tabela 3.1 traz outro aspecto relevante que é a chamada capacidade da centrífuga. Apesar da máxima aceleração ser importante, o que é de maior interesse para o ensaio seria o peso máximo de solo que pode ser rotacionado a uma determinada aceleração. Essa capacidade é representada pelo produto da aceleração radial, em razão da aceleração gravitacional, pelo peso em toneladas. Nota-se que em termos de

capacidade, as centrífugas de tambor têm a grande vantagem de exigirem um espaço menor mas para uma capacidade igual, ou até maior, que centrífugas de vigas.

4. MODELAGEM

Como já foi apresentado, o objetivo de toda modelagem física é simular, em um modelo em escala reduzida, os fenômenos presentes no protótipo. Para que essa simulação esteja correta e os resultados obtidos sejam confiáveis, existem aspectos do processo de modelagem que devem ser respeitados, sobretudo na definição da escala. Essa afirmativa também é verdadeira para ensaios em centrífugas geotécnicas.

Uma grande vantagem da simulação em centrífugas é a obtenção de níveis de tensões crescentes com a profundidade, enquanto a superfície do solo permanece livre. Isso representa diretamente o estado *in-situ*, onde o comportamento do solo depende diretamente do nível e do histórico de tensões. TAYLOR (1995) afirma que se o mesmo solo é usado e se o processo de preparação do modelo for cuidadoso para reproduzir o histórico de tensões, garantindo que o arranjo das partículas é o mesmo, então um modelo centrífugo submetido a uma aceleração N vezes a aceleração da gravidade terrestre terá uma tensão vertical na profundidade h_m do modelo idêntica à tensão vertical a uma profundidade h_p do protótipo, onde:

$$h_p = N * h_m \quad (\text{Eq.1})$$

A Figura 4.1 mostra a distribuição de tensão vertical no modelo sobre uma aceleração radial a_r e a tensão correspondente no protótipo sobre ação da gravidade, onde:

ω = Velocidade angular;

Raio = distância entre um ponto de referência do modelo e o centro de rotação da centrífuga;

a_r = Aceleração radial.

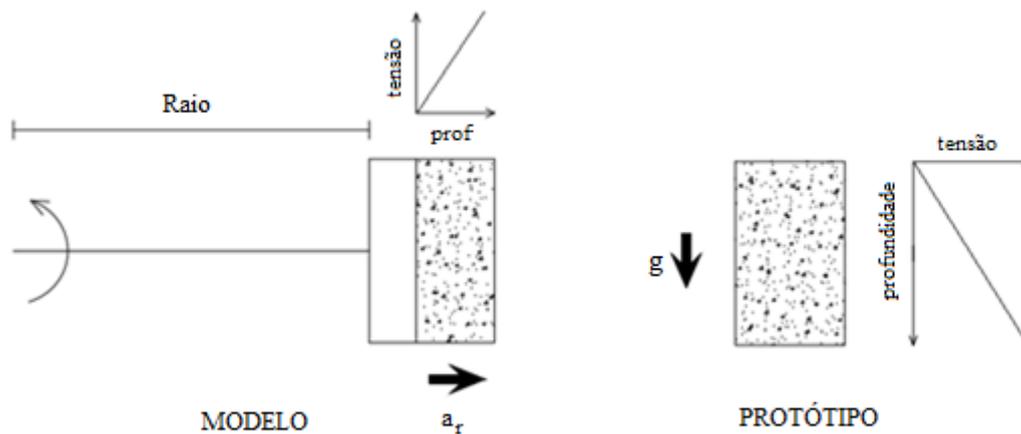


Figura 4.1. Tensões inerciais do modelo centrífugo induzidas pela rotação e tensões gravitacionais no protótipo.

Essa relação é a lei básica dos modelos centrífugos, entretanto, não pode ser generalizada para todos os parâmetros (HARTMANN, 2012). Considerando o vasto número de problemas geotécnicos e parâmetros que os governam, é essencial a definição das leis de escalas e dos erros de escalas.

Leis de escalas são as relações entre os parâmetros do modelo e do protótipo e podem ser definidas através de análises dimensionais ou pelas equações diferenciais que governam o evento estudado (TAYLOR, 1995). Existem, entretanto, erros inerentes à obtenção dessas relações, chamados de erros de escala. Críticas comumente direcionadas aos modelos centrífugos envolvem a existência de erros de escala, principalmente devido ao campo de aceleração não uniforme e à dificuldade de representação de detalhes do protótipo em um modelo de pequena escala (CALLE, 2007).

4.1. MOVIMENTO CIRCULAR

Para compreensão dos processos de modelagem e de definição dos fatores de escala, deve-se revisar as variáveis envolvidas no movimento circular e o conceito de força centrífuga (Figura 4.2). O movimento circular caracteriza-se principalmente pela existência de uma aceleração que não modifica a intensidade da velocidade do corpo, mas sim sua direção, chamada de aceleração radial (a_r). A força que gera essa aceleração é a chamada força centrípeta. Essa força é tomada a partir de referencial fixo (fora do movimento), está

direcionada para dentro da trajetória circular e, apesar de fundamental para manter o corpo rotacionando, não influi diretamente no campo inercial de interesse aos ensaios de centrífugas geotécnicas. A força responsável por impor aceleração ao solo do modelo denomina-se força centrífuga, também chamada de pseudo-força, pois só existe em relação a um referencial não inercial (o referencial é o corpo em movimento). Ela pode ser explicada pela sensação que se tem dentro do carro de ser jogado “para fora” do veículo quando este faz uma curva. Ela é dirigida radialmente para fora e tem intensidade igual a $m\omega^2r$ (Nussenzveig, 2002), onde:

ω = Velocidade angular

r = Raio da circunferência até o topo do modelo

m = Massa do modelo

ω^2r = aceleração radial

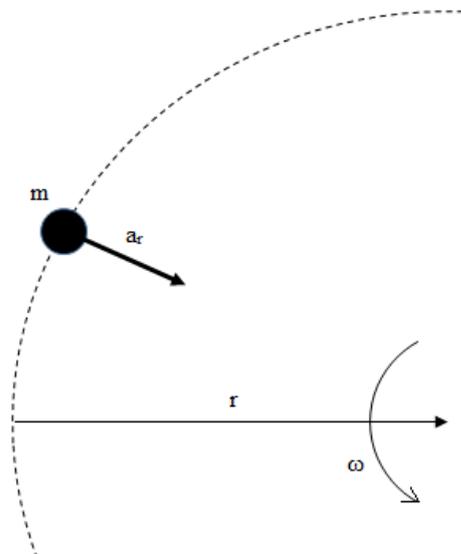


Figura 4.2. Esquema de um corpo de massa m em movimento circular.

Deste modo, não se deve confundir a força centrífuga com a centrípeta, pois ambas estão presentes no funcionamento das centrífugas geotécnicas, mas de formas diferentes, como é representado na Figura 4.3.

Na Figura 4.3.a temos a caixa/plataforma de uma centrífuga de viga cujo movimento só é mantido porque existe uma força centrípeta, transmitidas pelo braço a caixa. Por sua vez, na Figura 4.3.b temos o solo dentro da caixa, cuja tendência seria de fugir do movimento se o fundo da caixa saísse, caracterizando a força centrífuga.

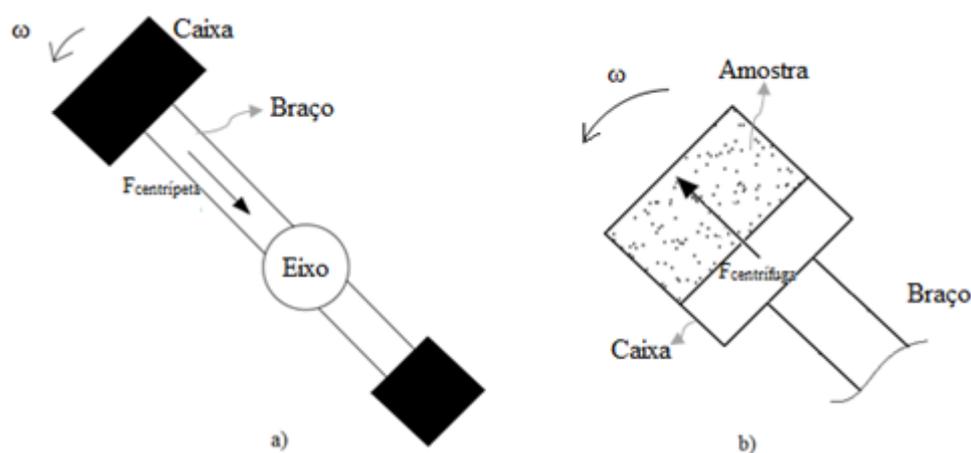


Figura 4.3. Descrição das forças no movimento circular em uma centrífuga geotécnica: a) Força Centrípeta e b) Força Centrífuga.

4.2. LEIS DE ESCALA

4.2.1. DIMENSÕES LINEARES

A partir da equação básica (Eq.1) sabemos que o fator de escala modelo:protótipo para dimensões lineares é 1:N. Sendo o modelo uma representação em escala linear do protótipo, então deslocamentos também terão fator de escala igual a 1:N (TAYLOR, 1995). Partindo do mesmo raciocínio, uma vez que a curva tensão versus deformação do protótipo e do modelo são idênticas, o fator de escala para as deformações é de 1:1.

É importante considerar que a gravidade terrestre é uniforme para as profundidades adotadas na engenharia civil, mas o mesmo não pode ser considerado para o campo de aceleração inercial gerado no modelo. Ele é gerado pela aceleração radial, calculada pelo produto de ω^2 com o raio, portanto há uma leve variação nesse valor ao longo do modelo. Tal problema é reduzido se a escolha do raio para definir o fator N for feita de forma cuidadosa.

Outro aspecto importante na escolha do raio é o efeito da curvatura. Além de constante, o campo gravitacional da Terra é paralelo para os critérios da engenharia geotécnica, ou seja, não existe efeito da curvatura terrestre mesmo para grandes estruturas como barragens ou pontes. Nas centrífugas esse erro existe e varia de uma máquina para outra, sendo menor para raios maiores adotados.

A Figura 4.4 mostra uma comparação gráfica entre a variação de tensão do modelo e do protótipo. Quando em funcionamento, a aceleração radial a_r que existe a uma profundidade h_m do modelo é dada pela Equação 2:

$$a_r = (r + h_m)\omega^2 \quad (\text{Eq.2})$$

Onde r é o raio da centrífuga e ω é a velocidade angular. Já a tensão vertical é dada pela Equação 3, onde ρ é a massa específica do solo, g é a aceleração gravitacional e N é a razão entre a_r e g :

$$\sigma = \rho g N h_m = \rho g h_p \quad (\text{Eq.3})$$

É necessário definir um raio efetivo R_e , que garanta o menor erro, para definir o índice N que será usado em todas as leis de escalas, conforme a Equação 4:

$$Ng = a_{r_e} = \omega^2 R_e \quad (\text{Eq.4})$$

Para isso, calculamos a tensão do modelo (σ_m) na profundidade z empregando a Equação 5:

$$\sigma_m = \int_0^z \rho \omega^2 (r + z) dz = \rho \omega^2 z (r + \frac{z}{2}) \quad (\text{Eq.5})$$

Substituindo z pela profundidade em que as tensões se igualam h_i (Figura 4.4), e usando as equações 3, 4 e 5, temos a Equação 6 apontando o valor para o raio efetivo:

$$R_e = r + \frac{h_i}{2} \quad (\text{Eq.6})$$

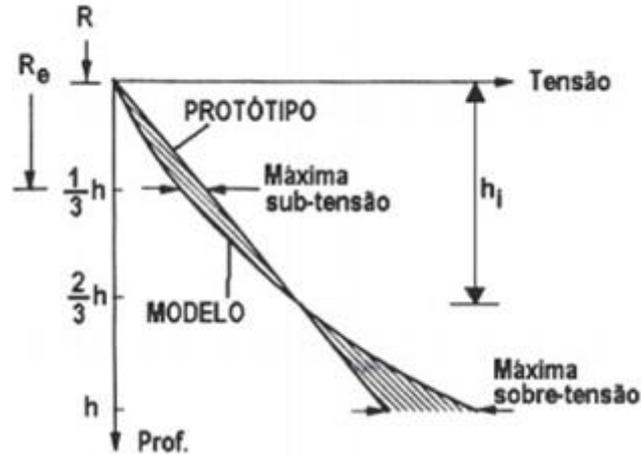


Figura 4.4. Comparação da variação de tensões com a profundidade de um modelo centrífugo e o protótipo (CALLE, 2007).

O gráfico da Figura 4.4 também aponta que para profundidades menores que h_i as tensões no modelo são menores que a do protótipo (sub-tensão) e que a profundidades superiores, as tensões são maiores (sobre-tensão). Um princípio conveniente para minimizar o erro na distribuição das tensões é trabalhar com os valores máximos de sub-tensão e sobre-tensão (TAYLOR, 1995).

O índice r_u de máxima sub-tensão ocorre na profundidade $0,5h_i$ e é calculado pela Equação 7:

$$r_u = \frac{\text{tensão do protótipo} - \text{tensão do modelo}}{\text{tensão do protótipo}}$$

$$r_u = \frac{\rho g(N0,5h_i) - \rho \omega^2(0,5h_i)(r + \frac{0,5h_i}{2})}{\rho g(N0,5h_i)} \quad (\text{Eq.7})$$

Que pode ser reduzida para Equação 8 se combinado com as equações 4 e 6.

$$r_u = \frac{h_i}{4R_e} \quad (\text{Eq.8})$$

A mesma lógica pode ser usada para calcular o índice de máxima sobre-tensão r_o , que acontece na base do modelo (h_m), conforme mostra a Equação 9:

$$r_o = \frac{h_m - h_i}{2R_e} \quad (\text{Eq.9})$$

Quando os dois índices forem iguais ($r_u = r_o$), as tensões no modelo são escalarmente iguais às do protótipo (CALLE, 2007). Assim, igualando as equações 8 e 9, temos a Equação 10:

$$h_i = \frac{2}{3} h_m \quad (\text{Eq.10})$$

Substituindo 10 nas equações 9 e 8, tem-se a Equação 11:

$$r_u = r_o = \frac{h_m}{6R_e} \quad (\text{Eq.11})$$

Finalmente, substituindo 10 na equação 6, encontra-se a Equação 12

$$R_e = r + \frac{h_m}{3} \quad (\text{Eq.12})$$

Da Equação 12 pode-se inferir que a dois terços da base do modelo a tensão existente tem correspondência exata com a tensão no protótipo e que o raio efetivo é medido do eixo de rotação até um terço da profundidade. O erro máximo é dado pela Equação 11, mas de acordo com TAYLOR (1995), para maioria das centrífugas $h_m/R_e < 0,2$, sendo o erro inferior a 3%.

4.2.2. ADENSAMENTO

Define-se como adensamento o processo de compressão (variação volumétrica) ao longo do tempo que ocorre simultaneamente com a expulsão da água nos vazios do solo, relacionada a transferência do excesso de poropressão para tensão ativa (TERZAGHI, 1943).

Ensaio de adensamento em determinados solos requerem muito tempo para dissipar a poropressão e processos de adensamento em protótipos podem levar meses. Uma das grandes vantagens atribuídas aos modelos centrífugos é a aceleração desse fenômeno (CRAIG, 1995), sendo de fundamental importância a definição de uma lei de escala para definir o tempo de adensamento. TAYLOR (1995) afirma que o método mais fácil de definir essa lei é pela análise dimensional, partindo da equação do parâmetro adimensional T_v (Equação 13):

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (\text{Eq.13})$$

Onde:

T_v = coeficiente adimensional de tempo usado para indicar o grau de adensamento

c_v = coeficiente de adensamento

t = tempo

H = altura da camada adensada

Para o mesmo grau de adensamento, modelo (m) e protótipo (p) apresentam mesmo T_v , de modo que se tem a Equação 14:

$$\frac{c_{vm} t_m}{H_m^2} = \frac{c_{vp} t_p}{H_p^2} \quad (\text{Eq.14})$$

Pelo princípio básico da modelagem centrífuga $H_p = NH_m$, que substituindo na Equação 14, resulta na Equação 15:

$$t_m = \frac{1}{N^2} \frac{C_{vp}}{C_{vm}} t_p \quad (\text{Eq.15})$$

Da Equação 15, infere-se que, ao garantir a igualdade entre coeficiente de adensamento do modelo e do protótipo, o fator de escala para o tempo de adensamento é $1:N^2$. Deste modo, um adensamento que naturalmente demora um ano pode ser simulado em menos de uma hora na centrífuga a uma aceleração de 100g.

TAYLOR (1995) também discorre sobre a aplicabilidade desse mesmo fator de escala para outros fenômenos de difusão como a condução de calor ou infiltração, contudo ele afirma que todas as análises foram feitas considerando o solo completamente saturado. Apesar de essa ser uma consideração aceitável, há casos onde a modelagem envolve fluxos em solos parcialmente saturados, ao qual o autor indica os trabalhos de GOFORTH (1991) e COOKE e MITCHEL (1991). Um outro problema na definição da escala do tempo acontece quando dois fenômenos necessitam de escalas diferentes. LAUE (2001) ressalta o caso de ensaios dinâmicos onde a aceleração do processo de difusão entra em conflito com o tempo de aplicação do carregamento. Medidas são então necessárias para atrasar o fluxo, como por exemplo, aumento da viscosidade do fluido.

4.2.3. FORÇA E TRABALHO

Existem ensaios centrífugos que requerem a aplicação de forças externas no solo por meio de atuadores, seja para fins de instrumentação (realização de ensaios SPT ou CPT no modelo) ou para verificar o efeito de um carregamento no protótipo (cravação de estacas, terremotos, etc). Portanto, é essencial definir fatores de escalas para as cargas a serem aplicadas.

MADABHUSHI (2014) apresenta uma análise simplificada para definir essas escalas por meio de uma razão entre a força aplicada ao protótipo (F_p) e aquela aplicada ao modelo (F_m), partindo da segunda lei de Newton, força igual massa (m) vezes aceleração (a) (Equação 16):

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{(ma)_m}{(ma)_p} \quad (\text{Eq.16})$$

A lei de escala para a aceleração é por definição igual a N:1. Para definir o fator de escala para massa utiliza-se o princípio de que o solo do modelo e do protótipo são idênticos, logo a massa específica do modelo (ρ_m) é igual à do protótipo (ρ_p):

$$\rho_p = \rho_m = \rho = \frac{m_m}{V_m} \quad (\text{Eq.17})$$

Onde:

V_m = volume do modelo

m_m = massa do modelo

O fator de volume é 1: N³, obtido a partir do fator de escala das dimensões do protótipo (Equação 1). Logo, pela igualdade da Equação 17 garante-se que a massa apresenta o mesmo fator de escala que o volume. Aplicando esses fatores à Equação 16 obtém-se a Equação 18:

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{\rho * V_m}{\rho * V_p} * \frac{a_r}{g} = \frac{1}{N^3} * \frac{N}{1} = \frac{1}{N^2} \quad (\text{Eq.18})$$

O fator de escala para forças (Equação 18) sugere que as cargas aplicadas na modelagem são consideravelmente menores que as observadas *in situ*. Isso é uma grande vantagem para o modelo centrífugo, porque se pode simular carregamentos elevados do protótipo com atuadores mais econômicos (MADABHUSHI, 2014).

Por sua vez, a obtenção do fator de escala do trabalho (W) ocorre de forma similar. Definido como o produto da força pelo deslocamento (d), cujos fatores de escala são respectivamente 1:N² e 1:N, a relação do trabalho será 1:N³, como apresentado na Equação 19.

$$\frac{W_m}{W_p} = \frac{F_m}{F_p} * \frac{d_m}{d_p} = \frac{1}{N^2} * \frac{1}{N} = \frac{1}{N^3} \quad (\text{Eq.19})$$

4.2.4. PRINCIPAIS LEIS DE ESCALA

A Tabela 4.1 traz um resumo das principais relações de escala. Apesar de algumas relações não terem sido aqui consideradas, sua definição ocorre de maneira semelhante ao que foi visto até agora. Contudo, nessa tabela só se apresentam características referentes do próprio solo. Sabe-se que por vezes outros materiais são usados no protótipo e também devem ser redimensionados.

CALLE (2007) apresenta, por exemplo, relações de escala para solos reforçados e uma análise escalar do comportamento do reforço no modelo e no protótipo. Desse modo, ressaltase que há uma vasta quantidade de parâmetros cuja relação de escala pode ser definida, mas o usual no ensaio é focar-se apenas naquelas inerentes ao problema estudado.

Tabela 4.1 Resumo das leis de escala na modelagem (CALLE, 2007)

| Tipo de evento | Parâmetro | Relação de escala Modelo: protótipo |
|--------------------------|----------------------|--|
| Estático | Gravidade | N:1 |
| | Tensão | 1:1 |
| | Deformação | 1:1 |
| | Profundidade | 1:N |
| | Área | 1:N ² |
| | Massa específica | 1:1 |
| | Massa | 1:N ³ |
| Dinâmicos ⁽¹⁾ | Força | 1:N ² |
| | Tempo | 1:N |
| | Frequência | N:1 |
| | Aceleração | N:1 |
| Difusão | Índice de deformação | N:1 |
| | Poropressão | 1:1 |
| | Gradiente hidráulico | 1:1 |
| | Concentração | 1:1 |
| | Tempo | 1:N ² |
| | Temperatura | 1 |
| | Velocidade | N:1 |
| | Permeabilidade | N:1 |

(1) Eventos dinâmicos são aqueles que envolvem carregamentos cíclicos, tais como terremotos. Para esses problemas a análise dos fatores de escala é regida pela equação diferencial que descreve o movimento cíclico (TAYLOR, 1995).

Ainda assim, devido ao crescimento da aplicação de centrífugas na área de geotecnia, é difícil, mas fundamental, manter-se informado a respeito do desenvolvimento de estudos das leis de escalas e, principalmente, nas limitações do uso da modelagem centrífuga. Por essa razão, diversos professores e estudiosos reuniram-se e apresentaram no Jornal Internacional

de Modelagem Física em Geotecnia (GARNIER, GAUDIN, *et al.*, 2007) um catálogo com as escalas já definidas e outros aspectos ainda não resolvidos.

4.3. EFEITO DE ESCALA

Qualquer simulação física está sujeita a erros, porque mesmo que se tomem os cuidados necessários para a definição dos fatores de escala é impossível montar um modelo com todos os aspectos idênticos ao do protótipo (PHILLIPS, 1995). A prática comum é tomar medidas para minimizar ou, se possível, anular esses efeitos. Um exemplo é a diferença entre o campo gravitacional terrestre, considerado constante, e o campo de aceleração inercial que varia com o raio de giração. Para desconsiderar esse efeito foi feita uma aproximação para definir um valor de raio efetivo (R_e) que implica em um erro mínimo.

Essas diferenças são chamadas de efeito de escala e serão discutidas no presente capítulo, uma vez que é fundamental reconhecer as limitações da modelagem centrífuga e até que ponto sua aplicação é aceitável ou deve ser complementada por outros métodos. Alguns ensaios podem apresentar efeitos de escalas que não serão apresentados aqui, sendo relevante somente ao problema em questão. O importante é que o pesquisador seja capaz de estabelecer os erros existentes e até que ponto considera o protótipo corretamente representado pelo modelo (TAYLOR, 1995).

4.3.1. “MODELAGEM DE MODELOS”

Não se trata de um efeito de escala, mas de uma técnica usada na modelagem centrífuga para assegurar a validade das leis de escalas obtidas (MADABHUSHI, 2014). Como o nome sugere, consiste em fazer diferentes modelos em escalas distintas de um mesmo protótipo. Os modelos devem prever o mesmo comportamento e é um método bastante útil em casos onde não há uma estrutura construída para calibrar os resultados. A Figura 4.5 é um gráfico ilustrativo utilizado para explicar o princípio da “modelagem de modelos” (KO, 1988). Por exemplo, um protótipo de 10 metros onde a aceleração é a própria gravidade, situação correspondente ao ponto A_1 do gráfico, pode ser simulado com 1 m a uma aceleração de 10g (ponto A_2) ou com 10cm a uma aceleração de 100g (ponto A_3). Os eixos de efeito de tamanho e tensão servem para ressaltar que tais efeitos devem ser considerados ao se comparar os ensaios (KO, 1988).

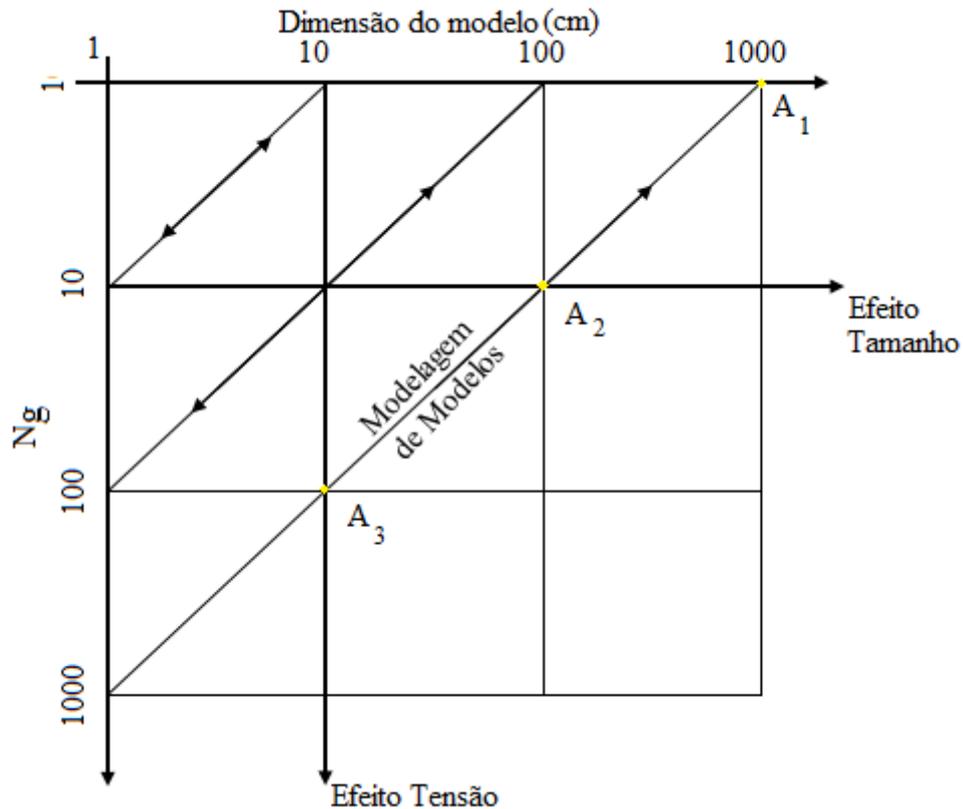


Figura 4.5. Princípio da modelagem de modelos (KO, 1988).

Nota-se que para o exemplo dado a variação entre as escalas da modelagem A_1 e A_3 é de 100 vezes. Normalmente essa variação é mais restrita e não inclui modelos com escala 1:1 (A_3). Dessa forma deve-se ser bastante criterioso ao se extrapolar os resultados das modelagens realizadas.

4.3.2. EFEITO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS

Quando da realização de ensaios centrífugos não é incomum questionarem a confiança dos resultados uma vez que todas as dimensões são reduzidas pelo fator N , mas as partículas do solo não o são (TAYLOR, 1995). Por exemplo, seria de se esperar que, se a proposta do protótipo é utilizar uma areia fina de 0,4 mm, adotar-se-ia um material com diâmetro médio de 0,004mm no modelo cuja aceleração radial fosse de cem vezes a aceleração da gravidade (100g). No entanto esse material, correspondente a um silte, não apresenta mesma mineralogia ou afinidade com a água que as areias, de modo que o comportamento e as relações de tensões-deformações não seriam equivalentes (MACHADO, 2016).

Pode-se desprezar esse efeito quando o solo é considerado como um material contínuo, e não um meio constituído por partículas. Contudo, para tanto, existe uma relação

mínima que deve ser observada entre o diâmetro médio das partículas e o dimensão da estrutura a ser estudada (MADABHUSHI, 2014).

OVENSEN (1979, 1985) *apud* TAYLOR (1995) investigou uma série de modelos de diferentes tamanhos sobre diferentes acelerações, mas correspondentes ao mesmo protótipo. Os resultados foram bastante consistentes, mostrando desvios significativos do comportamento esperado somente para razões menores que 15 entre o modelo e tamanho médio das partículas. Dessa forma, solos finos acabam não tendo efeitos de partículas significativos. TATSUOKA (1991) *apud* TAYLOR (1995) aponta que essa é uma aproximação muito simplificada e MOTTA (2008) sugere adotar modelos com tamanhos pelo menos iguais a 50 vezes o diâmetro médio das partículas. BOLTON e LAU (1988) *apud* TAYLOR (1995) demonstraram que a escala do modelo deve garantir que as propriedades mecânicas (angularidade e resistência) das partículas não sejam alteradas. Enfim, é essencial reconhecer que em dadas circunstâncias o efeito do tamanho das partículas é considerável e as modelagens devem incluir investigações para aferir sua significância no problema a ser estudado (TAYLOR, 1995).

4.3.3. EFEITO DO CAMPO DE ACELERAÇÃO ROTATIVO

Ainda que seja possível gerar um campo de aceleração eficiente por meio da rotação em torno de um eixo fixo, existem particularidades inerentes desse movimento que o diferenciam da ação gravitacional terrestre, levando a resultados por vezes diferentes do modelo em relação ao protótipo. Já foi discutido no presente trabalho o efeito da variação da aceleração radial em função do raio e como é possível minimizar esse efeito ao dimensionar o modelo para a aceleração existente a um raio efetivo R_e .

Outra característica da aceleração radial é o seu plano de atuação. No caso das centrífugas, ela existe no plano horizontal, podendo existir uma variação de direção com o plano vertical ao longo da largura, como ilustrado na Figura 4.6. Deste modo, uma componente lateral de aceleração é gerada podendo influenciar nos resultados, principalmente em casos em que, de alguma forma, há preocupação com os efeitos nas regiões mais próximas das paredes. Ainda que seja possível moldar os modelos com uma geometria que considere os efeitos dessa aceleração lateral, considera-se uma boa prática concentrar as atividades na zona central do modelo (TAYLOR, 1995), pois nem sempre as paredes da caixa representam perfeitamente as condições de contorno do protótipo.

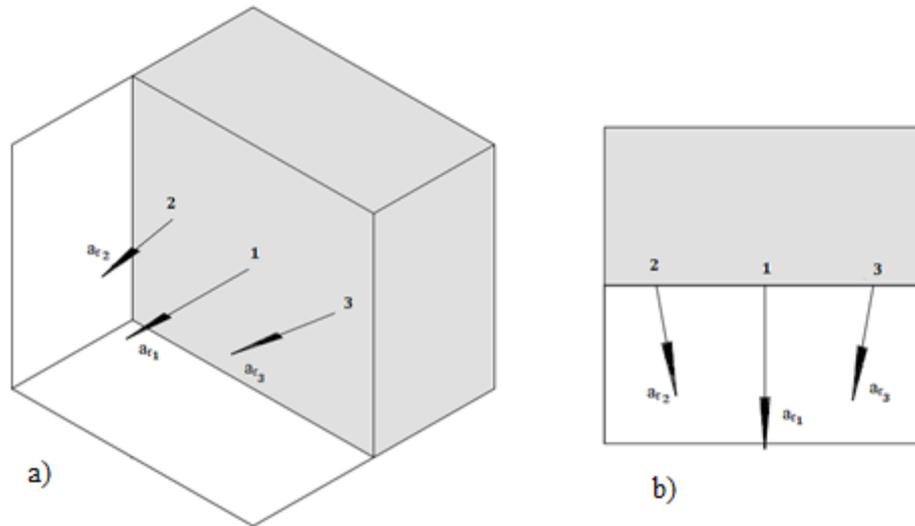


Figura 4.6. Comparação da aceleração radial do modelo em três pontos distintos (a) vista lateral e (b) planta.

Uma terceira consequência da aceleração radial é o chamado efeito Coriolis. Esse efeito ocorre devido a uma pseudo-força, semelhante a força centrífuga, que afeta a trajetória de corpos que se movimentam em superfícies em rotação. Na Figura 4.7 há uma representação gráfica desse efeito, onde um corpo se movimenta sobre um disco que gira em torno de seu eixo. Para o observador em A, fora do disco, a bola descreve um movimento em linha reta. Ao mesmo tempo, para um observador B fixo no disco a bola sofre uma deflexão no caminho.

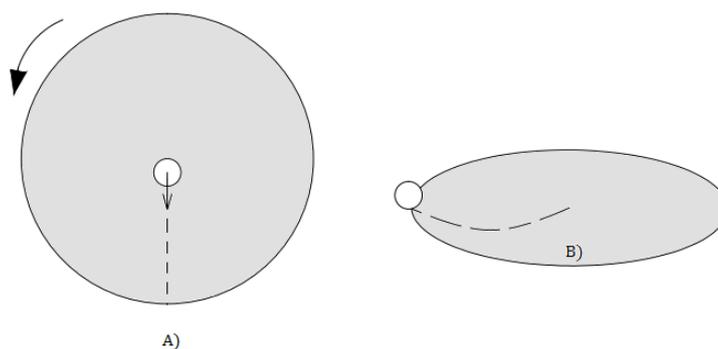


Figura 4.7. Representação gráfica do efeito Coriolis.

Nos modelos centrífugos ele pode ser observado quando há movimento do modelo no plano de rotação, desenvolvendo uma aceleração que atua nas partículas em movimento. É uma preocupação na simulação de terremotos e pode ser evitada ao rearranjar o modelo para que o plano de movimento do simulador seja paralelo ao plano de rotação. No caso da

percolação e demais efeitos que apresentem baixas velocidades, o efeito pode ser desconsiderado (CALLE, 2007). Em outros ensaios, onde pode ocorrer movimento relativo ao plano de rotação, é de interesse estimar uma faixa de velocidades para as quais o efeito de Coriolis pode ser desprezado. Primeiramente, sabe-se que tal força está relacionada à velocidade angular ω da centrífuga e velocidade v da massa em movimento dentro da centrífuga pela Equação 20:

$$F_c = 2m\omega v \sin\theta \quad (\text{Eq.20})$$

Onde θ é a inclinação entre as velocidades. Desse modo, se v e ω possuem a mesma direção, ou se a partícula não se movimenta, a força de Coriolis é nula. Da Equação 20 infere-se que a aceleração a_c desenvolvida pela força F_c é descrita pela Equação 21:

$$a_c = 2\omega v \quad (\text{Eq.21})$$

Enquanto que a aceleração do modelo é descrita pela Equação 22:

$$a_r = \omega^2 R e = \omega V \quad (\text{Eq.22})$$

Onde V é a velocidade tangencial desenvolvida pela centrífuga. Comparando as duas acelerações tem-se a Equação 23:

$$\frac{a_c}{a_r} = \frac{2v}{V} \quad (\text{Eq.23})$$

Se a partícula se movimenta a uma velocidade alta, por exemplo $v > 2V$, ela descreve um caminho relativo ao modelo bastante retilíneo e outros erros se tornam mais significativos. Entretanto, se v é menor do que 5% de V , o erro atribuído ao se desprezar o efeito é pequeno, menor que 10% (STEEDMAN e ZENG, 1995). Adota-se, portanto, como intervalo de velocidades onde o efeito não é significativo:

$$0,05V < v < 2V \quad (\text{Eq.24})$$

O limite de $0,05V$ funciona como limite superior para eventos de baixa velocidade.

4.3.4. EFEITO DO CAMPO GRAVITACIONAL TERRESTRE

Mesmo quando em funcionamento, os modelos nas centrífugas geotécnicas ainda estão sujeitos à ação da gravidade terrestre. Uma vez que a aceleração radial está geralmente no plano horizontal e a gravidade na vertical, uma resultante de aceleração é formada, que pode influenciar na percolação de fluídos e outros materiais. Quando as vigas de braço foram apresentadas, citou-se que algumas apresentam plataforma oscilante. Elas foram

desenvolvidas principalmente para contornar esse problema, pois a base da plataforma se posiciona sempre perpendicular à essa resultante.

Esse efeito geralmente é desprezível considerando que ensaios comuns em centrífugas geotécnicas apresentam aceleração radial pelo menos 10 vezes maiores que a gravidade. GURUNG (2004) apresentou um simples ensaio para verificar esse efeito, com um container com água rotacionando, onde, para $N=40$ a superfície da água já era considerada vertical. Para situações onde a aceleração radial é mais baixa deve-se adotar contenções ou movimentar, a uma velocidade constante, o conduto do material a ser depositado dentro da caixa de ensaio (MOTTA, 2008).

5. CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

É fundamental que sejam apresentadas certas considerações práticas dos ensaios centrífugos, indo, portanto, além da teoria. Trata-se de considerar os aspectos da realização dos ensaios, que podem sair do campo da geotecnia, como, por exemplo, o sistema de aquisição e transmissão de dados ou o abastecimento elétrico do maquinário. PHILLIPS (1995) listou e discorreu sobre algumas dessas considerações, buscando servir de guia para diferentes experimentos e garantir a qualidade dos ensaios centrífugos e de seus resultados. Aqui serão discutidas tais considerações.

5.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Define-se como caixa (ou container) de teste o espaço limitado da centrífuga onde é efetivamente montado o modelo a ser ensaiado, e, como plataformas (ou cestos), a extremidade dos braços das centrífugas de vigas em que estão posicionadas tais caixas (Figura 5.1). Nas centrífugas de tambor geralmente o solo está depositado ao longo de um canal de amostra constituinte da própria centrífuga, mas, como já foi comentado anteriormente, existem equipamentos capazes de seccionar esse canal o que configura um espaço confinado idêntico ao de caixas (Figura 5.2)



Figura 5.1. Vista da plataforma da centrífuga de viga da UENF com a caixa teste com janela de visualização (SANTIAGO, ALBUQUERQUE, *et al.*, 2010).

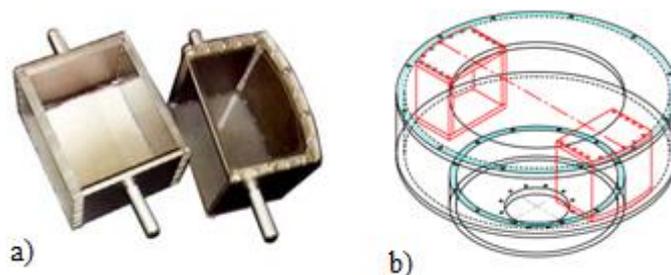


Figura 5.2. a) Set de caixas de teste para a centrífuga de tambor da empresa Broadbent G-Max e b) a instalação das mesmas no canal da centrífuga (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009).

PHILLIPS (1995) ressalta que em muitos casos o protótipo é uma região localizada dentro de um meio espaço infinito, ou seja, não estão localizados dentro de um container gigante, mesmo que por vezes possam existir estruturas ao redor. Logo, a simulação dentro das caixas deve ser conduzida de maneira que seus limites (fundo, lateral e topo da caixa) reproduzam adequadamente as condições de contorno distantes no espaço estudado.

Modelos de eventos estáticos requerem paredes sem atrito e com elevada rigidez para impedir movimentos laterais significativos. Em eventos dinâmicos, as paredes devem simular condições mais complexas, para evitar a reflexão de energia e manter valores corretos de rigidez dinâmica ao cisalhamento e evolução de tensões de cisalhamento complementares. Protótipos com planos de simetria, situação onde há mesmo comportamento nos dois espaços divididos pelo plano, podem ser simulados pela metade, adotando uma parede rígida de baixo atrito em um dos lados. A vantagem é um modelo reduzido e, com a adoção de material transparente, ainda permitiria observar o comportamento das deformações e movimentos (Figura 5.3).

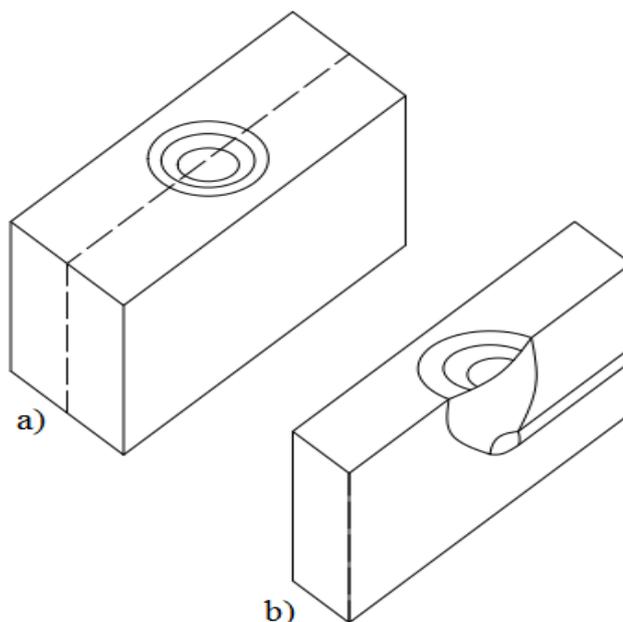


Figura 5.3. Movimento ao redor de um túnel visto a) em um modelo inteiro e b) em metade de um modelo, através de um plano transparente.

É inevitável que haja atrito nas paredes da caixa, seu valor dependendo do tipo do material da caixa. Fazendo uma análise básica das centrifugas geotécnicas existentes e de seus fabricantes, pode-se listar como principais constituintes o aço, com tratamentos diferenciais para combater a corrosão, o alumínio, o acrílico e o vidro, para as janelas de visualização dos ensaios. Medidas podem ser tomadas para reduzir os efeitos do atrito, como adotar em ensaios com solos argilosos revestimento com material lubrificante resistente a água ou, para ensaios em solos arenosos, uma lâmina de vidro entre o solo e as paredes internas da caixa. Modelos destinados ao estudo de deformações planas devem ser suficientemente largos de modo que o atrito lateral não represente uma porção significativa das forças resistentes.

As dimensões das caixas também são determinantes na definição do tamanho do modelo. Isso significa que ao se simular o protótipo, suas dimensões são reduzidas por um fator N de modo que o modelo seja tecnicamente viável de se construir dentro da centrífuga. A partir desse fator, se o equipamento é capaz de produzir uma aceleração N vezes a aceleração gravitacional, define-se todos os demais fatores de escala, como discutido no Capítulo 3.

É indicado para estudos em duas e três dimensões caixas com comprimento ao menos igual a duas vezes a profundidade do solo a ser adotada, para minimizar efeitos dos contornos. OVESEN (1975) *apud* PHILLIPS (1995) ao estudar modelos de sapatas em solos não coesivos concluiu que para evitar efeitos indesejáveis o diâmetro da caixa teria que ser pelo

menos cinco vezes o diâmetro da sapata do modelo. Os formatos mais comuns para as caixas são retangulares e circulares (Figura 5.4).

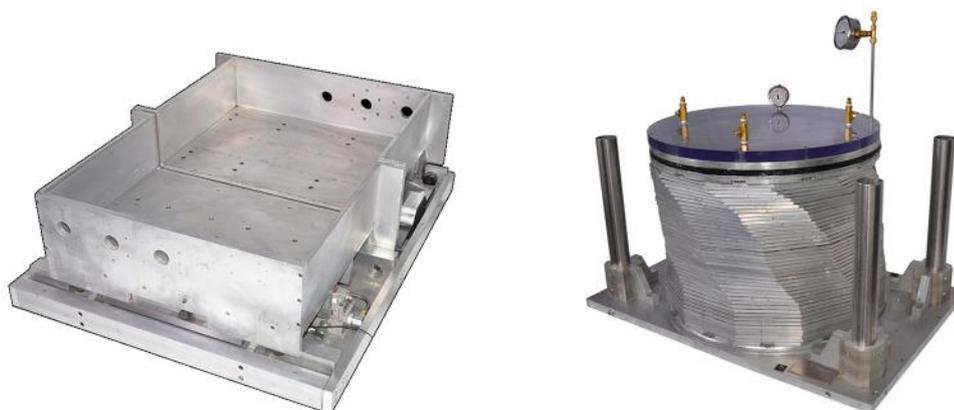


Figura 5.4. Caixa retangular com divisória e container laminar circular, ambos do Centro de Simulação de Engenharia Sísmica do Instituto Politécnico Rensselaer (NEES, 2015).

Os containers circulares apresentam em geral uma maior rigidez para uma massa menor e menos material nas fronteiras modelo-parede para uma área máxima, comparados as caixas retangulares (PHILLIPS, 1995). Estas são relativamente mais caras e maiores, para uma mesma rigidez que as circulares, mas são as que permitem melhor aproveitamento do espaço das plataformas das centrífugas, que tendem a ser retangulares também.

Outras considerações envolvem a capacidade das caixas de resistir às pressões impostas pelo solo. Por vezes janelas de visualização de vidro ou acrílico (adaptadas ao container) precisam de reforço para que não quebrem durante o ensaio. Também deve-se preocupar com a vedação das caixas, evitando vazamentos e perdas de materiais, lembrando-se que podem existir aberturas para a instalação de instrumentos ou canais. No item 4.3.3, quando se discutia o efeito do campo de aceleração rotativo, apontou-se que a prática ideal é concentrar as atividades na zona central do modelo, exatamente pois nem sempre é possível garantir que as laterais das caixas simulam adequadamente os arredores do protótipo.

Por fim, ressalta-se o aspecto generalizado dessas considerações. Elas se aplicam a grande parte dos ensaios, mas adaptações podem ser necessárias para que o modelo seja o mais próximo possível da situação do protótipo. Um exemplo foi o estudo de aterros estruturados com reforço de geossintético realizado por HARTMANN (2012) na centrífuga do Instituto Francês de Ciência e Tecnologia de Transporte, Espacial e Redes (IFSTTAR). Nele, a base do container adotado não seria rígida, mas adaptada a um platô móvel perfurado

que se desloca para baixo na vertical simulando o comportamento do aterro estruturado (Figura 5.5).

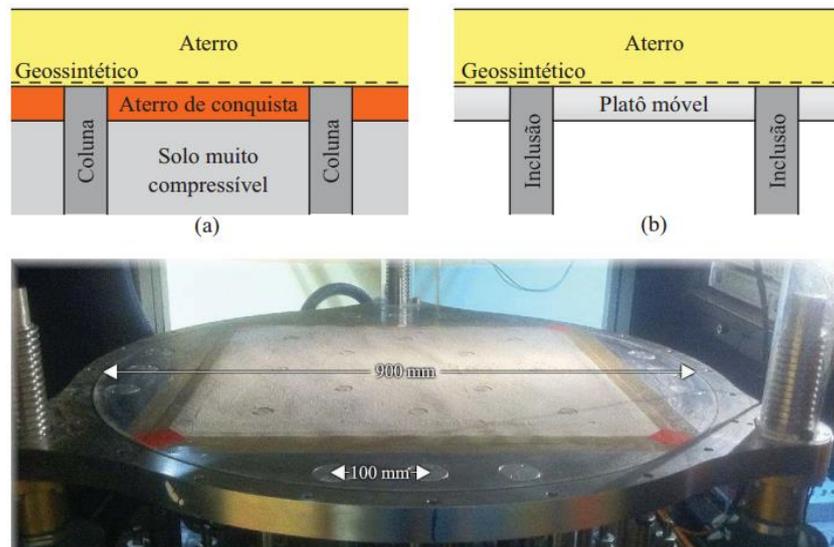


Figura 5.5. Comparação do protótipo e do modelo de Hartmann (a e b) e foto do platô móvel perfurado (HARTMANN, 2012).

5.2. DESIGN DO ENSAIO

Como todo ensaio laboratorial, ensaios centrífugos devem ser planejados com cautela e todos os aspectos do que será realizado devem ser considerados para evitar erros de execução. Quando esses erros ocorrem, a centrífuga é parada e o modelo já não está intacto e, por vezes, deve ser remontado. É comum limitações na disponibilidade de material e do tempo para obtenção dos dados, tornando a remoldagem inviável. A definição adequada do design é fundamental para evitar essas situações e chegar a resultados representativos.

Em centrífugas os únicos fenômenos que serão automaticamente elevados são aqueles dominados pelo efeito da gravidade. A verificação dos efeitos dessa elevação nos resultados, em função da escala, pode ser realizada pela “modelagem de modelos”. Essa metodologia foi discutida no item 4.3.1 e, apesar de aplicável, existe um limite para o intervalo de escalas que podem ser adotadas.

Os fatores de escala são definidos nessa fase de *design*. Pretendendo-se adotar modelos relativamente pequenos, os efeitos de escala serão maiores e medidas de controle adicionais podem ser necessárias. Outras desvantagens de modelos pequenos é a dificuldade de instrumentação (os equipamentos utilizados também serão reduzidos), terem condições de contorno mais críticas e ter mais sensibilidade ao processo de montagem do modelo.

Entretanto, no outro extremo, modelos relativamente grandes estarão limitados à capacidade de carga da centrífuga, às dimensões das caixas ou canal de amostras disponíveis e à disponibilidade de solo para o ensaio.

As considerações da modelagem foram discutidas no Capítulo 3, mas o design engloba também a escolha dos materiais de ensaio. Reproduzir todos os aspectos do protótipo nem sempre é possível e os esforços de modelagem devem ser direcionados aos fatores assumidos como regentes do comportamento a ser estudado. Isso não significa ignorar as demais características, mas é possível adotar medidas diferentes do observado *in situ* e chegar a mesma classe de resultados.

O experimento de HARTMANN (2012) é um exemplo dessa afirmação, pois o movimento do solo abaixo do aterro é simulado por um platô móvel. Outro exemplo é a adoção de fluídos de elevada viscosidade para impedir significantes variações de poropressão em material granular, assegurando que essa mudança não afetará o comportamento mecânico do solo (PHILLIPS, 1995).

A simulação das estruturas do protótipo procura manter a mesma geometria, mesmo comportamento sobre tensão, mesma rigidez e resistência relativa ao solo, mas é comum a adoção de diferentes materiais constituintes no modelo. O experimento de HARTMANN (2012) também é um exemplo desta prática, pois substitui em seus ensaios estacas (as colunas da Figura 5.5.a) por inclusões rígidas metálicas.

Contudo, deve-se tomar cuidado com essas substituições de materiais e como isso influi na semelhança modelo e protótipo, principalmente porque certas leis de escalas são determinadas assumindo que o material do modelo é o mesmo do protótipo. Se isso for alterado, deve-se garantir pelo menos igualdade entre os parâmetros de interesse. É o caso do caulim, material fino fabricado utilizado na COPPE/UFRJ para representar argilas encontradas em leito marinho.

Parte da energia exigida para rotacionar a centrífuga é dissipada em arrasto aerodinâmico gerando calor e a possibilidade de aumento da temperatura do modelo. Para ensaios com controle térmico isso implica na necessidade de medidas para isolar termicamente a caixa de teste. Modelos expostos tem parte do calor dissipado pela ventilação resultante da rotação, mas acabam sujeitos a movimentos de ar que podem causar efeitos indesejáveis (PHILLIPS, 1995).

5.3. PREPARO DO MODELO

Ainda que fosse possível em centrífugas de viga utilizar amostras indeformadas, a prática comum é a montagem do modelo. Isso ocorre porque ao “reduzirmos” o protótipo ao modelo, fissuras, inclusões e potenciais caminhos de drenagem presentes na amostra indeformada não são necessariamente reduzidos pelo mesmo fator de escala. Esse problema é eliminado com a remontagem do perfil de solo em laboratório. A reconstrução exige que se conheça o máximo possível do perfil e do comportamento do solo do protótipo, obtido por investigações de campo. É evidente que a amostra “remontada” não será idêntica a amostra indeformada, mas é possível considerá-la um material equivalente, aceitando seu comportamento e resistência iguais ao do protótipo (PHILLIPS, 1995). Estudos mais genéricos podem adotar solos preparados em laboratório com propriedades específicas e condições controladas (KIMURA, TAKEMURA, *et al.*, 1991).

O modelo pode ser construído fora da centrífuga ou dentro dela, sendo essa escolha geralmente ditada pelo tipo de centrífuga. Para centrífugas de vigas o usual é a construção antecipada do modelo em laboratório para posteriormente posicionar a caixa na plataforma, enquanto que nas de tambor deposita-se o material no canal de amostras da centrífuga em funcionamento, conhecido como montagem durante o voo. O processo também se diferencia de acordo com os tipos de solo.

Para solos granulares como areias o método mais comum é o pluviação a seco no container. A técnica consiste em despejar a areia de um depósito para dentro da caixa de amostra através de um funil largo que pode ser movimentado manualmente ou por comandos eletrônicos (LAUE, 2001). Em areias secas, material siltoso fino pode ser dissipado pelo ar, formando uma nuvem de poeira que deve ser contida no ambiente de ensaio e o técnico ou pesquisador deve estar devidamente protegido com máscaras.

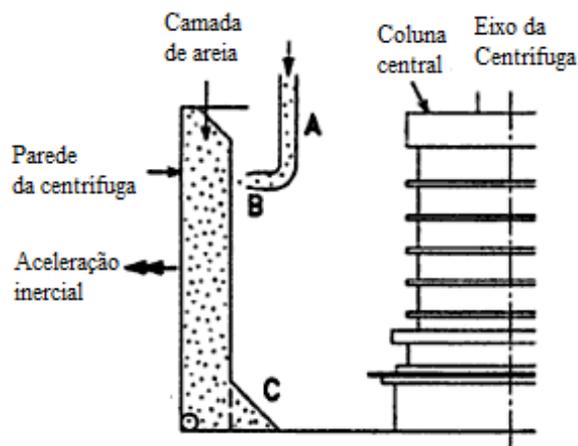


Figura 5.6. Despejo de areia seca em centrífuga de tambor por tubo (LAUE, 2001).

A densidade das amostras montadas é controlada pela energia imposta ao solo no despejo, energia a qual é função da altura e volume de fluxo de solo. Enquanto a qualidade de amostras de densidade média a elevada é boa e de fácil execução, o preparo de amostras com baixa densidade é mais complexo, pois mesmo que seja possível obtê-las através de processos de deposição rápidos, a integridade dessa configuração pode ser perturbada no transporte da caixa até a plataforma. A realização dos ensaios também modifica a densidade inicial do modelo. Parar e recomeçar o ensaio de 3 a 5 vezes resulta em um carregamento cíclico causando compressão volumétrica do solo e minimiza compressão adicional devido ao peso próprio da amostra durante os diversos ciclos de teste (LAUE, 2001).

Para centrífugas de tambor a pluviação pode ser feita de forma pontual por um tubo conectado a um funil externo (Figura 5.6) ou por um disco rotacional (Figura 5.7). A saturação do material pode ser realizada durante o ensaio, mas PHILLIPS (1995) afirma que a metodologia mais simples é a saturação do solo após a deposição, com controle adequado para evitar que bolsões de ar fiquem presos dentro do material.

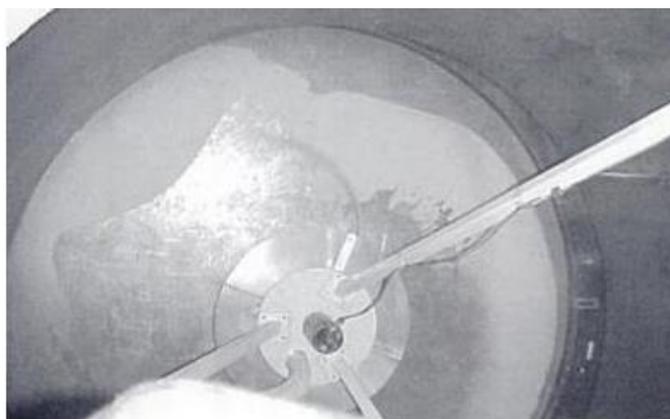


Figura 5.7. Disco rotativo espalhando areia no canal da centrífuga de tambor da ETHZ (LAUE, 2001).

Modelos com solos de granulometria fina, como argilas e siltes, são preparados com misturas de solo e uma quantidade pré-definida de líquido, normalmente água, formando um material laminoso. Essa lama precisa ser corretamente misturada e deareada, para a qual PHILLIPS (1995) aconselha misturar os componentes à vácuo por pelo menos duas horas até se obter uma consistência regular.

Amostras construídas em laboratório são colocadas dentro dos containers e adensadas em grandes unidades oedométricas. A tensão de adensamento é aplicada em etapas, e o tempo necessário para adensamento de camadas espessas de argila pode ser de várias semanas. Depois de adensado, a tensão aplicada é descarregada, a amostra deve ser levada ao ensaio centrífugo e o tempo entre esses dois procedimentos deve ser mínimo. PHILLIPS (1995) aponta diversos critérios do processo de adensamento, mas o aspecto fundamental é obter um perfil de adensamento adequado e garantir que ele seja mantido no ensaio. Quando acelerado na centrífuga, o solo é readensado e pelo menos a superfície da amostra estará sujeita a sobre-adensamento (LAUE, 2001). O preparo de amostras normalmente adensadas é obtido em montagens durante o voo.

Para a centrífuga de tambor da COPPE, os trabalhos de OLIVEIRA (2005), MOTTA (2008) e FAGUNDES (2010) apresentam duas técnicas de montagem do modelo: a técnica de lama ou grumos. A técnica de grumos consiste no lançamento cuidadoso de pedaços pequenos da amostra dentro da centrífuga, posicionada com o eixo na horizontal (Figura 3.8). O resultado é um material com grande quantidade de macro vazios que tornam o sistema extremamente compressível e com recalques elevados, e não representativos do protótipo, no começo do ensaio (Figura 5.8.a).

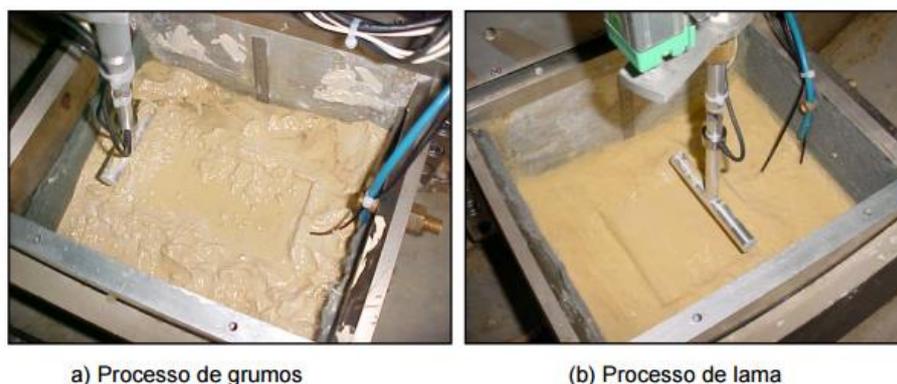


Figura 5.8. Diferenças no aspecto da camada final pelos processos de grumo e lama (OLIVEIRA, 2005).

A técnica de lama é adotada com a centrífuga de tambor no eixo vertical e em funcionamento para que o líquido não escorra para fora. A aceleração adotada nessa etapa não pode ser excessivamente pequena, o que causaria perfis inclinados para os depósitos de solo, nem muito alta, uma vez que a centrífuga não está balanceada. As desvantagens do método de lama são que a centrífuga deve permanecer em funcionamento por um tempo considerável até que as camadas de lama tenham consistência adequada e que esse método apresenta valores menores de resistência com a profundidade, com coesão não-drenada inferior ao método de grumos (OLIVEIRA, 2005). Ainda assim, essa técnica resulta em camadas mais homogêneas com superfícies mais suaves e regulares (Figura 5.8.b)



Figura 5.9. Colocação da lama em voo (OLIVEIRA, 2005).

5.4. CONTROLE DE FLUÍDOS

Essa etapa consiste em definir os fluidos dos canais ou caixas de amostra, o controle da pressão dos tubos que transportam esses fluidos e as medidas necessárias para se ter no modelo as condições de drenagem e poropressão adequadas. A colocação ou retirada de líquidos nas caixas e canais de amostra é geralmente executada por meio de dutos e tubos

conectados a abastecimento externo. O fluido mais comum dos ensaios geotécnicos é a água e a Figura 5.10 mostra um corte transversal da centrífuga de tambor da COPPE/UFRJ com os pontos de entrada e saída de água indicados.

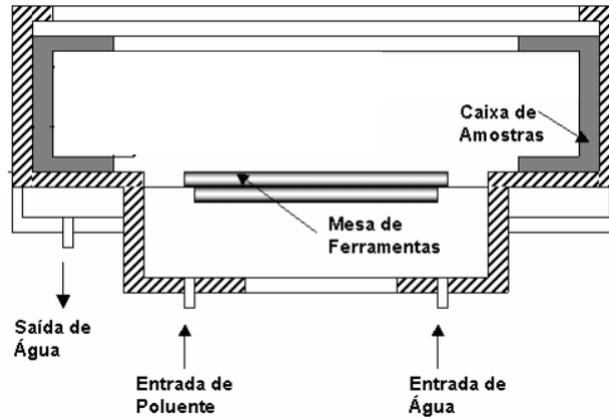


Figura 5.10. Seção transversal do canal de amostras (OLIVEIRA, 2005).

Mudanças de velocidades no funcionamento da centrífuga podem provocar movimento de líquidos na superfície da amostra e, conseqüentemente, erosão ou sobreposição de material. Medidas que evitam tais eventos são limitar o volume de líquido na superfície ou submergi-la completamente. A submersão da superfície também evita a evaporação excessiva que causaria tensões de sucção. Outras preocupações referentes aos fluídos são as pressões e níveis que devem ser monitoradas e controladas. Dutos verticais conectados hidráulicamente a às camadas drenantes da amostra permitem esse controle, inserindo ou retirando água do modelo quando necessário. É ideal impedir que dispositivos elétricos entrem em contato com os líquidos transportados, principalmente água e óleos.

5.5. ATUAÇÃO

Atuação nada mais é do que a aplicação externa de carregamentos, tensões e outras perturbações gerais no modelo que não são simuladas pelo peso próprio do solo. Por exemplo, ao se reproduzir sondagens de penetração nas centrífugas todo o aparato e aplicação de golpes constituem a atuação. Os atuadores, portanto, também necessitam de fatores de escala para os equipamentos, as frequências e intensidade das forças. A Tabela 4.1 apresenta esses fatores para forças, energia e frequência de atuação.

Como foi mostrado no item 3.2.2, as mesas centrais das centrífugas de tambor permitem acomodar atuadores externamente ao canal de amostra. Contudo, em alguns casos,

principalmente em centrífugas de viga, os equipamentos precisam ser montados dentro da caixa de teste. Deve-se garantir que os atuadores não limitem o comportamento do solo. O ideal é que eles não ocupem espaço excessivo, o que pode ser feito adotando-se a subdivisão de componentes. Significa, por exemplo, colocar o atuador na caixa, mas o sistema de abastecimento energético e de controle do lado de fora. Deve-se, no entanto, certificar que a comunicação entre essas partes é adequada.

Por vezes, no entanto, dimensionar um atuador pequeno o suficiente para ser acomodado e simultaneamente capaz de aplicar as intensidades desejadas é uma tarefa complexa. PHILLIPS (1995) coloca que atuadores simples e compactos são mais confiáveis. A tendência atual é desenvolver atuadores simples com controles mais sofisticados, o que tem permitido realizar tarefas complexas pela combinação de um conjunto de atuadores (MCVAY et al., 1994, *apud* PHILLIPS, 1995).

Os equipamentos podem ser adquiridos comercialmente, desde que eles sejam capazes de funcionar sobre altas acelerações (PHILLIPS, 1995). No contexto das centrífugas geotécnicas também é importante estar em constante contato com as pesquisas recentes, pois o desenvolvimento de atuadores específicos é bastante comum. Adotar técnicas e aparelhos já instrumentados é uma prática importante para padronizar os ensaios centrífugos. Por exemplo, o trabalho de ALMEIDA *et al* (2011) estuda o desenvolvimento de penetrômetros T-bar e de ensaios de penetração de cone para investigações nas centrífugas.

A alimentação energética dos atuadores pode ser elétrica, hidráulica, por pressão ou até mesmo através do campo de aceleração gerado (utilizando o peso próprio do equipamento atuador). A orientação desses atuadores em relação a aceleração gerada também é importante, pois sua operação não deve ser prejudicada pelo aumento relativo do seu peso próprio de maneira indesejada.

5.6. INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação é o monitoramento do comportamento do modelo por meio de transdutores ou simples avaliações visuais. Os transdutores são equipamentos que transformam medições físicas, como pressão e deformação, em sinais elétricos que serão interpretados pelo sistema de aquisição de dados. Conseqüentemente, um dos critérios imposto à instrumentação é de que a comunicação entre os transdutores e o sistema de aquisição de dados seja adequada (PHILLIPS, 1995).

Quando esses instrumentos estão localizados dentro das caixas testes ou canais de amostra, não devem perturbar o comportamento do modelo sendo ideal adotar equipamentos pequenos. Precisam resistir ao aumento do seu peso próprio, à esforços impostos na construção e desmontagem da amostra e, se estão enterrados, às tensões e poropressões crescentes durante o ensaio. Se os transdutores estão instalados no interior do solo, também é importante tomar medidas para que eles não funcionem como um tipo de reforço. Uma delas é posicionar o transdutor enterrado ortogonal a direção principal de movimento do solo (PHILLIPS, 1995).

O funcionamento dos transdutores pode ser constante, com medições feitas ao longo de todo teste, ou descontinuadas, com medidas tiradas em momentos específicos, como, por exemplo, no começo e no fim do voo da centrífuga. Essa frequência de medição depende do ensaio, do que está sendo avaliado e da frequência adotada no protótipo. Frequências adequadas para monitoramento contínuo costumam ser de uma a duas ordens de grandeza maiores do que as adotadas em campo (PHILLIPS, 1995).

Alguns transdutores de poropressão são preenchidos com material poroso que isola o fluido para medir a pressão. Nesses casos o nível de saturação do material poroso e sua porosidade influenciam na medição, devendo ser verificados. Se houver entupimento desse material, o transdutor deve ser trocado. Para os transdutores de tensão a atenção é com a posição e a rigidez do equipamento. Para medidas de tensão nos limites do modelo (perto das paredes das caixas), a rigidez do transdutor deve ser similar à rigidez dessas fronteiras. O mesmo pode ser interpretado para transdutores no meio da amostra.

Para medidas de deslocamentos, o contato com o modelo e a direção de deslocamento são aspectos importantes. Os transdutores de deslocamentos verticais não devem “afundar” no solo (o que significaria o movimento do próprio transdutor), enquanto que aparelhos para medição de deslocamentos horizontais podem requerer assistência mecânica, como molas ou cola, para manter-se em contato com o solo (PHILLIPS, 1995). Existem transdutores comerciais e, no outro extremo, instrumentações específicas que requerem o desenvolvimento de novas técnicas de medição como a medida das deformações das estruturas. Para qualquer caso, a adequação do equipamento ao modelo deve ser verificada.

Ainda que os transdutores apresentem dados quantitativos acurados, em geral a medição é pontual ou em um espaço pequeno da amostra. A avaliação visual por vezes é mais aproximada, porém permite monitorar o modelo como um sistema conjunto. Uma metodologia que pode ser adotada é a utilização de janelas nas caixas e canais (Figura 5.1 e

Figura 5.2), que permite registrar externamente, por filmagem ou fotografias o comportamento da amostra durante o ensaio. Câmeras também podem ser instaladas dentro dos containers e adotar marcadores ou materiais de contraste na amostra auxilia a destacar fenômenos como deslocamentos e deformações. Um exemplo é o uso de pó de chumbo em solução, que ajuda a identificar potenciais caminhos de drenagem e, através de radiografia, revelar distorções dentro do modelo (PHILLIPS, 1995).

5.7. AQUISIÇÃO DE DADOS

Sistemas de aquisição de dados de centrífugas geotécnicas precisam ser flexíveis, adaptando-se às solicitações de cada tipo de ensaio, e de processamento rápido e eficiente para receber, interpretar e armazenar simultaneamente dados de diversas interfaces. Esboçar o sistema de aquisição de dados auxilia a compreender os aspectos desse sistema e entender como a centrífuga opera. Um esboço típico é apresentado na Figura 5.11. A adoção de uma estrutura modular no sistema permite traçar e corrigir os erros, além de auxiliar na evolução, expansão e upgrade do sistema.

O registro manual é importante para verificação independente das medições obtidas, visto que a confiabilidade nos transdutores não é sempre garantida. A sigla ADC refere-se ao principal sistema de registro de dados: o conversor análogo para digital (*Analoque-to-Digital Convertor*). Realizar o *backup* dos dados obtidos também é aconselhado, pois esses podem ser necessários em outros trabalhos, e não seria prático refazer o ensaio. Como é possível que diversos testes sejam realizados, o sistema deve ter memória suficiente para armazenar todos esses resultados. A maioria dos módulos, hardwares e softwares do sistema estão disponíveis comercialmente. O desenvolvimento de aquisição personalizada consome tempo excessivo e não é aconselhado (PHILLIPS, 1995).

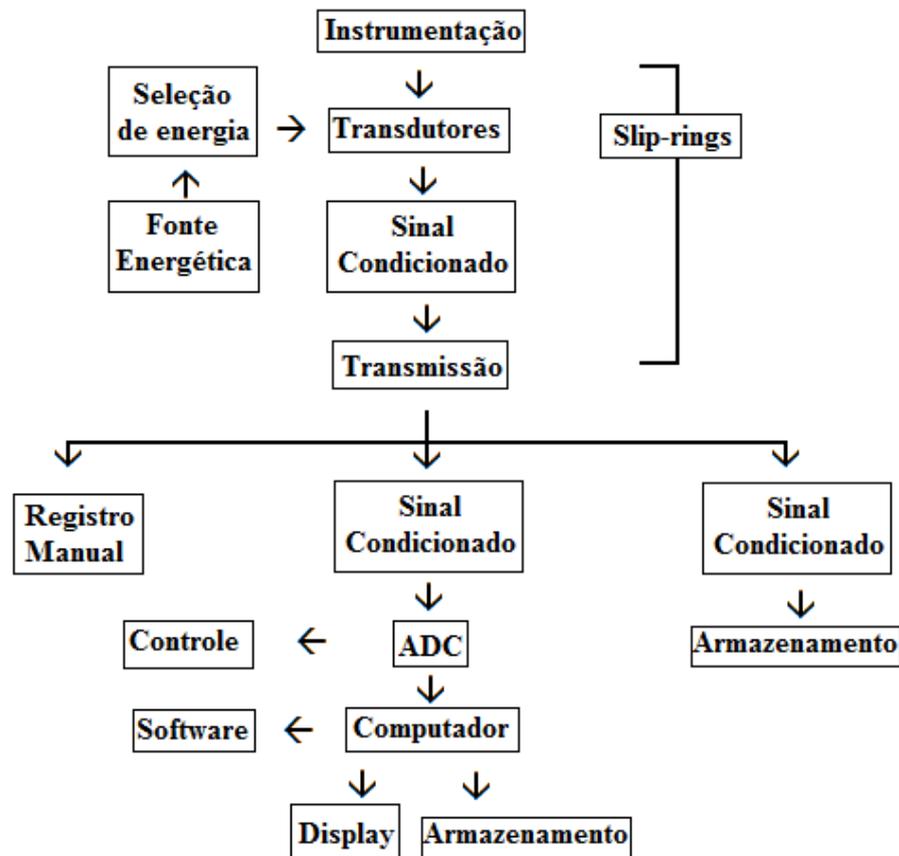


Figura 5.11. Esboço de um sistema de aquisição de dados típico (PHILLIPS, 1995).

Slip-rings, ou anéis deslizantes, são equipamentos que fazem a transmissão de energia e sinais elétricos de uma estrutura estacionária para uma rotativa. São bastante utilizados para a energização e controle dos dispositivos das centrífugas e na transmissão dos dados coletados pelos transdutores, como no caso das centrífugas da COPPE/UFRJ, da UENF e centrífugas da Broadbent. Contudo, esse sistema precisa de manutenção periódica, pois seu funcionamento envolve o arraste de escovas sobre os anéis (Figura 5.12), o que gera desgaste mecânico, calor e acúmulo de material.

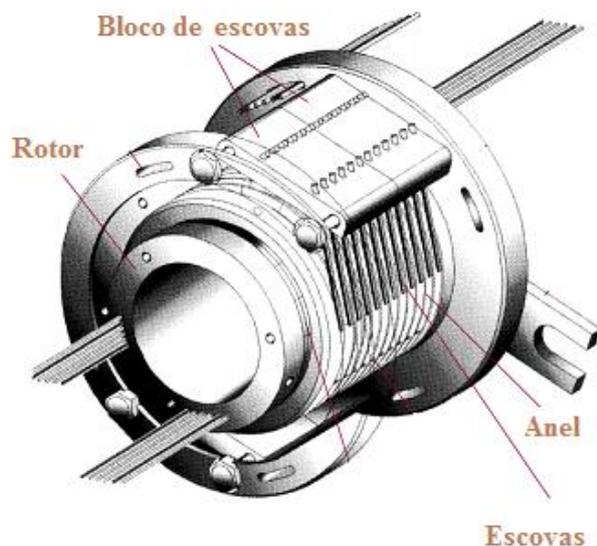


Figura 5.12. Componentes de um anel deslizante (CATÁLOGO MOOG COMPONENTS, 2015).

A centrífuga de tambor da COPPE/UFRJ apresentou casos de má qualidade na aquisição de dados e perdas de ensaios por interrupções do sinal devido à falta de manutenção desse sistema (FAGUNDES, 2010). A centrífuga da IFSTTAR substituiu os *slip-rings* por fibras-ópticas, o que reduziu os ruídos nos sinais de transmissão (HARTMANN, 2012). O ideal é manter os transdutores perto dos equipamentos de transmissão, o que garante sinais de maior qualidade.

5.8. REALIZAÇÃO DO ENSAIO

É de difícil realização o levantamento de todas as considerações aqui listadas, principalmente quando da instalação de centrífugas geotécnicas novas ou pesquisas centrífugas pioneiras, pois não há padronização das metodologias de ensaio e a própria centrífuga passa a ser o objeto de estudo. Trabalhos que abordem fenômenos semelhantes devem ser consultados, adotando, por vezes, adaptações e recomendações do fabricante a cada um dos sistemas. A modelagem também não é de fácil execução. Não apenas as escalas devem ser corretamente definidas, mas o processo de montagem dos modelos precisa ser adequado para simular corretamente os fenômenos do protótipo.

Enfim, para valer-se desse esforço, a realização do ensaio também deve ser impecável e PHILLIPS (1995) aconselha preparar um *check-list* com as atividades gerais requeridas, repassando por cada etapa: o design, a construção do equipamento, a construção do modelo, a

montagem das caixas de testes, sua integração a centrífuga e verificação, a condução do ensaio e posterior investigação dos dados obtidos.

Considerações especiais devem ser direcionadas à equipe técnica dos ensaios. O ideal é que profissionais experientes estejam envolvidos no planejamento e execução de todos os ensaios. Eles exerceriam a função de orientadores para os demais integrantes da equipe não familiarizados com essa tecnologia. A equipe também deve estar treinada para os protocolos de segurança. Centrífugas geotécnicas são equipamentos massivos e existem caixas com capacidade de até uma tonelada e centrifugadas a acelerações de 100g ((THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009), logo as pessoas em contato direto com esse maquinário devem saber manuseá-lo corretamente, para não danificá-lo nem resultar em riscos para os próprios pesquisadores e técnicos.

6. VISITA AO LABORATÓRIO DA COPPE

Para complementação desse trabalho foi realizada uma visita ao laboratório de ensaios centrífugos do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O objetivo da visita foi verificar as instalações necessárias e adequadas para a locação e utilização da centrífuga. Adicionalmente, foi possível acompanhar o chamado voo da centrífuga durante ensaios de deslocamento de tubos em solos moles. Isso permitiu acompanhar a instrumentação, a montagem do modelo, observar o sistema de aquisição de dados e as dificuldades apresentadas para executar ensaios com equipamentos que exigem precisão, mas extremamente delicados.

6.1. VISÃO GERAL

O laboratório está localizado no prédio Anexo do Centro de Tecnologia da UFRJ e consiste em duas salas distintas desse edifício, uma com a mini centrífuga de braço e outra com a centrífuga de tambor. Ambas as salas contêm computadores, armários e gaveteiros para guardar os equipamentos, uma bancada para preparo de material, pia e demais instalações comuns, mas essenciais, a laboratórios (tomadas, lixeiras, ventilação, etc.). Ressalta-se ainda a presença de uma talha elétrica, localizada bem acima das centrífugas (Figura 6.1). O equipamento existente nas duas salas serve para auxiliar o transporte de materiais para dentro e fora da centrífuga e está fixado a estrutura do laboratório.



Figura 6.1. Talha elétrica para auxílio no transporte de equipamentos.

Em nenhuma das salas existe separação física entre o equipamento e os computadores para comando e controle da centrífuga. Isso é possível, pois ambas as centrífugas possuem proteção própria que separa o ambiente rotacional do espaço externo (Figura 6.2). No entanto, esse tipo de arranjo representa risco de acidente a quem está acompanhando os resultados no caso de alguma peça da centrífuga vir a se soltar. Os painéis de controle do funcionamento, *no-break*, e botões de parada emergencial estão acessíveis e próximos à centrífuga (Figura 6.3). Para a mini centrífuga de viga sala foi reformada para sua instalação. Existem quadros localizados atrás da centrífuga, e de difícil acesso, mas que não comprometem seu funcionamento.



Figura 6.2 Centrífuga de viga de tambor da COPPE/UFRJ.

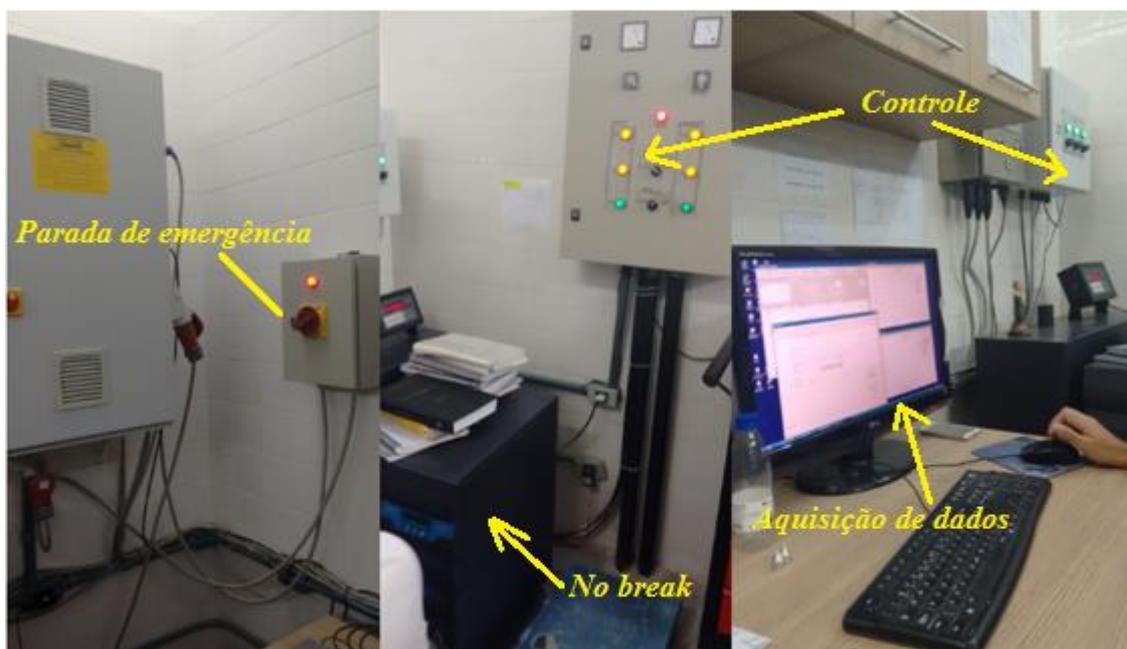


Figura 6.3. Painéis de Parada de Emergência, No break, Controle da Centrífuga e Aquisição de dados da Centrífuga de Viga

O laboratório apresenta uma ampla variedade de materiais para realização dos ensaios como células de cargas, atuadores de movimento, barras-T, dutos, estacas. Parte desse material foi adquirido comercialmente, mas alguns aparatos foram modificados ou produzidos no próprio laboratório. A Figura 6.4, a Figura 6.5, a Figura 6.6, a Figura 6.7 e a Figura 6.8 apresentam alguns desses equipamentos. A produção de elementos estruturais em escala reduzida é realizada em alumínio por um torno pertencente ao laboratório de geotecnia, com técnicos especializados. A definição das dimensões e demais especificações varia por ensaio, mas são reutilizados quando possível.



Figura 6.4 Placa coberta com geotêxtil não tecido para aplicação de tensões em áreas e adensamento na centrífuga de tambor.



Figura 6.5 Barra T para caracterização de solo mole em centrífugas de tambor.



Figura 6.6 Placa para execução de grupo de estacas em centrífuga de tambor.

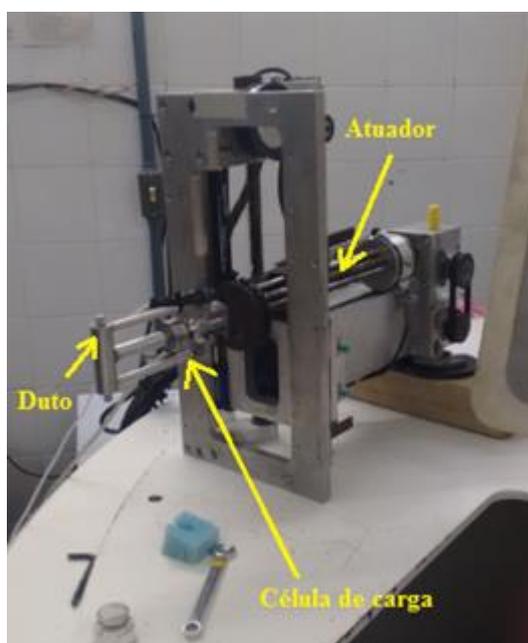


Figura 6.7 Montagem de atuador de movimentação vertical, célula de carga e duto.



Figura 6.8. Câmera para monitoramento do ensaio na centrífuga de viga.

6.2. CENTRIFUGAS DA COPPE

A centrífuga de tambor é a mais antiga, montada em 1995 pela empresa G-Max Scotland Ltd. (OLIVEIRA, 2005). Como citado no Capítulo 3, é uma centrífuga bascular de modo que atua com eixo na vertical ou na horizontal. Com um raio de 0,5 m, ela é capaz de atingir uma aceleração radial de 450 vezes a aceleração da gravidade (g) e apresenta capacidade de 90 gxtoneladas. A base do canal amostral permite fixar caixas seccionantes de diversos tamanhos (MACHADO, 2016). As dimensões de uma dessas caixas são mostradas na Figura 6.9. A aquisição de dados é feita pelo programa LOGS e a comunicação entre os meios rotacionais e estacionários é feito por vinte *slip-rings*. A centrífuga não veio equipada com mesa central para posicionamento dos atuadores, portanto todo o sistema de aquisição de dados foi montado por profissionais da COPPE (Figura 6.10).

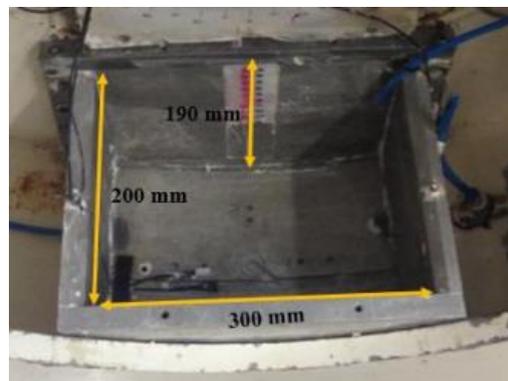


Figura 6.9. Caixa utilizada na centrífuga de tambor (MACHADO, 2016).



Figura 6.10. Sistema de aquisição de dados e instrumentação (local da mesa central) da centrífuga de tambor.

A segunda centrífuga, mais nova, é uma centrífuga de braço desenvolvida pela Broadbent e instalada em 2012. A máquina pode gerar acelerações de até 300g, tem um raio de 0,75 m e pode acoplar duas caixas de ensaio em cada extremidade. Não existem plataformas, as caixas (Figura 6.11) são acopladas diretamente ao braço da centrífuga por parafusos que permitem a sua oscilação de modo que a base da caixa estará sempre perpendicular a resultante da aceleração (Capítulo 3). Uma caixa é utilizada para ensaio e a outra como contrapeso. O espaço para a colocação da amostra é bastante inferior ao da centrífuga de tambor, com 300 mm de comprimento, 90 mm de largura e 156 mm de profundidade. O programa para aquisição de dados é o Acclipse.



Figura 6.11. Caixa da centrífuga de braço.

6.3. ÁREAS DE PESQUISA

As centrífugas da COPPE/UFRJ estão sob a supervisão do professor e engenheiro geotécnico Márcio de Souza Soares de Almeida. Os primeiros estudos ainda ocorreram na década de 90 e estavam envolvidos com o transporte de contaminantes no solo, mas atualmente já existem diversas publicações sobre diferentes temas. OLIVEIRA (2005) realizou pesquisas sobre a interação lateral solo-duto em camadas de argila. CALLE (2007) estudou a estabilidade de aterros de resíduos sólidos. MOTTA (2008) desenvolveu na centrífuga um CPT para medir resistência em solos arenosos. Muitos ensaios também foram realizados para estudos de estruturas offshore, mas uma grande parte dos estudos atuais se concentram na indústria de petróleo e gás (NOREÑA, 2015). O ensaio acompanhado durante a visita faz parte desse último espectro de ensaios.

A proposta do ensaio realizado no dia 05 de maio de 2016 era, de forma simplificada, simular a movimentação horizontal de um duto em solo arenoso. O duto de alumínio tem seu movimento simulado por atuador e os esforços medidos por uma célula de carga, montados de acordo com o esquema da Figura 6.7. Por se tratar de areia, a montagem foi realizada por pluviação. Esse procedimento consistiu em despejar uma massa pré-definida e peneirada de areia através de um funil (Figura 6.12).



Figura 6.12. Funil para despejo de areia na centrífuga de viga.

Ao ser despejado, o solo era distribuído por um carrinho movimentado manualmente ao longo do comprimento do modelo (Figura 6.13). Os orifícios desse carrinho permitem maior uniformidade na distribuição do material, auxiliados por uma malha de aço, que

também evita a passagem de grãos maiores do que o dimensionado. Após despejada, verificou-se se a distribuição está uniforme, retirando possíveis acúmulos, que posteriormente são recolocados no modelo por pluviação. O procedimento foi repetido até se obter uma superfície nivelada e uniforme. Em seguida, a amostra foi inundada lentamente, por meio do geotêxtil não tecido, utilizado para cobrir a lateral da caixa, para evitar que a percolação de água altere a estrutura do solo.

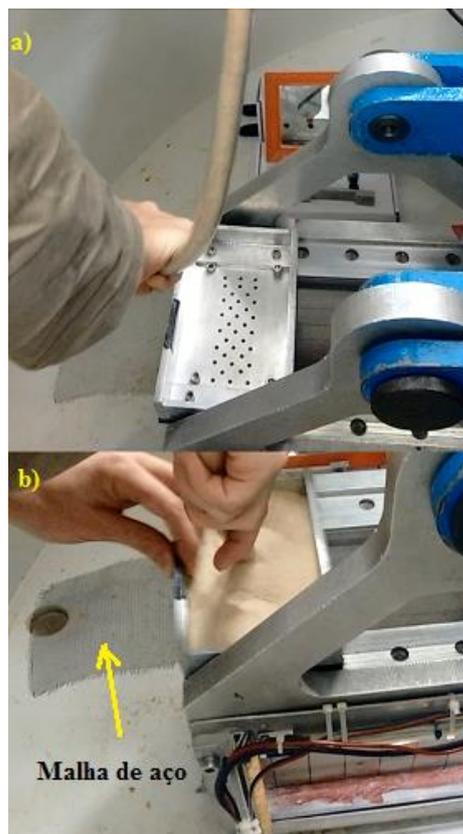


Figura 6.13 a) Carrinho e malha de aço para distribuição da areia e b) Carrinho preenchido com o material.

A montagem do modelo foi rápida, não demorando mais do que quarenta minutos, sendo que grande parte desse tempo foi só para a saturação da amostra. Porém foram encontrados problemas na célula de carga que atrasaram o experimento e não permitiram obter resultados significativos. A célula precisou ser trocada, posicionando a nova com acurácia para não causar divergências com ensaios anteriores, mas a configuração da aparelhagem dificultava esse serviço. Além disso, mesmo com a nova célula, os resultados obtidos no Acclipse não condiziam com o real, indicando que ainda havia algo de errado. Dessa forma, o ensaio não apresentou resultados significativos para a pesquisa.

O imprevisto ocorrido durante a visita foi um caso atípico de acordo com a equipe do laboratório. O comum, para ensaios com areia, é iniciar o voo da centrífuga logo pela manhã. Ainda assim, o atraso não foi considerado expressivo, uma vez que o problema foi identificado. Por fim, pôde-se observar com a visita que as centrífugas da COPPE são bastante demandadas e desde sua instalação sempre estiveram em operação, tornando-se um diferencial para as pesquisas geotécnicas da UFRJ.

7. ENSAIOS CENTRÍFUGOS

Pode-se afirmar que a centrífuga geotécnica cria dentro de seu espaço amostral, por meio de aceleração radial, um ambiente que simula o ambiente externo onde atua a gravidade. Assim, se garantirmos todos os aspectos de similitude e respeitando as leis de escala, seria possível realizar qualquer ensaio dentro da centrífuga e seus resultados seriam representativos do que se espera do protótipo.

Teoricamente, seria simples assim. Entretanto, sabe-se que garantir a semelhança entre protótipo e modelo não é simples. Como foi visto nos Capítulos 3 e 5, é preciso considerar cada particularidade do ensaio, o tipo de centrífuga que está sendo utilizada, as dimensões do espaço amostral e os equipamentos disponíveis para atuação e instrumentação. Os ensaios centrífugos usuais são utilizados para entendimento geral de eventos, onde os mecanismos do comportamento do protótipo podem ser melhor interpretados. Entretanto os ensaios podem apresentar objetivos diferentes. TAYLOR (1995), identifica as seguintes categorias para os estudos em centrífugas geotécnicas:

- O estudo de um problema particular (por exemplo, um aterro) para o qual há algumas dificuldades na definição do projeto. Há claramente a necessidade de reproduzir no modelo as características essenciais do protótipo. Sendo assim os resultados do modelo são extrapolados para o protótipo;
- Estudos direcionados à investigação de problemas e fenômenos, não diretamente a um protótipo pré-estabelecido, fazendo-se hipóteses gerais acerca de uma classe particular, por exemplo, a estabilidade de muros de contenção ou as deformações causadas pela construção de um túnel;

- Estudos específicos das variações de tensão e deslocamentos relevantes a um tipo particular de problema. O propósito destes testes é obter informações do comportamento do solo que possam ser de utilidade para modelos constitutivos ou alguma outra análise específica.

Destas categorias, a segunda é a mais aplicável à maioria dos estudos em centrífuga. Uma prática comum, como em qualquer área de estudo, é utilizar pesquisas anteriores com escopos semelhantes para auxiliar no processo de definição do ensaio centrífugo. O presente capítulo é uma apresentação de algumas pesquisas que utilizaram a centrífuga geotécnica para diferentes propósitos. Os trabalhos abordam temas distintos e adotam centrífugas diferentes, utilizando até centrífugas de instituições estrangeiras. Eles foram escolhidos com base em áreas de estudos abordadas no Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB. Espera-se que com a análise desses projetos tenha-se uma visão geral de ensaios centrífugos já consolidados e como eles poderiam servir de base para possíveis ensaios a serem realizados na UnB.

7.1. GEOSINTÉTICOS

Geossintéticos são materiais industrializados constituídos principalmente por polímeros. Podem apresentar-se na forma de tiras, mantas ou estrutura tridimensional e são bastante versáteis quanto as suas características e aplicação na Geotecnia (IGS, 2012). Pesquisas atuais estudam o benefício da utilização desses materiais em obras geotécnicas assim como as metodologias construtivas que otimizam sua instalação. Trata-se de um tema bastante abordado em trabalhos da UnB, seja o geossintético como foco principal ou como simples material constituinte do protótipo.

Dessa forma, as considerações sobre modelagem do geossintético são de grande interesse na modelagem centrífuga e se prevê que também seriam bastante utilizadas em uma centrífuga instalada na UnB. Dois trabalhos serão utilizados para ilustrar esses ensaios: o artigo de BLANC, DIAS *et al* (2014) publicado na revista *Geotextile and Geomembranes* e o artigo de SANTIAGO *et al* (2010).

7.1.1 VALIDAÇÃO EM CENTRÍFUGA DE ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA PLATAFORMA ESTAQUEADA REFORÇADA COM GEOSSINTÉTICOS

A publicação de BLANC, DIAS *et al* (2014) diz respeito a técnica de reforço de solos moles com estacas rígidas com camada de material granular (Figura 7.1). A camada granular funciona como uma plataforma de transferência de carga (LPT) e auxilia a transferir parte do carregamento aplicado ao solo mole para as estacas (A). Para melhorar o reforço, adota-se um geossintético na base da camada granular, que, ao ser deformado, transfere mais uma parcela de carregamento às estacas (B). Dessa forma, é transferido ao solo mole somente uma parcela restante do carregamento inicial (C).

A proporção entre os termos A, B e C depende da espessura da camada granular, espaçamento entre estacas, sobrecarga, compressibilidade do solo mole e rigidez secante do geossintético (J_a). Modelos numéricos são utilizados para obter maiores informações sobre essa distribuição de tensão, pois, apesar de subestimarem a tensão absorvida pelos geossintéticos, o uso de ferramentas numéricas tem se mostrado eficiente no dimensionamento do estaqueamento (BLANC, DIAS, *et al.*, 2014). Assim, o artigo trata da validação de alguns modelos numéricos baseado em ensaios centrífugos. A vantagem de se utilizar modelos centrífugos com esse propósito é que eles permitem maior controle das condições do protótipo e maior repetitividade dos ensaios em relação a observações em obras já estabelecidas. Para esse estudo adotou-se um equipamento desenvolvido na centrífuga de viga do Instituto Francês de Ciência e Tecnologia de Transporte, Espacial e Redes (IFFSTAR). Essa centrífuga apresenta capacidade de $2g \times ton$, raio de 5,5 m a partir do eixo e a plataforma da caixa, na qual foram instalados os modelos e equipamentos, possui área $1,61 \text{ m}^2$ ($1,40 \times 1,15 \text{ m}$)

Denominado *Mobile Tray* (MT), que traduzido significa bandeja ou platô móvel (Figura 7.2) o equipamento consiste de uma bandeja metálica perfurada (3) posicionada acima de um aparato que permite acoplar até no máximo 61 inclusões para modelagem das estacas (4). Ao se movimentar verticalmente para baixo, a bandeja é capaz de simular o adensamento do solo mole. A camada de material granular é posicionada por cima da bandeja, dentro de um anel metálico (2) e, acima deste, existe um tanque de aço (1) que pode ser preenchido com água durante os ensaios, simulando possíveis sobrecargas. O tanque constitui-se de uma membrana de borracha montada dentro de um cilindro metálico com 894 mm de diâmetro interno por 900mm de altura. O reforço geossintético é colocado na base do anel, entre

material granular e estacas. A modelagem simula um aterro de 17,9 m de largura, com espaçamento entre estacas de 2,0 m e diâmetro d de estaca de 0,5 m.

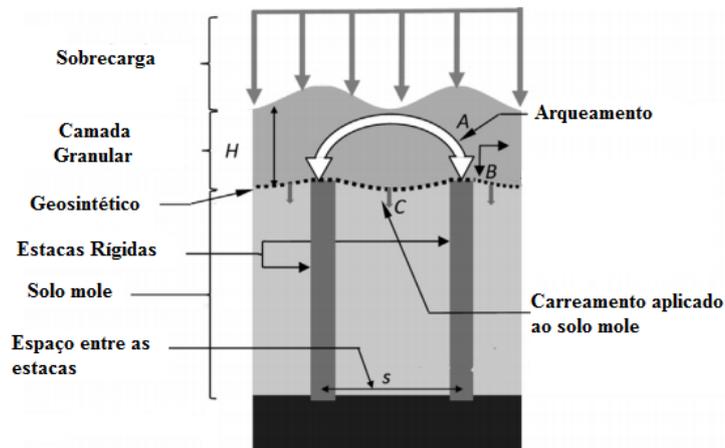


Figura 7.1 Mecanismo de transferência de cargas em aterros estaqueados reforçados com geossintéticos (BLANC, DIAS, *et al.*, 2014).

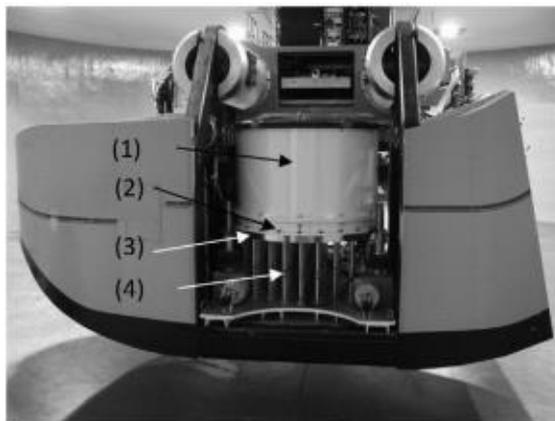


Figura 7.2. MT dentro da caixa da centrífuga de viga (BLANC, DIAS, *et al.*, 2014).

Em escala real, o material do LPT consiste principalmente de solo granular de diâmetro máximo de 31,5 mm. Para simular esse material e ao mesmo tempo prevenir o efeito do tamanho das partículas, adotou-se no modelo reduzido uma mistura de cinco tipos de areia com tamanho máximo de 1 mm, visto que a aceleração gerada na centrífuga era da ordem de 20 gravidades. Já o geossintético comumente adotado nessa técnica de reforço é a geogrelha. A força de tração (T) nesse material é o produto da deformação ϵ_g pela rigidez J_a . A lei de escala para ambas grandezas T e J_a é $1/N$, de modo que o material do modelo reduzido deveria ser N vezes menos rígido do que aquele adotado no protótipo, enquanto a deformação deve ser a mesma.

Buscando garantir essas condições na pesquisa em questão, os autores optaram por adotar um geotêxtil biaxial composto de fibras de prolipropileno de densidade 110g/m². A tensão aumenta com o carregamento e, conseqüentemente, com a fluência do geossintético, mas, para critério do projeto, foi adotado um valor fixo de $J_a = 4000\text{kN/m}$ como rigidez secante a curto prazo no protótipo. Os valores adotados para o modelo estão apresentados na Tabela 7.1. Por se tratar de um tecido biaxial, o valor J_a é a combinação da rigidez nas duas direções, axial e transversal, e o valor de 4000kN/m foi escolhido por estar próximo do valor comum de J_{axial} e $J_{\text{transversal}}$.

Tabela 7.1. Características do Geossintético utilizado no modelo centrífugo (BLANC, DIAS, *et al.*, 2014).

| Escala | Protótipo | | Modelo (N = 20) | |
|---|-------------|-------|-----------------|-------|
| Direção | Transversal | Axial | Transversal | Axial |
| T_{max} (kN/m) | 478 | 490 | 23,9 | 24,5 |
| J_a (kN/m) | 4760 | 2960 | 238 | 148 |
| Deformação á T_{max} , $\epsilon_{\text{gmáx}}$ (%) | 12,9 | 19,3 | 12,9 | 19,3 |

Cada ensaio foi dividido em três fases. Na primeira, o modelo era submetido a centrifugação em ciclos de aceleração e desaceleração para garantir a repetitividade das condições iniciais de um teste para o outro. Após garantida essa condição, a aceleração era mantida constante a 20 g. A segunda fase consistia no preenchimento do tanque com água para aplicação da sobrecarga. Na terceira, e última, fase a bandeja era movimentada para simular o movimento do solo mole.

É válido apontar que o MT não é uma modelagem de solos moles reais, mas somente uma simulação do seu movimento para análise do comportamento do reforço. O momento em que a bandeja está rebaixada o suficiente para não estar mais em contato com o geossintético representa o caso último em que toda a carga é transferida às estacas. A possibilidade de alcançar tal configuração depende do espaçamento entre estacas (s) e do valor de J_a . Quando possível, o equipamento é capaz de simular solos extremamente moles que suportam quase nenhum carregamento.

Por fim, os resultados de interesse são a eficiência e a deflexão do geossintético adotado. A eficiência é a relação entre a carga aplicada e aquela efetivamente absorvida pelas inclusões, medida pelas células de carga. A deflexão pode ser obtida pelo recalque diferencial,

medida pela diferença no deslocamento do LPT no topo de uma inclusão e o deslocamento acima do centro de um quadrado formado por quatro inclusões, como representado na Figura 7.3. O mesmo equipamento também é utilizado para estudos da altura da camada granular, do espaçamento e do diâmetro das estacas (d).

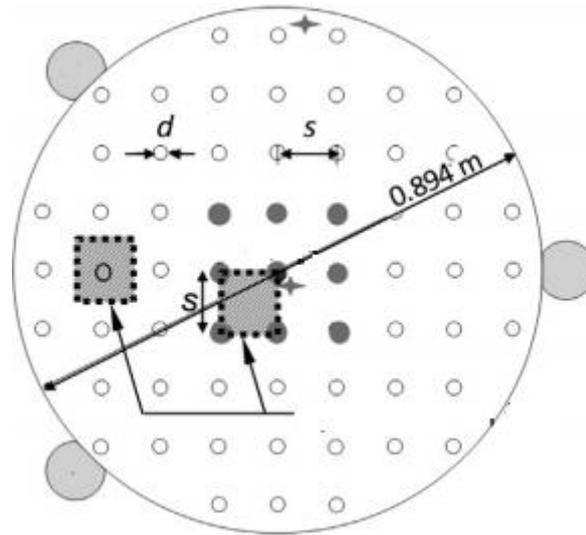


Figura 7.3. Visão superior da bandeja perfurada (BLANC, DIAS, *et al.*, 2014).

O artigo apresentado consiste de um conjunto de trabalhos realizados no tema apresentado, e desenvolve-se expondo as alternativas de modelagem numéricas a serem estudadas. Contudo, para critérios do presente projeto, o que ficou evidente, e que vale ser reforçado, é que as considerações utilizadas para a modelagem do reforço permitiram construir um modelo prático e com resultados confiáveis o suficiente para servir de base para validação de modelos numéricos analíticos.

7.1.2. ANCORAGEM DE DUTOS ENTERRADOS COM GEOGRELHAS

Dutos enterrados para transporte de gás e óleo tendem a sofrer deformações verticais consideráveis devido às forças advindas das pressões de bombeamento e aumento da temperatura. Quando ocorre elevação do nível de água do terreno, a estabilidade dos gasodutos é comprometida, o que pode levar a acidentes ambientais (SANTIAGO, SABOYA, *et al.*, 2010). Dessa forma, existe uma série de estudos de propostas para estabilização desses gasodutos. O artigo em questão está inserido nessa área de pesquisa e trata de uma análise comparativa da resistência ao levantamento entre dutos enterrados na areia ancorados a uma geogrelha. Realizando-se ensaios na centrífuga de viga da UENF, o trabalho objetivou-se a determinar a influência da ancoragem no ganho de resistência ao levantamento de dutos

enterrados quando sujeitos ao empuxo ascendente, como resultado da ação da subida do lençol freático.

Esse fenômeno foi simulado pelo arrancamento de dutos rígidos enterrados em areia. Realizaram-se ensaios a uma mesma profundidade (H) igual a três vezes o diâmetro dos tubos (D). Adotou-se aceleração radial de 10 vezes a aceleração gravitacional, definindo-se uma escala de 1:10 entre modelo e protótipo. O modelo foi montado em caixa teste de alumínio com dimensões internas de 70 cm de comprimento, 25 cm de largura, e 50 cm de altura. Essas dimensões permitiram ensaiar dois dutos por voo, sendo um ancorado a uma geogrelha e o outro não. Para representação dos dutos, utilizaram-se tarugos de alumínio aeronáutico sólido, com diâmetro de 5 cm, comprimento de 20 cm e massa de 1096,38 g. A Figura 7.4. Representação ilustrativa da montagem do modelo. ilustra o esquema do modelo, com altura do aterro, ancoragem com geogrelha, posicionamento do atuador, do sensor de deslocamento potenciométrico e da célula de carga.

Dois ensaios utilizaram geogrelhas com largura de 3D (15 cm) e os outros dois com 2D (10 cm). Nesse trabalho a modelagem da geogrelha deu-se somente com a definição de suas dimensões, usando o mesmo material de campo no modelo. Isso pode ser justificado porque o estudo da ancoragem adota uma redução de escala duas vezes inferior a redução do estudo de solos moles. Escalas menores implicam em maiores cuidados para evitar os erros de escala. Para preparo do solo, utilizou-se uma areia industrial lançada por pluviação na caixa teste. Os ensaios foram executados em duas densidades relativas diferentes, uma em estado denso (70%) e outra em estado fofo (23%).

O arrancamento dos dutos foi executado por um atuador (pistão hidráulico) com curso máximo de 65 mm, controlado a uma velocidade constante (0,5 mm/s). A célula de carga acoplada ao atuador (Figura 7.4) mede a força de arrancamento, enquanto que o deslocamento vertical é registrado pelo sensor potenciométrico. A aquisição dos valores medidos se deu por um *software* desenvolvido no laboratório em linguagem LabVIEW da UENF. Esse *software* também é responsável por controlar o posicionamento do atuador. De maneira geral, os resultados foram condizentes com o esperado e a presença da geogrelha levou a ganhos de resistência em torno de 25% em relação aos dutos sem ancoragem, para ambas as larguras. A pesquisa utilizou-se de ensaios com aparelhagem menos complexa do que o de BLANC, DIAS *et al* (2014), mas ainda eficiente no seu propósito.

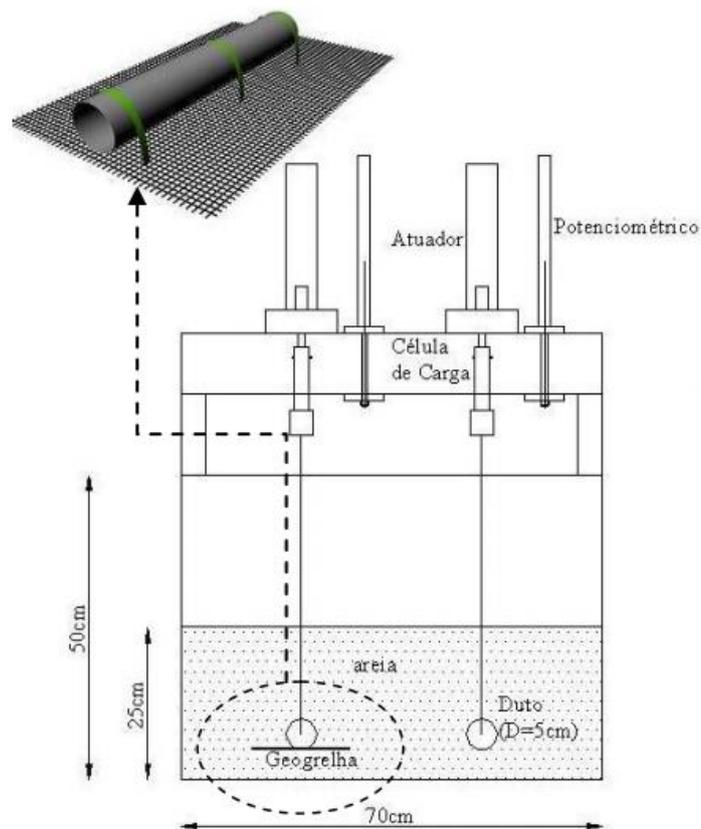


Figura 7.4. Representação ilustrativa da montagem do modelo (SANTIAGO, SABOYA, *et al.*, 2010).

7.2. DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS PARA ENSAIO CPT E BARRA-T

Todo ensaio centrífugo exige a caracterização do solo a ser utilizado na modelagem. Sendo ele o mesmo solo do protótipo ou uma substituição por material sintético, como é o caso do caulim na COPPE/UFRJ, o material do modelo deve apresentar características semelhantes a situação *in situ* de forma a simular corretamente o fenômeno de estudo. Tomando como base o solo de Brasília, um solo predominantemente colapsível, não foram encontrados ensaios centrífugos que abordassem esse material. Então, estudos em centrífugas geotécnicas nesse solo seriam pioneiros e necessitariam de aparelhagem adequada para caracterização em voo.

Ao se discutir a modelagem no Capítulo 3 o foco foi na definição das leis de escala para as características do solo e para as grandezas físicas envolvidas. Pouco foi comentado sobre o dimensionamento de equipamentos a serem empregados. Isso se deve ao fato de que a modelagem dos equipamentos é limitada à tecnologia disponível e não somente às dimensões.

Ainda que exista uma variedade considerável de aparelhos comerciais, muitos dispositivos ainda estão em desenvolvimento. De fato, a miniaturização dos equipamentos para a atuação e medição pode constituir uma grande dificuldade para a realização de ensaios durante o voo. Por essas considerações, é de interesse para esse projeto a apresentação do trabalho de ALMEIDA *et al* (2011) que trata do desenvolvimento de penetrômetros Barra-T e CPT para ensaios centrífugos.

7.2.1. PENETRÔMETRO DE BARRA-T E CPT PARA INVESTIGAÇÃO EM ENSAIOS CENTRÍFUGOS

O artigo de ALMEIDA *et al* (2011) é uma apresentação da experiência para desenvolvimento do penetrômetro de Barra-T e CPT para medida de resistência do solo na centrífuga de tambor da COPPE/UFRJ. Os resultados e interpretações foram realizados em solos argilosos e rejeitos siltosos, utilizando equipamentos de Barra-T e CPT, respectivamente.

Atualmente, a principal ferramenta utilizada em centrífuga é o penetrômetro de Barra-T. Seu funcionamento se assemelha ao ensaio de cone (CPT), mas com uma área em barra ao invés de um cone. Não há necessidade de correções da área, obtendo-se a resistência do solo por uma equação simples, mas sua utilização é indicada somente para solos argilosos, uma vez que a interpretação teórica da resistência mobilizada foi deduzida com base nesse tipo de solo. Para solos granulares o mais indicado é o CPT. Esse ensaio pode ser utilizado para determinar a estratigrafia do terreno, propriedades dos materiais e prever a capacidade de cargas de fundações (MOTTA, 2008). Seu princípio consiste de cravar no solo uma ponteira cônica a uma velocidade constante de 20 mm/s e o procedimento é padronizado pela norma brasileira NBR 12.069/91.

A Barra-T desenvolvida pelo laboratório possui um diâmetro de 15,2 mm e sua configuração é apresentada na Figura 7.5. A célula de carga, comercial, é responsável por medir as forças verticais, com tensões de fábrica de 50 N que compensam momentos fletores e variações térmicas. Um transdutor de poropressão foi posicionado no solo para monitoramento do adensamento.



Figura 7.5. Barra-T (ALMEIDA, OLIVEIRA, *et al.*, 2011).

Um aspecto importante para a calibração dos equipamentos é a utilização de solo com características conhecidas. No caso do material argiloso, utilizou-se para ensaio a argila da Baía de Guanabara coletada *in situ* e transformada em lama com umidade em torno de 1,5 vezes o limite de liquidez. Essa mistura permite a deposição, em voo, dentro da caixa através de um único ponto, com o movimento giratório levando a formação de camadas. Cada ensaio divide-se em duas etapas: o adensamento da amostra a uma aceleração de 100g e a atuação vertical e lateral à aceleração de 30g. A amostra ficava em voo durante dez horas para adensamento, após o qual reduzia-se de uma camada com altura de 105 mm para 71 mm e apresentava uma superfície lisa e regular, adequada para ensaios superficiais. Após a dissipação das poro-pressões, a Barra-T penetrava no material verticalmente (Figura 7.6) pela ação do atuador e era feita a medida da resistência não-drenada.



Figura 7.6 Barra-T em posição para penetração (ALMEIDA, OLIVEIRA, *et al.*, 2011).

Através dos resultados obtidos, os valores encontrados para cinco ensaios realizados na centrífuga foram condizentes com os valores obtidos *in situ*, mesmo que a penetração do modelo (equivalente a 1 m) fosse muito inferior à penetração dos ensaios de campo (por volta de 6 m). Outra consideração importante levantada diz respeito a não perturbação de amostras de campo, enquanto que amostras testadas na centrífuga foram reconstruídas em voo. Para considerar essa diferença, multiplicou-se os resultados da centrífuga por um coeficiente igual a 2.

Os ensaios com o CPT foram realizados em rejeitos da exploração de ferro pela Samarco Mineração S.A., localizada na cidade de Mariana, Minas Gerais. Uma análise dos grãos constituintes do material resultou em uma porcentagem de 7% de argila, 71% de silte e 22% de areia fina, sendo o rejeito classificado como siltoso. O estudo do seu comportamento também permitiu classificá-lo como não plástico (ALMEIDA, OLIVEIRA, *et al.*, 2011).

Para concepção do mini penetrômetro CPT levou-se em consideração a capacidade máxima de atuação do atuador radial centrífugo (2000N), a capacidade das células de carga (125N), a limitação da distância que o equipamento penetra (18 cm) e a elevada resistência do material. O penetrômetro precisa ser leve o suficiente para não perturbar significativamente a amostra, mas deve ser capaz de medir a resistência do solo. O equipamento foi desenvolvido para medir cargas de ponta e carga total, configuração possível pela presença de duas células de carga (Figura 7.7). A partir dessas considerações e dos materiais disponíveis, foi montado um CPT com cone de 9 mm de diâmetro, *shaft* interno de 5 mm, comprimento total (incluindo células de carga) de 165 mm e comprimento livre de aproximadamente 70 mm. Esse

comprimento livre levou em consideração a possibilidade de flambagem de acordo com formulações de Euler. A massa total do equipamento é de 323g.



Figura 7.7. Visão geral do mini-CPT (ALMEIDA, OLIVEIRA, *et al.*, 2011).

Para a análise do funcionamento do CPT em voo foi aplicado o princípio da modelagem de modelos. Assim, foram executadas medições com três acelerações distintas: 25g, 50g, 75g. A montagem da camada de solo na caixa foi executada com centrífuga estacionária e o adensamento foi realizado a uma aceleração de 50g durante 30 minutos. A altura final da camada adensada era de 9cm com uma densidade relativa de 99%. A penetração máxima adotada nos ensaios foi de 6 cm, correspondendo a profundidades no protótipo de 1,5 m, 3m e 4,5 m, respectivamente. Uma análise dos resultados apresentada na Figura 7.8 permitiu concluir que houve concordância entre os resultados de cada aceleração. A leve divergência a 25g pode ser justificada pelo sobreadensamento da amostra, uma vez que o adensamento foi realizado a 50g. Parâmetros de resistência obtidos no ensaio com o mini-CPT foram comparados com parâmetros obtidos em ensaio de cisalhamento direto e ensaio triaxial, permitindo concluir que os valores obtidos na centrífuga eram confiáveis e compatíveis com ensaios convencionais.

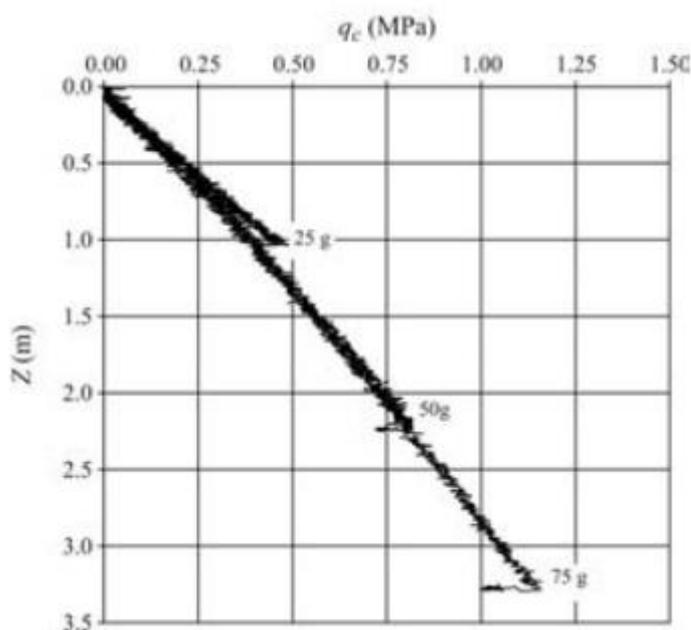


Figura 7.8. Modelagem de modelos para o mini-CPT com rejeitos siltosos na análise do protótipo com profundidade Z e carga medida q_c (ALMEIDA, OLIVEIRA, *et al.*, 2011).

Pela análise desse estudo é possível inferir que no desenvolvimento de equipamentos para a centrífuga é fundamental conhecer o funcionamento em escala real, o material que será usado para estudo e leis de escalas das grandezas medidas. A maior dificuldade da sua montagem é a existência de aparelhos pequenos o suficiente para atender aos fatores de escala definidos, mas que ainda realizam as medidas com precisão.

Quando esses equipamentos existem, a tendência é que sejam caros e exijam cuidadoso manuseio. Essa consideração foi observada no problema enfrentado durante a visita ao laboratório da COPPE/UFRJ. Ainda assim, o avanço da tecnologia computacional e eletrônica dos últimos anos tem proporcionado maior versatilidade para desenvolvimento de atuadores e monitoramento de ensaios centrífugos, ajudando a difundir os ensaios centrífugos (ALMEIDA, OLIVEIRA, *et al.*, 2011).

7.3. ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Atualmente, a Engenharia Ambiental tem sido foco das mais variadas pesquisas para estudar soluções que reduzam o impacto das ações humanas no meio ambiente. Na Geotecnia, destaca-se a preocupação com os aterros de resíduos sólidos. Apesar de ser uma ferramenta

útil para a deposição dos resíduos, os aterros ainda apresentam alguns aspectos que precisam ser melhorados como a produção de chorume e gás. Além disso, em aterros convencionais é inevitável que, com o tempo, a massa depositada entre em contato com a água de chuva e leve a contaminação do solo subjacente.

Existe grande interesse de estudo de propostas para estabilizar esses aterros e garantir que a contaminação seja mínima. É um tema importante para países em desenvolvimento como o Brasil e existe uma quantidade de trabalhos desenvolvidos pela UnB em análise de aterros. Como a centrífuga geotécnica consegue modelar complexos problemas bi e tridimensionais, sobre condições controladas e passíveis de serem reproduzidas, sua prática nesse tipo de pesquisas já foi reconhecida por variados pesquisadores.

Desse modo, procurando exemplificar a metodologia de modelagem, construção e análise de aterros de resíduos sólidos em centrífugas geotécnicas utilizou-se o trabalho de CALLE (2007).

7.3.1. COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE RESÍDUOS SÓLIDO URBANOS

A tese apresentada por CALLE (2007) objetiva o estudo do comportamento geomecânico de resíduos urbanos pré-tratados mecânico-biologicamente. O pré-tratamento mecânico consiste em preparar os resíduos para o tratamento biológico, removendo peças de grandes dimensões e de difícil trabalhabilidade. A fase biológica é a fase de estabilização (ou redução) da matéria orgânica existente. Uma vez que esse material é depositado em aterros de resíduo o estudo de seu comportamento se dá pelas premissas da geotecnia.

A tese busca compreender o comportamento tensão deformação e resistência desses resíduos e explicitar o efeito promovido pelos plásticos, madeira e demais materiais, denominado de *efeito fibra*. Para tanto, utilizou-se a centrífuga geotécnica de tambor da COPPE/UFRJ, sendo esta a primeira pesquisa que empregou ensaios centrífugos no estudo do comportamento de resíduos sólido urbanos no Brasil.

Além dos componentes próprios da centrífuga, foram elaboradas lâminas de aço para a modelagem de taludes de 45, 60 e 80°, desmontáveis em duas partes, para praticidade de execução, e projetadas considerando a curvatura do tambor (Figura 7.9.b). Também foi desenvolvida uma caixa em alumínio para os ensaios com uma câmera filmadora instalada para monitoração visual através de um espelho (Figura 7.9.a).

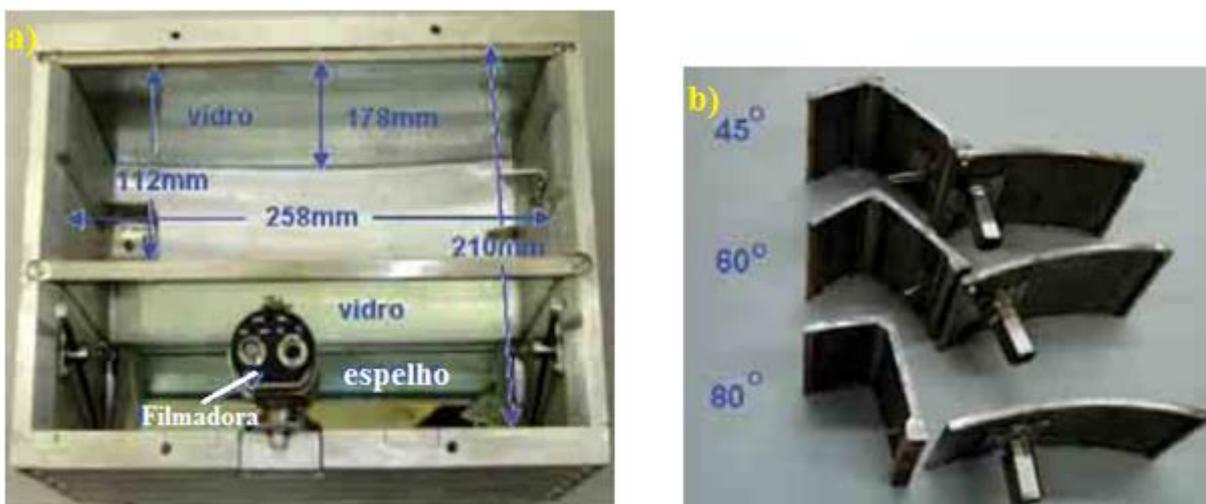


Figura 7.9. Equipamentos da modelagem a) Caixa com a câmera e b) lâminas de montagem dos taludes (CALLE, 2007).

O material para o ensaio foi resíduo sólido urbano triturado seco obtido da central de Tratamento Mecânico Biológico do Município de São Sebastião, São Paulo, com massa específica de $10,5 \text{ kN/m}^3$, com e sem adições de fibras. Para os ensaios preliminares os taludes foram construídos com a centrífuga em repouso utilizando as lâminas metálicas instaladas na caixa. O resíduo era disposto livremente sem aplicar compactação, inicialmente com a parte lateral da lâmina. Após a disposição do material, colocava-se a parte superior. Abaixo do talude tinha uma camada de 3,6 cm de altura de resíduo, para evitar contato direto do talude com a caixa e, conseqüentemente, variação brusca de rigidez. As lâminas eram acopladas ao atuador radial, que permitia sua remoção durante o voo. Contudo, durante esses ensaios preliminares foi observado que a ruptura do talude ocorria simultaneamente a retirada da lâmina.

Dessa forma, mostrou-se necessária a execução de ensaios adicionais. Destes, três utilizaram a inclinação de 60° e três a de 80° . Para a inclinação de 45° foi realizado somente um ensaio, sem a adição de fibras. Nessa nova etapa a montagem do modelo também foi executada com centrífuga parada e com eixo na horizontal. Para visualizar deformações, adotaram-se linhas brancas de açúcar nas laterais da caixa à medida que se procedia a colocação do resíduo (Figura 7.10). O material era compactado com barra de aço até se obter uma densidade de 12 kN/m^3 .

Uma vez construído o aterro, retirava-se a parte lateral da lâmina e colocava-se a parte superior antes de bascular a centrífuga para o eixo vertical. Para evitar vácuo entre resíduo e lâmina durante sua remoção adotou-se entre eles uma folha de plástico com pequenas

aberturas para fluxo livre do ar. Com o talude montado e sistema pronto iniciava-se a centrifugação partindo com valores baixos de aceleração até próximo a cem vezes a ação da gravidade. O ensaio era automaticamente parado quando atingido um valor de aceleração N_g que provocasse a ruptura do talude. Tais valores eram registrados como N_{crit} . Com as imagens registradas, e com adequado tratamento das deformações gráficas geradas pela câmera, era possível definir a superfície de ruptura do talude (Figura 7.11).



Figura 7.10. Talude montado na centrífuga com as linhas de açúcar (CALLE, 2007).

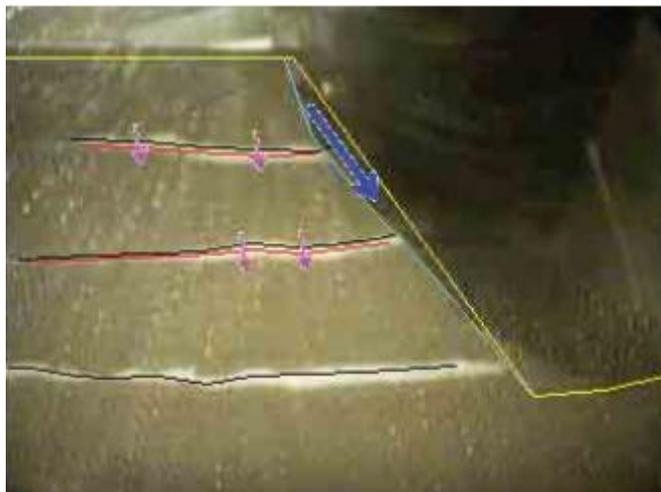


Figura 7.11. Talude deformado em ruptura (CALLE, 2007)

Devido ao erro dos ensaios preliminares, fez-se retro-análise somente dos ensaios adicionais. Para tanto, consideraram-se as superfícies de ruptura como lineares e adotaram-se os parâmetros apresentados na Figura 7.12. Nela, H é a altura do talude, β é sua inclinação, θ_{crit} é o ângulo crítico de ruptura, M_θ é o peso da cunha, φ é o ângulo de atrito e c_θ é a parcela de coesão aparente. A análise foi efetuada considerando a massa específica, $\gamma=12 \text{ kN/m}^3$ e altura de talude, $H=0,10 \text{ m}$, correspondente às condições dos ensaios em centrífuga.

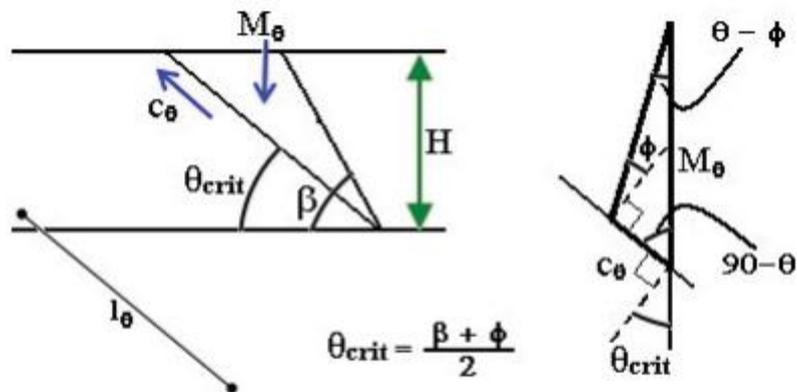


Figura 7.12. Análise da Ruptura (CALLE, 2007).

A partir dessa retro-análise e dos N_{crit} 's para cada situação, foi possível definir valores de coesão aparente (c) e ângulo de atrito (ϕ). Quando comparados com os resultados de ensaios de cisalhamento direto e triaxial, os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios centrífugos eram inferiores, ainda que seu comportamento fosse de acordo com o esperado (com incrementos de resistência com a adição das fibras). O autor associa essa diferença ao efeito do tamanho das partículas, uma vez que nos ensaios centrífugos seu tamanho relativo cresce enquanto que em ensaios tradicionais ele mantém-se constante. Adicionalmente, as fibras são solicitadas de forma diferenciada para cada ensaio e detalhes de execução dos modelos, como a forma de compactação, também podem influir nessa diferença.

Enfim, esse trabalho se destaca pelos erros encontrados durante a execução do ensaio. É uma das grandes dificuldades de ensaios pioneiros, mas, em contrapartida, ele já define critérios para projetos futuros que dariam continuidade ao estudo de aterros de resíduos modelados em centrífugas geotécnicas, como por exemplo, incluir medidas de deformação de melhor qualidade.

8. PROPOSTA APRESENTADA A UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

No ano de 2011, o Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB solicitou à empresa Broadbent, com devida autorização das entidades competentes, o orçamento de uma centrífuga geotécnica para o laboratório de geotecnia. A solicitação foi baseada na centrífuga

de tambor da COPPE/UFRJ e a compra do equipamento foi aprovada. Porém, por problemas de ordem burocráticas por parte de alguns setores da UnB, não houve o depósito do recurso financeiro aprovado pela FINEP para tal ano.

O presente capítulo consiste da apresentação dessa mesma proposta, mas agora com uma avaliação do produto sobre a óptica de tudo que se foi estudado até o momento. Isso permite verificar a adequação do equipamento a propostas de ensaios, os instrumentos e atuadores que estavam inclusos e quais as principais mudanças que deveriam ser promovidas no laboratório. Dessa forma, se o projeto de aquisição da centrífuga for retomado, os problemas técnicos e executivos para sua instalação serão reduzidos e os ensaios poderam ser realizados em um intervalo de tempo menor.

8.1. CENTRÍFUGA DE TAMBOR BASCULANTE

A solicitação foi de uma centrífuga de tambor basculante com capacidade de 80 g_xton, completa com um sistema de aquisição de dados (DAS) 16 Channel e conjunto de instrumentação básico. A proposta foi do modelo GMT GT80/1.0 e está estimada em valor saído de fábrica e recondicionada, pronta para funcionamento com garantia de doze meses, com disponibilidade de garantia estendida. Buscando manter o custo ao mínimo possível, a proposta inclui somente o canal de 1 m de diâmetro e duas caixas que permitem seccioná-lo (Figura 8.1). Assim, não são incluídos valores para cobrir quaisquer atuadores ou hardwares de ensaios específicos.



Figura 8.1. Set de caixas de teste para a centrífuga de tambor da empresa Broadbent G-Max (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009).

A máquina, assim como a da COPPE, permite mudar a direção do eixo de rotação, funcionando em dois modos de operação: horizontal (Figura 8.2.b) e vertical (Figura 8.2.a). A configuração horizontal atinge acelerações mais baixas, mas facilita o preparo do modelo. A

centrífuga pode ser inicializada em qualquer posição. Quando na horizontal, ela ocupa uma largura de 1,85 m, enquanto que na vertical, ela ocupa uma altura de 1,62 m. A empresa aconselha reservar uma área de 4 m por 4 m, para permitir retirada da centrífuga

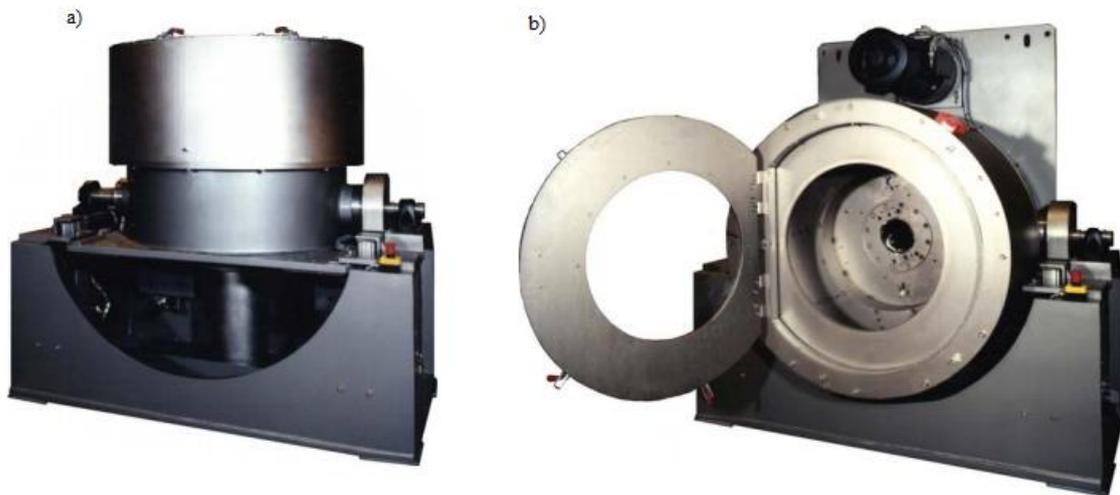


Figura 8.2. a) Configuração vertical b) configuração horizontal (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009).

O espaço de ensaio é um canal de 1,0 m de diâmetro, com 0,25 m de largura e profundidade de 0,17m. O equipamento é capaz de produzir uma aceleração radial de 400g com um carregamento de 200kg. Numa análise grosseira, para essa capacidade máxima é possível simular um protótipo de 1.256 m de comprimento, 100 m de largura, 68 m de profundidade ou 7M m³ de volume. A face superior do canal é equipada com quatro janelas de acrílico que permitem visualização do ensaio (Figura 8.3). As caixas de ensaio possuem volume de 5,6 litros e profundidade de 0,13 m. Elas também são equipadas com lateral de acrílico e encaixes que as conectam firmemente ao canal.

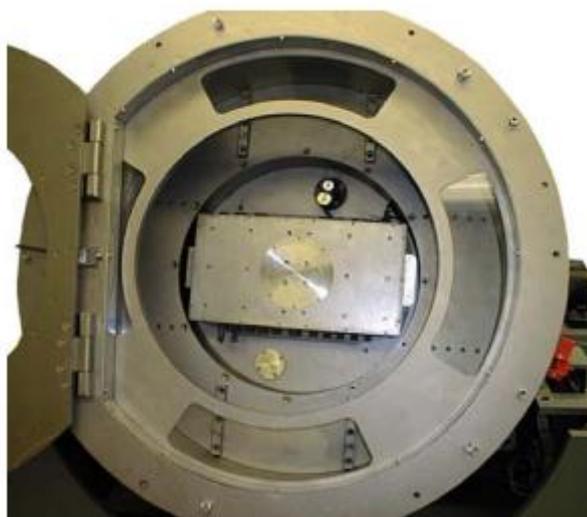


Figura 8.3. Janelas de acrílico da chapa lateral auxiliar do canal (THOMAS BROADBENT & SONS LTD, 2009).

A centrífuga opera por um sistema de polias conectadas por correias entre o shaft e o motor. Esse motor está condicionado para permitir controle de velocidade variável e ajuste da tensão da correia. A sustentação da centrífuga é garantida por dois elementos: uma base estrutural e um chassi. A base consiste de uma larga estrutura de aço que suporta o chassi por meio de dois blocos e é aconselhado ancorá-la firmemente a um bloco de fundação específico, com dimensões adequadas para prevenir o tombamento caso haja desbalanceamento. O chassi basculante é responsável por sustentar todos os elementos da centrífuga e atua a 90°, movimentando-se por um pequeno motor próprio.

A centrífuga vem equipada com um controlador lógico programável (PLC) que atua como sistema de segurança, controlando todas as funções da centrífuga geotécnica. Ele funciona independentemente dos sistemas de controle experimental, pois estes não são considerados confiáveis, mas interage com a instrumentação no interior da centrífuga para critérios de medição. A proposta inclui 4 botões de parada de emergência que podem ser instalados onde for requerido. A comunicação entre ambiente rotacional e ambiente rotacionário é feita por *slip rings* (Item 5.7). O conjunto de instrumentação incluído na proposta é composto de 5 transdutores de poro-pressão (PPT) e cinco transdutores de deslocamento (LVDT).

Por fim, o orçamento ficou 149.599,00 libras esterlinas, o que corresponde a aproximadamente 800 mil reais (de acordo com a cotação do dia 05/06/2016). Por questões de sigilo de contrato, não se entrará em detalhes sobre o orçamento, mas pode-se afirmar que a

máquina centrífuga é o item mais oneroso. Também é válido afirmar que o custo com entregas cobre somente a entrega até o porto, o transporte até Brasília ficaria a custo da Universidade, bem como a conexão do equipamento aos sistemas elétricos e hidráulicos e a rede de internet do laboratório.

8.2. ANÁLISE DA PROPOSTA

A centrífuga geotécnica da proposta pode ser considerada uma mini-centrífuga devido ao seu raio de 0,5 m. Ainda que relativamente pequena, sua capacidade de 80gxtoneladas permite que protótipos de dimensões consideráveis sejam modelados. Mas, como foi ressaltado durante os estudos de efeitos de escalas, quanto menor a centrífuga, mais sujeito a erros estará o modelo e maiores cuidados terão de ser tomados com sua montagem. Adicionalmente, os equipamentos para execução dos ensaios deverão ser pequenos o suficiente para não perturbar o modelo, mas capazes de realizar as medidas desejadas. Considerando que a proposta inclui um *kit* mínimo de aparelhagem, é de se esperar que na execução dos primeiros ensaios será necessário comprar ou desenvolver instrumentação própria, o que indica custos adicionais ao preço apresentado pela BroadBent Ltd.

Ainda assim, uma centrífuga de dimensões menores continua sendo a opção mais viável para o laboratório da UnB. Isso porque o custo, a instalação e a manutenção de um equipamento maior envolveria um processo mais longo, como ocorrido com a UENF. A questão de espaço é um assunto delicado, não só na instituição, mas como em toda cidade de Brasília. A mini-centrífuga tornará possível a instalação do equipamento sem a necessidade de construção de um novo prédio.

A reforma do laboratório seria necessária, com verificação estrutural, das instalações elétricas, hidráulicas e de segurança, mas não são critérios que envolveriam processos burocráticos extensos. Adicionalmente, a centrífuga também proporciona que mais modelos físicos sejam instrumentados sem que um espaço real seja de fato ocupado. Por exemplo, estruturas de fundação executadas em campo geralmente não são removidas após o ensaio, o que implica em perda de espaço amostral e de material. Ensaio centrífugos são desmontáveis e o solo utilizado geralmente é reaproveitado.

As janelas de acrílico das caixas e canal permitem visualização do espaço amostral enquanto a centrífuga está parada, mas em voo, as elevadas velocidades rotacionais atingidas

tornam impossível acompanhar o comportamento do ensaio a olho nu. Esse acompanhamento só é possível por dispositivos de captura de imagens, como filmadoras e câmeras fotográficas, adequados para funcionamento em situações de elevada gravidade. Além disso, o ideal é que apresentem boa resolução.

A movimentação do eixo da centrífuga é vantajosa para a montagem dos modelos, mas é importante considerar o espaço livre ao redor para qualquer uma das configurações (horizontal ou vertical), assim como o espaço para a movimentação de um eixo para o outro. Além disso, posicionamento do *no-break*, dos painéis de controle, dos botões de parada de emergência e dos computadores de controle e aquisição de dados, idealmente deveriam se posicionar a uma certa distância da máquina. Considerando, no entanto, o isolamento do espaço amostral, o sistema LPC e o pouco espaço disponível no laboratório, eles podem ser colocados no mesmo ambiente que a centrífuga, desde que o acesso a cada equipamento esteja livre.

Sua semelhança com a centrífuga da COPPE/UFRJ pode se beneficiar com uma parceria entre as duas instituições. Ou seja, garantindo um fluxo de informações entre os laboratórios. Dessa forma a UnB poderia utilizar-se dos conhecimentos de montagem de modelos, definição e manuseio de equipamentos e funcionamento do sistema de aquisição de dados (DAS). Para a COPPE/UFRJ essa parceria possibilita ampliação do número de ensaios e das abordagens em cada um deles, pois suas centrífugas já são bastante solicitadas.

Essa parceria proporcionaria também o contato de técnicos e docentes a tecnologia antes da aquisição da centrífuga. Apesar de temas de pesquisa abordados na UnB serem adaptáveis a ensaios centrífugos, é difícil que sem a presença da máquina haja interesse na adoção de modelagens físicas em centrífugas. Dessa forma, após a instalação, um certo período de tempo deverá ser empregado na formação de uma equipe capacitada para manusear os equipamentos. Se for permitido que técnicos realizem estágios em laboratórios centrífugos ou que docentes e estudantes entrem em contato com esse maquinário, seria possível realizar ensaios quase imediatamente após sua instalação.

9. CONCLUSÕES

A proposta da compra de um equipamento deve ser capaz de convencer que tal aquisição é uma melhoria em relação a situação anterior. Ela deve ser capaz de explicar o que está sendo proposto e, principalmente, as vantagens que o equipamento traz, embasando-se em evidências que comprovem tais vantagens. No presente projeto a proposta é da aquisição de uma centrífuga geotécnica para o laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília. Buscou-se explicar como funcionam essas máquinas, os ensaios e, não só apresentar suas vantagens, como também comprová-las pela análise de pesquisas já realizadas e visita laboratorial.

O Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB tem carência de pesquisas com modelagem física, apesar da importância desse tipo de abordagem. A presença da centrífuga no laboratório de geotecnia da Universidade de Brasília proporcionaria um incentivo para essa metodologia de estudo e introduziria o laboratório ao desenvolvimento de ensaios centrífugos, tema que vem sendo difundido em diversas instituições geotécnicas do mundo. Adicionalmente, as pesquisas da UnB têm potencial para realização em ensaios centrífugos, partindo-se, por exemplo, de trabalhos anteriores em transporte de contaminantes e estudo de reforço com geossintéticos.

A mini-centrífuga de tambor se mostrou a mais vantajosa para o laboratório da UnB, considerando suas dimensões inferiores, com espaço amostral extenso e uma capacidade considerável de aceleração. Além disso, sua utilização na COPPE/UFRJ e em outras instituições provam sua aceitação como equipamento. Verificou-se também que erros de escala, apontados como a maior crítica a modelagem em escalas reduzidas, podem ser desconsiderados tomando-se as medidas adequadas.

Enfim, a aquisição de uma centrífuga se mostra um avanço para o programa de pós-graduação em Geotecnia, com inserção de novas abordagens de estudo. A máquina também permite que mais modelos físicos sejam construídos apenas com algumas pequenas modificações no espaço físico na universidade.

A divulgação da tecnologia é uma medida de incentivo a pesquisadores para buscar conhecimento e criar uma base teórica para os ensaios futuros. Sugestões para pesquisas futuras seriam a investigação mais detalhada de ensaios centrífugos para um problema específico, com acompanhamento, se possível, dos ensaios em outras instituições por profissionais locais.

10. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. S. S. et al. CPT and T-bar Penetrometers for Site Investigation in Centrifuge Tests. **Soils and Rocks An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** , São Paulo, Abril 2011. 79-88.

BLANC, M. et al. Numerical analysis of a geosynthetic-reinforced piled load transfer platform e Validation on centrifuge test. **Geotextiles and Geomembranes**, 2014. 525-539.

CALLE, J. A. C. **Comportamento geomecânico de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro. 2007.

CARNEIRO, F. L. **Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1993.

CASSIDY, M. J.; BYRNE, B. W. **Drum Centrifuge Model Tests Comparing the Performance of**. Oxford. 2001.

COLUMBIA UNIVERSITY. CENTRIFUGE FACILITIES of COLUMBIA UNIVERSITY, NEW YORK CITY. **Columbia University**, 2004. Disponível em: <<http://www.columbia.edu/cu/civileng/ling/centrifuge/>>. Acesso em: 20 maio 2016.

CRAIG, W. H. **Géotechnique**. [S.l.]: [s.n.], 1989.

CRAIG, W. H. Centrifuges: Past, Present and Future. In: TAYLOR, R. N. **Geotechnical Centrifuge Technology**. Londres: Taylor & Francis, 1995. p. 1-17.

ETH. Chair of Geotechnical Engineering Centrifuge. **Eidgenössische Technische Hochschule Zürich**, 2012. Disponível em: <http://www.geotechnics.ethz.ch/centrifuge/index_EN>. Acesso em: 20 maio 2016.

FAGUNDES, D. D. F. **Modelagem Física de Estruturas Offshore Assentes em Leito**. Rio de Janeiro. 2010.

GARNIER, J. et al. CATALOGUE OF SCALING LAWS AND SIMILITUDE QUESTIONS IN GEOTECHNICAL CENTRIFUGE MODELLING. **IJPMG-International Journal of Physical Modelling in Geotechnics** , v. 3, p. 01-23, 2007.

HARRIS, H. G.; SABNIS, G. M. **Structural Modeling and Experimental**. 2^a. ed. Nova Iorque: CRC Press, 1999.

HARTMANN, D. A. **Modelagem centrífuga de aterros estruturados com reforço geossintético**. Rio de Janeiro. 2012.

HKUST, H. K. U. O. S. A. T. Geotechnical Centrifuges in the world. **GEOTECHNICAL CENTRIFUGE FACILITY**, 2002. Disponível em: <<http://www.gcf.ust.hk/GCFCenter.html#RPI>>. Acesso em: 20 maio 2016.

IGS. Associação Brasileira de Geossintéticos. **IGS Brasil**, 2012. Disponível em: <<http://igsbrasil.org.br/>>. Acesso em: 1 jun. 2016.

IPT. IPT - Centro Tecnológico, 2015. Disponível em: <http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CT-OBRAS/laboratorios_e_sessoes/6-secao_de_geotecnia.htm>. Acesso em: 22 nov. 2015.

ISSMGE. Physical Modelling in Geotechnics - TC104. **International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2016. Disponível em: <<http://www.tc104.group.shef.ac.uk/>>. Acesso em: 29 abr. 2016.

JÜRGENS, P. Centrífuga geotécnica entra em operação na Uenf. **Rio Pesquisa**, Rio de Janeiro , v. 1, n. 4, p. 6-7, Setembro 2008.

KIMURA, T. **Centrifuge research activities in Japan**. [S.l.]: [s.n.], 1988.

KIMURA, T. et al. Failures of fills due to rain fall. In: MCLEAN, H. Y. K. A. F. G. **Centrifuge 91'**. Rotterdam: Balkema, 1991. p. 509-516.

KO, H. Y. Summary of the state-of-the-art in centrifuge model testing.. In: W. H. CRAIG, R. G. J. A. N. S. **Centrifuges in Soil Mechanics**. Rotterdam: [s.n.], 1988. p. 11-18.

KOBAYASHI, A. S. **Handbook on Experimental Mechanics**. 2^a. ed. [S.l.]: VCH, 1993.

KOPSCITZ, I. UENF CONQUISTA A 1^a COLOCAÇÃO DO RANKING DO MEC NO RIO. **Governo do Rio de Janeiro**, 2013. Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/imprensa/exibeconteudo?article-id=1393104>>. Acesso em: 11 abr. 2016.

LAUE, S. J. Centrifuge Technology. In: SPRINGMAN, S. **Constitutive and Centrifuge Modelling: Two Extremes**. Zurique: A.A. BALKEMA, 2001. p. 75-96.

MACHADO, L. M. **MODELAGEM FÍSICA EM CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS MOLES COM COLUNAS GRANULARES**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016.

MACHADO, L. M. **MODELAGEM FÍSICA EM CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA DE REFORÇO DE SOLOS MOLES COM COLUNAS GRANULARES**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016.

MADABHUSHI, G. **Centrifuge Modelling for Civil Engineers**. [S.l.]: CRC Press, 2014.

MOTTA, H. P. G. D. **Comportamento de um rejeito de transição em centrífuga**. Rio de Janeiro. 2008.

NEES. Center for Earthquake Engineering Simulation at Rensselaer Polytechnic Institute, 2015. Disponível em: <<http://homepages.rpi.edu/~dobryr/sketch.html>>. Acesso em: 2 out. 2015.

NOREÑA, P. C. T. **INTERAÇÃO CÍCLICA SOLO-DUTO EM ARGILA MOLE: MODELAGEM FÍSICA**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2015.

NUS. Facilities and Lab Equipments - National University of Singapore Centre for protective technology, 2015. Disponível em: <<http://www.cpt.sg/facilities.php>>. Acesso em: 2 out. 2015.

NUSSENZVEIG, H. M. Força Centrífuga. **Curso de Física Básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2002. p. 295-296.

OLIVEIRA, J. R. M. D. S. D. **Modelagem em Centrífuga de um Problema de Interação Solo Estrutura**. Rio de Janeiro. 2005.

PHILLIPS, R. Centrifuge modelling: practical considerations. In: TAYLOR, R. N. **Geotechnical Centrifuge Technology**. Londres: Taylor & Francis, 1995. p. 34-59.

RANDOLPH, M. F.; HOUSE, A. R. The Complementary Roles of Physical and Computational Modelling. **Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2001.

SABOYA, F. J.; TIBANA, S.; REIS, R. M. Nova Centrífuga Geotécnica da UENF é a maior da América Latina. **Revista Fundações e Obras Geotécnicas**, Rio de Janeiro, 2013.

SANTIAGO, P. D. A. C. et al. **Levantamento de Dutos Enterrados: Modelagem Física em**. Rio de Janeiro. 2010.

SANTIAGO, P. D. A. C. et al. Levantamento de Dutos Enterrados: Modelagem Física em Centrífuga Geotécnica. **COBRAMSEG 2010: ENGENHARIA GEOTÉCNICA PARA O DESENVOLVIMENTO, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE**, Gramado, Agosto 2010.

SCHOFIELD, A. N. Cambridge geotechnical centrifuge operations. **Géotechnique**, Cambridge, v. 25, n. 4, p. 743-761, 1980.

SHENZHEN ARS MECHANICAL AND ELECTRICAL CO.,LTD. ARS, 2012. Disponível em: <<http://www.arslipring.com/technical-article/article-8.html>>. Acesso em: 21 out. 2015.

STEEDMAN, R. S.; ZENG, X. Dynamics. In: TAYLOR, R. N. **Geotechnical Centrifuge Technology**. Londres: Taylor & Francis, 1995. p. 168-195.

TAYLOR, R. N. Centrifuges in modeling: principles and scale effects. In: TAYLOR, R. N. **Geotechnical Centrifuge Technology**. Londres: Taylor & Francis, 1995. p. 19-33.

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. Nova Iorque: John Wiley&Sons, Inc., 1943. 265 p.

THOMAS BROADBENT & SONS LTD. Geotechnical Centrifuges, 2009. Disponível em: <<http://www.broadbent.co.uk/en/ipd-products-geotechnical>>. Acesso em: 21 out. 2015.

TUDELFT. Geotechnical Centrifuge. **Delft University of Technology**, 2016. Disponível em: <<http://www.citg.tudelft.nl/en/about-faculty/departments/geoscience-engineering/geoscience-engineering-laboratory/facilities/geotechnical-centrifuge/>>. Acesso em: 20 maio 2016.

UENF. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2014. Disponível em: <<http://www.uenf.br/dic/ascom/2014/09/19/video-centrifuga-geotecnica/>>. Acesso em: 06 out. 2015.

UNB. Pós-Graduação em Geotecnia , 2015. Disponível em: <<http://www.geotecnia.unb.br/teses-dissertacoes.php?id=1>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

UNIVERSIDADE DO COLORADO. Geotechnical Engineering and Geomechanics , Centrifuge Lab, 2012. Disponível em: <https://ceae.colorado.edu/geotech/facilities_centrifuge_400gton.html>. Acesso em: 28 set. 2015.