

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Bruna Zakharia Hoch

**INTERAÇÃO DINÂMICA SOLO-ESTRUTURA:
ATENUAÇÃO NA CATENÁRIA INVERSA DE ESTACAS
TORPEDO PARA PLATAFORMAS *OFFSHORE***

Porto Alegre
julho 2014

BRUNA ZAKHARIA HOCH

**INTERAÇÃO DINÂMICA SOLO-ESTRUTURA:
ATENUAÇÃO NA CATENÁRIA INVERSA DE ESTACAS
TORPEDO PARA PLATAFORMAS *OFFSHORE***

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

Orientador: Marcelo Maia Rocha

Porto Alegre
julho 2014

BRUNA ZAKHARIA HOCH

**INTERAÇÃO DINÂMICA SOLO-ESTRUTURA:
ATENUAÇÃO NA CATENÁRIA INVERSA DE ESTACAS
TORPEDO PARA PLATAFORMAS *OFFSHORE***

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2014

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. Techn., Universität Innsbruck, Áustria
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando Schnaid (UFRGS)
PhD pela University of Oxford, Inglaterra

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Marcelo Maia Rocha (UFRGS)
Dr. Techn. pela Universität Innsbruck, Áustria

Dedico este trabalho a meus pais, Airton e Leila, com
gratidão por todo amor, incentivo e apoio sempre
demonstrado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e esperança. Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Airton e Leila, e ao meu irmão, pelo amor desde sempre, pelo incentivo constante ao longo de toda a faculdade, pelo apoio nas dificuldades e pelos momentos de alegria.

Agradeço ao Prof. Marcelo Rocha, orientador deste trabalho, pela paciência comigo, pela motivação com o projeto, pelo estímulo, pela atenção oferecida durante todo o desenvolvimento deste estudo e pelo auxílio tanto na elaboração da revisão bibliográfica quanto nos procedimentos experimentais e tratamento dos dados obtidos. Agradeço pela oportunidade de fazer parte desta pesquisa, desenvolvida pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFRGS.

Agradeço à Profa. Carin Schmitt pelo amparo na estruturação deste projeto, pela imensa dedicação nas correções, pela disponibilidade e interesse sempre despendidos e pelo treinamento tanto para a apresentação escrita quanto oral deste trabalho.

Agradeço ao mestrando Naloan Sampa, pela fundamental ajuda ao longo dos experimentos realizados, pelo companheirismo, amizade e pelo encorajamento diante dos obstáculos.

Agradeço a todo corpo docente da Escola de Engenharia da UFRGS, pela formação ao longo destes anos, pela capacitação técnica para desempenho da função de Engenheira Civil.

Agradeço, por fim, aos meus amigos, por proporcionarem momentos de descontração durante este período, especialmente ao Daniel Schmidt, que também se dispôs a ler e corrigir grande parte dos erros gramaticais deste trabalho e sempre me animou nos desafios.

Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.

Martin Luther King

RESUMO

Este trabalho determina a atenuação, provocada pelo solo, entre as cargas dinâmicas de entrada e saída no trecho de catenária inversa em estacas torpedo de plataformas *offshore* em função das diversas frequências de vibração aplicadas na linha de ancoragem. Para tanto são abordados assuntos gerais sobre os desafios enfrentados atualmente na indústria petrolífera, os quais motivam o presente estudo, assim como também conceitos de modelos reológicos, para caracterização do comportamento do solo, e de análise dimensional, para correta semelhança entre os dados gerados pelo modelo reduzido criado e o protótipo. Para o desenvolvimento da pesquisa, foi tomado como base o caso típico fornecido pela Petrobras para o estudo, o qual define um torpedo com penetração no leito marinho de 28,8 metros, do ponto em que a linha de ancoragem encontra o solo, no *Touch Down Point* (TDP) até o *padeye* da âncora. Além disso, foi estabelecida em 45° a inclinação com que a plataforma tensiona esta linha de ancoragem e entre 3000 e 7000 kN a carga de projeto para as estacas. A Petrobras também forneceu as cargas no TDP, que se mantêm oscilando em torno de 4000 e 4500 kN, podendo alcançar um pico de até 6000 kN, e a densidade espectral, mostrando que há um pico na frequência de 0,1 Hz. Para os ensaios em laboratório, o solo foi modelado com uma proporção de 15% de bentonita e 85% de caulim com teor de umidade de 120%. Os experimentos foram divididos em ensaios estáticos e dinâmicos, sendo estudados ângulos de 0 a 55° de inclinação da linha de ancoragem. Nos ensaios estáticos foram aplicadas cargas correspondentes a até 9000 kN no protótipo. Nos ensaios dinâmicos, as tensões oscilantes foram aplicadas no modelo submetido a cargas correspondentes a 6400 e 4480 kN no protótipo. Foi feita varredura decrescente de frequências, e foram estudadas duas amplitudes na mesa vibratória. Os dados foram processados no Octave. Os resultados revelaram que a atenuação estática varia entre 20 a 30% por metro de catenária, durante o descarregamento. Os valores para atenuação total oscilaram entre 35 a 45% por metro de catenária, levando à conclusão de que existe atenuação dinâmica de aproximadamente 15% por metro de catenária. Também se concluiu que a atenuação possui relação com a resistência ao cisalhamento do solo, decrescendo com o aumento de carga, e que o efeito da viscosidade é praticamente inexistente, propondo a existência de um efeito dinâmico provavelmente não relacionado à frequência, ou então uma relação entre a atenuação dinâmica com a estática no carregamento.

Palavras-chave: Atenuação em Linhas de Ancoragem de Plataformas *Offshore*. Catenária Inversa em Estacas Torpedo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Identificação das etapas da pesquisa	24
Figura 2 – Âncora VLA instalada	29
Figura 3 – Âncora torpedo	31
Figura 4 – Lançamento de âncora torpedo	32
Figura 5 – Esquema de ancoragem <i>offshore</i> ilustrando catenária inversa	33
Figura 6 – Comportamento elástico linear	35
Figura 7 – Comportamento plástico linear	36
Figura 8 – Comportamento viscoso linear	37
Figura 9 – Comportamento de materiais elásticos, plásticos e viscoelásticos submetidos a carga constante	38
Figura 10 – Teste de relaxação	38
Figura 11 – Modelo viscoelástico de Kelvin	40
Figura 12 – Modelo viscoelástico de Maxwell	40
Figura 13 – Modelo elastoplástico de Prandtl-Reuss	41
Figura 14 – Modelo viscoplástico de Bingham	42
Figura 15 – Modelo viscoplástico sem comportamento instantâneo	42
Figura 16 – Âncora torpedo do caso típico	54
Figura 17 – Cargas no TDP e densidade espectral para o caso típico	55
Figura 18 – Aparelho de palheta de laboratório automatizado	57
Figura 19 – Ensaio de campo para resistência ao cisalhamento não drenada	60
Figura 20 – Resultados de resistência ao cisalhamento não drenada em ensaio de laboratório para a argila com teor de umidade 100%	61
Figura 21 – Resultados de resistência ao cisalhamento não drenada em ensaio de laboratório para a argila com teor de umidade 120%	61
Figura 22 – Resultados dos ensaios de Rocha (2014)	63
Figura 23 – Representação da estrutura utilizada em laboratório	65
Figura 24 – Equipamentos para medição de cargas estáticas e dinâmicas e aquisição dos resultados	66
Figura 25 – Tanque utilizado	67
Figura 26 – Corrente utilizada no modelo	68
Figura 27 – Medidas da corrente utilizada no modelo (em mm)	68
Figura 28 – Vista inferior da célula de carga do fundo do tanque	69
Figura 29 – Vista superior da célula de carga do fundo do tanque	69
Figura 30 – Célula de carga da superfície	70

Figura 31 – Cabo de aço, polia, sargento e cabo kevlar	71
Figura 32 – Indicação dos ângulos no trilho metálico	71
Figura 33 – Sistema de polias e suporte para pesos	72
Figura 34 – Pesos utilizados nos ensaios	73
Figura 35 – Excitador de vibração tipo 4808	74
Figura 36 – Sistema para sobreposição de carga dinâmica à linha de ancoragem	75
Figura 37 – Acelerômetro tipo 4383 V	75
Figura 38 – Amplificador de potência tipo 2712 (acima) e controle de excitação de vibração tipo 1050 (abaixo)	76
Figura 39 – Sistema de ligação do amplificador de potência, controle de excitação de vibração, mesa vibratória e acelerômetro	77
Figura 40 – Amplificador de potência tipo 2712	78
Figura 41 – Baterias e amplificador	79
Figura 42 – Osciloscópio	80
Figura 43 – Borneira da National Instruments modelo BNC-2110	81
Figura 44 – Placa modelo NI DAQCard 6036E	82
Figura 45 – Processamento de dados no Labview	83
Figura 46 – Forças de entrada e saída na catenária	83
Figura 47 – Calibração das células de carga com tanque com água	84
Figura 48 – Misturador	85
Figura 49 – Tanque preenchido com solo para realização dos ensaios	87
Figura 50 – Curva de calibração estática (para ângulo de 55°)	92
Figura 51 – Registro de picos na colocação de cargas na calibração estática (para ângulo de 55°)	93
Figura 52 – Tabela de calibração estática (para ângulo de 55°)	94
Figura 53 – Ajuste da matriz de calibração estática	95
Figura 54 – Curva de um dos ensaios estáticos (para ângulo de 55°)	97
Figura 55 – Registro de picos na colocação de cargas em um dos ensaios estáticos (para ângulo de 55°)	98
Figura 56 – Atenuação estática por metro de catenária no primeiro ensaio estático	99
Figura 57 – Atenuação estática por metro de catenária no segundo ensaio estático	100
Figura 58 – Atenuação estática por metro de catenária no terceiro ensaio estático	100
Figura 59 – Carga lida em cada célula durante ensaio dinâmico para 10 kgf (para ângulo de 55°) com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s ²	102
Figura 60 – Carga lida em cada célula durante ensaio dinâmico para 7 kgf (para ângulo de 55°) com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s ²	103

Figura 61 – Densidade espectral para cada célula durante ensaio dinâmico para 10 kgf (para ângulo de 55°) com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s ²	104
Figura 62 – Densidade espectral para cada célula durante ensaio dinâmico para 7 kgf (para ângulo de 55°) com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s ²	104
Figura 63 – Atenuação total por metro de linha de ancoragem durante ensaio dinâmico para 10 kgf com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s ²	105
Figura 64 – Atenuação total por metro de linha de ancoragem durante ensaio dinâmico para 7 kgf com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s ²	106
Figura 65 – Atenuação total por metro de linha de ancoragem durante ensaio dinâmico para 10 kgf com aceleração entre 0,12 a 6,09 m/s ²	107
Figura 66 – Atenuação total por metro de linha de ancoragem durante ensaio dinâmico para 7 kgf com aceleração entre 0,12 a 6,09 m/s ²	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Grandezas de base (conjunto completo)	44
Quadro 2 – Grandezas derivadas (conjunto incompleto)	45
Quadro 3 – Planilha de análise com escala de comprimento 1:40	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação de aceleração de 0,25 a 12,19 m/s ² durante varredura de frequências	88
Tabela 2 – Variação de aceleração de 0,12 a 6,09 m/s ² durante varredura de frequências	89

LISTA DE SIGLAS

CALM – *Catenary Anchor Leg Mooring*

CGS – *Centimeter-Grama-Second*

DDP – *Deep Down Point*

DPA – *Deep Penetrating Anchor*

FPSO – *Floating Production Storage and Offloading*

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

Labview – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*

LEGG – Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais

LMT – Comprimento-Massa-Tempo

NBR – Norma Brasileira

MODU – *Mobile Offshore Drilling Unit*

PEA – *Plate Embedment Anchor*

PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

SALM – *Single Anchor Leg Mooring*

SM – *Spread Mooring*

SPM – *Single Point Mooring*

TDP – *Touch Down Point*

TLP – *Tension Leg Platform*

UEP – Unidade Estacionária de Produção

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VLA – *Vertically Loaded Anchor*

LISTA DE SÍMBOLOS

Π – número Pi (adimensional)

A – área (m^2)

V – volume (m^3)

f – frequência (Hz)

v – velocidade (m/s)

a – aceleração (m/s^2)

ρ – massa específica (kg/m^3)

F – força (N)

σ – tensão (Pa)

W – trabalho (J)

T – torque (N.m)

Q – carga (C)

σ_v – tensão vertical efetiva (Pa)

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

z – profundidade (m)

F_r – número de Froude (adimensional)

L – comprimento (m)

E – módulo de elasticidade longitudinal (Pa)

ε – deformação elástica longitudinal (adimensional)

η – constante de proporcionalidade (Ns/m^2)

S_u – resistência não drenada do solo (Pa)

u – amplitude absoluta máxima (m)

M – matriz de calibração (adimensional).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	22
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	22
2.2 OBJETIVO PRINCIPAL DA PESQUISA	22
2.3 HIPÓTESE	22
2.4 PRESSUPOSTO	22
2.5 PREMISA	23
2.6 DELIMITAÇÕES	23
2.7 LIMITAÇÕES	23
2.8 DELINEAMENTO	23
3 EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO EM ÁGUAS PROFUNDAS	26
3.1 SISTEMAS DE ANCORAGEM	26
3.2 LINHAS DE ANCORAGEM	27
3.3 ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO	28
3.3.1 Âncora convencional	28
3.3.2 Âncora de placa	28
3.3.3 Âncora vertical	29
3.4 ESTACAS TORPEDO	29
3.4.1 Generalidades	30
3.4.2 Características	30
3.4.3 Instalação	31
3.5 CATENÁRIA INVERSA	32
4. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA MECÂNICO: MODELOS REOLÓGICOS	34
4.1 CONCEITOS BÁSICOS	34
4.2 ELASTICIDADE, PLASTICIDADE E VISCOSIDADE LINEAR	35
4.3 FLUÊNCIA E RELAXAÇÃO	37
4.4 MODELOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS	39
4.4.1 Modelos viscoelásticos de Kelvin e Maxwell	39
4.4.1.1 Modelo de Kelvin	39
4.4.1.2 Modelo de Maxwell	40
4.4.2 Modelo elastoplástico de Prandtl-Reuss	41
4.4.3 Modelo viscoplástico de Bingham	41

4.5 MODELO APLICADO AO SOLO ESTUDADO	42
5. ANÁLISE DIMENSIONAL: PRINCÍPIOS E APLICAÇÃO	43
5.1 PRINCÍPIOS	43
5.1.1 Grandezas físicas	43
5.1.1.1 Unidades fundamentais e derivadas	44
5.1.1.2 Escolha das grandezas de base	45
5.1.2 Homogeneidade dimensional	46
5.1.3 Matriz dimensional e mudança de base	46
5.1.3.1 Parâmetros adotados	47
5.1.3.2 Objetivo e metodologia de cálculo	47
5.1.3.3 Condições para mudança de base	48
5.1.4 Teorema de Π	48
5.1.4.1 Conceito	48
5.1.4.2 Aplicação dos números Π	49
5.2 APLICAÇÃO EM MODELOS REDUZIDOS PARA ANÁLISE GEOTÉCNICA.....	49
5.2.1 Critério de semelhança adotado	50
5.2.2 Planilha de análise	52
5.2.3 Caso típico	53
6. MODELAGEM DO SOLO	56
6.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO DRENADA (S_u): CONCEITO E MEDIÇÃO	56
6.2 MISTURA ARGILOSA UTILIZADA	57
6.2.1 Caulim	58
6.2.2 Bentonita	58
6.2.3 Mistura de caulim e bentonita	58
6.3 DIFERENÇAS DE RESISTÊNCIAS AO CISALHAMENTO NÃO DRENADA ENTRE ENSAIOS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO	59
7. DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	65
7.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	65
7.1.1 Tanque	67
7.1.2 Corrente	67
7.1.3 Célula de carga do fundo tanque	68
7.1.4 Célula de carga da superfície	70
7.1.5 Cabo de aço, polias, suporte para pesos e pesos	70
7.1.6 Mesa vibratória e acelerômetro	73

7.1.7 Controle de excitação e amplificador de potência da mesa vibratória	76
7.1.8 Sistema de aquisição de dados	79
7.2 ENSAIOS REALIZADOS	83
7.2.1 Calibração das células de carga com tanque com água	84
7.2.2 Preparação da mistura argilosa	85
7.2.3 Ensaios de carregamento estático e dinâmico	86
7.2.3.1 Primeiro ensaio de carregamento estático e dinâmico	87
7.2.3.2 Segundo ensaio de carregamento estático e dinâmico	89
7.2.4 Observações importantes sobre a calibração e os ensaios	89
8. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS	91
8.1 MATRIZ DE CALIBRAÇÃO PARA OS ENSAIOS	91
8.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS	96
8.2.1 Resultados ensaios estáticos	96
8.2.2 Resultados ensaios dinâmicos	101
9. CONCLUSÕES	109
REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o petróleo ainda é a principal fonte de energia do mundo. Além de gasolina e óleo diesel, vários outros produtos também são derivados a partir dele, como polímeros plásticos, benzinhas, parafina, querosene, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e alguns medicamentos.

O petróleo está depositado em rochas porosas, sendo encontrado principalmente em bacias sedimentares tanto de ambientes terrestres quanto marítimos. Frente à elevada demanda da sociedade por este recurso natural, existe a necessidade constante de exploração de novas reservas, as quais, muitas vezes, avançam para fora da plataforma continental através das plataformas *offshore*.

Para a exploração de petróleo em águas rasas, os métodos adotados consistem nas tradicionais plataformas fixas, com utilização de estacas metálicas cravadas. Entretanto, com a descoberta de bacias em regiões de grandes profundidades de lâmina d'água, passou a ser necessário o emprego de outros métodos para a ancoragem destas estruturas, tendo em vista a inviabilidade de instalação das plataformas fixas nestes casos e a maior agressividade presente no ambiente. Assim, frente a estas restrições, as plataformas flutuantes passaram a ser utilizadas em águas profundas, atendendo às atividades de exploração atuais (COSTA, 2008, p. 1).

Segundo Kunitaki (2006, p. 1), esta transição levou ao desenvolvimento de novas unidades de fundação que atuassem como partes imóveis nas estruturas de ancoragem de plataformas flutuantes, dentre as quais as recentes estacas tipo torpedo podem ser citadas. Estas estacas, também chamadas de âncoras, conforme Aguiar (2011, p. vi), são cravadas de forma dinâmica até que a profundidade desejada seja alcançada e são formadas por um tubo cilíndrico com aletas laterais que possuem a função de aumentar sua resistência a esforços.

Diante da existência de vários métodos para a ancoragem das plataformas flutuantes, as estacas do tipo torpedo têm se destacado em função das vantagens que apresentam. Morais (2013, p. 180) descreve que elas possuem baixo custo devido à fabricação e instalação simples, sendo necessário somente um navio específico que atue no lançamento e

posicionamento das âncoras. Por fim, estas estacas também suportam elevadas cargas de ancoragem.

Entretanto, se por um lado esta alternativa possui atrativos, por outro também apresenta vários desafios tecnológicos que vêm sendo estudados, uma vez que não existem normas específicas para o projeto de estacas deste tipo. De acordo com Aguiar (2011, p. vi), as estacas torpedo possuem forma diferente das tradicionalmente empregadas em Engenharia, fazendo com que os cálculos de capacidade de carga usuais nem sempre proporcionem resultados razoáveis. Além disso, Kunitaki (2006, p. 1) ressalta que é fundamental que os métodos computacionais adotados sejam melhorados a fim de que os ensaios possam ser gradativamente substituídos por modelos numéricos. Desta forma, sendo utilizados parâmetros adequados na previsão tanto da penetração da âncora, quanto das cargas causadas pelas linhas de ancoragem, da disposição do trecho enterrado, da resistência a esforços e das variações nas propriedades do solo, os resultados obtidos são precisos.

Portanto, estudos relacionados ao comportamento da estaca torpedo em escala real, checagem e calibração de modelos de cravabilidade e simulação da capacidade de carga vêm sendo desenvolvidos, levando em consideração tanto a análise estática quanto dinâmica do sistema. Este trabalho faz parte do projeto Petrobras de tecnologias *offshore*: Sistemas de jateamento, transferência de carga e melhoramento de solos, desenvolvido numa parceria entre a Petrobras e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Nele são tratados os estudos relacionados à interação dinâmica solo-estrutura para sistemas de ancoragem de estacas torpedo, no que diz respeito à atenuação das forças dinâmicas transmitidas à âncora que ocorre ao longo da catenária inversa, desde o ponto em que esta encontra o solo, no TDP (que é o ponto em que a linha de ancoragem encontra o leito marinho), considerando as diversas frequências de vibração às quais a linha de ancoragem pode ser submetida. As forças no TDP são denominadas forças de entrada neste trabalho, enquanto as incidentes na âncora são chamadas de forças de saída. O conceito de atenuação é a reação do solo que reduz a carga na linha de ancoragem que é transmitida à estaca, sendo, portanto, um efeito desejável por contribuir com a capacidade total de carga do sistema.

O trabalho foi estruturado em nove capítulos. O capítulo 2 contém as diretrizes da pesquisa, apresentando a questão de pesquisa, o objetivo e os métodos adotados. Na sequência, o

capítulo 3 contextualiza o foco do estudo no cenário atual de exploração petrolífera no país, expondo os sistemas já utilizados e discutindo as dificuldades enfrentadas.

O capítulo 4, por sua vez, discute as características do sistema mecânico através da descrição dos comportamentos dos materiais plásticos, elásticos e viscosos e dos modelos físicos e matemáticos existentes para sua modelagem, bem como a sua aplicação no caso estudado. O capítulo 5 aborda os principais conceitos de análise dimensional necessários para o desenvolvimento do modelo reduzido estudado e considerações referentes aos critérios de semelhança adotados. Este capítulo também explana o caso típico fornecido pela Petrobras para o estudo.

O capítulo 6 trata da modelagem do solo, explicando a resistência ao cisalhamento não drenada e a forma como ela é determinada em laboratório, assim como a mistura utilizada para os ensaios e as diferenças no comportamento da resistência ao cisalhamento não drenada obtida em laboratório e a proposta pela Petrobras. O capítulo 7 descreve o procedimento experimental, explicando os equipamentos utilizados e os ensaios realizados. Por fim, o capítulo 8 explana todo o processamento e análise dos resultados gerados, e o capítulo 9 expõe as conclusões da pesquisa.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a relação entre as magnitudes das forças dinâmicas de entrada e saída, no trecho de catenária inversa em estacas torpedo de plataformas *offshore*, em função das diversas frequências de vibração aplicadas na linha de ancoragem?

2.2 OBJETIVO PRINCIPAL DA PESQUISA

O objetivo principal do trabalho é a determinação da atenuação entre as forças dinâmicas de entrada e saída no trecho de catenária inversa em estacas torpedo de plataformas *offshore* em função das diversas frequências de vibração aplicadas na linha de ancoragem.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que as forças dinâmicas de entrada são superiores às de saída, no trecho de catenária inversa em estacas torpedo de plataformas *offshore*, em função das diversas frequências de vibração aplicadas na linha de ancoragem, devido à atenuação, que é dependente da resistência ao cisalhamento do solo, e esta diferença será menor à medida que as flutuações de carga forem mais rápidas, devido aos efeitos dinâmicos de viscosidade.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o solo se comporta como material visco-plástico na calibração dos modelos teóricos para o trecho de catenária inversa em estacas torpedo de plataformas *offshore*.

2.5 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que atualmente as linhas de ancoragem em plataformas *offshore* são dimensionadas para os valores de pico das forças dinâmicas de entrada, sem considerar a atenuação de carga que pode haver nas forças dinâmicas de saída, que são de fato transmitidas ao torpedo.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao trecho de catenária inversa em estacas torpedo de plataformas *offshore*.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) o estudo corresponde à primeira etapa de pesquisas da Petrobras neste assunto;
- b) o modelo analisado possui escala pequena, de 1:40, sendo necessária a continuidade do estudo em modelos de maior escala;
- c) o solo estudado neste trabalho é argiloso, sendo desconsiderados leitos arenosos;
- d) as forças de viscosidade ou quaisquer forças relacionadas a ela não estão modeladas em escala, sendo desprezado o trecho de deformação elástica.

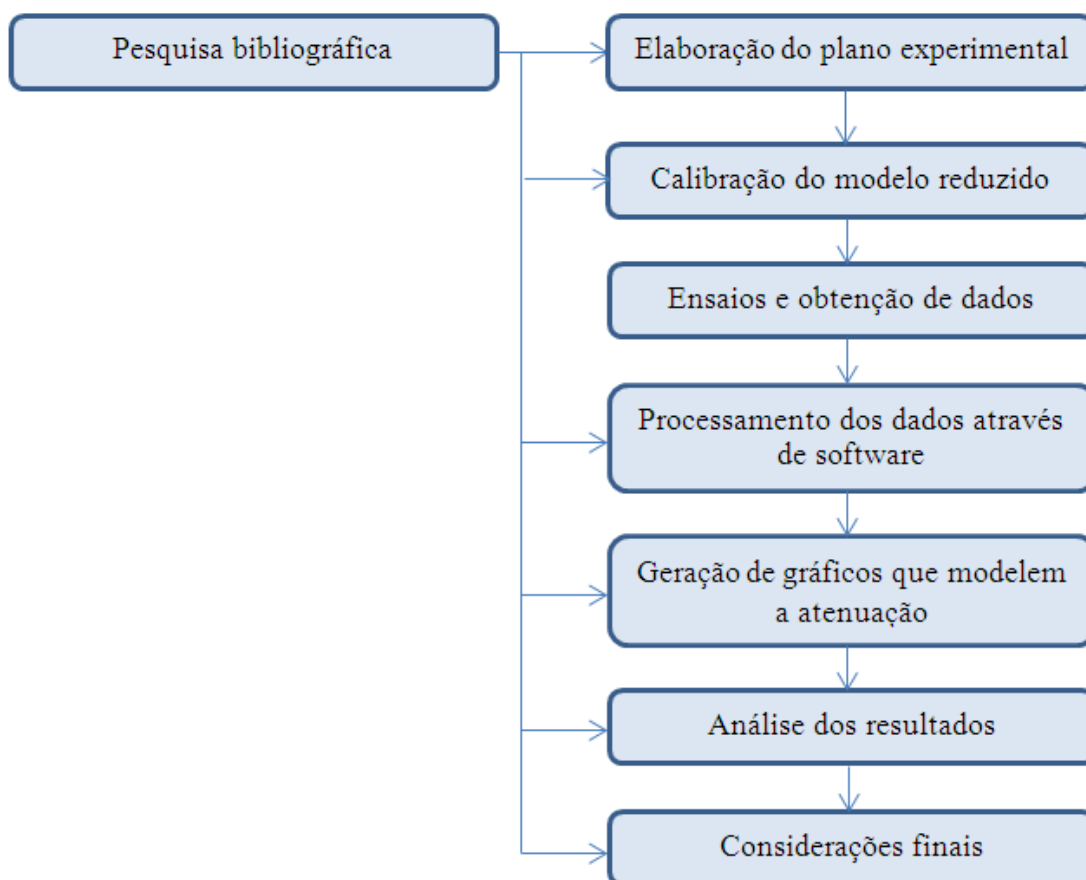
2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado conforme as etapas apresentadas a seguir, representadas na figura 1 e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) calibração do modelo reduzido;
- d) ensaios e obtenção de dados;
- e) processamento dos dados através de software;
- f) geração de gráficos que modelem a atenuação;
- g) análise dos resultados;

h) considerações finais.

Figura 1 – Identificação das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

A primeira etapa consistiu em uma pesquisa bibliográfica. Assim, foram reunidas as informações para a criação de um embasamento teórico sobre os temas abordados no trabalho. Esta revisão discutiu a exploração de petróleo em águas profundas relatando os desafios, as tecnologias, os sistemas marítimos empregados, o funcionamento da ancoragem em plataformas *offshore* e a definição das estacas torpedo e catenária inversa. Além disso, foi tratada a caracterização do sistema mecânico, sendo necessário para tanto a conceituação dos modelos reológicos. Foi descrita a aplicação destes modelos no estudo do solo, identificando-se os parâmetros presentes. Também foram trabalhados os principais conceitos de análise dimensional, comprovando a importância da precisão na semelhança física entre modelos e protótipos para que os dados obtidos sejam coerentes. Além destes princípios, foi relatada também a forma como aconteceu sua aplicação no assunto estudado durante o trabalho. Por fim, foi descrita a modelagem do solo para os experimentos, através da definição da

resistência ao cisalhamento não drenada e de sua medição, e as características da mistura argilosa utilizada. A pesquisa bibliográfica se estendeu durante todo o trabalho.

A segunda etapa foi relacionada à elaboração do plano experimental, com a explanação de todos os equipamentos e variáveis a serem analisados. Para tanto, foi lançado mão dos conhecimentos de análise dimensional e do solo, especificamente, e de testes com o modelo, para que os valores gerados de fato representassem, em escala, a realidade observada nas linhas de ancoragem. Após esta etapa, seguiu-se à calibração e aos ensaios estáticos e dinâmicos com o modelo reduzido utilizado nos experimentos. Este modelo foi submetido a carregamentos em diversos ângulos de inclinação para a linha de ancoragem e a frequências e amplitudes de vibração diferentes geradas por uma mesa vibratória acoplada ao sistema, sendo coletados os dados obtidos.

Os valores gerados foram adquiridos pelo *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* (Labview) e processados através do Octave. A partir disto, foram plotados gráficos que modelassem a atenuação, relacionando as forças dinâmicas de entrada, no TDP, com as de saída, transmitidas à âncora torpedo. Finalmente, foram analisados os resultados produzidos, chegando-se às devidas conclusões a respeito desta atenuação.

3 EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO EM ÁGUAS PROFUNDAS

A exploração marítima do petróleo gerou riscos maiores do que a terrestre, tendo em vista a necessidade de maiores aplicações de capital em plataformas, navios, treinamento de pessoas e pesquisas geofísicas. A incerteza do processo é alta, pois este, além de oneroso, pode resultar em poços secos ou não vantajosos do ponto de vista econômico, os quais se revelam como tal apenas no momento da perfuração (MORAIS, 2013, p. 24, 25).

A complexidade é crescente quanto mais profundas são as águas. O autor também afirma que, com o progresso nas explorações *offshore* e diante dos desafios tecnológicos e dos elevados investimentos, a indústria petrolífera passou a buscar contribuições científicas por meio de pesquisa e desenvolvimento envolvendo universidades, empresas e indústrias para que novos sistemas de exploração e produção pudessem ser implantados.

Atualmente, de acordo com Randolph et al. (2011), este desenvolvimento de estruturas para águas profundas resultou em instalações flutuantes que são ancoradas no fundo do mar. Assim, através de *risers* verticais ligados a uma canalização, chamada de *flowline* ou *pipeline*, o petróleo é extraído, formando uma infraestrutura de grande complexidade, com poços e dutos coletores alicerçados em pontos fixos.

O presente capítulo apresenta os métodos de ancoragem de plataformas *offshore* utilizados na exploração de petróleo em águas profundas. Por fim, tendo em vista o foco do trabalho, conceitos relativos a estacas torpedo e catenária inversa também são aprofundados.

3.1 SISTEMAS DE ANCORAGEM

De acordo com Kunitaki (2006), os sistemas podem ser classificados como ancoragem distribuída e ancoragem com ponto único. No sistema de ancoragem distribuída, *Spread Mooring* (SM), as linhas são alocadas em todo o entorno da plataforma, permitindo a resistência aos esforços de todas as direções. A ancoragem com ponto único, conhecida como *Single Point Mooring* (SPM), é usualmente empregada em navios que armazenam a produção de alguma plataforma ou que possuem equipamentos de produção, proporcionando menores esforços sobre o casco.

A autora explica que a ancoragem de ponto único pode ser desenvolvida de três formas. Na ancoragem com *turret*, as linhas e os *risers* são ligados a ele. Esta estrutura pode ser instalada dentro ou fora do navio. Outra forma de ancoragem é a *Catenary Anchor Leg Mooring* (CALM), em que as linhas em catenárias são presas em uma boia, que é ligada ao navio por meio de um cabo composto de material sintético. Este sistema possui limitações no que diz respeito ao comportamento da boia em relação às ondas, que pode ser diferente da reação do navio, apesar de haver soluções estruturais que minimizem o problema, como a utilização de uma vinculação rígida. Por fim, pode ser utilizada também a *Single Anchor Leg Mooring* (SALM), que adota *risers* articulados que atuam como pêndulos invertidos.

3.2 LINHAS DE ANCORAGEM

As linhas de ancoragem podem assumir três configurações: catenária, raio curto e verticais. As linhas em catenária são empregadas durante a produção e perfuração por viabilizarem a mobilidade da plataforma, uma vez que dispensam as âncoras. Estas catenárias são dispostas em um raio elevado, sendo que o atrito da parte enterrada no solo suporta os esforços por si só. Esta configuração apresenta como inconveniente, entretanto, o fato de poderem avançar no espaço de outras plataformas próximas, havendo a possibilidade de causarem interferência entre as linhas (KUNITAKI, 2006, p. 14).

As linhas de ancoragem de raio curto, também conhecidas como *taut leg*, são instaladas com ângulo de aproximadamente 45 graus, conforme esclarece a autora. Esta configuração reduz os custos com a linha, que passa a possuir um comprimento menor, e permite que as plataformas sejam instaladas perto de outras unidades de exploração. Por outro lado, estas linhas restringem a mobilidade do sistema e necessitam de âncoras resistentes. Apesar desta desvantagem, este sistema é bastante utilizado em águas profundas.

Por fim, as linhas de ancoragem vertical são constantemente tracionadas, acarretando grande rigidez a esforços verticais, porém pouca rigidez aos esforços aplicados horizontalmente. Este sistema é usualmente utilizado em plataformas *Tension Leg Platform* (TLP) (KUNITAKI, 2006, p. 15).

3.3 ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO

Os elementos de fundação correspondem aos pontos fixos das plataformas flutuantes. De acordo com Costa (2008, p. 12, 13), as fundações profundas de plataformas *offshore* transmitem os esforços para o solo. Estas estruturas são usualmente de aço e possuem seção transversal em forma de anel.

A literatura relata uma diversidade de elementos de fundação, como estacas cravadas, injetadas e grauteadas. Os itens seguintes, entretanto, abordam apenas as fundações compostas por âncoras.

3.3.1 Âncora convencional

As âncoras convencionais são fixadas por arrasto através de um navio que contenha infraestrutura capaz de lançar e puxar este tipo de fundação. Elas possuem uma haste que proporciona a penetração no solo no ângulo desejado, uma garra, para fixação da resistência do solo, um cepo, para que a rotação seja evitada, e uma coroa, que agrega rigidez à estrutura (KUNITAKI, 2006, p. 20).

Segundo Costa (2008, p. 23, 24), a desvantagem que estas âncoras apresentam é de não resistirem a cargas aplicadas verticalmente, sendo assim empregadas geralmente em linhas de ancoragem de catenária de peso. Além disso, o ângulo entre a haste e a garra possui variações de acordo com o solo, sendo menor para areias e maior para argilas moles. De qualquer forma, independentemente do solo, a âncora deve ser fixada de maneira adequada, através de combinação com amarras de aço, para que não haja o arrasto desta estrutura.

3.3.2 Âncora de placa

De acordo com Kunitaki (2006, p. 21), as âncoras de placa são bastante utilizadas pela marinha dos Estados Unidos. Elas são denominadas como *Plate Embedment Anchor* (PEA).

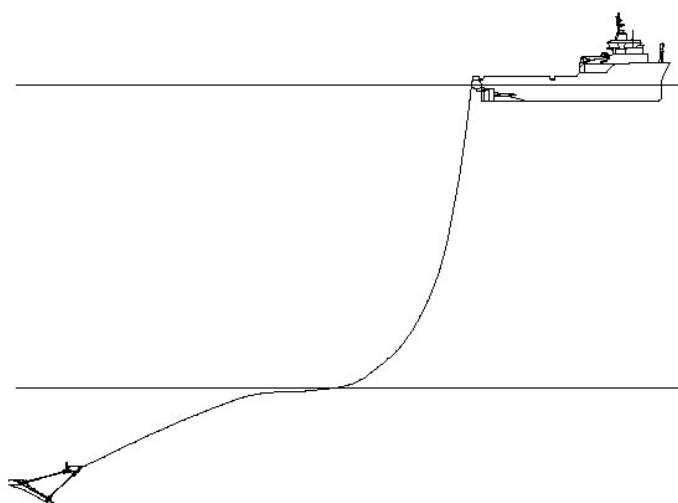
A autora explica que estas âncoras, diferentemente das convencionais, são instaladas com a utilização de martelos e não são recomendadas para profundidades superiores a 50 metros, pois, neste caso, os martelos terminam não atingindo estas alturas de lâmina d'água e tornam o processo muito oneroso. A instalação também pode ser feita com o uso de explosivos,

porém o solo deve ser cuidadosamente estudado para que não exista uma camada de pequena resistência que impossibilite a âncora de ser introduzida na camada que possui maior capacidade de carga.

3.3.3 Âncora vertical

De acordo com Costa (2008, p. 24), as âncoras verticais são chamadas também de *Vertically Loaded Anchor* (VLA), e são empregadas basicamente em ancoragem *taut leg*, por serem resistentes às cargas verticais. A figura 2 ilustra este tipo de âncora.

Figura 2 – Âncora VLA instalada



(fonte: KUNITAKI, 2006)

Segundo Kunitaki (2006, p. 22, 23), a forma como esta estrutura é instalada é similar à âncora convencional. Assim, um navio movimenta o elemento até que este alcance a carga projetada, que passa a ser aplicada verticalmente à placa. As âncoras verticais, portanto, reagem da mesma forma que as de placa.

3.4 ESTACAS TORPEDO

Além dos elementos de fundação citados anteriormente, existem também as chamadas estacas ou âncoras torpedo, ou âncoras de penetração dinâmica, chamadas, em inglês, de *Deep Penetrating Anchor* (DPA). De acordo com Sagrilo et al. (2012, p. 1), as âncoras torpedo são uma alternativa com custo acessível para ancoragem de linhas em plataformas flutuantes.

3.4.1 Generalidades

Conforme Medeiros Junior (2002), as estacas ou âncoras torpedo vêm sendo desenvolvidas pela Petrobras desde 1996 como tecnologia para ancoragem de plataformas e *risers* flexíveis em solos argilosos. Desde então, para a otimização do projeto destas estruturas, têm sido aprimorados softwares e ensaios, como na Bacia de Campos.

Primeiramente as estacas torpedo foram utilizadas juntamente a linhas de ancoragem flexíveis. Após isto, estas estruturas passaram a ser largamente aplicadas como elementos de fundação para *Mobile Offshore Drilling Units* (MODUs), plataformas semissubmersíveis de produção e *Floating Production Storage and Offloadings* (FSPOs). Estas estacas já foram instaladas em profundidades maiores que 2000 metros (COSTA, 2008).

A autora também explica que o dimensionamento dessas estruturas exige recursos computacionais e utilização de métodos matemáticos para a determinação de previsão de penetração do torpedo, cálculo de esforços no seu topo, disposição do trecho com catenária inversa e cálculo da resistência tanto do solo quanto da estrutura. Este processo é conduzido juntamente com experimentos em campo e em laboratório. Devido ao alto preço destes ensaios, torna-se necessário cada vez mais o desenvolvimento de métodos computacionais e numéricos que simulem de forma adequada o comportamento das âncoras torpedo.

3.4.2 Características

Randolph et al. (2011) explicam que estas âncoras possuem formato de foguete, usualmente com 12 a 15 metros de comprimento e diâmetro de 0,8 a 1,2 metros. Além disso, elas pesam em torno de 500 a 1200 kN. Estas âncoras, conforme Sagrilo et al. (2012, p. 1), são instaladas no solo por queda livre e, segundo Randolph et al. (2011), são lançadas de uma altura de 50 a 100 metros do solo, alcançando uma velocidade que pode chegar a 30 m/s. Elas podem penetrar no solo em uma profundidade que corresponde a até três vezes o seu comprimento.

Sagrilo et al. (2012, p. 2) ressaltam que não há especificações técnicas quanto ao desenho destas âncoras. Porém, Costa (2008) define que as estacas torpedo são constituídas de um tubo cilíndrico de aço que possui uma ponta fechada em formato de cone e quatro aletas laterais, que são responsáveis pelo contato entre a estaca e o solo e objetivam a maior resistência lateral e axial da estrutura. Medeiros Junior (2002) complementa que a parte

interna destas estruturas tubulares é preenchida com sucata e concreto. Além disso, a estrutura também possui um *padeye*, que é um ponto de fixação em aço fundido para a amarração das linhas de ancoragem, o qual permite que os esforços sobre a fundação possam ser aplicados em qualquer direção. De acordo com Costa (2008), este *padeye*, ou olhal, pode ser interno se a estrutura for projetada para ancoragem de *risers* e externo se as estacas forem dimensionadas para ancoragem de MODUs e Unidades Estacionárias de Produção (UEPs). A espera, neste caso, é situada externamente ao solo.

Estas estacas permitem a instalação de um conjunto de três *risers* a uma profundidade de lâmina d'água de até 1300 metros (MEDEIROS JUNIOR, 2002). A figura 3 ilustra este tipo de âncora.

Figura 3 – Âncora torpedo



(fonte: SAGRILO et al, 2012)

3.4.3 Instalação

Conforme explica Kunitaki (2006), as estacas utilizadas para a ancoragem de *risers* flexíveis e MODUs é realizada com a utilização de uma embarcação com rebocador que proceda ao transporte e lançamento. Desta forma, o número de navios e o tempo de instalação é bastante reduzido em comparação a outros elementos de fundação. Outra vantagem presente na alocação destas estruturas é o fato de não serem instaladas por arrasto, como as demais âncoras, podendo assim ser instaladas em zonas com plataformas próximas sem causar interferência entre as linhas.

Assim, o procedimento tem seu início quando as estacas são posicionadas nas corretas coordenadas. O cabo de amarra é distensionado lentamente até que o torpedo esteja a uma certa altura do solo. Esta profundidade é denominada de altura de queda e a partir dela a estaca, que se encontra totalmente verticalizada, é liberada por um gatilho, sendo cravada no solo por queda livre. A figura 4 ilustra este procedimento.

Figura 4 – Lançamento de âncora torpedo



(fonte: MEDEIROS JUNIOR, 2002)

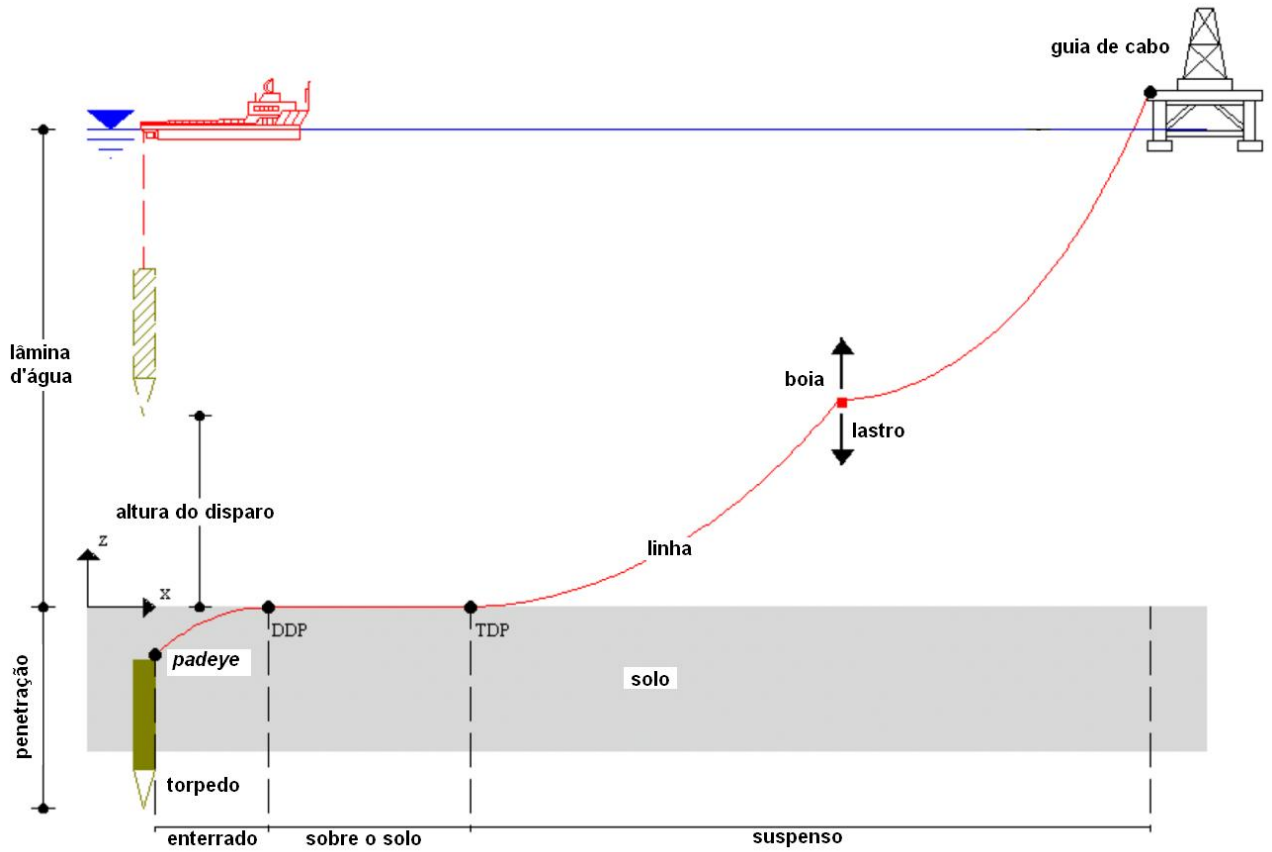
3.5 CATENÁRIA INVERSA

O trecho de catenária inversa corresponde ao foco do trabalho. Wales et al. (2011) ressaltam que uma das considerações importantes a ser feita no projeto de plataformas flutuantes é referente à resistência a cargas extremas, que estão diretamente relacionadas às condições de ancoragem diante dos esforços causados pelos ventos e ondas. Assim, também é importante levar em consideração a interação entre as linhas de ancoragem e o solo, nos segmentos enterrados, para que não aconteça o afrouxamento nas amarrações. Este trecho enterrado possui formato de catenária inversa, iniciando no olhal da âncora e terminando no TDP.

Os autores complementam que o comprimento e formato desta catenária possuem relação com a tensão aplicada nela. Portanto, a tensão aplicada na instalação das estacas torpedo para que seja formada a catenária inversa corresponde a uma operação complexa, aumentando os riscos e os custos da execução do projeto. A figura 5 ilustra o sistema de ancoragem indicando o trecho de catenária inversa. Neste trabalho, o ponto chamado de *Deep Down Point* (DDP)

corresponde ao TDP, não havendo linha de ancoragem sobre o solo: ela passa de suspensa para enterrada.

Figura 5 – Esquema de ancoragem *offshore* ilustrando catenária inversa¹



(fonte: adaptado de trabalho não publicado, tradução nossa)

¹ Esquema de ancoragem *offshore* fornecido pela Petrobras ao PPGEC/UFRGS.

4 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA MECÂNICO: MODELOS REOLÓGICOS

Para a caracterização do sistema mecânico em análise são discutidos alguns modelos reológicos existentes na literatura. Estes modelos representam as parcelas referentes à elasticidade, plasticidade e viscosidade de um material, as quais podem estar atuando tanto separadamente uma das outras como em conjunto.

O capítulo descreve os conceitos básicos em reologia e explicita os modelos que representam os comportamentos de alguns materiais. Por fim, é analisado o modelo que se aplica ao presente trabalho.

4.1 CONCEITOS BÁSICOS

De acordo com Cogliati (2011), a reologia é o estudo das relações existentes entre tensões, deformações, velocidades de deformações e variações de tensões no tempo, as quais são modeladas por equações. Os modelos reológicos expressam a forma como um material se comporta através do uso de simplificações e combinações de modelos que possuam fácil compreensão.

A autora explica que são estabelecidos elementos que representam cada uma das parcelas a serem estudadas: uma mola para a componente elástica, um amortecedor para a viscosa e duas placas pressionadas uma contra a outra para a plástica. Além disso, estes elementos podem ser combinados entre si para demonstrarem os resultados de experimentos com solos, sendo que cada um destes elementos contém uma constante que o distingue.

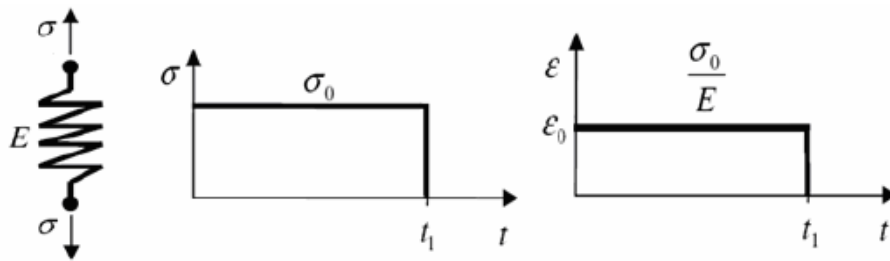
Conforme Gomes e Marchese (2013, p. 71), apesar de estes modelos rudimentares não representarem de forma completamente precisa as estruturas cristalinas e as moléculas da matéria, eles possibilitam o melhor entendimento das reações dos materiais diante das alterações de tensões e deformações. Quanto mais completo for o modelo, mais precisa é a adaptação feita para o experimento, uma vez que há um aumento no número de constantes a serem definidas.

4.2 ELASTICIDADE, PLASTICIDADE E VISCOSIDADE LINEAR

Santos (2008, p. 5) define os materiais elásticos como aqueles que apresentam recuperação à forma inicial após serem submetidos a uma carga que cause deformação. Esta deformação, alcançada assim que o carregamento é aplicado, é, portanto, reversível, e a energia interna é conservada. A elasticidade linear é definida como a deformação proporcional e constante do corpo constituído deste material em relação à carga aplicada.

Por isso um material elástico pode ser comparado a uma mola. Segundo Gomes e Marchese (2013, p. 71), as molas submetem-se a uma relação de tensão e deformação linear, mesmo que sujeitas à compressão ou ao cisalhamento. A figura 6 ilustra o comportamento elástico linear em função do tempo.

Figura 6 – Comportamento elástico linear



(fonte: adaptada de SANTOS, 2008, p. 6)

Os elementos que possuem comportamento elástico linear têm suas tensões e deformações descritas pela Lei de Hooke, em que o módulo de elasticidade, que corresponde à constante de proporcionalidade, é uma propriedade pertencente ao material (SANTOS, 2008, p. 6). Esta lei é expressa através da fórmula 1:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

σ = tensão (Pa);

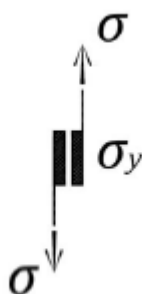
E = módulo de elasticidade longitudinal (Pa);

ε = deformação elástica longitudinal (adimensional);

t = tempo (s).

A plasticidade, de acordo com Cogliati (2011), pode ser representada pelo modelo de Saint-Venant, através da resistência de atrito entre dois materiais que possuem superfície rugosa e que são apoiados um contra o outro. Desta forma, o deslocamento ocorre quando a tensão fornecida alcança um determinado valor, e neste momento a velocidade de deformação passa a existir. Este modelo é representado na figura 7.

Figura 7 – Comportamento plástico linear



(fonte: COGLIATI, 2011, p. 30)

Farina (2009, p. 17) também explica que a plasticidade acontece quando as tensões são mais elevadas e o comportamento do material não é mais elástico. A deformação plástica pode aumentar um pouco mais mesmo após a aplicação da carga, e, após isso, se mantém constante se a carga for inalterada. Com a retirada da carga, há deformação definitiva.

A viscosidade, por sua vez, caracteriza o quanto um material é resistente ao escoamento. Geralmente os fluidos revelam esta propriedade em maior escala do que os sólidos, porém sem considerar a estrutura molecular da matéria que os constituem (SANTOS, 2008, p. 6).

Os materiais viscosos podem ser comparados a amortecedores, que, de acordo com Gomes e Marchese, (2013, p. 71), são submetidos a uma relação entre as cargas de compressão e cisalhamento. Santos (2008, p. 6, 7) define que um corpo apresenta comportamento viscoso linear quando a taxa de deformação é diretamente proporcional à uma carga aplicada de forma constante. Assim, este fluido é definido como newtoniano e a constante de proporcionalidade recebe o nome de viscosidade. A representação deste comportamento é definida pela fórmula 2 e ilustrada na figura 8:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma t}{\eta} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

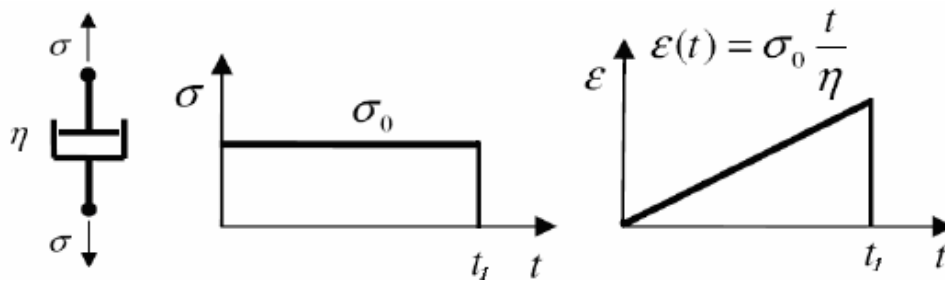
ε = deformação elástica longitudinal (adimensional);

σ = tensão (Pa);

η = constante de proporcionalidade (Ns/m²);

t = tempo (s).

Figura 8 – Comportamento viscoso linear

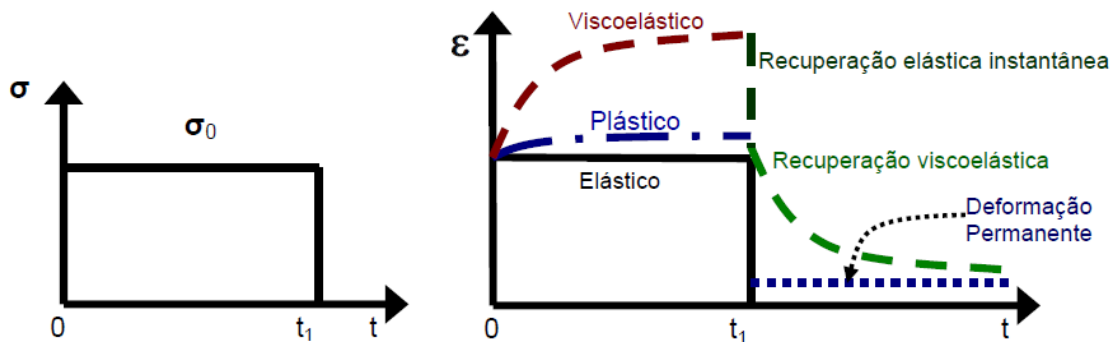


(fonte: adaptada de SANTOS, 2008, p. 6)

4.3 FLUÊNCIA E RELAXAÇÃO

A fluência também pode ser chamada de *creep* e consiste na predisposição que as partículas do material em análise possuem de se movimentarem quando uma carga constante é imposta ao sistema (SANTOS, 2008, p. 9). Cogliati (2011) afirma que, quando uma tensão constante é aplicada em uma mola, há uma deformação imediata. Caso o material seja perfeitamente elástico, esta deformação permanece igual durante o tempo. Já se o material for viscoso, a deformação não é imediata, mas sim com o decorrer do tempo, e ascende linearmente. Farina (2009, p. 18) apresenta o comportamento de diferentes materiais diante da aplicação de uma tensão constante na figura 9.

Figura 9 – Comportamento de materiais elásticos, plásticos e viscoelásticos submetidos a carga constante

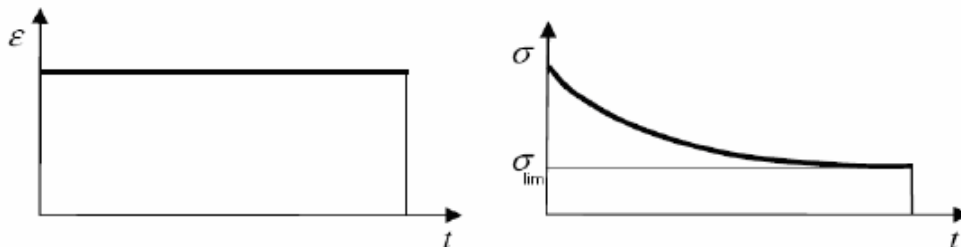


(fonte: FARINA, 2009, p. 18)

A relaxação é a variação nas tensões quando a deformação permanece inalterada. Os materiais elásticos perfeitos não apresentam este comportamento, pois a tensão aplicada gera uma deformação que, se for constante, resulta numa tensão que também não varia (COGLIATI, 2011).

Porém, a autora afirma que materiais viscosos, por sua vez, quando sofrem deformação constante, têm sua tensão minorada ao longo do tempo. Quando a deformação permanece inalterada, sua velocidade é zero. Santos (2008, p. 9) explica que a relaxação pode ser entendida através de um experimento em que o sistema é tracionado axialmente, causando um aumento no seu comprimento. Assim, é gerado um estado de deformações axiais constante, que pode ser representado através da figura 10.

Figura 10 – Teste de relaxação



(fonte: SANTOS, 2008, p. 9)

4.4 MODELOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS

Os materiais viscoelásticos, elastoplásticos e viscoplásticos podem ser estudados através de modelos físicos e matemáticos a partir de combinações das parcelas elásticas, plásticas e viscosas estudadas neste capítulo. A seguir, são descritos os principais modelos adotados, dentre eles os modelos viscoelásticos de Kelvin e Maxwell, o modelo elastoplástico de Prandtl-Reuss e o modelo viscoplástico de Bingham.

4.4.1 Modelos viscoelásticos de Kelvin e Maxwell

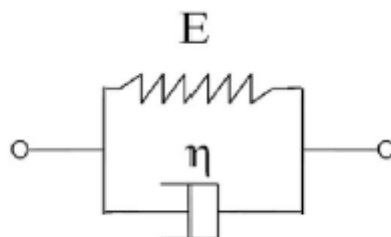
Conforme Santos (2008, p. 5) explica, “Os materiais viscoelásticos são caracterizados pela observância de um comportamento intermediário entre o sólido elástico e o fluido newtoniano.”. Além disso, de acordo com Farina (2009), os materiais viscoelásticos possuem relação de tensão e deformação subordinada ao tempo e à frequência.

Submetidos a uma carga uniaxial, a reação dos materiais viscoelásticos pode ser explicitada através da utilização de modelos teóricos que possuem tanto parcelas elásticas quando viscosas (MARQUES; CREUS, 2012, p. 13). Santos (2008, p. 16) complementa que a apresentação destas parcelas pode ser feita por meio de modelos físicos e matemáticos, que possuem variadas composições geométricas de molas, que equivalem ao efeito elástico, e amortecedores, que equivalem ao efeito viscoso. Desta forma, segundo Escarpini Filho (2010, p. 7), nesta simplificação adotada, os arranjos de molas correspondem aos modelos de Hooke, enquanto os arranjos de amortecedores correspondem aos modelos newtonianos.

4.4.1.1 Modelo de Kelvin

O modelo reológico de Kelvin considera que a viscoelasticidade pode ser expressa através da combinação de uma parcela viscosa com uma elástica em uma ligação em paralelo (SANTOS, 2008). A figura 11 representa esquematicamente este modelo.

Figura 11 – Modelo viscoelástico de Kelvin



(fonte: ESCARPINI FILHO, 2010, p. 11)

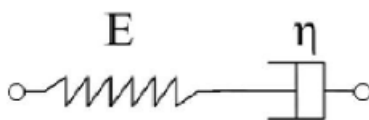
De acordo com o autor, quando as extremidades de um material forem submetidas a uma tensão, esta é compartilhada entre os elementos viscosos e elásticos, sendo a tensão total igual à soma das tensões em cada um desses elementos. Com relação às deformações do sistema, elas devem ser iguais tanto para a parcela elástica quanto para a viscosa.

Por fim, Santos (2008, p. 24) afirma que os sólidos viscoelásticos se comportam de acordo com o modelo de Kelvin. Este modelo é utilizado em estudos geotécnicos e geológicos e até mesmo na indústria alimentícia.

4.4.1.2 Modelo de Maxwell

O modelo reológico de Maxwell consiste na combinação da parcela elástica com a viscosa por meio de uma ligação em série. O modelo possui semelhança aos circuitos elétricos e foi apresentado por James Clerk Maxwell (SANTOS, 2008). A figura 12 representa esquematicamente este modelo.

Figura 12 – Modelo viscoelástico de Maxwell



(fonte: ESCARPINI FILHO, 2010, p. 8)

Para o autor, quando as extremidades de um material forem submetidas a uma tensão, a deformação total gerada é compartilhada entre os elementos viscosos e elásticos, sendo equivalente à soma das deformações em cada uma das parcelas. Por outro lado, a tensão é igualmente distribuída entre os elementos viscosos e elásticos.

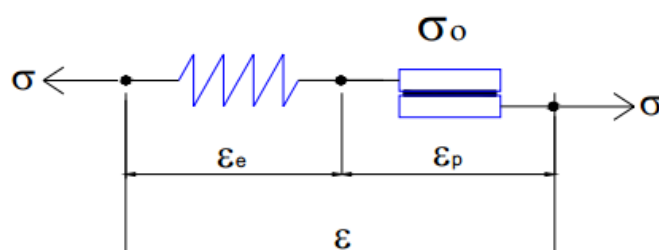
Escarpini Filho (2010, p. 10) lembra que a proposta de Maxwell supõe que a deformação aumenta de forma linear e indefinida. Assim, para grandes intervalos de tempo, o modelo não fornece resultados coerentes que ilustrem como os sólidos reais se comportam.

4.4.2 Modelo elastoplástico de Prandtl-Reuss

Carbone (2007), o modelo elastoplástico de Prandtl-Reuss consiste numa combinação em série de uma parcela plástica com uma elástica. Sendo assim, os dois modelos simples são sujeitos a igual tensão.

A deformação é a soma das deformações de cada uma das parcelas e a tensão aplicada na mola é a mesma que a aplicada nos dois corpos pressionadas. O autor ressalta que este modelo não é viscoso e desenvolve deformações definitivas quando as tensões atingem a resistência à plasticidade. A figura 13 ilustra este modelo.

Figura 13 – Modelo elastoplástico de Prandtl-Reuss



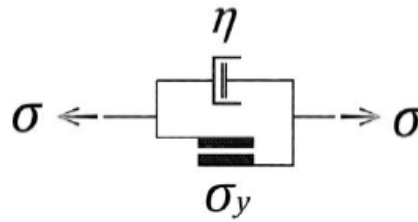
(fonte: CARBONE, 2007, p. 12)

4.4.3 Modelo viscoplástico de Bingham

O modelo de Bingham é constituído por uma parcela plástica conectada em paralelo a uma viscosa. Neste caso, quando o material é submetido a uma tensão menor que a necessária para gerar deformação plástica, não existe nenhuma deformação no conjunto (COGLIATI, 2011).

Segundo a autora, quando o valor de deformação ultrapassa este limite, acontece a deformação do sistema, e a velocidade desta deformação é relacionada ao coeficiente de viscosidade do amortecedor e à tensão crítica. A figura 14 representa este sistema.

Figura 14 – Modelo viscoplástico de Bingham

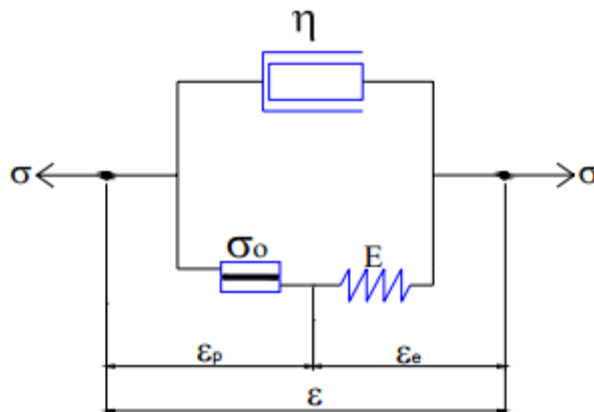


(fonte: COGLIATI, 2011, p. 38)

4.5 MODELO APLICADO AO SOLO ESTUDADO

Para a análise de todos os efeitos causados pelo solo estudado neste trabalho, o modelo adotado se assemelha ao chamado na literatura de viscoplástico sem comportamento instantâneo. Neste modelo, de acordo com Carbone (2007), o conjunto elastoplástico de Prandtl-Reuss é associado em paralelo a uma parcela viscosa. A figura 15 mostra este sistema.

Figura 15 – Modelo viscoplástico sem comportamento instantâneo



(fonte: CARBONE, 2007, p. 13)

As deformações elásticas, no caso de estudo, não são importantes pois as magnitudes das deformações são muito elevadas, então a parcela plástica é muito superior à elástica. Já as viscosas são o objeto de estudo, uma vez que elas têm relação com a atenuação entre as forças de entrada e saída na catenária inversa. Isto acontece porque a viscosidade está relacionada com a velocidade de deformação do fluido.

5 ANÁLISE DIMENSIONAL: PRINCÍPIOS E APLICAÇÃO

A análise dimensional é uma técnica utilizada para análise dos dados numéricos de um fenômeno físico, desde que este possa ser reproduzido com a utilização de equações dimensionais entre os parâmetros presentes. Assim, ainda que alguns resultados possam ser obtidos facilmente, eles possuem limitações, pois o método, devido ao seu caráter genérico, não proporciona que uma resposta completa seja alcançada, ou que o funcionamento do fenômeno analisado seja descoberto. Porém, a análise dimensional é um significativo recurso matemático, já que permite a diminuição do número de variáveis no problema analisado, aumentando o conhecimento adquirido através das experiências (LANGHAAR, 1951, p. 1, 2).

Assim, conforme Carneiro (1993, p. 4), através de análise qualitativa e de experimentos, a análise dimensional deve agregar todos os parâmetros que intervêm no caso estudado, reunindo leis físicas nas quais as fórmulas dimensionais de constantes físicas presentes no contexto se baseiam. Logo, uma das principais aplicações deste conceito é a proposição de requisitos de semelhanças físicas que associam os protótipos com os modelos adotados.

Este capítulo refere-se aos principais conceitos em análise dimensional. Por fim, são especificados os critérios de semelhança adotados para a construção do modelo reduzido utilizado no presente projeto de pesquisa.

5.1 PRINCÍPIOS

Os seguintes itens consistem na definição de grandezas fundamentais, derivadas e de base, bem como do princípio da homogeneidade dimensional. Em sequência, também são tratados os conceitos de matrizes dimensionais e Teorema de Π , que são escopo fundamental no estudo da análise dimensional.

5.1.1 Grandezas físicas

As grandezas físicas geralmente podem ser expressadas por números, que correspondem à amplitude destas grandezas. A medida, portanto, relaciona diretamente ou indiretamente a

quantidade de uma grandeza com a sua unidade adequada de mensuração (BARENBLATT, 1987, p. 17).

Carneiro (1993, p. 5) define uma grandeza física como uma essência de caráter abstrato, como, por exemplo, o comprimento e a massa. De acordo com Maia (1960, p. 15, 16), as grandezas físicas geralmente são subordinadas entre si, por isso, existindo esta relação entre tais, o mesmo acontece entre as unidades e os símbolos destas grandezas.

5.1.1.1 Unidades fundamentais e derivadas

O estudo das grandezas físicas envolve a conceituação de unidades fundamentais e derivadas. Para Carneiro (1993), as unidades fundamentais ou básicas são unidades de medida que não possuem relação de dependência com as demais, equivalendo, assim, às grandezas fundamentais. As unidades derivadas, por sua vez, são todas dependentes das unidades fundamentais, equivalendo às grandezas derivadas e representadas nas fórmulas dimensionais.

O Sistema Internacional de Unidades estabelece as grandezas de base e derivadas. Estas grandezas são demonstradas conforme os quadros 1 e 2.

Quadro 1 – Grandezas de base (conjunto completo)

Grandeza	Nome SI	Símbolo SI
comprimento, L	metro	m
tempo, t	segundo	s
massa, M	quilograma	kg
temperatura, T	kelvin	K
corrente, I	ampère	A
quantidade de partículas elementares	mole	mol
intensidade luminosa	candela	cd

(fonte: SONIN, 2001, p. 29, tradução nossa)

Quadro 2 – Grandezas derivadas (conjunto incompleto)

Grandeza	Lei de Formação	Dimensão	Símbolo dimensional	Nome
área	$A = \int dx dy$	L^2	m^2	-
volume	$V = \int dx dy dz$	L^3	m^3	-
frequência	$f = 1/\tau$	t^{-1}	s^{-1}	hertz (Hz)
velocidade	$v = dx/dt$	Lt^{-1}	ms^{-1}	-
aceleração	$a = d^2x/dt^2$	Lt^{-2}	ms^{-2}	-
massa específica	$\rho = M/V$	ML^{-3}	$kg\ m^{-3}$	-
força	$F = Ma$	MLt^{-2}	$kg\ m\ s^{-2}$	newton (N)
tensão	$\sigma = F/A$	$ML^{-1}t^{-2}$	$N\ m^{-2} = kg^{-1}\ m^{-2}\ s^{-2}$	pascal (Pa)
trabalho/energia	$W = \int F dx$	ML^2t^{-2}	$N\ m = kg\ m^2\ s^{-2}$	joule (J)
torque	$T = Fl$	ML^2t^{-2}	$N\ m = kg\ m^2\ s^{-2}$	-
potência	dW/dt	ML^2t^{-3}	$J\ s^{-1} = kg\ m^2\ s^{-3}$	watt (W)
carga	$Q = \int I dt$	It	$A\ s$	coulomb (C)

(fonte: adaptado de SONIN, 2001, p. 29, tradução nossa)

5.1.1.2 Escolha das grandezas de base

A resolução de problemas em análise dimensional está diretamente relacionada à escolha das grandezas de base. Barenblatt (1987, p. 17-18) explica que esta escolha é decorrente da especificação dos métodos conceituais utilizados para a medição dos parâmetros físicos presentes no problema. Assim, as grandezas são discriminadas e as unidades-padrão que as relacionam são empregadas como unidades fundamentais do sistema. As grandezas derivadas são estabelecidas através do significado das grandezas físicas envolvidas e de sua relação com as grandezas fundamentais.

Sonin (2001) complementa que tanto o tipo quanto o número de grandezas de base podem ser escolhidos livremente. Barenblatt (1987) exemplifica que um sistema bastante utilizado é o *Centimeter-Grama-Second* (CGS), cujas unidades centímetro, grama e segundo equivalem às grandezas de base massa, comprimento e tempo.

Carneiro (1993, p. 9) afirma também que não existe a necessidade de as grandezas de base escolhidas serem obrigatoriamente grandezas primárias. O autor conclui que é possível que algumas grandezas primárias passem a possuir unidades derivadas, caso o número de unidades de base seja reduzido ao longo do processo de cálculo.

5.1.2 Homogeneidade dimensional

Os dois lados de uma equação devem possuir dimensões iguais para que esta seja coerente de acordo com os princípios da Física (BARENBLATT, 1987, p. 5). Maia (1960, p. 17) explica que, uma vez que as equações físicas expressam relações entre grandezas, as equivalências existentes não devem ser alteradas de acordo com o sistema de unidades utilizado.

De acordo com o autor, para que tais relações permaneçam inalteradas, é necessária a multiplicação dos membros das equações pelos fatores numéricos adequados. Estes fatores são potências de razões entre as unidades utilizadas anteriormente com as atuais, e todas as partes da equação devem ser igualmente subordinadas a essas razões, possuindo mesmo grau em comparação aos símbolos dimensionais. Assim, as equações físicas devem ser homogêneas no que se refere a estes símbolos.

5.1.3 Matriz dimensional e mudança de base

A análise dimensional permite a mudança das grandezas escolhidas como base do sistema por outras. Com base no princípio da homogeneidade dimensional, Carneiro (1993, p. 6, 7) explica que as equações matemáticas que descrevem as leis e os mecanismos na Física devem permanecer eficientes caso um sistema seja trocado por outro, pois não possuem relação com o sistema de unidades escolhido. Isso deve acontecer mesmo quando as quantidades das unidades fundamentais forem modificadas ou quando houver mudança de base.

5.1.3.1 Parâmetros adotados

Conforme já citado, a escolha das grandezas que fazem parte do sistema é necessária para que a análise dimensional seja realizada. Assim, Barenblatt (1987, p. 31) reitera que é necessário serem obtidas relações entre os parâmetros das equações que expressam leis ou mecanismos da Física que caracterizem o evento estudado. Estes parâmetros podem ser definidos como governantes ou governados. Os parâmetros governados são os parâmetros a serem determinados no estudo, enquanto os governantes podem ser classificados como variáveis independentes e dependentes.

Carneiro (1993), entretanto, ressalta que uma parcela destes parâmetros governantes pode não possuir unidade de medida. Um caso deste tipo de variáveis são os chamados fatores de forma.

Barenblatt (1987, p. 32) também mostra que a definição do problema físico pode conter constantes físicas, que podem ser descritas em função das variáveis dependentes, e não apenas das independentes. Carneiro (1993, p. 26) afirma que estas constantes físicas específicas relativas a propriedades de substâncias podem ser adimensionais, apesar de serem, geralmente, dimensionais, assim como as constantes físicas universais. As constantes físicas possuem caráter variável nos problemas, sendo necessário para isso um equacionamento coerente para as várias substâncias.

5.1.3.2 Objetivo e metodologia de cálculo

O objetivo da mudança de base, portanto, é adequar a base adotada para que as grandezas fundamentais que não possuam participação direta entre os parâmetros dos problemas possam ser substituídas por grandezas derivadas que atuem diretamente entre estes (CARNEIRO, 1993, p. 27, 28). Para tanto, de acordo com Langhaar (1951, p. 30), é adequada a representação das dimensões das variáveis distribuídas em forma de tabela, a fim de que os mecanismos algébricos possam ser aplicados na análise dimensional.

Conforme Carneiro (1993, p. 28, 30), os dados do problema podem ser dispostos em um quadro, denominado de matriz dimensional, cujas linhas são constituídas pelas grandezas fundamentais e as colunas pelos parâmetros adotados (variáveis dependentes e independentes e constantes físicas). A matriz dimensional, assim, contém os expoentes de dimensão, e a base

Comprimento-Massa-Tempo (LMT), por exemplo, pode ser substituída por outra que possua dimensões linearmente independentes.

5.1.3.3 Condições para mudança de base

Entretanto, de acordo com Carneiro (1993, p. 20, 21), as unidades fundamentais devem ser linearmente independentes entre si na base adotada. Assim, podem ser escolhidas tanto grandezas fundamentais quanto derivadas para a constituição de uma base, desde que não sejam uma combinação uma das outras. A mudança de uma base pode ser facilmente efetuada quando forem conhecidas as dimensões das grandezas das bases novas nas bases antigas.

Além disso, para Carneiro (1993), o requisito para que um número específico de grandezas seja escolhido como nova base é que o posto desta matriz (número de unidades básicas necessário para descrever o fenômeno) na base antiga deve ser igual ao número de grandezas adotado. Caso contrário, se o posto, também conhecido como *rank*, for inferior a esse número, há combinações lineares, gerando as chamadas bases superabundantes, que devem ser substituídas a fim de que o determinante não seja nulo.

5.1.4 Teorema de Π

Toda a teoria de análise dimensional está compreendida nos fundamentos da homogeneidade dimensional e no teorema de Π . O autor afirma que as grandezas da Física podem ser apresentadas como multiplicações de potências de outras grandezas das quais elas são subordinadas, exceto nos casos em que estas grandezas são simplesmente fatores numéricos (MAIA, 1960, p. 21).

5.1.4.1 Conceito

O nome do teorema tem origem no símbolo Π utilizado por Buckingham, em 1914, para as variáveis adimensionais (SONIN, 2001, p. 38). Carneiro (1993, p. 50-51) complementa que o nome deste teorema, originado da letra grega maiúscula Π , é também equivalente ao caractere latino P, que é primeira letra da palavra produto.

De acordo com Barenblatt (1987, p. 34), o teorema supõe que, se um fenômeno pode ser expresso através de uma subordinação entre grandezas dimensionais e parâmetros governantes dimensionais, esta pode ser representada também como uma relação entre

parâmetros adimensionais e produtos adimensionais dos parâmetros governantes. A quantidade destes produtos adimensionais é igual ao número total de parâmetros governantes menos o número de parâmetros governantes que são variáveis independentes. Sonin (2001, p. 38) também afirma que o teorema parte do pressuposto de que todas as equações são dimensionalmente homogêneas.

5.1.4.2 Aplicação dos números Π

Os números Π correspondem ao número de grandezas adimensionais envolvidas, possuindo dimensão igual à unidade. Eles não se alteram quando as unidades fundamentais de medida são trocadas. (BARENBLATT, 1987).

Para Carneiro (1993, p. 72), uma forma de estes números serem compreendidos é como uma correspondência entre as proporções das grandezas de um modelo e um protótipo. A relação de grandeza dos parâmetros presentes entre o modelo e o protótipo é estabelecida pelos fatores de escala. Logo, inserindo no lugar de cada uma das variáveis que compõe os números Π os respectivos fatores de escala, o valor da multiplicação das potências é igual à unidade.

Barenblatt (1987, p. 4) também ressalta que esta constante pode ser corretamente determinada por meio de experimentos. Os números Π possuem, geralmente, nomes de diversos cientistas, conforme cita Carneiro (1993). Dentre eles, figuram Reynolds, Fourier, Galileu, Weber e Froude. O número de Froude é interpretado como a relação entre as forças de inércia e de gravidade, possuindo grande aplicação na elaboração de modelos reduzidos.

5.2 APLICAÇÃO EM MODELOS REDUZIDOS PARA ANÁLISE GEOTÉCNICA

Tendo em vista a dificuldade presente em ser estabelecida uma semelhança completa entre os experimentos em escalas diferentes, algumas grandezas físicas passam a necessitar de ajustes. Se o mesmo material para o solo for utilizado no modelo reduzido, todas as propriedades deles estarão na escala 1:1. Além disso, se a aceleração gravitacional for alterada no modelo, passa a ser necessário o uso de centrífugas para que seja corretamente ajustada.

Em sistemas mecânicos e geotécnicos, as grandezas fundamentais empregadas são o comprimento, a massa e o tempo. Em decorrência disto, as demais grandezas analisadas no

estudo têm suas escalas decorrentes das fundamentais. Para a determinação destas escalas nos modelos reduzidos, neste trabalho são desenvolvidas soluções envolvendo a ruptura de solos argilosos.

5.2.1 Critério de semelhança adotado

Para que um fenômeno seja corretamente representado, é necessário que as grandezas de base sejam escolhidas de forma adequada. Neste caso, considerando-se que a ruptura do solo acontece geralmente em função da tensão vertical efetiva no maciço, tem-se, de acordo com a fórmula 3, um sistema de grandezas de base constituído de comprimento, massa específica e tempo:

$$\sigma_v = \rho g z \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

σ_v = tensão vertical efetiva (Pa);

ρ = massa específica (kg/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

z = profundidade (m).

Assim, o comprimento (L) possui escala livre, enquanto a massa específica (ρ) e a gravidade (g) são mantidas fixas, iguais a 1. A principal vantagem desta escolha é que neste caso pode ser feita a reprodução direta da tensão vertical em modelos sem ser necessário utilizar centrífugas, pois a escala da gravidade não é modificada. Outro benefício também desta escolha é a escala da massa específica também ser mantida. Por outro lado, a principal desvantagem desta escala é a dificuldade de serem representados os trechos de deformação elástica. Logo, é importante que o sistema seja válido para os casos de ruptura dependendo apenas da tensão vertical, excluindo-se deslocamentos e deformações elásticas, que estão fora de escala.

Este sistema é conhecido, conforme já citado, como semelhança de número de Froude, em que a aceleração da gravidade é mantida com escala 1:1. Desta forma, a constante

adimensional, o número de Froude (fórmula 4), permanece constante mesmo que as escalas sejam modificadas:

$$F_r = \frac{v^2}{gL} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

F_r = número de Froude (adimensional);

v = velocidade (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

L = comprimento (m).

No caso de solos argilosos, a ruptura depende da coesão (tensão vertical), que possui mesma escala que o comprimento. Logo, os modelos reduzidos devem possuir coesão reduzida também, da mesma forma que o comprimento. A sugestão no trabalho é que a argila seja substituída por uma mistura de caulinita com bentonita em proporções adequadas.

Assim, a resistência ao cisalhamento não drenada do solo, S_u , pode ser determinada, uma vez que ela depende da tensão vertical e de um coeficiente k , que é adimensional; a gravidade e a massa específica compõem a resistência última do solo, de acordo com a fórmula 5:

$$S_u = k\sigma_v \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

S_u = resistência não drenada do solo (Pa);

σ_v = tensão vertical efetiva (Pa);

k = constante adimensional.

5.2.2 Planilha de análise

A planilha desenvolvida para a construção de modelos reduzidos pode ser demonstrada no quadro 3. Neste caso, os valores gerados correspondem a uma escala de comprimento de 1:40, adotada conforme a viabilidade de confecção do modelo reduzido.

Quadro 3 – Planilha de análise com escala de comprimento 1:40²

Grandezas de base	Símbolo	Unidade	\mathcal{L}	\mathcal{M}	\mathcal{T}	Inversão			Escala	Escala Inv.
Comprimento	\mathcal{L}	m	1	0	0	1	0	0	2,500E-02	40
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	3	1	0	1,000E+00	1
Aceleração (da gravidade)	g	m/s ²	1	0	-2	0,5	0	-0,5	1,000E+00	1
Grandezas derivadas	Símbolo	Unidade	\mathcal{L}	m	t	\mathcal{L}	ρ	g	Escala	Escala Inv.
Comprimento	\mathcal{L}	m	1	0	0	1	0	0	2,500E-02	40
Massa	\mathcal{M}	kg	0	1	0	3	1	0	1,563E-05	64000
Tempo	\mathcal{T}	s	0	0	1	0,5	0	-0,5	1,581E-01	6,32
Frequência	f	Hz	0	0	-1	-0,5	0	0,5	6,325E+00	0,16
Aceleração (da gravidade)	a	m/s ²	1	0	-2	0	0	1	1,000E+00	1
Velocidade	v	m/s	1	0	-1	0,5	0	0,5	1,581E-01	6,32
Vazão	Q	m ³ /s	3	0	-1	2,5	0	0,5	9,882E-05	10119
Viscosidade cinemática	ν	m ² /s	2	0	-1	1,5	0	0,5	3,953E-03	253
Força	F	N	1	1	-2	3	1	1	1,563E-05	64000
Momento	\mathcal{M}	Nm	2	1	-2	4	1	1	3,906E-07	2560000
Rigidez axial	k	N/m	0	1	-2	2	1	1	6,250E-04	1600
Tensão (pressão, módulos, coesão, etc.)	σ	Pa	-1	1	-2	1	1	1	2,500E-02	40
Massa específica	ρ	kg/m ³	-3	1	0	0	1	0	1,000E+00	1
Viscosidade dinâmica	μ	kg/m/s	-1	1	-1	1,5	1	0,5	3,953E-03	253
Área	A	m ²	2	0	0	2	0	0	6,250E-04	1600
Volume	V	m ³	3	0	0	3	0	0	1,563E-05	64000
Inércia de área	I	m ⁴	4	0	0	4	0	0	3,906E-07	2560000

(fonte: trabalho não publicado)

Com a aplicação deste método, a escala de tensão vertical passa a ter a mesma escala do comprimento. Sistemas de apoio, cabos e quaisquer outros elementos que tenham importância na modelagem devem ser dimensionados de acordo com as escalas do quadro 3.

Algumas propriedades do solo, como módulo de Young, módulo de corte e viscosidades não podem ser adaptadas às escalas propostas no quadro acima, pois elas apresentam escala 1:1 no protótipo. Assim, a rigidez do solo no domínio elástico e os efeitos de velocidade de deformação não são corretamente modelados. As forças viscosas e elásticas, portanto, estão

² Planilha criada pelo Prof. Marcelo Rocha e apresentada na disciplina de Técnicas Experimentais Aplicadas a Vibrações em Estruturas do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

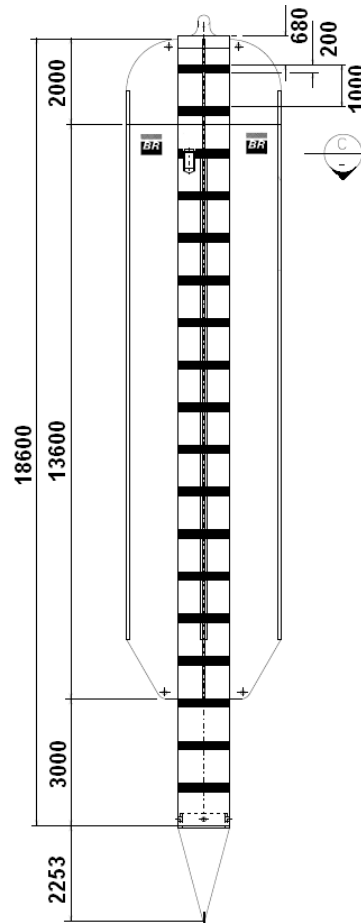
fora de escala no modelo reduzido criado em laboratório, que considera o solo como material rígido-plástico. Neste caso, apenas as forças plásticas estão em escala.

Conforme mencionado no item 4.5, entretanto, as deformações plásticas são muito maiores que as deformações elásticas, permitindo que estas possam ser desconsideradas no presente estudo. Porém, ainda que a similaridade não seja cumprida, os resultados experimentais levam a conclusões úteis. Isto acontece, porque, caso a viscosidade, por exemplo, que se encontra em escala 1:1, já apresentar resultados pequenos, na escala 1:253 (conforme apresenta o quadro 3) será totalmente desprezível.

5.2.3 Caso típico

Finalmente, para que fosse possível construir um modelo reduzido que representasse de forma correta a realidade, a Petrobras forneceu um caso típico para o estudo. Assim, as dimensões do torpedo, as cargas estáticas e dinâmicas e o comportamento do solo foram pré-determinados. A partir destes parâmetros, foram obtidas, através do quadro 3, as relações de semelhança entre o modelo e o protótipo.

O torpedo típico determinado possui comprimento total de 20,853 metros. Foi proposta a penetração no leito marinho de 28,8 metros, do TDP até o *padeye* da âncora. Desta forma, o torpedo penetra, no total, aproximadamente 2,4 vezes o seu comprimento no solo, do TDP até a sua ponta cônica. As dimensões desta estaca constam na figura 16.

Figura 16 – Âncora torpedo do caso típico³

(fonte: trabalho não publicado)

As disposições referentes à modelagem do solo típico são descritas com mais detalhes no capítulo 6 deste trabalho, sendo que, conforme estabelecido pela Petrobras, a resistência ao cisalhamento não drenada do solo cresce linearmente com a profundidade, numa proporção de 1,4. O peso específico do solo é de 15,1 kN/m³. A amarra da linha de ancoragem à âncora é feita com uma corrente de 550 metros, com diâmetro de 120 milímetros. A inclinação com que a plataforma tensiona esta linha de ancoragem é de 45°.

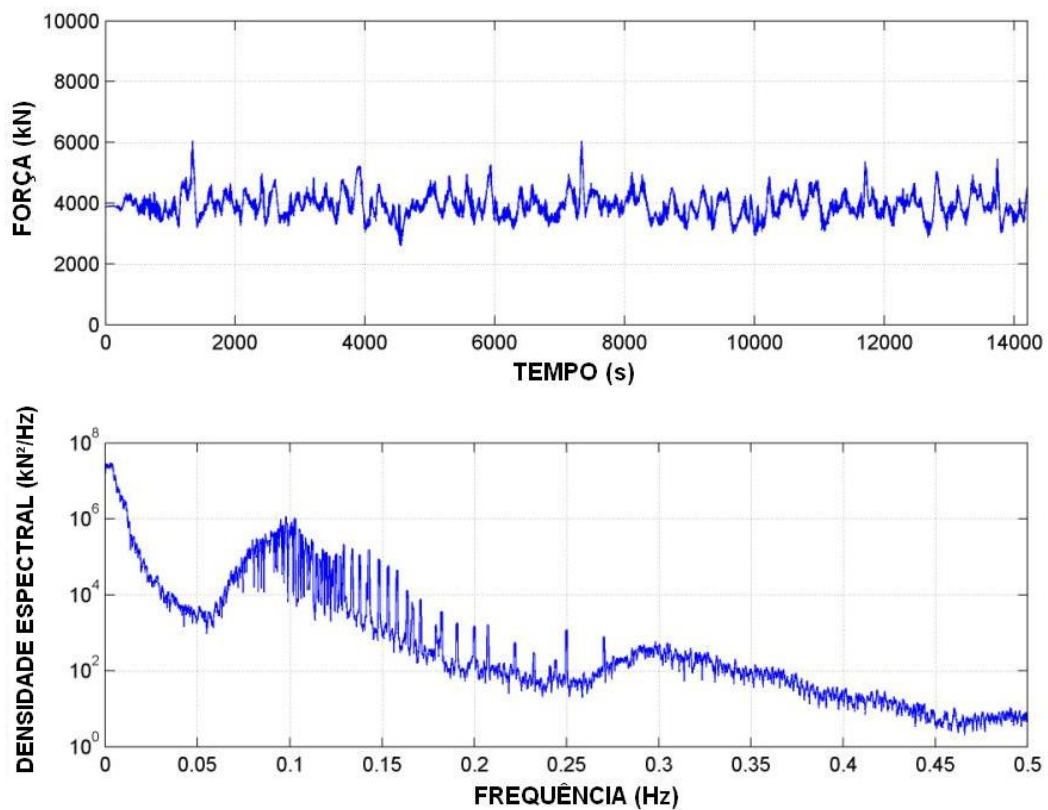
A Petrobras informou que a carga de projeto das estacas varia entre 3000 e 7000 kN. Também foi informada a carga no TDP, que sem mantém oscilando em torno de 4000 e 4500 kN, podendo alcançar um pico de até 6000 kN. É para este pico que a Petrobras tem dimensionado suas estacas, e, caso a atenuação para as cargas dinâmicas seja comprovada como

³ Projeto de âncora torpedo fornecido pela Petrobras ao PPGE/UFRRGS com dimensões para o caso típico estudado.

significativa, podem ser projetados torpedos que resistam a uma carga menor, diminuindo, automaticamente, o custo de produção.

A partir da série temporal de carregamento, foi possível estimar a densidade espectral, que revela um pico na frequência de 0,1 Hz, a qual deve ser estudada. Após esta frequência, não existem picos significativos. As cargas no TDP e a densidade espectral são ilustradas na figura 17.

Figura 17 – Cargas no TDP e densidade espectral para o caso típico⁴



(fonte: trabalho não publicado, tradução nossa)

⁴ Gráfico com cargas no TDP fornecido pela Petrobras ao PPGEC/UFRGS para o caso típico estudado e, abaixo, densidade espectral estimada pelo PPGEC/UFRGS.

6 MODELAGEM DO SOLO

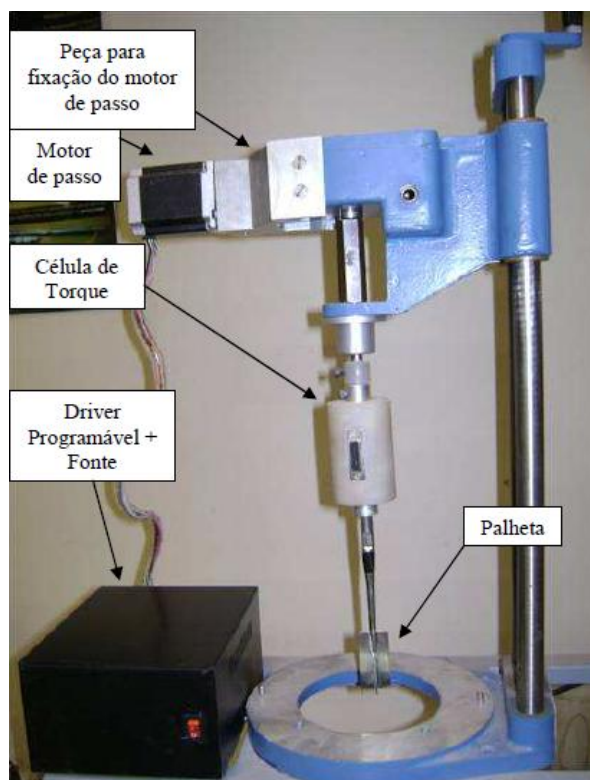
6.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO DRENADA (S_u): CONCEITO E MEDIÇÃO

De acordo com Alves Filho (2010), a resistência ao cisalhamento não drenada não é uma propriedade inerente do solo, pois tem relação com a forma como ele sofre ruptura, com a anisotropia (características que variam com a direção do material), com a velocidade de deformação, que é maior em argilas plásticas, e com as tensões aplicadas. Assim, o tipo de problema a ser analisado é que dá as condições para a análise e para os métodos de avaliação a serem adotados.

Esta resistência, portanto, em solos passíveis de liquefação, é adquirida através das tensões verticais efetivas presentes antes da colocação de carga (FREIRE NETO, 2009). Sendo assim, Baroni (2010) explica que, em reservatórios de argilas moles, o ensaio de palheta é o mais utilizado para a especificação da resistência ao cisalhamento não drenada, e, em sua pesquisa, levou à conclusão de que esta resistência cresce com o aumento da profundidade.

Em laboratório, conforme Rocha (2014), o ensaio de mini palheta é o mais comumente empregado para a especificação do S_u em argilas moles saturadas e sujeitas a cargas não drenadas. O equipamento utilizado no Laboratório de Ensaio Geotécnicos e Geoambientais (LEGG) da Escola de Engenharia da UFRGS durante a pesquisa de vários mestrados e doutorandos é ilustrado na figura 18.

Figura 18 – Aparelho de palheta de laboratório automatizado



(fonte: GAUER, 2010)

Rocha (2014) explica que este instrumento é formado por uma palheta com seção em formato de cruz, a qual penetra numa amostra de solo com velocidade constante, determinando assim o torque necessário para ruptura do solo na rotação. De acordo com Gauer (2010), as especificações de diâmetro, espessura e formato das palhetas e velocidades de carregamentos a serem empregadas, bem como o procedimento de ensaio e interpretação de resultados, são normalizados pela NBR 10905 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1989).

Rocha (2014) também realizou ensaios de cravação dinâmica, com 3 modelos reduzidos de estacas torpedo, de escalas 1/60, 1/70 e 1/80. Este ensaio também visou ao estudo da resistência ao cisalhamento não drenada para as misturas argilosas utilizadas.

6.2 MISTURA ARGILOSA UTILIZADA

A argila utilizada neste trabalho é a mesma que foi utilizada por Rocha (2014). Desta forma, de acordo com a autora, a mistura realizada no laboratório representa as características físicas da argila presente no solo marinho de maneira similar. Foi utilizado apenas o material

passante da peneira com malha de 2 mm. A mistura consiste em uma proporção de 85% de caulim e 15% de bentonita, em massa, com teor de umidade de 120%. Rocha (2014) realizou seus ensaios com mistura com teor de umidade de 100% também, a qual foi desconsiderada neste trabalho, de acordo com as conclusões do item 6.3.

O preparo da mistura e o controle do seu teor de umidade seguem os procedimentos da NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986). A água incorporada na mistura é destilada, proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul (ROCHA, 2014).

6.2.1. Caulim

De acordo com a NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995), o caulim é um minério argiloso que é formado em grande parte pela caulinita, um alumínio silicato hidratado com estrutura lamelar. Rocha (2014) explica que ele é constituído por 23,02% de argila e 76,98% de silte.

6.2.2 Bentonita

De acordo com a NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995), a bentonita é uma argila com grande teor de montmorilonita e apresenta grande expansão quando em contato com água. Rocha (2014) descreve que a bentonita aplicada nos ensaios é a sódica malha 200 comercial ativada com carbonato de sódio. Sua composição é de 8,71% de argila e 91,29% de silte.

6.2.3 Mistura de caulim e bentonita

Conforme citado, assim como no trabalho de Rocha (2014), a mistura utilizada no presente estudo se baseia na composição em massa de materiais secos de 85% de caulim e 15% de bentonita. A autora afirma que a mistura entre estes dois materiais aumenta a trabalhabilidade do material resultante.

O objetivo da mistura é obter uma resistência ao cisalhamento próxima à fornecida no caso típico da Petrobras. Esta grandeza está em escala nos estudos realizados e possui relação

direta com a atenuação, tanto estática, na dissertação de Rocha (2014), quanto dinâmica, no presente trabalho.

6.3 DIFERENÇAS DE RESISTÊNCIAS AO CISALHAMENTO NÃO DRENADA ENTRE ENSAIOS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO

O caso típico fornecido pela Petrobras foi obtido por ensaios de campo. Ele apresenta uma proporção para a resistência ao cisalhamento não drenada no solo dada pela fórmula 6, e os resultados dos ensaios são apresentados na figura 19:

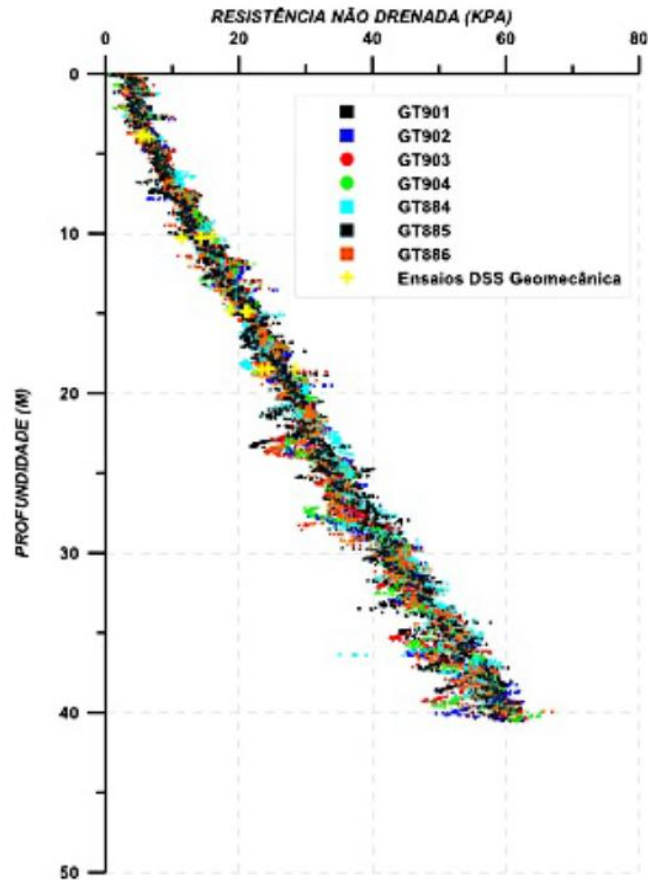
$$S_u = 1,4z \quad \text{(fórmula 6)}$$

Onde:

S_u = Resistência ao cisalhamento não drenada (kN/m²);

z = profundidade (m).

Figura 19 – Ensaio de campo para resistência ao cisalhamento não drenada⁵

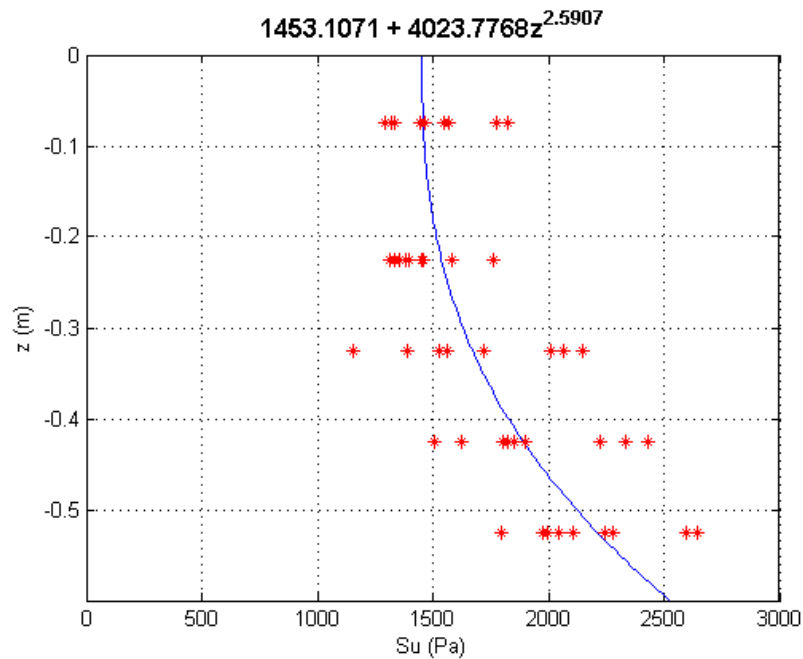


(fonte: trabalho não publicado)

Conforme mencionado, Rocha (2014) realizou ensaios de palheta em laboratório para as misturas com teor de umidade de 100% e 120%. Os resultados para a resistência ao cisalhamento não drenada foram plotados nas figuras 20 e 21, que contêm as respectivas fórmulas que interpolam os dados obtidos.

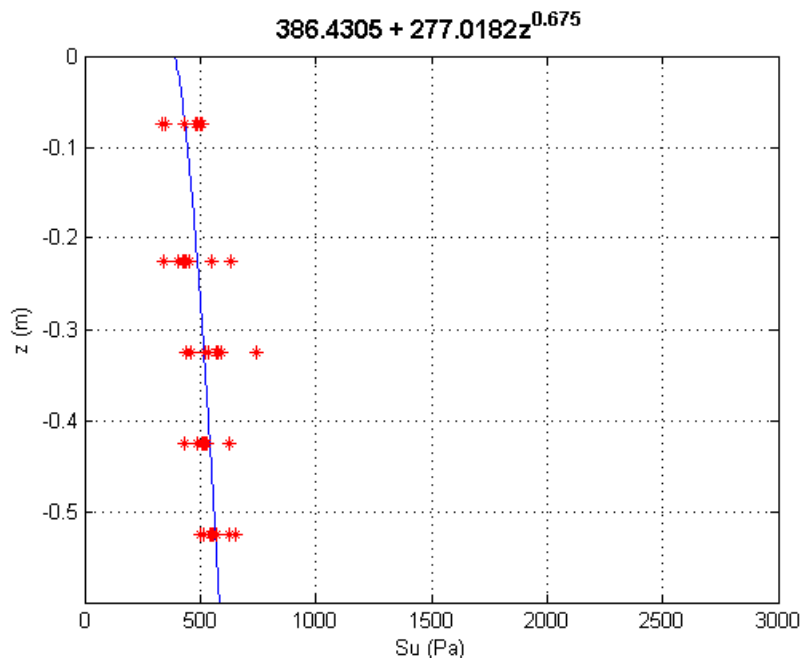
⁵ Gráfico fornecido pela Petrobras ao PPGE/EE/UFRGS com dados de ensaios de campo para a resistência ao cisalhamento não drenada do solo típico presente no leito marinho estudado.

Figura 20 – Resultados de resistência ao cisalhamento não drenada em ensaio de laboratório para a argila com teor de umidade 100%⁶



(fonte: trabalho não publicado)

Figura 21 – Resultados de resistência ao cisalhamento não drenada em ensaio de laboratório para a argila com teor de umidade 120%⁷



(fonte: trabalho não publicado)

⁶ Gráfico gerado pelo Professor Marcelo Rocha do PPGE/UFGRS a partir de resultados de resistência ao cisalhamento não drenada em ensaio de laboratório para argila com teor de umidade de 100%.

⁷ Gráfico gerado pelo Professor Marcelo Rocha do PPGE/UFGRS a partir de resultados de resistência ao cisalhamento não drenada em ensaio de laboratório para argila com teor de umidade de 120%.

Através dos dados fornecidos pelos ensaios tanto de campo quanto de laboratório, é possível analisar que existe um efeito na superfície, a qual não obedece completamente a proporção proposta pela Petrobras. A figura 19, que mostra os resultados dos ensaios de campo, demonstra que até uma profundidade de 5 metros a linearidade entre resistência ao cisalhamento e a profundidade não é plenamente respeitada. O mesmo acontece nos ensaios de Rocha (2014), que, por serem realizados em um modelo reduzido, provavelmente intensificam este efeito. Entretanto, por mais que esta proporção proposta pela Petrobras não seja completamente atendida pelo solo estudado, a ordem de grandeza está correta. Isto pode ser provado quando a autora forçou as equações obtidas a passarem pela origem. Foi obtida a fórmula 7 para argila com teor de umidade 100% e a fórmula 8 para o teor de umidade 120%, as quais são ilustradas na figura 22:

$$S_u = 4,81z \quad \text{(fórmula 7)}$$

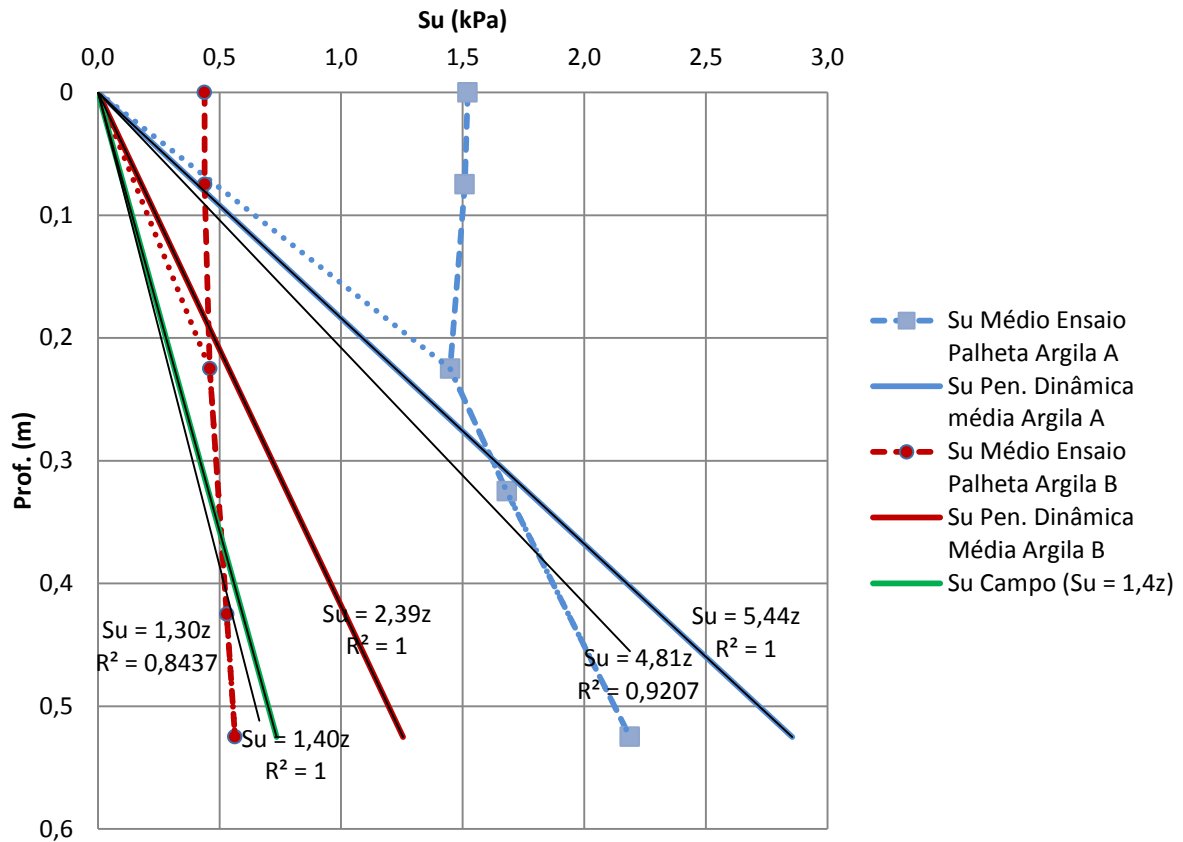
$$S_u = 1,3z \quad \text{(fórmula 8)}$$

Onde:

S_u = Resistência ao cisalhamento não drenada (kN/m²);

z = profundidade (m).

Figura 22 – Resultados dos ensaios de Rocha (2014)



(fonte: ROCHA 2014)

De acordo com Lourenço (2014), as retas em cheio são as equações lineares dos ensaios, que são forçadas a passar pela origem. Desta forma, conforme a literatura determina, a resistência ao cisalhamento não drenada cresce com a profundidade. Entretanto, o autor afirma que não existe um padrão característico com valores próximo a zero na superfície. A teoria prevê que a relação entre as resistências e a tensão aplicada resultam numa constante, o que não é observado nas resistências apresentadas entre 0,1 e 0,2 m de profundidade.

O autor presume que possa haver influência do pequeno nível de tensões nas camadas iniciais do solo, porém, quando estas curvas são ajustadas pela origem, fornecem resultados que se aproximam ao observado pela Petrobras. Isto é observado principalmente no solo com teor de umidade de 120%, cuja linearidade se aproxima mais à fornecida para o caso típico. Sendo assim, a mistura com teor de 100% foi desprezada no estudo de atenuação para cargas dinâmicas, já que consiste num solo muito resistente, que não corresponde de forma tão precisa à realidade.

Assim, a mistura realizada no laboratório possibilita o estudo com este solo uma vez que a ordem de grandeza é correta. Porém, para o processamento dos dados, é necessário utilizar a resistência obtida através das fórmulas presentes nas figuras 20 e 21, que interpolam os valores reais obtidos nos ensaios.

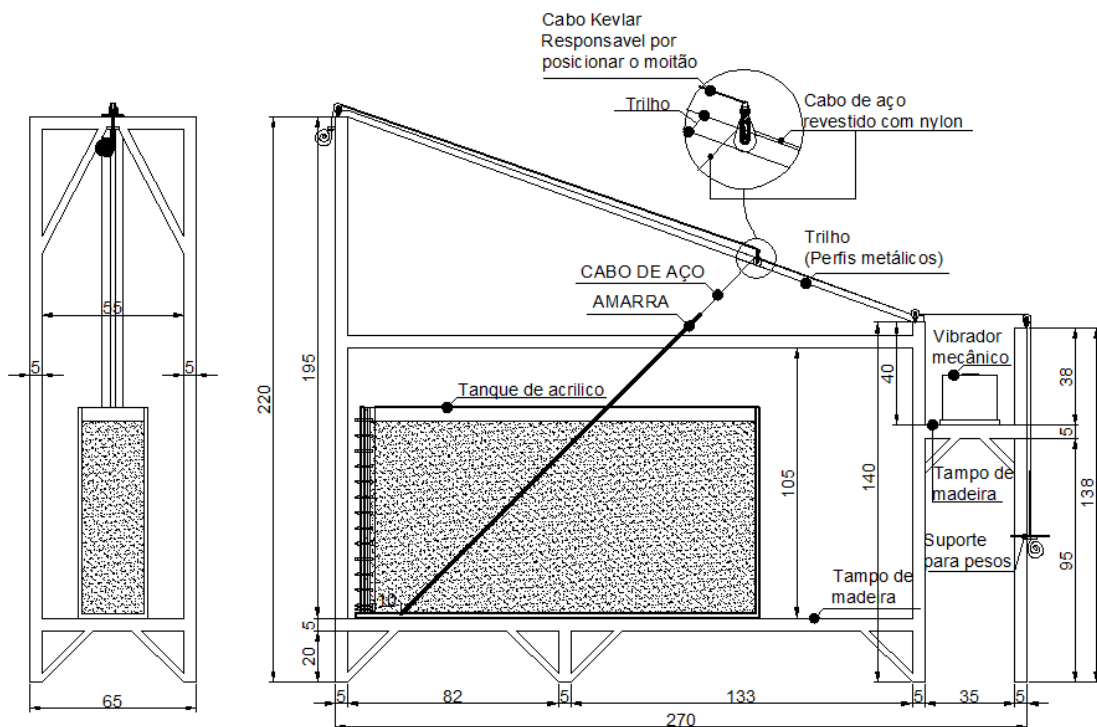
7 DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios deste trabalho foram realizados no LEGG, na Escola de Engenharia da UFRGS. Este capítulo descreve tanto os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios quanto os procedimentos experimentais.

7.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O desenvolvimento dos ensaios foi feito utilizando uma estrutura construída no laboratório pela mestrandia Cinthia Rocha, que estudou a atenuação ao longo da linha de ancoragem para carregamentos estáticos. Esta câmara foi montada para simular o comportamento desta linha no solo. A figura 23 mostra esta estrutura.

Figura 23 – Representação da estrutura utilizada em laboratório

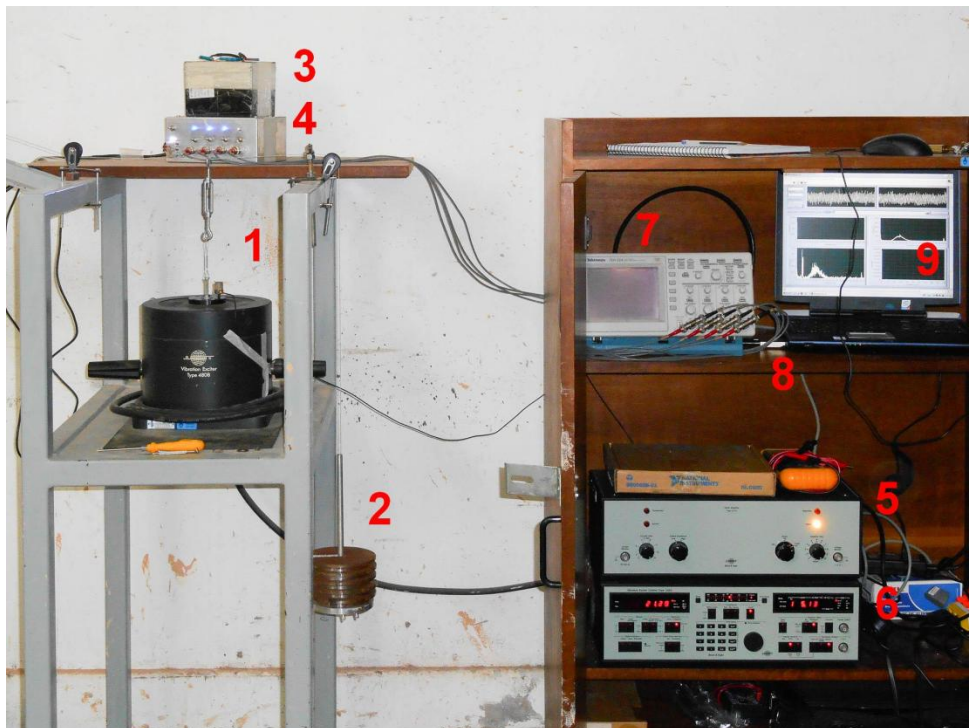


(fonte: ROCHA, 2014)

De acordo com Rocha (2014), esta estrutura permite que sejam realizados ensaios com a linha de ancoragem inclinada de 0° a 55° , proporcionando a formação da catenária inversa no solo.

A este modelo foi acoplada uma mesa vibratória que produz um deslocamento transversal em um ponto da linha, o que resulta em uma flutuação no seu nível de tensão. Outros equipamentos também foram desenvolvidos e acrescentados para a medição de cargas dinâmicas e para a aquisição dos resultados. O sistema completo, contendo todos os equipamentos, corresponde ao modelo da figura acima juntamente com os equipamentos apresentados na figura 24.

Figura 24 – Equipamentos para medição de cargas estáticas e dinâmicas e aquisição dos resultados



(fonte: foto da autora)

A numeração expressa na figura acima corresponde aos seguintes equipamentos:

- 1) mesa vibratória e acelerômetro;
- 2) suporte para pesos e pesos;
- 3) baterias;
- 4) amplificador;
- 5) amplificador de potência da mesa vibratória;
- 6) controle de excitação de vibração;
- 7) osciloscópio;
- 8) placa de aquisição de dados;

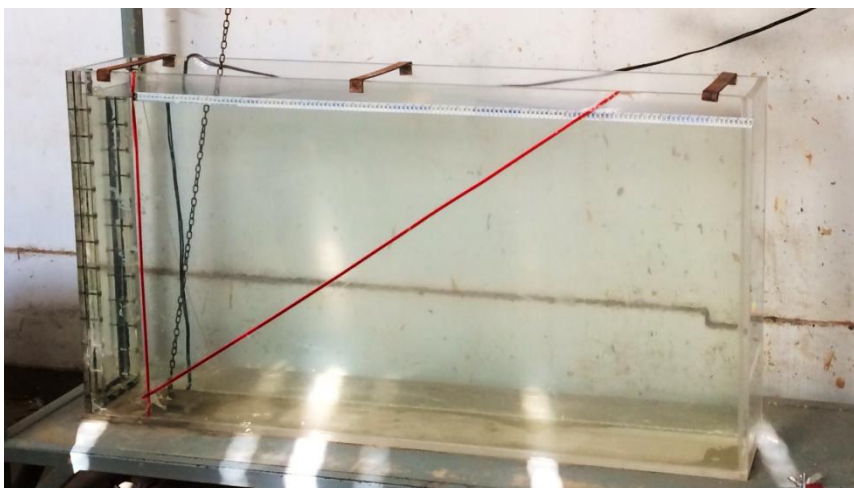
9) processamento de dados no Labview.

7.1.1 Tanque

O tanque utilizado nos ensaios foi desenvolvido por Rocha (2014) e foi construído em acrílico com espessura de 1,5 cm. Conforme a autora, ele possui comprimento externo de 155 cm, largura externa de 27 cm e altura externa de 82 cm. Uma das paredes laterais pode ser removida, o que facilita a operação entre os ensaios, e é fixada com utilização de parafusos com porca borboleta e arruelas de borracha, sendo que sua lateral possui borracha para vedação.

As dimensões do tanque respeitam a escala de comprimento de 1:40, sendo que a profundidade corresponde aos 28,8 metros de penetração da estaca torpedo no solo (quando ele é cheio até 72 cm), de acordo com o caso típico da Petrobras. A largura foi escolhida de forma que não houvesse influência das paredes do tanque no campo de tensões em torno da linha de ancoragem. O comprimento foi estabelecido de forma que fosse possível inclinar a corrente nos ângulos desejados. A figura 25 mostra este tanque.

Figura 25 – Tanque utilizado

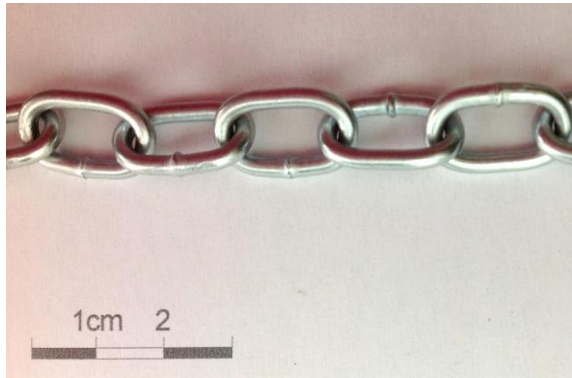


(fonte: foto da autora)

7.1.2 Corrente

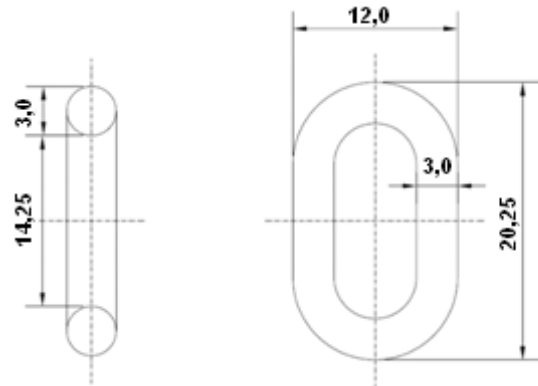
A corrente adotada como modelo para linha de ancoragem, também foi a mesma utilizada por Rocha (2014), com comprimento de 147 cm. As figuras 26 e 27 ilustram essa corrente com suas respectivas dimensões.

Figura 26 – Corrente utilizada no modelo



(fonte: ROCHA, 2014)

Figura 27 – Medidas da corrente utilizada no modelo (em mm)



(fonte: adaptado de ROCHA, 2014)

A corrente foi fixada à célula de carga presente no fundo do tanque, e esticada até a a célula de carga de fora do tanque. Foi fixada uma fita métrica ao longo do comprimento do tanque, para medição da posição da corrente no TDP durante os ensaios. A dimensão da corrente também segue a escala de comprimento de 1:40, de acordo com o quadro 3.

7.1.3 Célula de carga do fundo tanque

Da mesma forma que para Rocha (2014), para a medição das cargas de tração no ponto de encontro da linha de ancoragem à estaca torpedo, foi fixada uma célula de carga com extensômetros de resistência elétrica no fundo do tanque. Esta célula mede tanto componentes verticais quanto horizontais de forças no ponto de ancoragem. Ela foi utilizada pela mestranda Cinthia e desenvolvida pelo professor Marcelo Maia Rocha, do PPGE. As figuras 28 e 29 ilustram esta célula de carga.

Figura 28 – Vista inferior da célula de carga do fundo do tanque



(fonte: ROCHA, 2014)

Figura 29 – Vista superior da célula de carga do fundo do tanque



(fonte: ROCHA, 2014)

De acordo com Rocha (2014), esta célula foi desenvolvida com extensômetros de resistência elétrica, que são dispositivos que medem deformações a partir da variação da resistência elétrica. A autora explica que os extensômetros utilizados na confecção da célula de carga foram do tipo PA-13-250AG-350-L, coláveis, com modelos unidimensionais simples, de formas tradicionais e fabricados pela Excel Sensores Ltda. Este sistema foi composto por oito extensômetros colados de forma que fossem formadas duas pontes completas de *Wheatstone*, sendo uma referente aos esforços verticais e outra aos horizontais. Os extensômetros foram colados numa chapa de aço inox de 13x13 cm e de espessura 2 mm, a qual sofre a deformação que é medida. Nas laterais da chapa foram coladas tiras de acrílico.

Além disso, conforme Rocha (2014), para a conexão da célula à corrente, foi utilizado um parafuso de aço inox sextavado de rosca inteira de 1/2", que foi preso no centro da peça de metal. A célula de carga foi fixada no fundo do tanque com cola de silicone para vedação completa contra a água e o solo.

A deformação da chapa de inox é muito pequena, atingindo 0,2 mm de deslocamento no centro para a carga máxima de 14 kgf. Isso simplifica que as tensões mobilizadas na massa de solo acima da célula são pequenas e não influenciam as medições.

7.1.4 Célula de carga da superfície

Para a medição das cargas de tração no TDP foi utilizada uma célula de carga ligada à corrente na parte externa ao solo. Este foi um dos instrumentos implementados nos ensaios de carregamentos dinâmicos que não estava presente nos ensaios com carregamento estático.

A célula de carga utilizada é da Líder Balanças, de alumínio anodizado e com capacidade nominal de 100 kg. Possui sensibilidade de 2 mV/V, erro combinado inferior a 0,03%, sobrecarga de ruptura de 300% da capacidade e impedância de saída de 350 ohms e de entrada de 400 ohms. A figura 30 mostra esta célula.

Figura 30 – Célula de carga da superfície



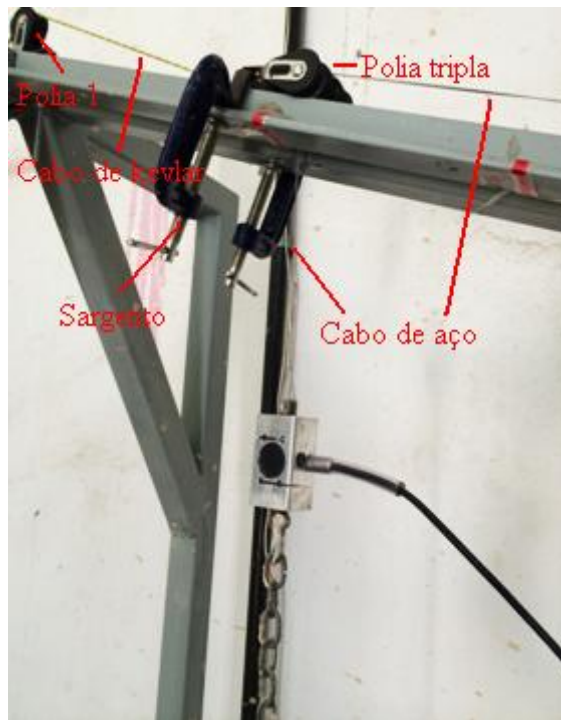
(fonte: foto da autora)

7.1.5 Cabo de aço, polias, suporte para pesos e pesos

Para a tração da corrente, foi conectado um cabo de aço à célula de carga da superfície. O cabo utilizado foi de aço inoxidável revestido com nylon, resistente a 120 lb (aproximadamente 54 kgf).

Este cabo foi apoiado no trilho inclinado na estrutura metálica por meio de polias, até o suporte para pesos. Para a fixação em cada ângulo de medição, foram utilizados grampos sargentos presos a uma polia tripla, juntamente com um cabo de kevlar. A figura 31 ilustra esta conexão.

Figura 31 – Cabo de aço, polia, sargento e cabo kevlar



(fonte: foto da autora)

Estes ângulos foram marcados no trilho metálico inclinado, a cada 5°. A figura 32 ilustra essas marcações, que foram feitas de 0° a 55°.

Figura 32 – Indicação dos ângulos no trilho metálico



(fonte: foto da autora)

As polias e o cabo de kevlar foram utilizados por Rocha (2014) também. Assim, a autora explica que o sistema completo é composto por três polias fixas que deslizam sobre o trilho

metálico, além de uma polia na parte mais alta da estrutura, que é responsável pelo posicionamento correto da polia tripla. A esta polia é preso o cabo de kevlar, com espessura de 3 mm e composto por cabo de aço inox revestido com nylon, que é amarrado na estrutura metálica.

Por fim, outras duas polias estão presentes no sistema, uma na parte final do trilho, e outra após a passagem do cabo de aço pela mesa vibratória. Todas as polias foram lubrificadas para que houvesse a menor perda por atrito possível. O cabo de aço é por fim conectado ao suporte de pesos, conforme a figura 33.

Figura 33 – Sistema de polias e suporte para pesos



(fonte: foto da autora)

Os pesos utilizados para o carregamento foram de 500 g e 1000 g. Obedecendo à escala de força do quadro 3, cada 1000 g de correspondem a 640 kN de carregamento no protótipo. A figura 34 ilustra os pesos utilizados.

Figura 34 – Pesos utilizados nos ensaios



(fonte: foto da autora)

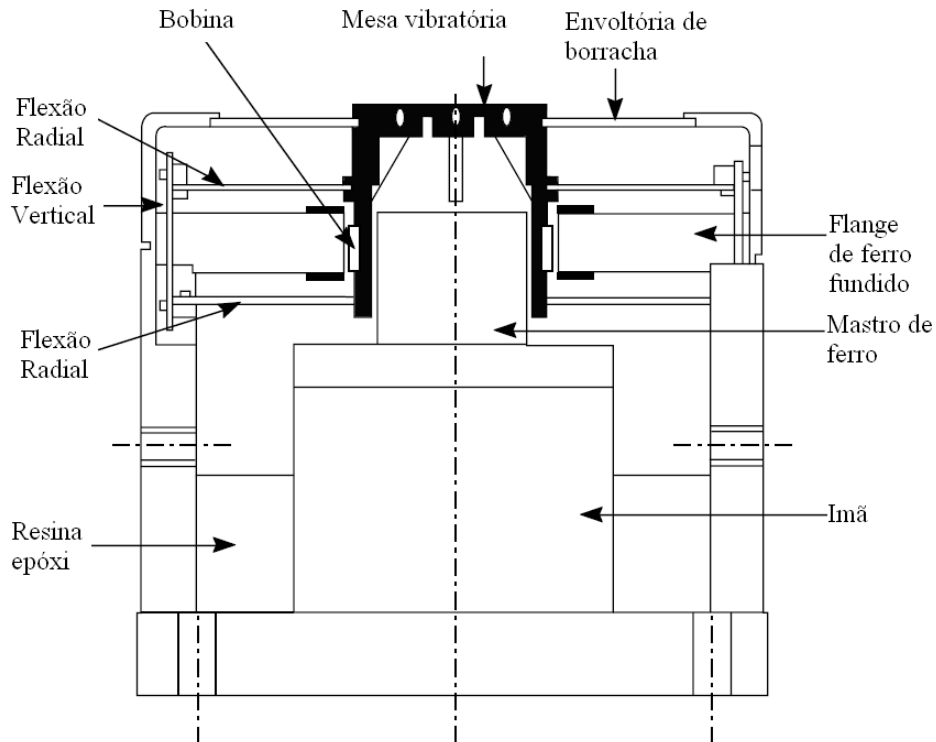
7.1.6 Mesa vibratória e acelerômetro

A mesa vibratória instalada no sistema também não estava presente nos ensaios de carregamento estático e foi utilizada no experimento para a introdução de cargas dinâmicas de acordo com as frequências escolhidas. A mesa instalada é da marca Brüel & Kjaer, chamado excitador de vibração tipo 4808.

Conforme Brüel & Kjaer (2006), este excitador é uma máquina compacta, que possui campo magnético permanente. É usualmente conectado a um amplificador de potência tipo 2719, e o cabo AQ 0649 é utilizado para ligação do amplificador de potência à unidade de bobina de mesa vibratória. Para conexão com o amplificador de potência tipo 2712 da Brüel & Kjaer, é necessário remover um dos plugues Neutrik de quatro pinos Speakon do cabo AQ 0649, e substituir por três pinos canhão da Brüel & Kjaer, número JP 0308, que devem ser soldados.

Ainda de acordo com este manual, para a maioria dos testes de vibração, a maneira mais fácil de montar o excitador é colocá-lo na posição vertical com a sua base apoiada sobre um suporte sólido, como bancada ou piso de concreto. Também é possível utilizar parafusos para a fixação, através dos quatro furos de sua base. O elemento móvel é suportado por um sistema de orientação retilínea constituído de peças de flexão transversal e radial. Estas flexões são produzidas por uma estrutura de molas de aço e elastômeros de amortecimento, proporcionando uma onda de aceleração limpa. O manual deste equipamento contém a figura 35, que ilustra cada uma das partes da mesa vibratória.

Figura 35 – Excitador de vibração tipo 4808



(fonte: BRÜEL & KJAER, 2006, tradução nossa)

As especificações técnicas do equipamento, são que ele opera numa faixa de frequência de 5Hz a 10 kHz, possui frequência de ressonância axial de 10 kHz, aceleração máxima mesa de 700 m/s^2 , deslocamento máximo de 12,7 milímetros de pico-a-pico, velocidade máxima de 1,4 m/s, peso total de 35 kg e diâmetro de 215 mm e altura de 200 mm (BRÜEL & KJAER, 2006). No experimento, esta mesa vibratória foi colocada sobre o suporte metálico e sobrepôs tensão variável no cabo de aço. A figura 36 ilustra este sistema.

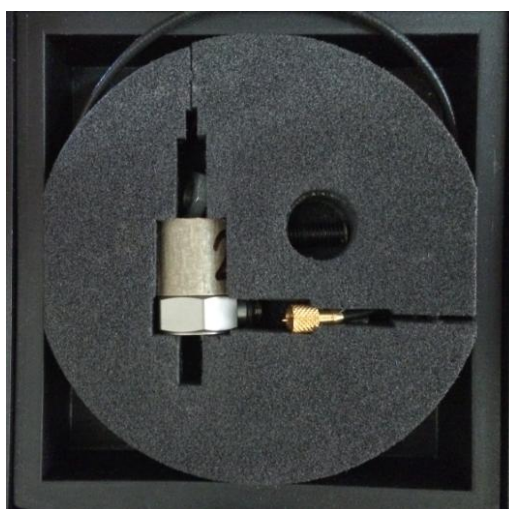
Figura 36 – Sistema para sobreposição de carga dinâmica à linha de ancoragem



(fonte: foto da autora)

Juntamente à mesa vibratória foi instalado um acelerômetro também da marca Brüel & Kjær, tipo 4383 V. Ele possui sensibilidade de $2,696 \text{ pC/m/s}^2$, sendo a frequência limite mais baixa determinada pelo amplificador utilizado e a mais alta de $8,4 \text{ kHz}$. A frequência de ressonância é de $27,8 \text{ kHz}$. A figura 37 mostra este acelerômetro.

Figura 37 – Acelerômetro tipo 4383 V



(fonte: foto da autora)

7.1.7 Controle de excitação e amplificador de potência da mesa vibratória

Juntamente à mesa vibratória foram utilizados outros dois equipamentos: o controle de excitação de vibração tipo 1050 e o amplificador de potência tipo 2712, ambos da Brüel & Kjaer. A figura 38 mostra sua instalação no laboratório.

Figura 38 – Amplificador de potência tipo 2712 (acima) e controle de excitação de vibração tipo 1050 (abaixo)

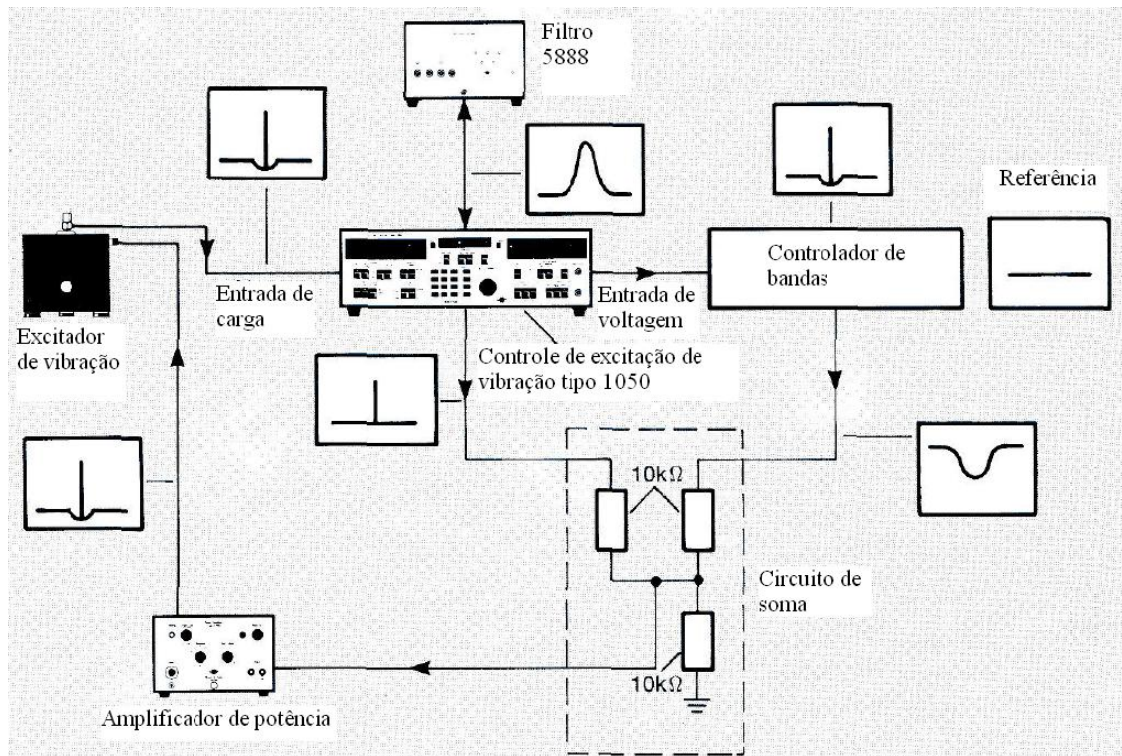


(fonte: foto da autora)

Na natureza é difícil acontecer uma onda puramente senoidal, sendo mais comum o movimento senoidal juntamente com um aleatório, dentro de uma faixa de frequência. Por isso, em teste de vibração, são utilizadas tanto ondas senoidais quanto ondas aleatórias, para uma melhor simulação do mundo real. Para tanto, um dos equipamentos adequados para esta função, é o controle de excitação de vibração tipo 1050, que produz um sinal puro. Ele pode ser utilizado juntamente com um controlador de bandas de frequência, que produz sinais aleatórios. A vibração é quantificada pelo acelerômetro presente na mesa vibratória, conectado a este controle tipo 1050 (BRÜEL & KJAER. [2008?]).

No experimento foi utilizado apenas este equipamento, sem a presença de um controlador de bandas. O sistema completo funciona de acordo com a figura 39.

Figura 39 – Sistema de ligação do amplificador de potência, controle de excitação de vibração, mesa vibratória e acelerômetro



(fonte: BRÜEL & KJAER, [2008?], tradução nossa)

De acordo com o caso típico, um dos picos de frequência estabelecidos pela Petrobras é de 0,1 Hz, sendo a escala de frequência estabelecida pelo quadro 3. Assim, devido às limitações do aparelho utilizado, foi inserida uma frequência mínima de 1 Hz no modelo, que corresponde a 0,16 Hz no protótipo. Apesar de este valor ser um pouco superior ao pico estabelecido pela Petrobras, foi o único considerado sensível à mesa vibratória, que não produz adequadamente frequências mais baixas que 1 Hz. A frequência mínima desta mesa, conforme mencionado, é de 5 Hz, porém, ela funciona de maneira razoável até 1 Hz, apesar de neste caso o sinal gerado não ser perfeitamente senoidal.

O controle de excitação recebe os dados de aceleração, bem como a varredura de frequências a ser utilizada. Pode ser feita tanto a varredura crescente quanto decrescente das frequências através deste aparelho. A relação entre estes dados é estabelecida pela fórmula 9:

$$u_{m\acute{a}x} = \frac{a_{m\acute{a}x}}{(2\pi f)^2} \quad (\text{f\acute{o}rmula 9})$$

Onde:

$u_{m\acute{a}x}$ = amplitude absoluta máxima (m);

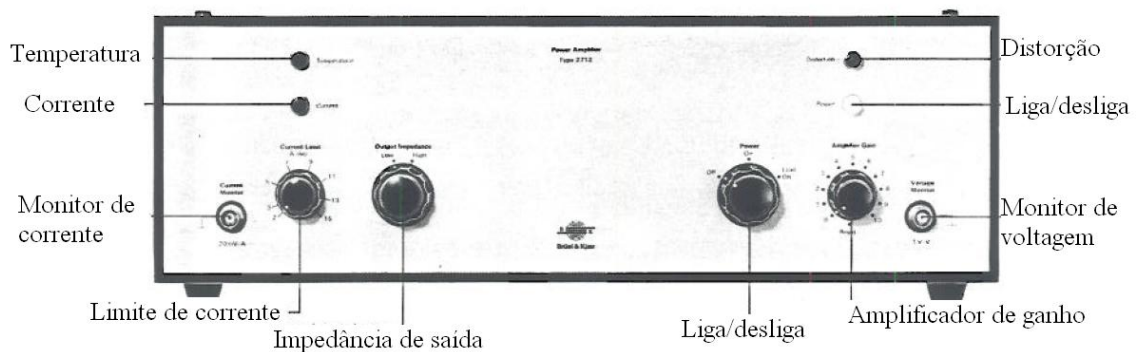
$a_{m\acute{a}x}$ = aceleraao máxima (m/s²);

f = frequência (Hz).

Uma vez a mesa vibratória possui deslocamento total de 12,7 mm, a amplitude absoluta máxima  de 6,35 mm. Durante os ensaios, esta amplitude foi mantida fixa para cada experimento enquanto aceleraao e a frequência foram alteradas. Desta forma, os resultados obtidos são mais coerentes do que quando a aceleraao  mantida fixa e a amplitude  variada, pois ao longo da varredura a amplitude se torna muito pequena com o aumento das frequências e os dados não são corretamente lidos pelo acelerômetro.

O amplificador de potência tipo 2712, de acordo com Brüel & Kjaer (1977), foi desenvolvido para excitadores de pequenas frequências, como o 4808, utilizado nos ensaios. O amplificador possui os controles ilustrados na figura 40.

Figura 40 – Amplificador de potência tipo 2712



(fonte: BRÜEL & KJAER, 1977, traduao nossa)

7.1.8 Sistema de aquisição de dados

Para a aquisição dos dados das células de carga, foi utilizado um sistema composto por baterias e amplificador, da mesma forma que utilizado por Rocha (2014). De acordo com a autora, os extensômetros foram conectados a um amplificador da universidade, de circuito integrado INA118 com alimentação em corrente contínua de 5 V. Este amplificador foi ligado a um conjunto de duas baterias de 12 V cada.

Foram utilizadas duas entradas para recebimentos dos dados da célula de carga do fundo do tanque (para as componentes vertical e horizontal), e uma terceira para receber os dados da célula de carga da superfície. A figura 41 mostra estes equipamentos.

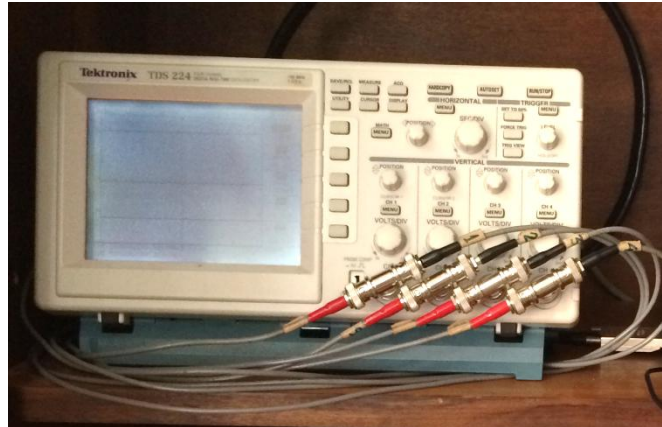
Figura 41 – Baterias e amplificador



(fonte: foto da autora)

Diferentemente do trabalho para carregamentos estáticos, os sinais deste experimento foram monitorados com a conexão deste amplificador a um osciloscópio. Para tanto, foi utilizado um aparelho da marca Tektronix, modelo TDS 224. A figura 42 mostra o equipamento.

Figura 42 – Osciloscópio

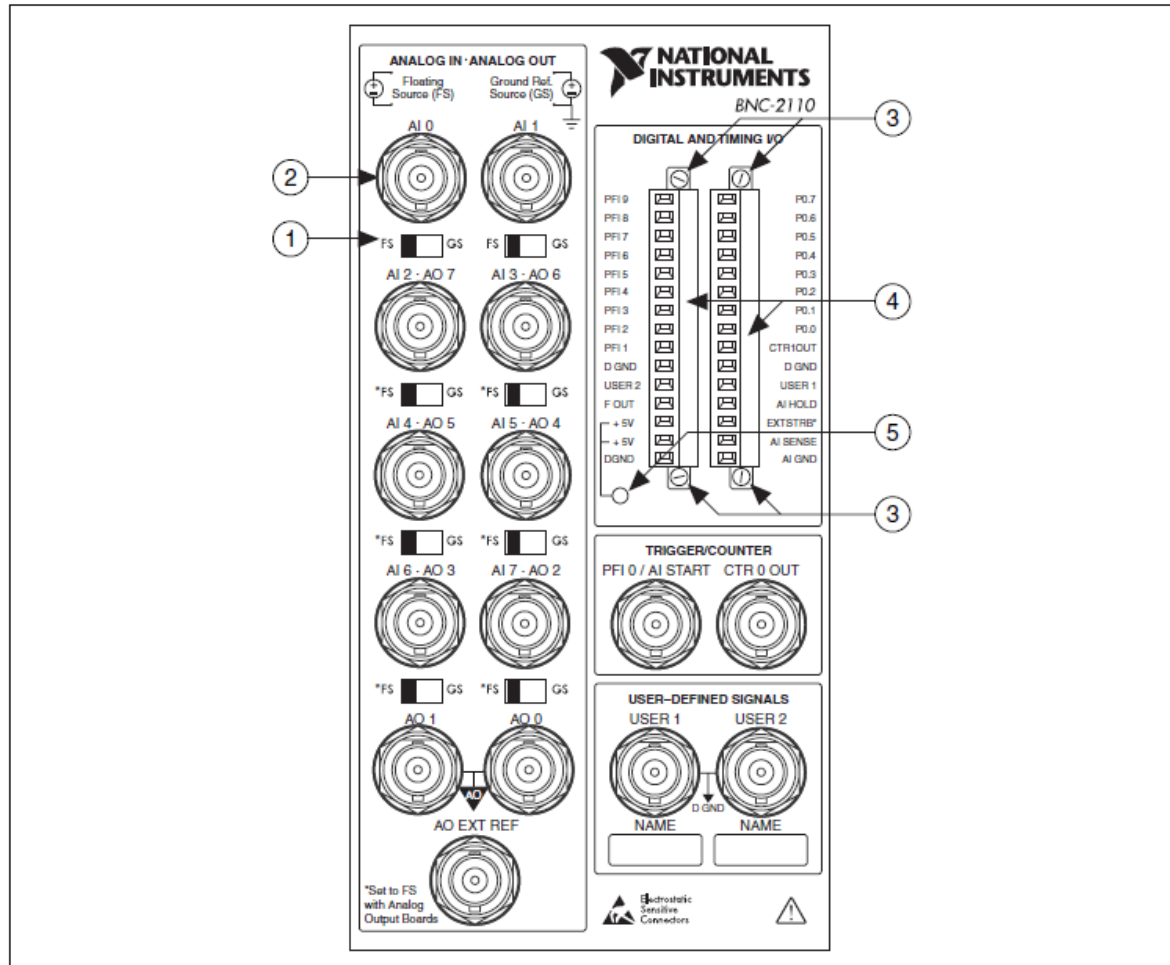


(fonte: foto da autora)

Os cabos provenientes do amplificador são conectados tanto ao osciloscópio como a uma borneira, da National Instruments, modelo BNC-2110. Ela tem a função de receber os sinais vindos dos três cabos e transmiti-los a um cabo que é conectado à placa dentro do computador, que é o sistema de aquisição de dados.

Esta borneira deve ser conectada a um sistema de aquisição de dados específico com a utilização de cabo específico também. No caso do experimento, foi utilizada a placa NI DAQCard 6036E, com o cabo SHC68-68-EP. Esta borneira pode ser utilizada para medir sinais flutuantes, sendo para isto necessário mover o interruptor localizado abaixo do conector do canal AI para a posição de fonte flutuante, denominada FS (NATIONAL INSTRUMENTS, c1998-2003). A figura 43 ilustra este equipamento.

Figura 43 – Borneira da National Instruments modelo BNC-2110



1 Interruptor para fonte flutuante (FS) /
fonte referenciada (GS)
2 Conectores BNC

3 Blocos de terminais fixadores de parafusos
4 Blocos de terminais para I/O
5 Indicadores de luz

(fonte: NATIONAL INSTRUMENTS, c1998-2003, tradução nossa)

Conforme mencionado, através do cabo SHC68-68-EP, esta borneira foi conectada ao sistema de aquisição de dados, que consiste numa placa modelo NI DAQCard 6036E, de 16 bits, instalada dentro do computador utilizado. Ela atua numa faixa de entrada de -10 a $+10$ V (NATIONAL INSTRUMENTS, c2006). No experimento deste trabalho, esta placa foi regulada para uma faixa de entrada de -5 a $+5$ V, para maior precisão nos resultados. A figura 44 mostra esta placa.

Figura 44 – Placa modelo NI DAQCard 6036E

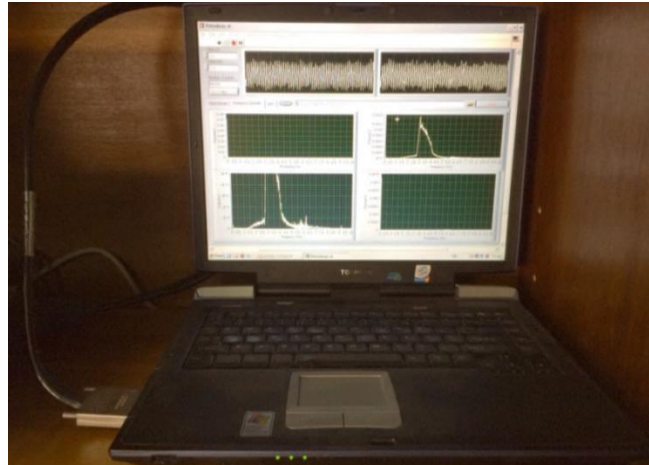


(fonte: NATIONAL INSTRUMENTS, c2006)

Os dispositivos de medição da National Instruments são um pacote com o software de aplicação, tais como Labview, LabWindows e Microsoft Visual Studio, para programação da medição nestes dispositivos. Estes softwares possuem uma interface de programação de aplicativos, que é uma biblioteca de funções, classes, atributos e propriedades para a criação de aplicativos para o dispositivo (NATIONAL INSTRUMENTS, c2003-2006).

Assim, para a leitura dos dados foi utilizado o Labview, que é uma linguagem de programação aplicada para medições. Assim, o sistema de aquisição de dados foi conectado computador. O Labview gerou os gráficos a partir das taxas e tempos de aquisição de dados estabelecidos ao longo dos ensaios. A figura 45 mostra o computador processando os dados.

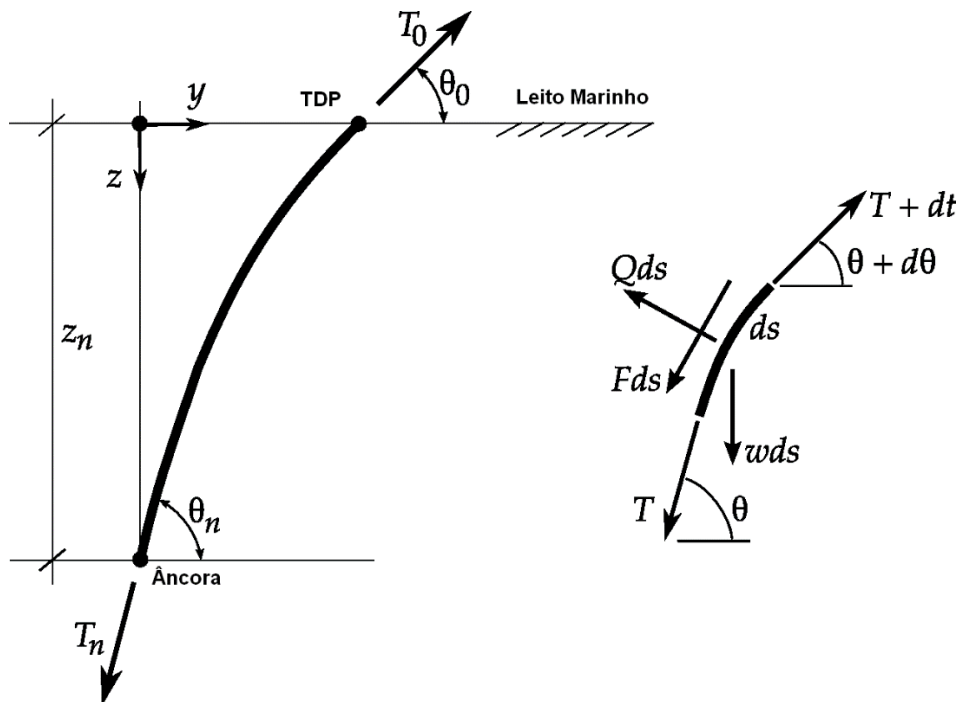
Figura 45 – Processamento de dados no Labview



(fonte: foto da autora)

7.2 ENSAIOS REALIZADOS

O procedimento experimental é explicado nos itens a seguir. Foi dividido na calibração do modelo, bem como nos ensaios estáticos e dinâmicos. Os ensaios tiveram como objetivo medir a força de entrada, no TDP, e a de saída, na âncora, conforme ilustrado na figura 46.

Figura 46 – Forças de entrada e saída na catenária⁸

(fonte: trabalho não publicado, tradução nossa)

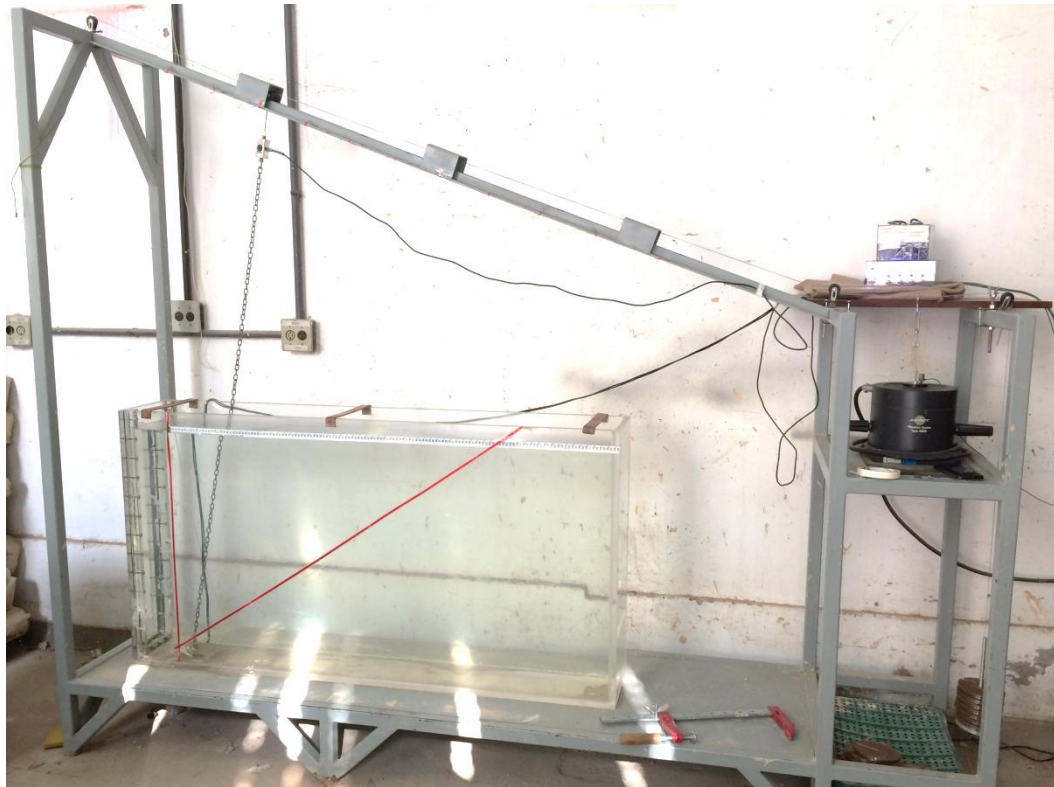
⁸ Figura fornecida pela Petrobras ao PPGE/UFRRGS que ilustra as forças na linha de ancoragem.

7.2.1 Calibração das células de carga com tanque com água

Antes da realização dos ensaios dinâmicos, foi necessário realizar a calibração das células de carga. Assim, foi possível buscar uma relação entre a força de tração aplicada e as tensões geradas pelas células. Para tanto, o tanque foi cheio de água até a altura de 72 cm.

A calibração das células de carga foi feita para os carregamentos estáticos apenas. Foram aplicadas cargas no suporte de pesos com a corrente posicionada em cada um dos ângulos, totalizando 12 posições para a corrente: 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50° e 55°. A figura 47 ilustra como o sistema foi montado para a calibração.

Figura 47 – Calibração das células de carga com tanque com água



(fonte: foto da autora)

Esta calibração consistiu na colocação de pesos de 1 kg no suporte para pesos a cada 20 s, até 14 kg serem colocados. Os pesos foram, então, retirados um a um, a cada 20 s, conforme sua colocação, até 0 kg. O carregamento de 14 kgf no modelo corresponde a 9000 kN no protótipo, que é superior à carga de projeto, conforme estabelecido no caso típico. A carga foi, portanto, majorada nos ensaios estáticos. A taxa de aquisição no Labview foi de 256 Hz e o tempo de aquisição foi de 600 s.

A calibração foi realizada somente estaticamente, pois, para 14 kgf aplicados verticalmente, a placa instrumentada da célula de carga do fundo do tanque deflete apenas 0,2 mm, conforme já mencionado, ou seja, é muito rígida. Esta rigidez garante a inexistência de efeitos ressonantes para a faixa de frequências que foi estudada nos ensaios. Além disso, o amplificador adotado garante resposta linear em frequências de até 100 Hz, que também é bastante superior às frequências adotadas nos ensaios. Desta forma, tornou-se possível descartar a calibração dinâmica.

7.2.2 Preparação da mistura argilosa

Para os ensaios serem realizados foi necessário encher o tanque com a mistura que simulou o leito marinho. Para tanto, foi escolhida uma mistura com 85% de caulim, 15% de bentonita com 120% de umidade. Foi utilizado um misturador de eixo vertical, para a preparação desta argila. A figura 48 ilustra este misturador.

Figura 48 – Misturador



(fonte: foto da autora)

Cada mistura foi feita com 25,5 kg de caulim, 4,5 kg de bentonita e 33 kg de água. A bentonita e caulim foi misturada em uma bacia antes de ser lançada no misturador, e inicialmente foram adicionados apenas 20 kg deste material na betoneira, juntamente com parte da água, para que fosse mais fácil de homogeneizar a mistura. Em seguida, o restante do material foi inserido no equipamento. Foi utilizada uma pá do laboratório para auxiliar na mistura do material.

Para cada mistura realizada foram recolhidas três amostras para análise do teor de umidade. Estas amostras foram pesadas e colocadas no forno durante no mínimo 24 horas. O procedimento foi realizado de acordo com a NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986). A variação aceitável do teor de umidade da mistura adotada foi de 5%.

O sistema foi preparado com a corrente posicionada a 0° , e a cada mistura, o material era retirado da betoneira e lançado com força no tanque. Este procedimento foi feito com a mão, para que houvesse o menor teor de vazios possível. Para o enchimento do tanque foram realizadas seis misturas, totalizando 378 kg de solo.

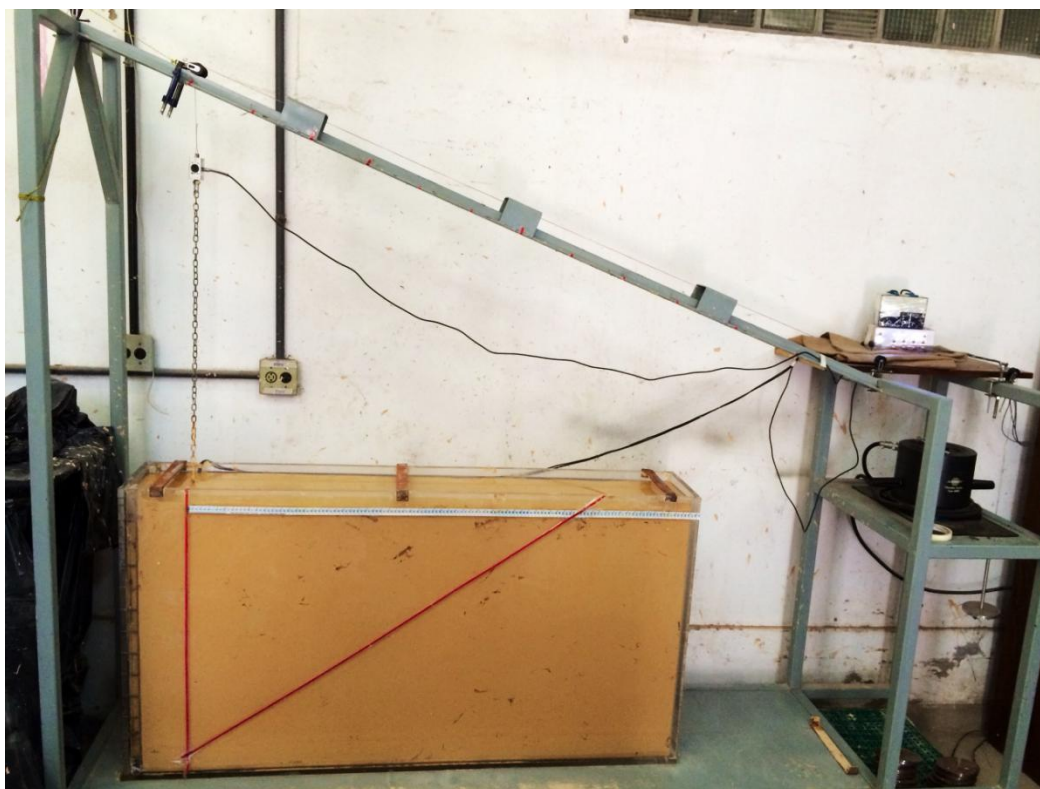
O tanque foi preenchido com solo a uma altura de 72 cm e foi colocada uma lâmina d'água sobre ele para que o teor de umidade não fosse perdido. Os ensaios foram realizados após, no mínimo, 24 horas do enchimento do tanque.

7.2.3 Ensaios de carregamento estático e dinâmico

Com a corrente posicionada a 0° foram iniciados os ensaios de tração para carregamentos estáticos e dinâmicos. Eles foram realizados em sequência: primeiro estático, depois dinâmico e, após isso, a corrente era ajustada para a posição do próximo ângulo. Novamente foram feitas medições para as 12 posições para a corrente: 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° e 55° .

Ao final de cada ensaio estático, foi medida a posição da corrente no TDP, através da régua fixada na lateral do tanque. O procedimento foi repetido com duas faixas de aceleração para a mesa vibratória diferentes, a fim de ser encontrado o resultado mais coerente. A figura 49 ilustra como o sistema foi montado para o ensaio.

Figura 49 – Tanque preenchido com solo para realização dos ensaios



(fonte: foto da autora)

7.2.3.1 Primeiro ensaio de carregamento estático e dinâmico

O primeiro ensaio aconteceu depois de um dia que a mistura havia sido feita e colocada no tanque. O teor de umidade de referência era 120% e o obtido pelas amostras foi de 125,2%.

O primeiro ensaio para carregamentos estáticos consistiu na colocação de pesos de 1 kg no suporte para pesos a cada 20 s, até 14 kg serem colocados. Os pesos foram, então, retirados um a um, a cada 20 s, conforme sua colocação, até 10 kg. Este procedimento foi feito, com colocação de carga ângulo a ângulo para a formação da catenária inversa no solo. O carregamento de 14 kgf no modelo corresponde a 9000 kN no protótipo, conforme já citado. O descarregamento foi feito até os 10 kgf, que são equivalentes a 6400 kN no protótipo (carga dentro da faixa utilizada para o projeto). A taxa de aquisição no Labview foi de 256 Hz e o tempo de aquisição foi de 360 s.

O ensaio de carregamentos dinâmicos foi feito na sequência dos carregamentos estáticos, em cada uma das 12 posições. Assim, as medições foram feitas inicialmente com a carga de 10 kgf sobre o suporte de pesos e depois foram retirados os pesos até que 7 kgf estivessem sobre o suporte, e novamente foram feitas as medições de cargas dinâmicas. Estas cargas foram

escolhidas pois correspondem a 6400 e 4480 kN, respectivamente, no protótipo, e, de acordo com a figura 17 do caso típico, correspondem aproximadamente à carga nos picos e à carga média no TDP.

Em ambos os casos a mesa vibratória introduziu frequências de 1 a 8 Hz, programada em 7 níveis, e foi feita a varredura no sentido decrescente, de 8 para 1 Hz, na taxa de 0,5 oct/min. A frequência mínima adotada foi de 1 Hz por corresponder ao pico do caso típico, conforme já mencionado. A frequência máxima adotada no experimento foi de 8 Hz, que, de acordo com o quadro 3, corresponde a 1,28 Hz no protótipo, cobrindo a faixa até 0,5 Hz fornecida pelo caso típico da figura 17. A varredura decrescente foi escolhida por proporcionar resultados mais estáveis do que a crescente nos testes. A aceleração foi programada em 7 níveis, variando de 0,25 a 12,19 m/s² conforme a varredura de frequências. Assim, de acordo com a fórmula 9, foi produzida uma amplitude relativamente constante na mesa vibratória variando até aproximadamente 4,82 mm. A tabela 1 mostra esta variação de aceleração em relação às frequências.

Tabela 1 – Variação de aceleração de 0,25 a 12,19 m/s² durante varredura de frequências

Frequência (Hz)	Aceleração (m/s ²)
1 – 2	0,25
2 – 3	0,99
3 – 4	2,24
4 – 5	3,98
5 – 6	6,22
6 – 7	8,95
7 – 8	12,19

(fonte: elaborado pela autora)

A taxa de aquisição de dados no Labview para os carregamentos dinâmicos também foi de 256 Hz e o tempo de aquisição foi de 360 s. A taxa do compressor foi fixada em 1dB/s/Hz, para evitar ressonância e diminuir variabilidade da aceleração.

7.2.3.2 Segundo ensaio de carregamento estático e dinâmico

O segundo ensaio aconteceu depois de três dias que a mistura havia sido feita e colocada no tanque. O teor de umidade de referência era 120% e o obtido pelas amostras foi de 125,2%.

Este ensaio foi realizado de forma exatamente igual ao primeiro, com todos os parâmetros mantidos inalterados. A diferença deste ensaio foi a aceleração foi programada em 7 níveis, variando de 0,12 a 6,09 m/s², ao longo da varredura de frequências. Portanto, de acordo com a fórmula 9, foi produzida uma amplitude na mesa vibratória variando até aproximadamente 2,41 mm. A tabela 2 mostra esta variação de aceleração em relação às frequências.

Tabela 2 – Variação de aceleração de 0,12 a 6,09 m/s² durante varredura de frequências

Frequência (Hz)	Aceleração (m/s ²)
1 – 2	0,12
2 – 3	0,5
3 – 4	1,12
4 – 5	1,99
5 – 6	3,11
6 – 7	4,48
7 – 8	6,09

(fonte: elaborado pela autora)

7.2.4 Observações importantes sobre a calibração e os ensaios

Durante os ensaios e durante a calibração, a sensibilidade informada no aparelho que controla a vibração é de 2,91pC/m/s², assim, o erro percentual de sensibilidade é igual a 7,3%. Além disso, para os ângulos de 10° e 30°, os resultados dos ensaios dinâmicos podem ter interferência do cabo utilizado para fixar as polias, uma vez que a estrutura impossibilitava a colocação de sargentos nestes ângulos.

Para os ângulos entre 40 e 55°, ocorreu bastante vibração lateral da corrente para frequências na faixa de 8 a 7 Hz. Com a vibração excessiva da corrente, ocorre a erosão na parte interior e

deposição da argila na parte exterior da corrente. Na repetição dos ensaios, foi refeito o ensaio da parte estática no ângulo de 15° , pois o sistema de colocação de peso deslizou no momento da colocação das cargas.

Foi realizado um terceiro ensaio, somente estático, depois de um dia que a mistura havia sido feita e colocada no tanque. O teor de umidade de referência era 120% e o obtido pelas amostras foi de 122,48%.

8 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS

O processamento dos dados gerados pelo Labview para a análise dos resultados dos ensaios foi feito através do Octave, que é uma linguagem de alto nível com um ambiente interativo para a computação numérica, desenvolvimento de algoritmos, visualização e análise de informações e criação de modelos. Primeiramente foram analisados os dados obtidos na calibração, sendo que, a partir destes, foi gerada uma matriz que foi inserida nos *scripts* que analisaram os dados dos ensaios com o solo. Estes *scripts* foram desenvolvidos pelo Professor Marcelo Rocha, e a sua explanação segue nos próximos itens.

8.1 MATRIZ DE CALIBRAÇÃO PARA OS ENSAIOS

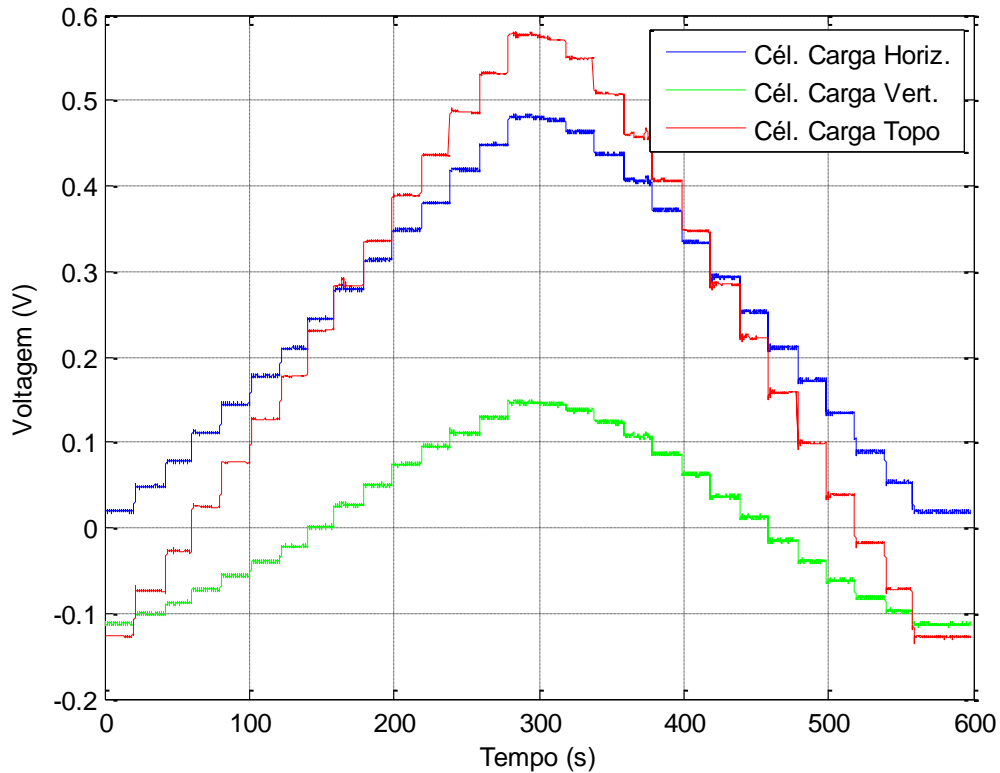
A matriz de calibração para os ensaios foi gerada a partir do processamento dos dados da calibração estática. Para a análise dos resultados da calibração, o *script* do Octave chamou todos os arquivos gerados pelo Labview no ensaio com o tanque cheio d'água, na ordem em que foi feito o carregamento (de 0 até 14 kgf) e, após isto, o descarregamento total. Em seguida, o programa zerou a tabela geral com estes dados e fez um *loop* sobre todos os ângulos que foram ensaiados, de 0° a 55°.

O registro de cada lote foi carregado e foi gerada a curva de calibração, filtrando os dados. Para isto, foi utilizado um comando chamado *BandPass*, que é um filtro numérico dentro do domínio da frequência. A banda de frequência permitida foi uma faixa entre dois intervalos determinados, que, no caso, foi de 0 a 10 Hz, sendo considerados como zero todos os valores de densidade espectral fora desta faixa permitida. Após isto, foi feita a retro-transformação para o domínio tempo.

Assim, para cada uma das células de carga, foi obtido o valor da voltagem lida em função do tempo de 600 s de duração da calibração estática. Esta voltagem varia de acordo com a colocação da carga no modelo, apresentando patamares para cada peso no carregamento e descarregamento. A célula de carga horizontal e vertical corresponde às duas componentes da célula de carga do fundo do tanque, enquanto a célula de carga do topo corresponde à célula de carga da superfície. Este procedimento foi realizado para os 12 ângulos de inclinação de

linha de ancoragem possíveis no modelo. O gráfico gerado ilustra a forma como os resultados se comportam para o ângulo de 55° , conforme a figura 50.

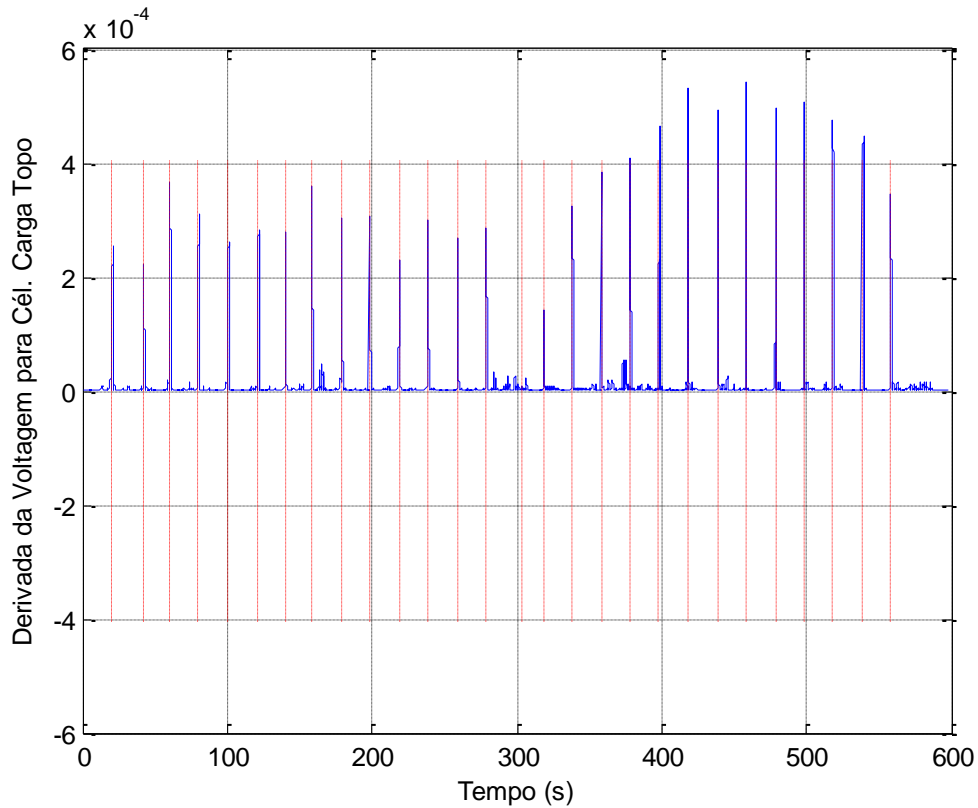
Figura 50 – Curva de calibração estática (para ângulo de 55°)



(fonte: elaborado pela autora)

Em seguida, para a determinação dos pontos de mudança de carregamento foi calculada a derivada da função para a célula de carga da superfície. Também foi utilizado um comando chamado *SqrWindow*, que suaviza as séries temporais por um procedimento com um número ímpar de passos de tempo. Desta forma, foram gerados os picos que correspondem exatamente à mudança de carga no sistema, a cada 20 s. O procedimento foi realizado para cada ângulo. O gráfico da figura 51 ilustra os resultados para o ângulo de 55° .

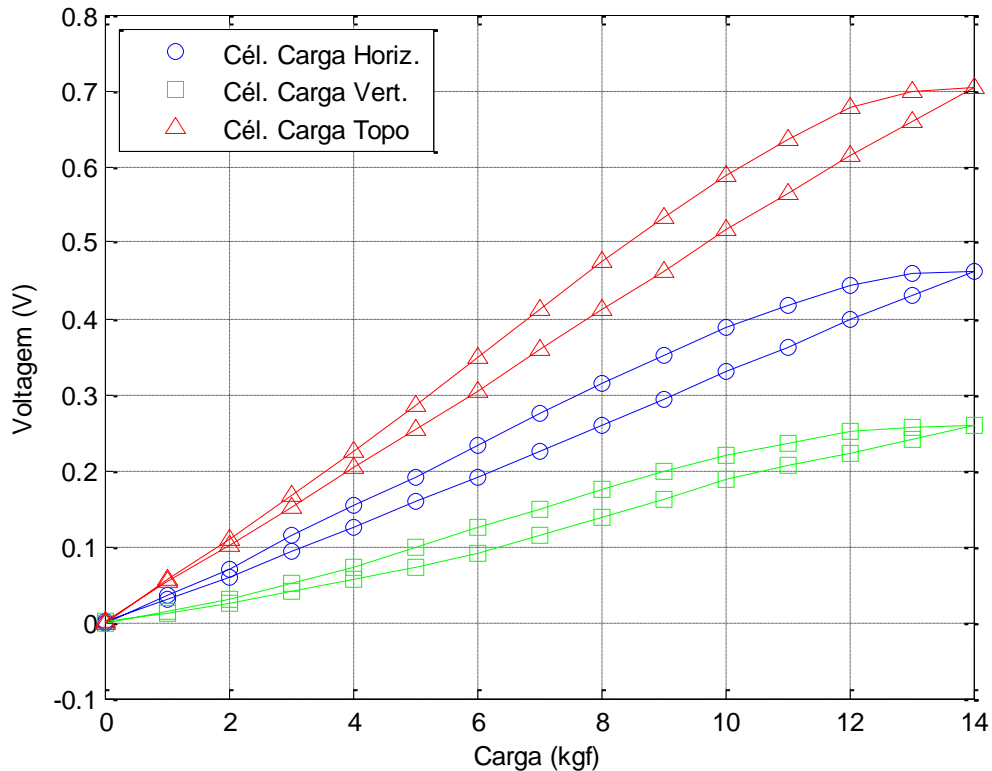
Figura 51 – Registro de picos na colocação de cargas na calibração estática
(para ângulo de 55°)



(fonte: elaborado pela autora)

Para a preparação da tabela de calibração, foi feita a média dos valores encontrados entre os picos anteriormente definidos. Esta média foi calculada para um intervalo presente entre cada pico com uma margem de 3 segundos, ou seja, com início 3 segundos após o fim de um pico e fim 3 segundos antes no início do próximo pico. Estas médias de voltagem foram associadas às respectivas cargas aplicadas no modelo neste intervalo de tempo, e os dados foram ajustados para que o valor inicial de voltagem de cada célula de carga passasse pela origem. Os valores foram plotados para cada ângulo em que foi realizado o ensaio e o gráfico da figura 52 ilustra os resultados para o ângulo de 55°.

Figura 52 – Tabela de calibração estática (para ângulo de 55°)



(fonte: elaborado pela autora)

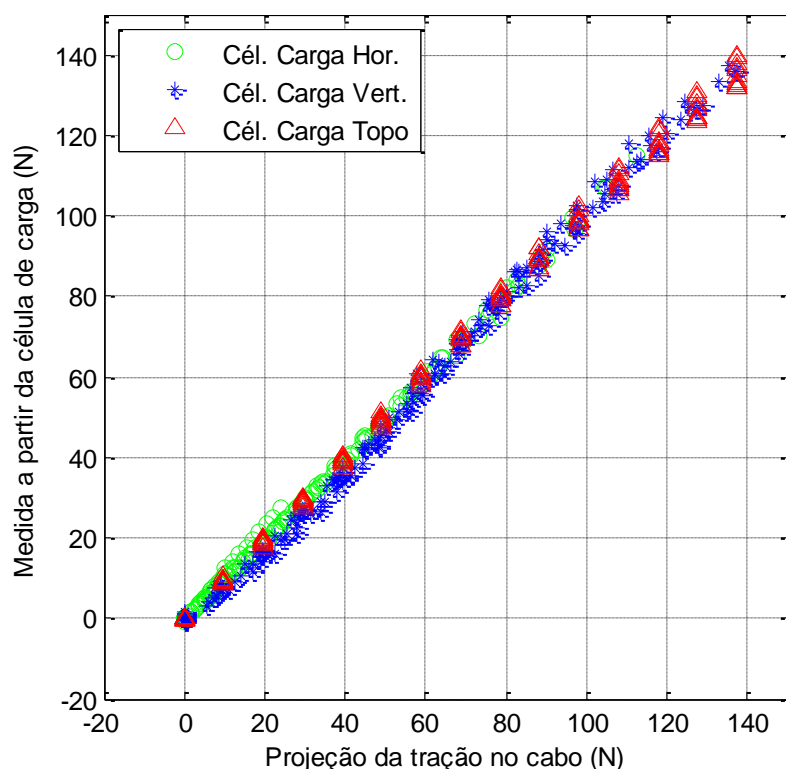
Por fim, foi realizado o ajuste da matriz de calibração. Foi utilizado o comando *optimset*, que cria uma estrutura de opções de otimização, juntamente com o *MaxFunEvals*, que especifica o número máximo permitido de avaliações de uma função. A matriz de calibração foi gerada na fórmula 10 e, quando multiplicada pelos valores lidos, foi plotada no gráfico da figura 53:

$$M = \begin{matrix} 0,2545 & -0,0097 & 0 \\ -0,0435 & 0,3843 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1986 \end{matrix} \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

M = matriz de calibração estática (adimensional).

Figura 53 – Ajuste da matriz de calibração estática



(fonte: elaborado pela autora)

A matriz de calibração foi estruturada para que, através dela, as componentes das forças fossem lidas de forma independente uma da outra. Assim, as duas primeiras colunas da matriz da fórmula 10 correspondem aos valores de calibração para a componente vertical e horizontal das forças aplicadas na célula de carga do fundo, respectivamente, enquanto a terceira coluna corresponde aos valores de calibração para as forças na célula de carga do topo.

Na célula de carga do fundo, as componentes verticais e horizontais do carregamento geram deformações diferentes na placa. Entretanto, mesmo com uma distribuição das pontes de *Wheatstone* que favoreceu a medição das deformações de maneira independente para cada componente de carga, ainda houve uma pequena interferência nos resultados, que necessitou ser corrigida. Esta interferência aparece na segunda linha da primeira coluna e na primeira linha da segunda coluna da matriz na fórmula 10. A célula de carga da superfície, por sua vez, é totalmente independente, e por isso, não existe nenhuma interferência nos valores lidos nela e, conseqüentemente, nenhuma correção precisou ser feita.

Esta matriz foi multiplicada pelos valores lidos com carga subtraídos dos valores lidos sem carga. Assim, foram obtidas as forças em cada célula de carga corretamente, conforme demonstrado.

8.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

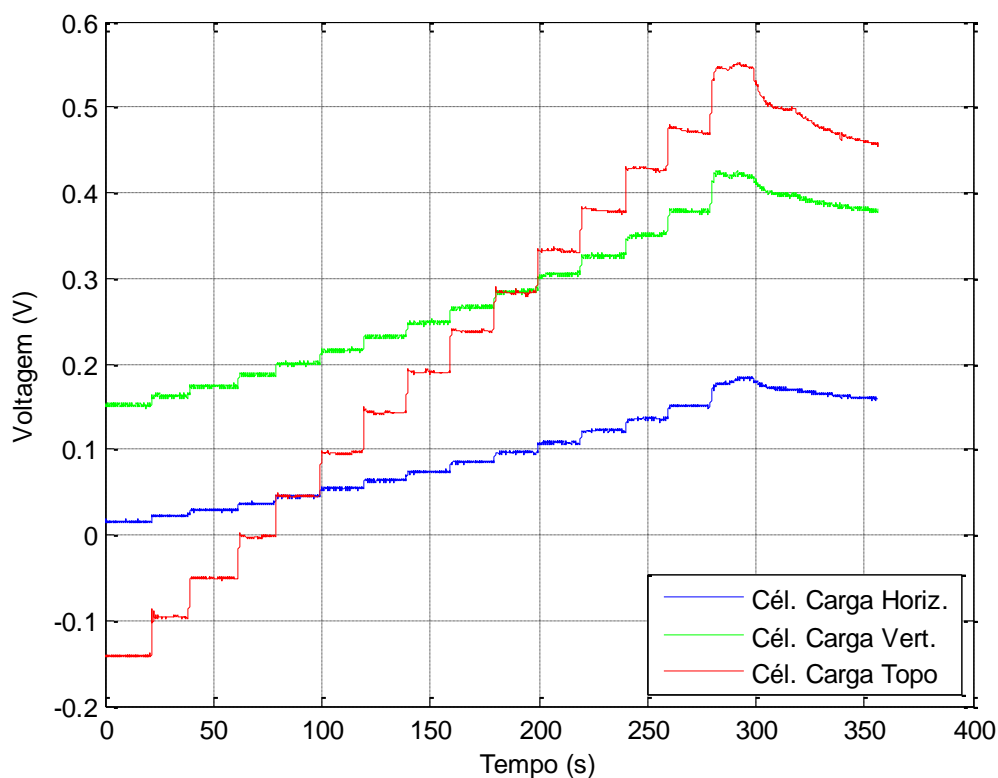
Os resultados dos ensaios foram divididos para o caso estático e dinâmico. Assim, conforme descrito anteriormente, os ensaios dinâmicos foram realizados para as cargas de 7 e 10 kgf, e foram repetidos com a aceleração entre 0,25 e 12,19 m/s² e entre 0,12 a 6,09 m/s². Os resultados seguem nos próximos itens.

8.2.1 Resultados dos ensaios estáticos

Para a análise dos resultados de cada ensaio estático, assim como na calibração estática, o *script* do Octave chamou todos os arquivos gerados pelo Labview no ensaio com o tanque cheio de solo, na ordem em que foi feito o carregamento (de 0 até 14 kgf) e descarregamento (de 14 até 0 kgf). Foi inserida neste momento a matriz de calibração estática. Após isto, o programa zerou a tabela geral e fez um *loop* sobre todos os ângulos que foram ensaiados.

O registro de cada lote foi carregado e o arquivo de zeros, utilizado como referência, foi gerado. Foi utilizado o comando *BandPass* como filtro numérico dentro do domínio da frequência, cuja banda permitida foi fixada na faixa entre 0 e 10 Hz. Para cada uma das células de carga foi obtido o valor da voltagem lida em função do tempo de 360 s de duração do ensaio estático. Desta forma, novamente esta voltagem varia de acordo com a colocação da carga no modelo, apresentando patamares para cada peso colocado e retirado. Este procedimento foi realizado para os 12 ângulos de inclinação de linha de ancoragem possíveis no modelo. O gráfico gerado para um dos ensaios ilustra a forma como os resultados se comportam para o ângulo de 55°, conforme a figura 54.

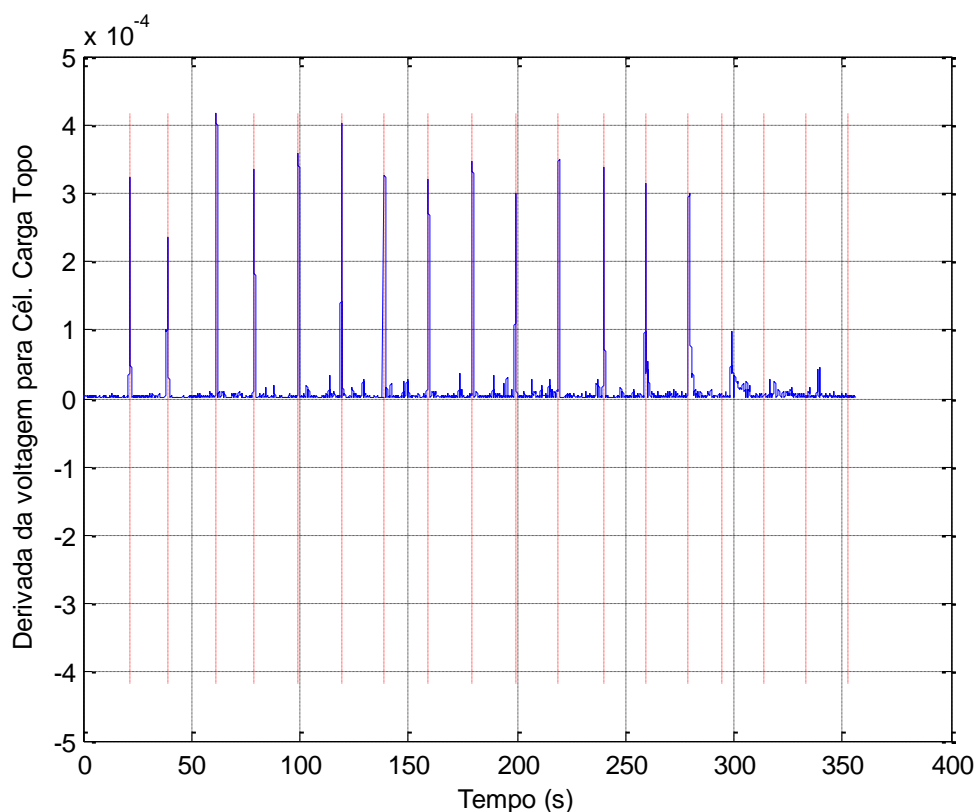
Figura 54 – Curva de um dos ensaios estáticos (para ângulo de 55°)



(fonte: elaborado pela autora)

Para a determinação dos pontos de mudança de carregamento, assim como na calibração estática, foi calculada a derivada da função para a célula de carga da superfície. A célula de carga da superfície é utilizada por ser considerada a de referência, pois a carga lida nela é integralmente a carga de entrada, sem qualquer atenuação do solo ser considerada. Foi utilizado o comando *SqrWindow* para suavização das séries temporais. Os picos gerados correspondentes aos momentos de mudança de carga são apresentados no gráfico da figura 55.

Figura 55 – Registro de picos na colocação de cargas em um dos ensaios estáticos (para ângulo de 55°)



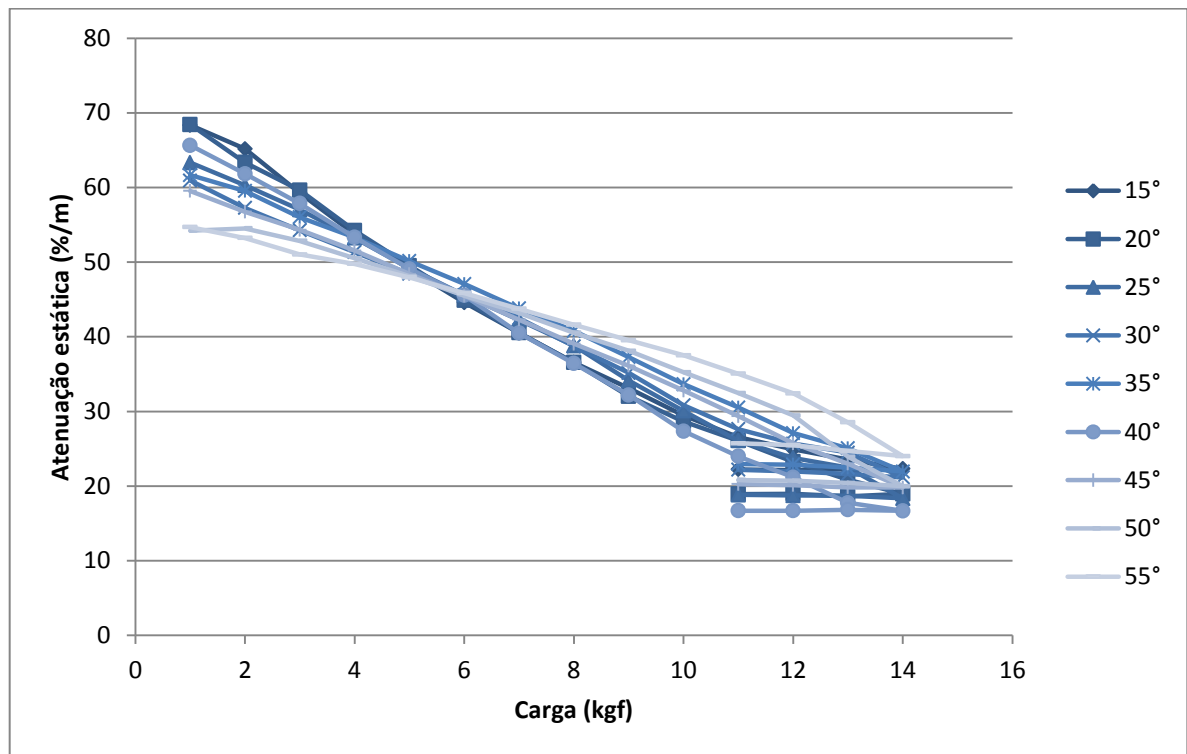
(fonte: elaborado pela autora)

Para a preparação da tabela de resultados, foi feita a média dos valores encontrados entre os picos. Assim como na calibração, esta média foi calculada para um intervalo presente entre cada pico com uma margem de 3 segundos. Estas médias de voltagem foram associadas, através da matriz de calibração, às cargas medidas por cada célula de carga, sendo que a do topo registra a totalidade da carga aplicada, pois ela não possui influência do solo. Para a determinação da carga total na célula de carga do fundo do tanque, foi calculada a raiz da soma dos quadrados de cada uma das componentes horizontais e verticais.

A atenuação, portanto, foi calculada como a diferença entre os valores de carga da célula do topo e do fundo do tanque dividida pelo valor de carga da célula do topo. Este valor foi multiplicado por 100 para fornecer a porcentagem de atenuação. Além disso, a atenuação obtida foi dividida pelo comprimento da catenária em cada ângulo. Para tanto, este comprimento foi aproximado à uma reta, com origem na célula de carga do fundo do tanque e término no valor medido de posição da ancoragem no TDP para cada ensaio, considerando-se a altura do solo de 72 cm.

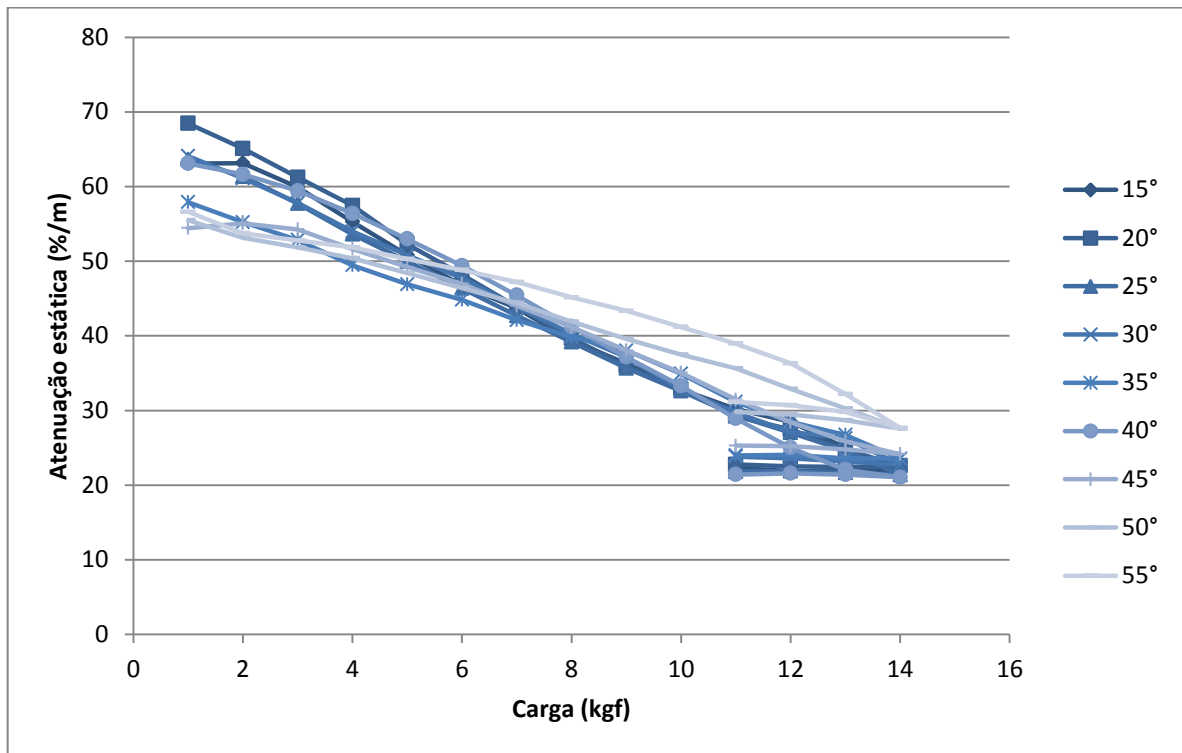
Foram realizadas três repetições para este ensaio. Os resultados para os ângulos de 0° a 10° foram desconsiderados, pois neste caso a corrente não permitiu que o solo se deformasse corretamente, não fornecendo a atenuação de forma coerente. Os valores de atenuação em porcentagem por metro de linha de ancoragem foram plotados em função de cada um dos ângulos (de 15° a 55°) e em função das cargas aplicadas, de acordo com as figuras 56 a 58.

Figura 56 – Atenuação estática por metro de catenária no primeiro ensaio estático



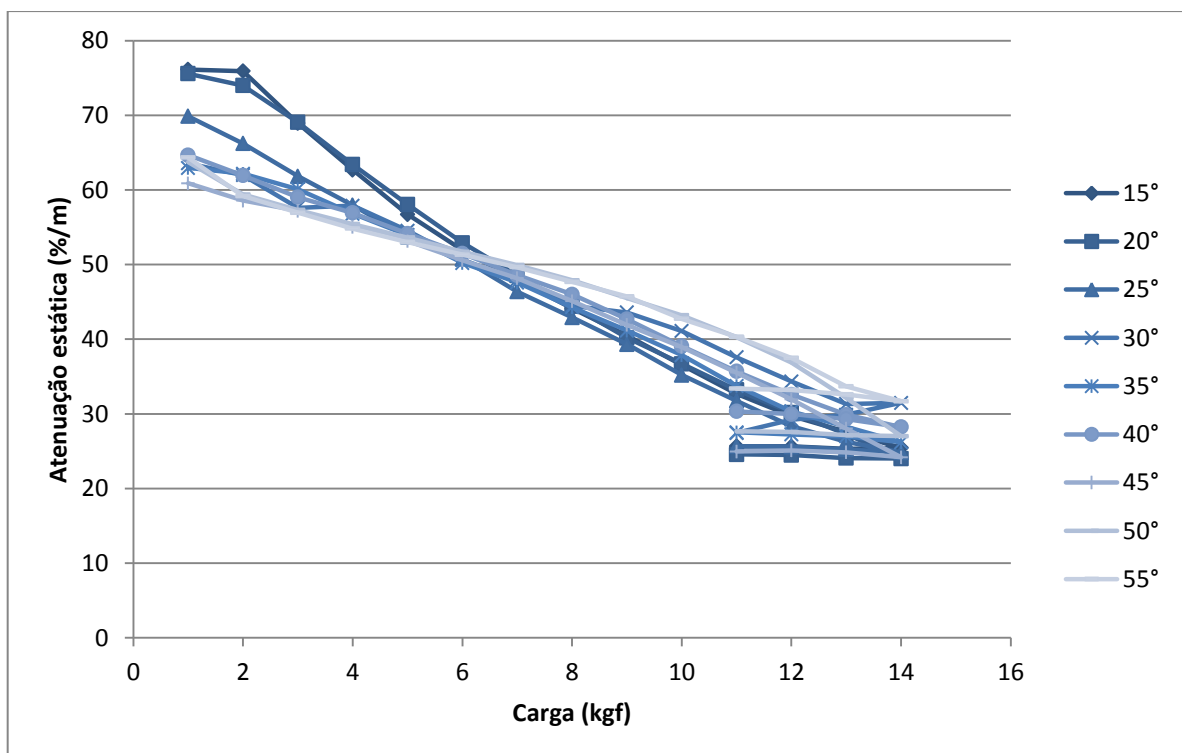
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 57 – Atenuação estática por metro de catenária no segundo ensaio estático



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 58 – Atenuação estática por metro de catenária no terceiro ensaio estático



(fonte: elaborado pela autora)

Os gráficos gerados permitiram relacionar a atenuação estática em função da carga aplicada no carregamento e descarregamento e do ângulo de inclinação da catenária. Assim, durante o carregamento do modelo, à medida que a carga aumenta, menor é a atenuação estática. Isto acontece porque o solo passa a resistir menos e se rompe, formando uma fenda e diminuindo, conseqüentemente, a atenuação. No descarregamento do modelo, os gráficos revelaram que a atenuação permanece razoavelmente constante até os 11 kgf lidos pelo sistema de aquisição de dados, variando, aproximadamente, entre 20 a 30% por metro de catenária. Isto acontece porque o solo já foi rompido, portanto não gera atenuações maiores no descarregamento.

Em relação ao ângulo de inclinação, o comportamento esperado era de que não houvesse variação da atenuação, já que esta foi discretizada por metro de linha de ancoragem. Os gráficos revelaram, porém, que para cargas menores a atenuação tende a ser maior para os ângulos menores, enquanto que para cargas maiores a atenuação tende a ser maior para os ângulos maiores. A variação, de acordo com os gráficos, alcançou até 10% de atenuação por metro de catenária. Este comportamento, um pouco discrepante do esperado, pode ter sido causado pela aproximação que foi feita para o cálculo do comprimento da catenária, uma vez que, neste, ela foi aproximada a uma reta, e não a uma catenária.

8.2.2 Resultados dos ensaios dinâmicos

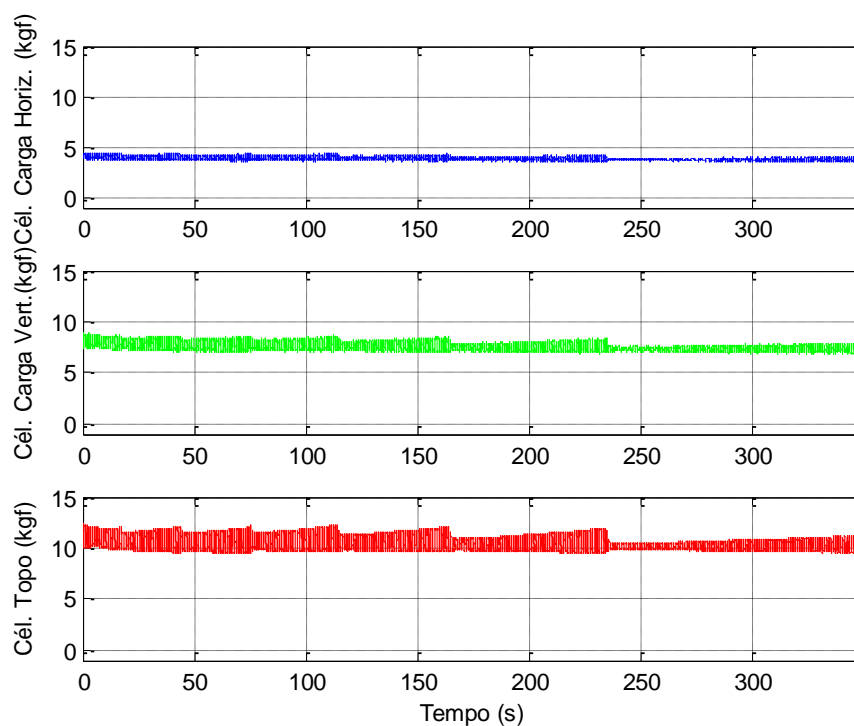
Os ensaios dinâmicos inicialmente foram analisados para a aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s². Assim, para cada uma das duas etapas (para 10 e 7 kgf), novamente os arquivos gerados pelo Labview foram chamados pelo *script* do Octave. Foi inserida a matriz gerada na calibração estática. Após isto, as tensões de referência, do arquivo de zeros criado pelo ensaio estático, foram lidas, e o programa zerou a tabela geral e fez um *loop* sobre todos os ângulos que foram ensaiados.

O registro de cada lote foi carregado, foi utilizado o comando *BandPass* como filtro, com banda permitida na faixa entre 0 e 10 Hz e para cada uma das células de carga foi obtido o valor da voltagem lida em função do tempo de 360 s de duração do ensaio dinâmico. Foi, então, extraída a tensão de referência e foi ajustada a escala.

Os dados foram plotados, registrando a carga lida em cada célula de carga em função do tempo de 360 s do ensaio dinâmico. Os gráficos gerados mostram os resultados obtidos para 10 e 7 kgf nas figuras 59 e 60. Este procedimento foi realizado para os 12 ângulos de

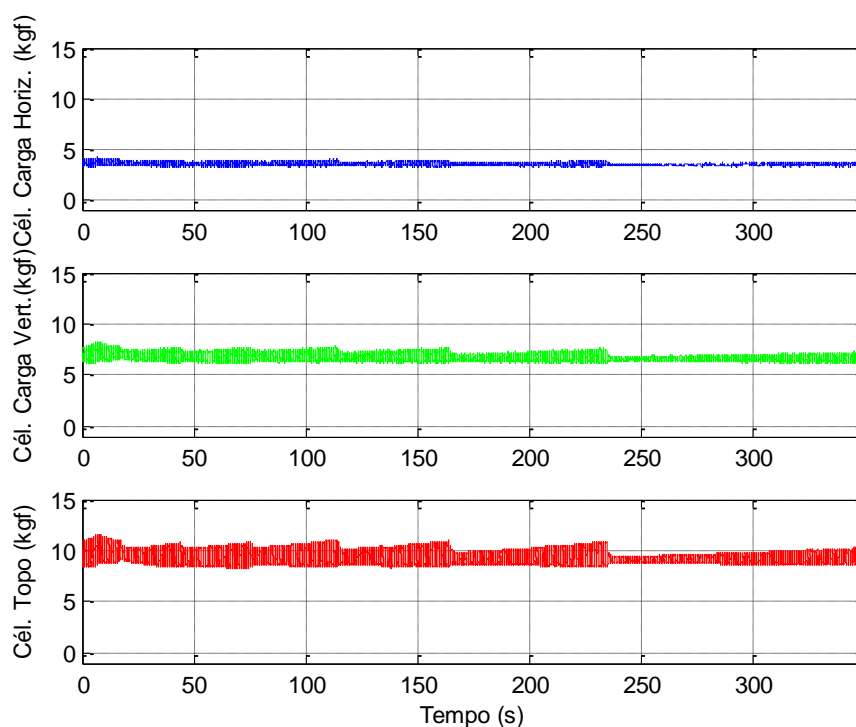
inclinação de linha de ancoragem possíveis no modelo. O gráfico gerado ilustra a forma como os resultados se comportam para o ângulo de 55° para um dos ensaios dinâmicos.

Figura 59 – Carga lida em cada célula durante ensaio dinâmico para 10 kgf (para ângulo de 55°) com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s^2



(fonte: elaborado pela autora)

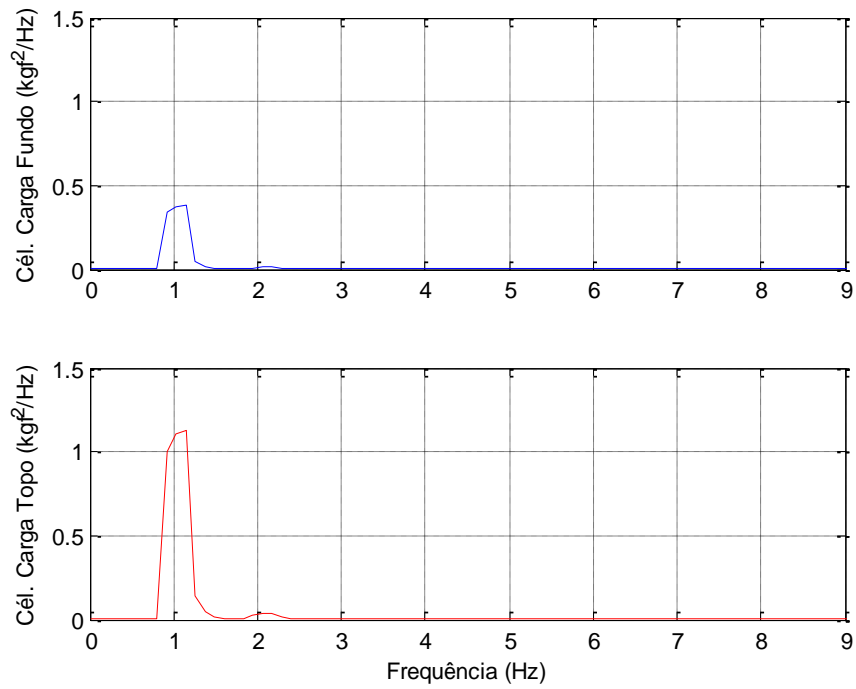
Figura 60 – Carga lida em cada célula durante ensaio dinâmico para 7 kgf (para ângulo de 55°) com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s²



(fonte: elaborado pela autora)

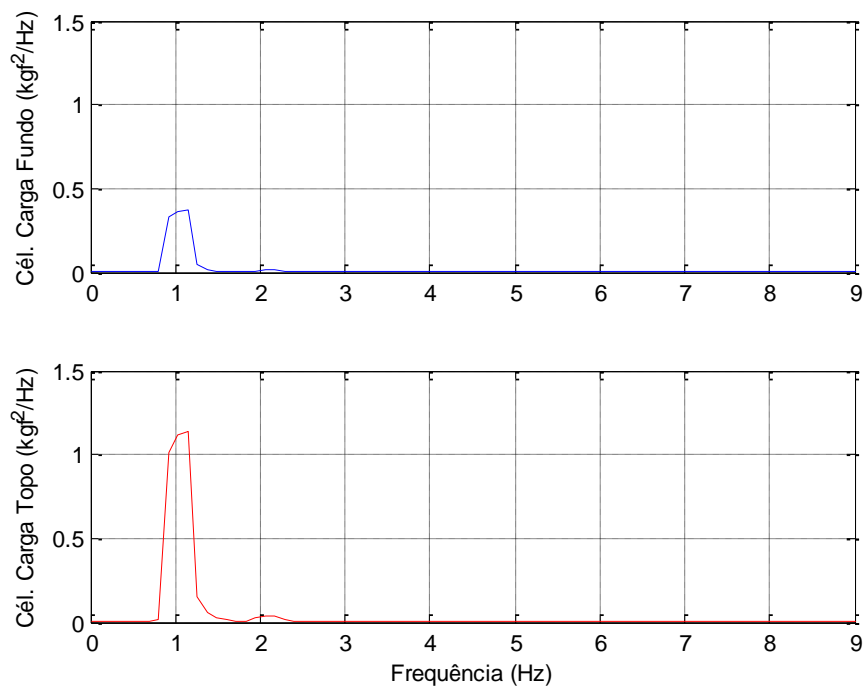
Em seguida, foi feita a análise no domínio frequência. Inicialmente foi calculada a tensão resultante na célula de carga do fundo do tanque, através da soma vetorial das duas componentes, vertical e horizontal. Após isto, foi utilizado o comando *SpectralDensity*, que estima o espectro de uma série temporal. Este comando cria, a partir de um vetor com o espectro das parcelas flutuantes de séries temporais, um vetor com o correspondente domínio de frequência, bem como a média e desvio padrão destas séries. A função retorna os ângulos de fase para cada frequência, de acordo com os resultados da transformada de Fourier. Foram utilizados 40 passos para a leitura dos dados. Os gráficos registram os pontos de pico de frequência para a resultante da célula de carga do fundo do tanque e para a célula de carga da superfície, que é a referência, de acordo com as figuras 61 e 62.

Figura 61 – Densidade espectral para cada célula durante ensaio dinâmico para 10 kgf (para ângulo de 55°) com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s²



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 62 – Densidade espectral para cada célula durante ensaio dinâmico para 7 kgf (para ângulo de 55°) com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s²

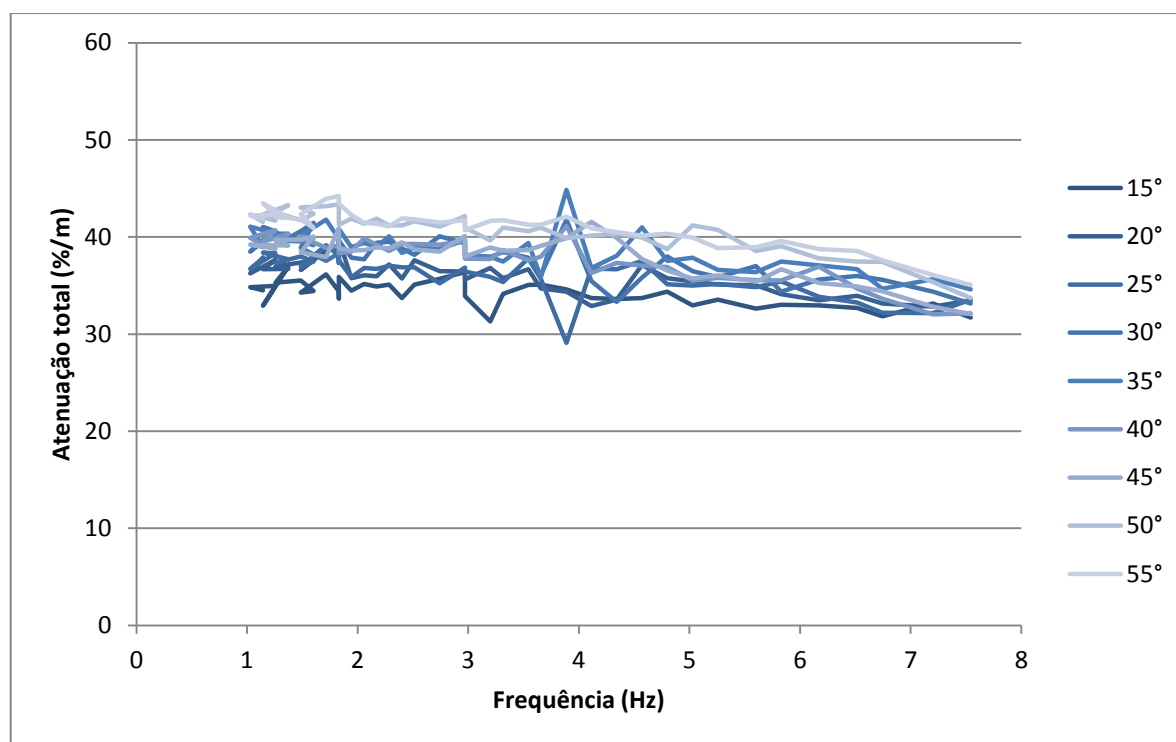


(fonte: elaborado pela autora)

Por fim, foi calculada, a partir da densidade espectral das duas células, a atenuação total gerada para cada ângulo do experimento. Esta atenuação foi dada em porcentagem pois não é possível manter a amplitude da carga constante durante a varredura. Isso implica que é possível apenas medir a atenuação relativa.

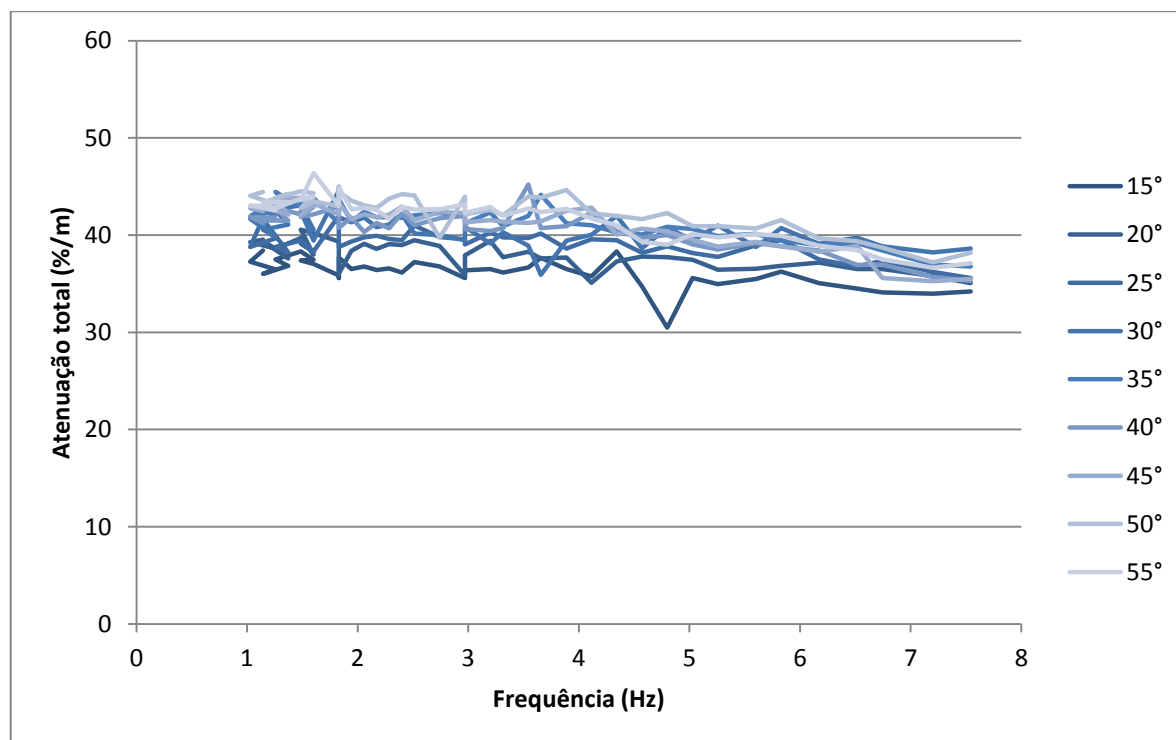
A atenuação obtida foi dividida pelo comprimento da catenária em cada ângulo, da mesma forma como foi feito para o ensaio estático. Os resultados para os ângulos de 0° a 10° também foram desconsiderados, para a obtenção de resultados mais coerentes para a atenuação. Assim, para os ângulos de 15° a 55° , os gráficos gerados mostram os valores obtidos para 10 e 7 kgf nas figuras 63 e 64.

Figura 63 – Atenuação total por metro de linha de ancoragem durante ensaio dinâmico para 10 kgf com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s²



(fonte: elaborado pela autora)

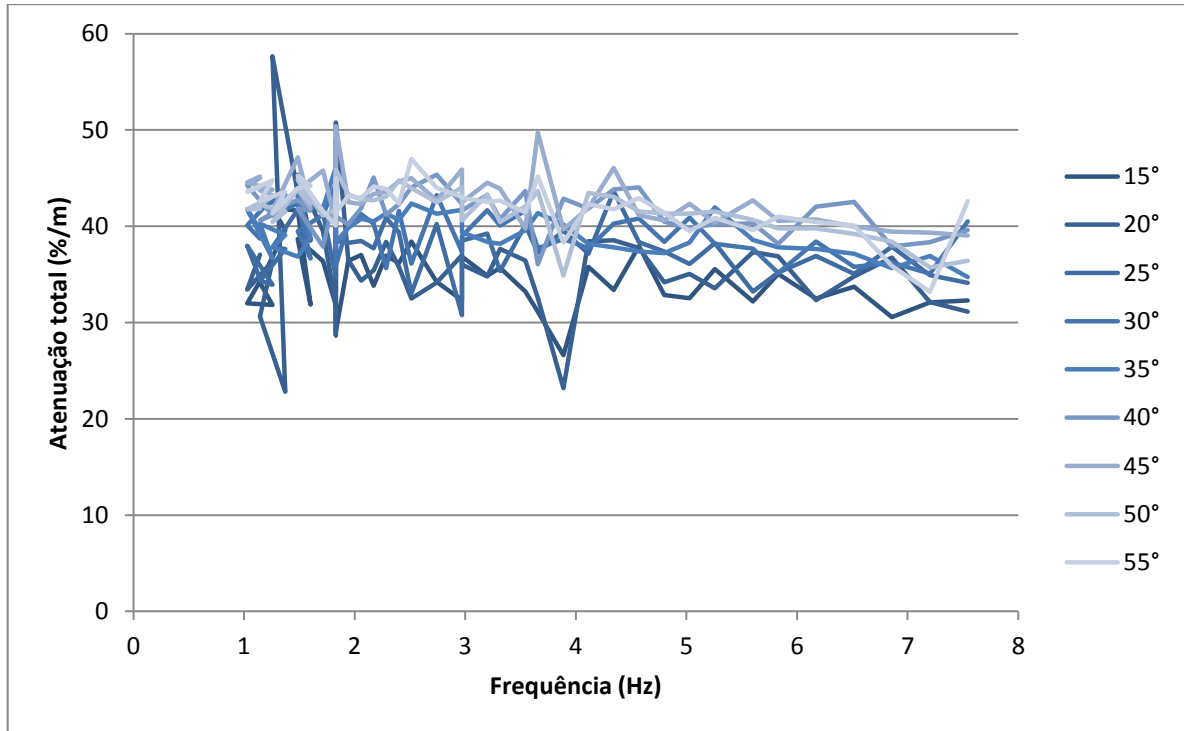
Figura 64 – Atenuação total por metro de linha de ancoragem durante ensaio dinâmico para 7 kgf com aceleração entre 0,25 a 12,19 m/s²



(fonte: elaborado pela autora)

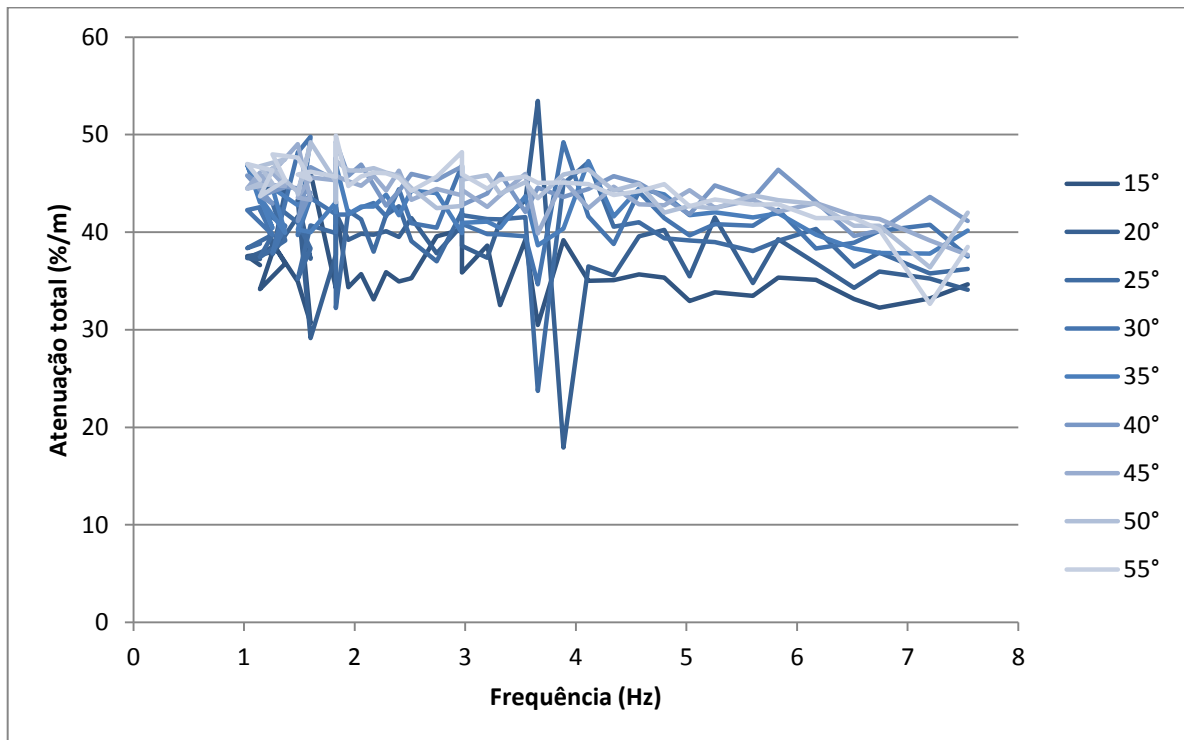
O processamento dos dados do ensaio dinâmico para 10 e 7 kgf para a aceleração entre 0,12 a 6,09 m/s² foi feito exatamente da mesma forma que o anterior. Os resultados para atenuação total neste caso são apresentados nas figuras 65 e 66.

Figura 65 – Atenuação total por metro de linha de ancoragem durante ensaio dinâmico para 10 kgf com aceleração entre 0,12 a 6,09 m/s²



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 66 – Atenuação total por metro de linha de ancoragem durante ensaio dinâmico para 7 kgf com aceleração entre 0,12 a 6,09 m/s²



(fonte: elaborado pela autora)

Os gráficos gerados permitiram relacionar a atenuação total, que é a soma entre a atenuação estática com a dinâmica, em função das frequências de vibração aplicadas e em função das amplitudes utilizadas na mesa vibratória. A atenuação total gerada oscilou aproximadamente entre 35 e 45% por metro de catenária nos ensaios analisados, tanto para 10 quanto para 7 kgf. Os resultados de atenuação estática no descarregamento foram extrapolados para 10 e 7 kgf (uma vez que os ensaios dinâmicos foram realizados durante a descarga), correspondendo, conforme mencionado anteriormente, a valores entre 20 e 30% por metro de catenária. Foi observado, portanto, um aumento de aproximadamente 15% na atenuação total quando foi incrementada a atenuação dinâmica.

Os gráficos revelaram que não existe uma variação considerável de atenuação em função das frequências aplicadas. Foi verificado apenas um pequeno efeito da viscosidade a partir de 4 Hz, diminuindo gradativamente a atenuação total, até 8 Hz, para valores entre 30 e 40% por metro de catenária aproximadamente. Com relação às amplitudes de vibração, não houve interferência nos resultados, porém as maiores amplitudes para a mesa vibratória, quando a aceleração variou entre 0,25 a 12,19 m/s², proporcionaram resultados com menor interferência.

9 CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado, o objetivo da pesquisa foi atingido. A reação do solo entre as forças dinâmicas de entrada e saída no trecho de catenária inversa em função das frequências de vibração aplicadas na linha de ancoragem resulta numa atenuação total entre, aproximadamente, 35 e 45% por metro de catenária. Para frequências superiores a 4 Hz, foi constatada uma leve e gradativa redução para a atenuação total, que diminui, até 8 Hz (que correspondem a 1,28 Hz no protótipo, de acordo com o quadro 3), para valores entre 30 e 40% por metro de catenária aproximadamente.

A hipótese do trabalho era de que as forças dinâmicas de entrada seriam superiores às de saída neste trecho, em função das frequências de vibração aplicadas na linha de ancoragem, devido à atenuação, que é dependente da resistência ao cisalhamento do solo, e que esta diferença entre as forças seria menor à medida que as flutuações de carga fossem mais rápidas, devido aos efeitos dinâmicos de viscosidade. Esta hipótese foi parcialmente atendida, uma vez que, de fato, houve atenuação dinâmica, já que a atenuação estática resultou em valores entre 20 a 30% por metro de catenária, sugerindo que a atenuação dinâmica soma em aproximadamente 15% à atenuação estática. Além disso, a atenuação possui relação com a resistência ao cisalhamento do solo, uma vez que decresce com o aumento de carga, conforme revelaram os resultados para os ensaios de atenuação estática.

Os efeitos dinâmicos de viscosidade, no entanto, foram praticamente inexistentes, já que a atenuação total observada manteve-se praticamente constante, apresentando apenas um pequeno decréscimo com o aumento das frequências. A viscosidade, além disso, conforme mencionado, está fora de escala, mantendo uma proporção de aproximadamente 1:1, diferentemente da escala de 1:253 determinada pelo quadro 3. Assim, se o efeito da viscosidade foi insignificante no modelo, dividindo-se este efeito por 253 no protótipo, ele passa a ser desprezível. Desta forma, o modelo se aproxima bastante ao rígido-plástico.

Os resultados levam à conclusão de que existe um efeito dinâmico provavelmente não ocasionado pela frequência, que gerou o incremento de aproximadamente 15% nos valores de atenuação, quando foi introduzida carga oscilante. Um fato a ser observado foi de que a atenuação dinâmica possui a mesma grandeza de valores que a atenuação estática no

carregamento para 10 kgf. Portanto, outra possibilidade de conclusão é de que exista alguma relação entre a atenuação dinâmica com a atenuação estática no carregamento, em vez do descarregamento. Estes efeitos precisam ser estudados para que conclusões mais aprofundadas sejam alcançadas no estudo de atenuação dinâmica, proporcionando, desta forma, a elaboração de projetos de estacas que otimizem resistência e custo.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C. S. de. **Análise da interação solo-estrutura de âncoras do tipo torpedo para plataformas offshore**. 2011. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- ALVES FILHO, C. E. S. **Correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos de argilas compressíveis com utilização do penetrômetro dinâmico leve**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. **NBR 6502**: rochas e solo. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 10905**: ensaios de palheta in situ – método. Rio de Janeiro, 1989.
- BARENBLATT, G. I. **Dimensional analysis**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1987.
- BARONI, M. **Investigação geotécnica em argilas orgânicas muito compressíveis em depósitos da Barra da Tijuca**. 2010. 249 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- BRÜEL & KJAER. **Power amplifier type 2712**. [S. l.: s. n.], July 1977.
- _____. **PM vibration exciter type 4808 – user manual**. Naerum: Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S, June 2006.
- _____. **Sine-on-random vibration testing**. Naerum: [s. n.], [2008?].
- CARBONE, N. **Desenvolvimento de um novo algoritmo para análise viscoplástica com o método dos elementos de contorno**. 2007. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CARNEIRO, F. L. **Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1993.
- COGLIATI, B. **Modelos viscosos em mecânica dos solos: análise de uma equação visco-hipoplástica**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- COSTA, R. G. B. **Análise paramétrica das condições de ancoragem de plataformas offshore utilizando estacas torpedo a partir de modelos em elementos finitos**. 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

- ESCARPINI FILHO, R. dos. S. **Análise de estruturas de materiais compósitos viscoelásticos lineares através da teoria de volumes finitos**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2010.
- FARINA, L. C. **Caracterização viscoelástica por meio de ensaios de fluência e ruptura por fluência de compósitos poliméricos de matriz de resina epoxídica e fibra de carbono**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009
- FREIRE NETO, J. P. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade**. 2009. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotecnia) – Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- GAUER, E. A. **Influência da velocidade de rotação da mini-palheta na resistência de um solo siltoso**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- GOMES, H. M.; MARCHESI, T. Ajuste de modelos reológicos mecânicos no creep de polipropileno, poliestireno e policarbonato: comparação com o MEF. **Modelos reológicos mecânicos**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 65-83, mar. 2013.
- KUNITAKI, D. M. K. N. **Tratamento de incertezas no comportamento dinâmico de estacas torpedo para ancoragem de sistemas flutuantes na exploração de petróleo offshore**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- LOURENÇO, D. E. **Estudo de fenômenos de hidrojateamento em solos argilosos**. 2014. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- LANGHAAR, H. L. **Dimensional analysis and theory of models**. New York: John Wiley & Sons, 1951.
- MAIA, L. P. M. **Análise dimensional**. Rio de Janeiro: Nacionalista, 1960.
- MARQUES, S. P. C.; CREUS, G. J. **Computational Viscoelasticity**. Heidelberg: Springer, 2012.
- MEDEIROS JUNIOR, C. J. Low Cost Anchor System for Flexible Risers in Deep Waters. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 20., 2002, Houston. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2002. p. 1333-1337.
- MORAIS, J. M. de. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2013.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **Installation guide BNC-2110**. [S. l.]: National Instruments Corporation, c1998-2003.

_____. **DAQ Getting Started Guide [S. I.]**: National Instruments Corporation, c2003-2006.

_____. **Low-Cost E Series Multifunction DAQ – 12 or 16-Bit, 200 kS/s, 16 Analog Inputs. [S. I.]**: National Instruments Corporation, c2006.

ROCHA, C. C. M. **Atenuação de cargas estáticas em linhas de ancoragem**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. (trabalho a ser defendido no mês de agosto de 2014)

RANDOLPH, M. F.; GAUDIN, C.; GOURVENEC, S. M.; WHITE, D. J.; BOYLAN, N.; CASSIDY, M. J. Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments. **Ocean engineering**, Perth, v. 38, n. 7, p. 818-834, May, 2011.

SAGRILO, L. V. S.; SOUSA, J. R. M. de.; LIMA, E. C. P.; PORTO, E. C.; FERNANDES, J. V. V. A Study on the Holding Capacity Safety Factors for Torpedo Anchors. **Journal of Applied Mathematics**, v. 2012, p. 1-18, 2012.

SANTOS, J. P. L. **Análise de modelos reológicos viscoelásticos através de formulações mistas em elementos finitos**. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SONIN, A. A. **The physical basis of dimensional analysis**. 2nd ed. Cambridge, USA: Editora do MIT, 2001.

WALES, S.; SINCOCK, P.; SANTOSA, M. Impact of Catenary Embedment on the Mooring Performance of a Deep Water Floating Production Unit. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 21., 2011, Maui. **Proceedings...** Melbourne: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011. p. 163-169.