



**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS RADIER  
ESTAQUEADO EM SOLOS MOLES EM PROCESSOS DE ADENSAMENTO**

**EDGAR RODRIGUEZ RINCON**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS RADIER  
ESTAQUEADO EM SOLOS MOLES EM PROCESSOS DE ADENSAMENTO**

**EDGAR RODRIGUEZ RINCON**

**ORIENTADOR: RENATO PINTO DA CUNHA (UnB)**  
**COORIENTADOR: BERNARDO CAICEDO HORMAZA (U de Los Andes)**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO: GTD 119/16**  
**BRASÍLIA / DF: 20 de Maio/2016**

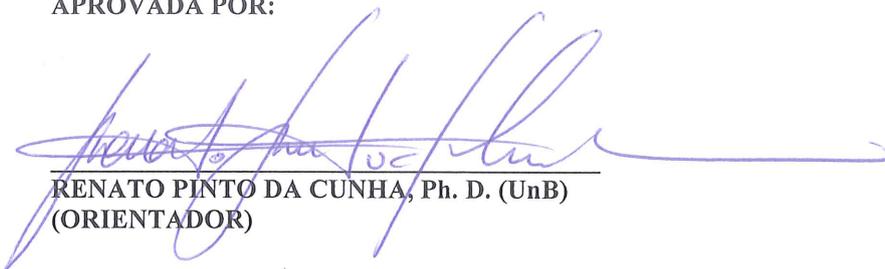
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
E AMBIENTAL

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS RADIER  
ESTAQUEADO EM SOLOS MOLES EM PROCESSOS DE ADENSAMENTO

EDGAR RODRIGUEZ RINCON

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM GEOTECNIA.

APROVADA POR:



RENATO PINTO DA CUNHA, Ph. D. (UnB)  
(ORIENTADOR)



MÁRCIO DE SOUZA SOARES DE ALMEIDA, Ph. D. (UFRJ)  
(EXAMINADOR EXTERNO)



WILSON CARTAXO SOARES, D. Sc. (COPESOLO - UNIPÊ)  
(EXAMINADOR EXTERNO)



GREGÓRIO LUIS SILVA ARAÚJO, D. Sc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)



JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, Ph. D. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 20 de maio de 2016.

## FICHA CATALOGRÁFICA

RINCON, EDGAR RODRIGUEZ.

Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento, Distrito Federal, 2016

xxiii, 237 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2016)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Sistemas radier estaqueado

2. Subsidência

3. Atrito negativo

4. Modelos Físicos em Centrífuga

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RINCON, E.R. (2016). Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-119/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 237 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Edgar Rodríguez Rincón

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento.

GRAU / ANO: Doutor / 2016

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

---

Edgar Rodríguez Rincón

SCLN 202 Bloco D – Apt 213 Asa Norte

CEP: 70832545 – Brasília D.F. – Brasil.

*De tu amor hacia mí nunca me olvido Señor.*

*(Salmo 26)*

*A minha mãe, Carmen Rosa, pela fortaleza e amor de sempre;  
Ao meu companheiro e apoio, Juan Pablo, pelo amor e o caminho andado ao meu lado;  
Ao meu pai, Ernesto (In memoriam), porque ele também formou parte da minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha gratidão a:

Deus, porque sempre está presente na minha vida.

Os meus irmãos: Toño, Ligia, Patricia e Liliana, e aos meus sobrinhos: Andrés, Andrea, Nicolás, Sebastián, Daniel e Esteban. São uma grande parte do meu coração.

O Edwin Martinez, meu irmão no caminho da vida e meu psicólogo de graça.

A Engenheira Dianita Correa por demonstrar que amizade e coleguismo podem vir juntos.

Os amigos e colegas de profissão: Marisol Nemocón, Hugo Rondón, Luis Angel Moreno e Juan Carlos Ruge.

Os amigos colombianos: Juan Carlos Ruge, Alejandra Gómez, Iván Otalvaro, Catalina Mantilla, Esteban Alarcón, Claudia Ochoa, Jorge Cormane, Claudia Gómez, Carmen Elena Ramirez, pela irmandade e por fazer lembrar a Colômbia no Brasil.

Os brasileiros que me ajudaram a conhecer um pouco mais de sua cultura Denis, Paulinha, Aline e Zuleide.

O Professor Renato Cunha, pela oportunidade, pelo apoio, pela ajuda e pelo profissionalismo neste trabalho, por resolver minha vida quando eu precisava.

O Professor Bernardo Caicedo, pela oportunidade de utilizar o Laboratório de Modelos Geotécnicos da Universidade de Los Andes, pela ajuda e pela admiração que lhe tenho.

O Professor Juan Félix Rodríguez, pelas ideias iniciais desta pesquisa, pelo apoio e pela revisão deste trabalho.

A Engenheira Julieth Monroy da Universidade de Los Andes, pela disposição, pela ajuda e pelo interesse nesta pesquisa e no meu trabalho.

Os colegas “*centrifuguitos*” da Universidade de Los Andes: Eduardo, Natalia, William, Camilo, Hamed, Enzo, Jairo e Catalina, pelo apoio no laboratório de Modelos Geotécnicos e as muitas ajudas neste processo, porque com eles voltei a gostar de trabalhar nos sábados.

A minha “*neurona*”, Sebastián Padilla, pelo interesse nesta pesquisa e porque sem sua ajuda os modelos de menor tamanho não seriam realidade. Fico eternamente agradecido.

Os apoiadores na consecução e envio de artigos: Marisol Nemocón, Marcelo Llano e Eduardo Rueda.

A Maria Célia de Primo pelo tempo, apoio e revisão do “*meu português*”.

Os colegas do GPFees e da Geotecnia.

A Universidade Nacional da Colômbia, por ser minha segunda casa e pelo tempo para meus estudos.

O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq (do Brasil), e ao Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS (da Colômbia), pelo apoio financeiro.

## RESUMO

Os sistemas de fundação denominados radier estaqueado (RE), estão sendo cada dia mais utilizados para edificações de altura média (até sete níveis), construídos em solos moles submetidos a processos de subsidência pela mudança nas condições internas de tensões. Estas mudanças acontecem especialmente pela variação da poropressão como consequência da extração de água e da perda da recarga dos aquíferos.

A pesquisa apresentada tem por objetivo avaliar o comportamento destes sistemas RE, quando assentes em argilas moles, em processo de adensamento devido ao peso da estrutura e ao abatimento da poropressão gerado pelo bombeamento de água das camadas permeáveis profundas. Pretende-se que a pesquisa seja o ponto de partida para um melhor entendimento do comportamento, e que no futuro permita a proposição de uma metodologia simplificada de análise, que leve em conta os fenômenos de atrito negativo.

O trabalho experimental foi realizado com o uso de modelos em escala reduzida na centrífuga geotécnica. Foram utilizados dois equipamentos que permitiram trabalhar em diferentes escalas para obter as respostas de recalques, poropressão ao interior do solo, e distribuição da carga no sistema, em condições controladas de presença de água.

Como resultado da pesquisa foi determinada a influência do número e espaçamento das estacas na resposta do radier, demonstrando-se que, normalmente, grupos de estacas com maior espaçamento controlam melhor os recalques. No entanto, os recalques são maiores quando o solo é submetido a um processo de abatimento das poropressões, se comparado com recalques medidos em condições de poropressão constante (ou somente afetados pelo carregamento).

Observou-se que existe um número de estacas além do qual os controles no recalque se apresentam insignificantes. Foi possível observar também, que pelo processo de abatimento das poropressões, o radier perde parcialmente o contato com o solo e transmite uma carga maior às estacas que formam parte do sistema RE. Assim, se as estacas foram projetadas para trabalhar muito próximas da carga última, estas poderiam atingir a carga de ruptura e acontecer a falha geral do sistema.

## **ABSTRACT**

The Piled Raft Foundations systems (PRF), are commonly used for medium height buildings (up to seven levels), built on soft soils subjected to subsidence processes by changing the internal conditions of stress. These variations are especially related to the change in pore water pressure as a result of water extraction and loss of groundwater recharge.

This research aims to evaluate the behavior of PRF systems, built on soft clay in consolidation process due to the structural loads and the reduction of the pore water pressure generated by pumping water from deep permeable layers. It is intended that the research is the starting point for a better understanding of the system PRF behavior and that in the future, allow the proposal of a simplified method of analysis that takes into account the negative friction phenomena.

The experimental work was performed using reduced scale models in geotechnical centrifuge. Two devices operating at different scales for the evaluation of settlement, pore water pressure within the soil and the load distribution in the system, under water controlled conditions.

As a result of this research, was determined the influence of the number and spacing of the piles in PRF response, demonstrating that typically, piles groups with greater spacing have a more effective settlement control. Moreover, settlements are larger when the soil is exposed to a reduction process of pore water pressure, if compared with settlement measured under conditions of constant pore water pressure (or only affected by the load).

It was observed that there are a number of piles beyond which settlement controls are negligible. Further, due to the reduction process of pore water pressure, the raft partially loses contact with the soil and therefore transfers a higher load to the piles into the PRF system. Thus, if the piles are designed to work very close to the ultimate load, the risk of a total system failure is greater.

## RESUMEN

Los sistemas de cimentación denominados placa-pilotes (PP) están siendo cada vez más utilizados para edificios de mediana altura (hasta siete niveles), construidos en suelos blandos sometidos a procesos de subsidencia por las variaciones en las condiciones internas de esfuerzos. Estas variaciones normalmente se asocian con la alteración de la presión intersticial como consecuencia de la extracción de agua e de la pérdida de recarga de los acuíferos.

La investigación aquí presentada tiene por objetivo evaluar el comportamiento de sistemas PP, construidos en arcillas blandas, sometidas a procesos de consolidación debido al peso de la estructura e al abatimiento de las presiones de poros por el bombeo de agua de los estratos permeables profundos. Se pretende que la investigación sirva como punto de partida para entender mejor el comportamiento de estos sistemas e, que en un futuro, permita llegar a proponer una metodología simplificada de análisis que considere los fenómenos de atrito negativo.

El trabajo experimental fue realizado mediante la implementación de modelos en escala reducida en centrifuga geotécnica. Fueron utilizados dos equipos que permitieron trabajar en escalas diferentes para determinar las respuestas en función de asentamientos, presiones de poros al interior del suelo y distribución de carga en el sistema, con condiciones controladas de presencia de agua.

Como resultado de la investigación fue determinada la influencia del número y separación de los pilotes en la respuesta de la losa, demostrándose que, normalmente, grupos de pilotes con mayor separación controlan mejor los asentamientos. No obstante, los asentamientos son mayores cuando el suelo es sometido a un proceso de abatimiento de la presión de poros, al compararlos con asentamientos medidos en condiciones de presión de poros constante (o solamente afectados por carga).

Se observa que existe un número de pilotes por encima del cual el control del asentamiento no es importante. Fue posible observar también, que debido al proceso de abatimiento de las presiones de poros, la losa pierde parcialmente el contacto con el suelo y transmite una mayor carga a los pilotes que forman parte del sistema PP. Por eso, si los pilotes se diseñan para trabajar muy próximos de la carga última, estos pueden alcanzar la carga de ruptura y generar la falla general del sistema.

## INDICE

1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 - OBJETIVOS .....	3
1.3 - METODOLOGIA .....	3
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	3
2 - REVISÃO DA LITERATURA .....	5
2.1 - FUNDAÇÕES.....	5
2.2 - SISTEMA RADIER ESTAQUEADO.....	9
2.2.1 - Comportamento do sistema radier estaqueado.....	9
2.2.2 - Métodos de análise de sistemas radier estaqueado .....	16
2.3 - O PROBLEMA DE SUBSIDÊNCIA .....	18
2.4 - ESTACAS COM ATRITO NEGATIVO .....	20
2.5 - SISTEMAS RADIER ESTAQUEADO EM SOLOS MOLES COM ADENSAMENTO .....	24
2.5.1 - Uso de sistemas radier estaqueado em solos moles .....	25
2.5.2 - Grupos de estacas e sistemas radier estaqueado em solos moles com adensamento .....	26
2.6 - MODELOS REDUZIDOS.....	30
2.6.1 - Modelos em escala 1g .....	30
2.6.2 - Modelagem em centrífuga .....	33
2.7 - PESQUISAS DE REFERÊNCIA EM CENTRIFUGA .....	41
2.7.1 - Pesquisa de Thaher & Jessberger (1991) .....	41
2.7.2 - Pesquisa de Horikoshi & Randolph (1996).....	43
2.7.3 - Pesquisa de Tran et al. (2012b).....	44
2.8 - RESUMO DO CAPITULO .....	45
3 - MATERIAIS E METODOS .....	47
3.1 - FENÔMENO A MODELAR.....	47
3.2 - DESCRIÇÃO DA CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA .....	48
3.3 - PARÂMETROS A SEREM AVALIADOS NOS MODELOS .....	49
3.4 - MATERIAIS PARA O RADIER E ESTACAS .....	50
3.5 - FATOR DE ESCALA E DIMENSÕES DOS ELEMENTOS.....	51
3.6 - DETERMINAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS MODELOS.....	52
3.7 - PERFIL DO SOLO A REPRESENTAR .....	54
3.8 - MATERIAL PARA FABRICAÇÃO DO SOLO .....	55
3.9 - FABRICAÇÃO DO SOLO.....	59
3.9.1 - Molde inicial para ensaios em escala 1/70.....	59
3.9.2 - Processo de fabricação do solo para modelos em escala 1/70 - 3 camadas .....	60
3.9.3 - Processo de fabricação de solo para modelos em escala 1/200 .....	65

3.10 - ETAPAS DE VOO .....	66
3.11 - PREPARO DO ENSAIO PARA OS MODELOS EM ESCALA 1/70 (M) .....	68
3.11.1 - Instrumentação.....	68
3.11.2 - Projeto mecânico para modelos em escala 1/70.....	75
3.11.3 - Carga no sistema.....	75
3.12 - PREPARO DO ENSAIO PARA OS MODELOS EM ESCALA 1/200 (m).....	76
3.12.1 - Instrumentação.....	76
3.12.2 - Carga no sistema.....	78
3.13 - RESUMO DO CAPÍTULO .....	78
4 - MODELAGEM E DADOS EXPERIMENTAIS.....	80
4.1 - MODELOS EM ESCALA 1/70.....	80
4.1.1 - Tempos de voo.....	80
4.1.2 - Organização dos ensaios .....	81
4.1.3 - Ensaio 1 – Modelo M2.....	81
4.1.4 - Ensaio 2 – Modelo M1.....	84
4.1.5 - Sistema de controle externo do nível da água.....	85
4.1.6 - Ensaio 3 – Modelo M1.....	86
4.1.7 - Ensaio 4 – Modelo M3.....	91
4.1.8 - Ensaio 5 – Modelo M6.....	96
4.1.9 - Ensaio 6 – Modelo 4 (M4).....	100
4.2 - MODELOS EM ESCALA 1/200.....	104
4.2.1 - Tempos de voo para Modelos em Escala 1/200.....	104
4.2.2 - Organização dos ensaios .....	104
4.2.3 - Carga aplicada.....	105
4.2.4 - Deslocamentos nos modelos .....	106
4.3 - RESUMO DO CAPÍTULO .....	110
5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	112
5.1 - RESISTÊNCIA DO SOLO.....	112
5.2 - AVALIAÇÃO DA CARGA NAS ESTACAS .....	116
5.3 - RESULTADOS DA MODELAGEM EM ESCALA 1/70 .....	118
5.3.1 - Modelo M1.....	118
5.3.2 - Modelo M3.....	123
5.3.3 - Modelo M4.....	130
5.3.4 - Modelo M6.....	136
5.4 - RESULTADO DA MODELAGEM EM ESCALA 1/200.....	143
5.4.1 - Etapa 1 .....	144
5.4.2 - Etapa 2 .....	145
5.4.3 - Etapa 3 .....	148
5.5 - ANÁLISE COMPARATIVA DAS RESPOSTAS DOS MODELOS.....	150

5.5.1 - Comparativo de deslocamentos .....	151
5.6 - CARGA NO SISTEMA RADIER ESTAQUEADO .....	159
5.6.1 - Carga ao longo do fuste das estacas.....	165
5.7 - RESUMO DO CAPÍTULO .....	166
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	168
6.1 - CONCLUSÕES .....	168
6.2 - LIMITAÇÕES .....	171
6.3 - RECOMENDAÇÕES .....	172
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	173
APÊNDICES .....	181
Apêndice A. Ensaio sobre caulim.....	182
Apêndice B. Calibração da instrumentação .....	191
Apêndice C. Projeto de sistemas radier estaqueado .....	197
Apêndice D. Projeto de elementos de suporte e aplicação da carga.....	203
Apêndice D. Resultados das leituras dos strain gauges nos modelos em escala 1/70 .....	207
Apêndice F. Registro fotográfico das montagens dos modelos .....	228
Apêndice G. Análise da influência das condições de borda na resposta dos modelos.....	234

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> Equações de capacidade de carga de Meyerhof.....	6
<b>Tabela 2.2.</b> Fatores de interação em sistemas radier estaqueado.....	16
<b>Tabela 2.3.</b> Leis de escalamento na centrífuga geotécnica.....	37
<b>Tabela 2.4.</b> Caraterísticas da pesquisa de Thaher & Jessberger (1991).....	41
<b>Tabela 2.5.</b> Distribuição dos modelos da pesquisa de Thaher & Jessberger (1991).....	42
<b>Tabela 2.6.</b> Caraterísticas da pesquisa de Horikoshi & Randolph (1996).....	43
<b>Tabela 2.7.</b> Modelos da pesquisa de Horikoshi & Randolph (1996).....	43
<b>Tabela 2.8.</b> Caraterísticas da pesquisa de Tran <i>et al.</i> (2012b).....	45
<b>Tabela 3.1.</b> Caraterísticas da centrífuga geotécnica de maior tamanho.....	49
<b>Tabela 3.2.</b> Caraterísticas da centrífuga geotécnica de menor tamanho.....	49
<b>Tabela 3.3.</b> Determinação das dimensões dos elementos do sistema radier estaqueado para os modelos em escala 1/70.....	52
<b>Tabela 3.4.</b> Determinação das dimensões dos elementos do sistema radier estaqueado para os modelos em escala 1/200.....	52
<b>Tabela 3.5.</b> Modelos propostos em escala 1/70.....	53
<b>Tabela 3.6.</b> Modelos propostos em escala 1/200.....	54
<b>Tabela 3.7.</b> Comparativo das propriedades do caulim com materiais de referência.....	58
<b>Tabela 3.8.</b> Quantidades e parâmetros utilizados na fabricação dos moldes (4 camadas).....	60
<b>Tabela 3.9.</b> Quantidades e parâmetros aplicados na fabricação dos moldes em três camadas nos modelos em escala 1/70.....	65
<b>Tabela 3.10.</b> Quantidades e parâmetros a serem aplicados na fabricação dos moldes em três camadas nos modelos em escala 1/200.....	65
<b>Tabela 3.11.</b> Células de carga.....	70
<b>Tabela 3.12.</b> Equações de calibração das células de carga FLEXIFORCE A 301.....	71
<b>Tabela 3.13.</b> Piezômetros.....	71
<b>Tabela 3.14.</b> Constantes de calibração dos piezômetros Honeywell 40PC015G.....	72
<b>Tabela 3.15.</b> <i>Strain gauge</i> .....	72
<b>Tabela 3.16.</b> Constantes de calibração dos <i>strain gauges</i> .....	75
<b>Tabela 4.1.</b> Atividades e tempos de voo para os modelos em escala 1/70.....	80
<b>Tabela 4.2.</b> Datas de fabricação e voos para modelos em escala 1/70.....	81
<b>Tabela 4.3.</b> Atividades e tempos de voo para os modelos em escala 1/200.....	104
<b>Tabela 4.4.</b> Datas de fabricação e voos para modelos em escala 1/200.....	105
<b>Tabela 4.5.</b> Resumo das respostas dos modelos trabalhados na pesquisa.....	111
<b>Tabela 5.1.</b> Resumo do modelo geotécnico para o solo utilizado nos modelos.....	116
<b>Tabela 5.2.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M1 na Etapa 1.....	119
<b>Tabela 5.3.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M1 na Etapa 2.....	123
<b>Tabela 5.4.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 1.....	124
<b>Tabela 5.5.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 2.....	127

<b>Tabela 5.6.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 3. ....	129
<b>Tabela 5.7.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 1. ....	131
<b>Tabela 5.8.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 2. ....	133
<b>Tabela 5.9.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 3. ....	136
<b>Tabela 5.10.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 1. ....	137
<b>Tabela 5.11.</b> Resumo dos resultados do modelo M6 na Etapa 2. ....	140
<b>Tabela 5.12.</b> Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 3. ....	142
<b>Tabela 5.13.</b> Resumo dos resultados da Etapa 1 para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.....	144
<b>Tabela 5.14.</b> Resultados dos deslocamentos na Etapa 2 para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200. ....	147
<b>Tabela 5.15.</b> Resultados dos deslocamentos na Etapa 3 para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200. ....	148
<b>Tabela 5.16.</b> Fatores de Forma (FF) para os modelos. ....	151
<b>Tabela 5.17.</b> Deslocamentos finais nos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.....	151
<b>Tabela 5.18.</b> Deslocamentos finais nos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/70.....	152
<b>Tabela 5.19.</b> Relação de redução de recalques. ....	158
<b>Tabela 5.20.</b> Distribuição de carga nas estacas ....	160
<b>Tabela 5.21.</b> Porcentagem de carga atingido pelas estacas nos modelos ....	162
<b>Tabela G. 1.</b> Comparativo de recalques para os diferentes Casos acima. ....	238

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Metodologia da pesquisa.....	4
<b>Figura 2.1.</b> Critérios de deslocamento e deformação para ruptura pelo fuste e pela ponta em estacas..	7
<b>Figura 2.2.</b> Curvas carga – recalque de sistemas radier estaqueado para diferentes filosofias de projeto.....	11
<b>Figura 2.3.</b> Conceito geral de sistema radier estaqueado. ....	12
<b>Figura 2.4.</b> Proporção da carga assumida pelo radier em um sistema radier estaqueado.....	14
<b>Figura 2.5.</b> Fundamentos teóricos do sistema radier estaqueado. ....	15
<b>Figura 2.5.</b> Representação da resposta das fundações quando submetidas ao processo de subsidência. ....	20
<b>Figura 2.6.</b> Condições de forças sobre estacas. ....	21
<b>Figura 2.7.</b> Conceito do eixo neutro. ....	23
<b>Figura 2.9.</b> Tipos de centrífuga geotécnica. ....	33
<b>Figura 2.9.</b> Comparação da variação das tensões na profundidade em um modelo em centrífuga e seu protótipo. ....	36
<b>Figura 2.11.</b> Distribuições do sistema radier estaqueado nos ensaios realizados na pesquisa de Thaher & Jessberger (1991).....	42
<b>Figura 2.12.</b> Distribuições do sistema radier estaqueado nos ensaios realizados na pesquisa de Horikoshi & Randolph (1996).....	44
<b>Figura 2.13.</b> Distribuições do sistema radier estaqueado nos ensaios realizados na pesquisa de Tran <i>et al.</i> (2012b).....	44
<b>Figura 3.1.</b> Fenômeno de abatimento da poropressão em profundidade. ....	47
<b>Figura 3.2.</b> Centrífuga geotécnica de maior tamanho da Universidade <i>de Los Andes</i> .....	48
<b>Figura 3.3.</b> Centrífuga geotécnica de menor tamanho da Universidade <i>de Los Andes</i> .....	48
<b>Figura 3.4.</b> Configurações geométricas dos modelos propostos em escala 1/70.....	53
<b>Figura 3.5.</b> Configurações geométricas dos modelos propostos em escala 1/200.....	54
<b>Figura 3.6.</b> Perfil proposto de resistência não drenada do solo. Rincón e Rodríguez (2001).....	55
<b>Figura 3.7.</b> Análise granulométrica por sedimentação do caulim. ....	57
<b>Figura 3.8.</b> Resultado de compressibilidade no ensaio de adensamento para caulim. ....	57
<b>Figura 3.9.</b> Resultado de ensaios triaxiais (Tipo CU) em amostras de caulim.....	58
<b>Figura 3.10.</b> Relação tensão aplicada – resistência do solo para fabricação dos moldes da centrífuga geotécnica.....	60
<b>Figura 3.11.</b> Processo de mistura do caulim com água. ....	61
<b>Figura 3.12.</b> Colocação de geotêxtil e camada de areia inferior. ....	62
<b>Figura 3.13.</b> Cobertura da mistura com geotêxtil.....	62
<b>Figura 3.14.</b> Aplicação de carga com (esquerda) atuador pneumático, (direita) macaco hidráulico. ..	63
<b>Figura 3.15.</b> Construção de filtros intermediários.....	63
<b>Figura 3.16.</b> Depósito externo de água.....	64
<b>Figura 3.17.</b> Distribuição das camadas e perfil de resistência não drenada do solo.....	64
<b>Figura 3.18.</b> Detalhe dos equipamentos de adensamento dos modelos em escala 1/200.....	66

<b>Figura 3.19.</b> Representação das condições de poropressão nas etapas de voo.....	68
<b>Figura 3.20.</b> Linha de tempo e etapas de voo para os modelos.....	68
<b>Figura 3.21.</b> Extensômetros.....	69
<b>Figura 3.22.</b> Montagem para a calibração de células de carga Flexiforce.....	70
<b>Figura 3.23.</b> Distribuição dos <i>strain gauges</i> nas estacas e nomenclatura utilizada.....	73
<b>Figura 3.24.</b> Armação para calibração dos <i>strain gauges</i> .....	74
<b>Figura 3.25.</b> Curva de calibração em compressão da estaca 2 (E2): L1- SG1 e SG5.....	74
<b>Figura 3.26.</b> Projeto mecânico de conexão, reação e disposição do radier e as estacas nos modelos de sistemas radier estaqueado.....	75
<b>Figura 3.27.</b> Detalhe da armação e montagem para carga e suporte de instrumentos.....	76
<b>Figura 3.28.</b> Projeto do suporte para carga, localização e apoio da instrumentação em modelos 1/200.....	77
<b>Figura 3.29.</b> Montagem geral dos modelos 1/200.....	77
<b>Figura 3.30.</b> Resumo das etapas de voo para os modelos.....	78
<b>Figura 4.1.</b> Montagem para cravação das estacas individuais no modelo M2.....	82
<b>Figura 4.2.</b> Montagem para ensaio das estacas individuais no modelo M2.....	82
<b>Figura 4.3.</b> Carga–deslocamento no solo e na estaca. Prova de carga na Estaca 2 (E2) - Modelo M2.....	83
<b>Figura 4.4.</b> Carga–deslocamento no solo e na estaca. Prova de carga na Estaca 3 (E3) - Modelo M2.....	83
<b>Figura 4.5.</b> Tubo de controle externo do nível de água no ensaio 2.....	84
<b>Figura 4.6.</b> Perfis de resistência, umidade, grau de saturação e peso específico no molde 2 - Modelo 1 (M1).....	85
<b>Figura 4.7.</b> Sistema de controle externo do nível da água.....	86
<b>Figura 4.8.</b> Distribuição da instrumentação no molde 3 - modelo 1 M1.....	87
<b>Figura 4.9.</b> Pontos complementares de medida de deslocamento durante os tempos de parada.....	88
<b>Figura 4.10.</b> Perfil de resistência não drenada, umidade, grau de saturação e peso específico no ensaio 3 – modelo M1.....	88
<b>Figura 4.11.</b> Leituras de deslocamento do solo no modelo M1.....	89
<b>Figura 4.12.</b> Leituras dos piezômetros no modelo M1.....	89
<b>Figura 4.13.</b> Leituras de deslocamento do radier no modelo M1.....	90
<b>Figura 4.14.</b> Leituras de carga sobre o radier no modelo M1.....	91
<b>Figura 4.15.</b> Detalhe da instrumentação e falha do radier no modelo M1.....	91
<b>Figura 4.16.</b> Distribuição da instrumentação no molde 4 - Modelo 3 (M3).....	92
<b>Figura 4.17.</b> Perfil de resistência não drenada no ensaio 4 – modelo M3.....	93
<b>Figura 4.18.</b> Leituras de deslocamento do solo no modelo M3.....	93
<b>Figura 4.19.</b> Leituras dos piezômetros do modelo M3.....	94
<b>Figura 4.20.</b> Leituras de deslocamento do radier no modelo M3.....	94
<b>Figura 4.21.</b> Leituras de carga sobre o radier e as estacas, no modelo M3.....	95
<b>Figura 4.22.</b> Detalhe da instrumentação e montagem do modelo 3 (M3).....	95
<b>Figura 4.23.</b> Perfil de resistência não drenada no molde 5 – modelo 6 (M6).....	96
<b>Figura 4.24.</b> Distribuição da instrumentação no ensaio 5 - modelo M6.....	97
<b>Figura 4.25.</b> Leituras de deslocamento do solo no modelo M6.....	97

<b>Figura 4.26.</b> Leituras dos piezômetros no modelo M6.....	98
<b>Figura 4.27.</b> Leituras de deslocamento do radier no modelo M6.....	98
<b>Figura 4.28.</b> Leituras de carga sobre o radier e as estacas, no modelo M6.....	99
<b>Figura 4.29.</b> Detalhe da instrumentação no modelo M6.....	99
<b>Figura 4.30.</b> Distribuição da instrumentação no molde 6 - Modelo 4 (M4).....	100
<b>Figura 4.31.</b> Perfil de resistência não drenada no ensaio 6 – modelo M4.....	101
<b>Figura 4.32.</b> Leituras de deslocamento do solo no modelo M4.....	101
<b>Figura 4.33.</b> Leituras dos piezômetros no modelo M4.....	102
<b>Figura 4.34.</b> Leituras de deslocamento do radier no modelo M4.....	102
<b>Figura 4.35.</b> Leituras de carga sobre o radier e as estacas, no modelo M4.....	103
<b>Figura 4.36.</b> Detalhes das estacas instrumentadas e a montagem do modelo 4 (M4).....	103
<b>Figura 4.48.</b> Carga aplicada nos modelos em escala 1/200.....	105
<b>Figura 4.49.</b> Deslocamento do solo e do radier no modelo 1 (m1).....	106
<b>Figura 4.50.</b> Deslocamento do solo e do radier no modelo 2 (m2).....	107
<b>Figura 4.51.</b> Deslocamento do solo e do radier no modelo 3 (m3).....	107
<b>Figura 4.52.</b> Deslocamento do solo e do radier no modelo 4 (m4).....	108
<b>Figura 4.53.</b> Deslocamento do solo e do radier no modelo 5 (m5).....	108
<b>Figura 4.54.</b> Deslocamento do solo e do radier no modelo 6 (m6).....	109
<b>Figura 4.55.</b> Deslocamento do solo e do radier no modelo 7 (m7).....	109
<b>Figura 4.56.</b> Detalhe dos modelos m3 e m4 em escala 1/200.....	110
<b>Figura 5.1.</b> Resistência não drenada média do solo fabricado.....	113
<b>Figura 5.2.</b> Parâmetros do solo no protótipo.....	114
<b>Figura 5.3.</b> Perfil aproximado de tensões no protótipo.....	114
<b>Figura 5.4.</b> Perfil de resistência e OCR.....	115
<b>Figura 5.5.</b> Curva carga – recalque padronizado para estaca E2.....	116
<b>Figura 5.6.</b> Curva carga – recalque padronizado para estaca E3.....	117
<b>Figura 5.7.</b> Linha de tempo para análise de resultados nos modelos em escala 1/70.....	118
<b>Figura 5.8.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M1 na Etapa 1.....	119
<b>Figura 5.9.</b> Grau de adensamento em função do fator de tempo, segundo Terzaghi.....	120
<b>Figura 5.10.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M1 na Etapa 2.....	122
<b>Figura 5.11.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 1.....	124
<b>Figura 5.12.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 2.....	126
<b>Figura 5.13.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 3.....	128
<b>Figura 5.14.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 1.....	130
<b>Figura 5.15.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 2.....	132
<b>Figura 5.16.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 3.....	135
<b>Figura 5.17.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 1.....	137
<b>Figura 5.18.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 2.....	139
<b>Figura 5.19.</b> Resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 3.....	141

<b>Figura 5.20.</b> Linha de tempo para análise de resultados nos modelos em escala 1/200.....	143
<b>Figura 5.21.</b> Deslocamento do solo na Etapa 1, para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.....	144
<b>Figura 5.22.</b> Deslocamentos na Etapa 2 dos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200. ....	146
<b>Figura 5.23.</b> Deslocamentos na Etapa 3 dos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200. ....	149
<b>Figura 5.24.</b> Perfis de deslocamentos nos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/70.....	153
<b>Figura 5.25.</b> Comparativo de recalques do solo nos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.....	154
<b>Figura 5.26.</b> Comparativo de recalques no sistema radier estaqueado, protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.....	154
<b>Figura 5.27.</b> Fenômeno de separação do radier e o solo em sistemas radier-estaqueado.....	155
<b>Figura 5.28.</b> Deslocamento efetivo dos sistemas radier estaqueado. ....	156
<b>Figura 5.29.</b> Recalques nos sistemas radier estaqueado. ....	157
<b>Figura 5.30.</b> Deslocamentos do solo nos modelos. ....	158
<b>Figura 5.31.</b> Relação de redução de recalques. ....	159
<b>Figura 5.31.</b> Proporção da carga assumida pelo radier em um sistema radier estaqueado.....	161
<b>Figura 5.33.</b> Proporção da carga assumida pelo radier e relação com o recalque médio, na Etapa 2. ....	163
<b>Figura 5.34.</b> Proporção da carga assumida pelo radier e relação com o recalque médio, na Etapa 3. ....	163
<b>Figura A. 1.</b> Ensaios de classificação para caulim - 1 .....	183
<b>Figura A. 2.</b> Ensaios de classificação para caulim - 2 .....	184
<b>Figura A. 3.</b> Ensaio de adensamento para caulim - 1 .....	185
<b>Figura A. 4.</b> Ensaio de adensamento para caulim - 2 .....	186
<b>Figura A. 5.</b> Ensaio de adensamento para caulim - 3 .....	187
<b>Figura A. 6.</b> Ensaio triaxial para caulim - 1 .....	188
<b>Figura A. 7.</b> Ensaio triaxial para caulim - 2 .....	189
<b>Figura A. 8.</b> Processo de fabricação de amostras para os ensaios de adensamento e triaxial. ....	190
<b>Figura A. 9.</b> Amostra extraída do tubo de PVC .....	190
<b>Figura A. 10.</b> Ensaio triaxial em amostras fabricadas com caulim .....	190
<b>Figura B. 1.</b> Calibração de <i>strain gauges</i> para a Estaca 1 .....	192
<b>Figura B. 2.</b> Calibração de <i>strain gauges</i> para a Estaca 2 .....	193
<b>Figura B. 3.</b> Calibração de <i>strain gauges</i> para a Estaca 3.....	194
<b>Figura B. 4.</b> Calibração de piezômetros tipo Haneywell.....	195
<b>Figura B. 5.</b> Calibração de células de carga tipo Flexiforce.....	196
<b>Figura C. 1.</b> Plano No 1 de fabricação do radier e dos elementos de carga nas estacas. ....	198
<b>Figura C. 2.</b> Plano No 2 de fabricação do radier e dos elementos de carga nas estacas. ....	199
<b>Figura C. 3.</b> Plano No 3 de fabricação do radier e dos elementos de carga nas estacas. ....	200
<b>Figura C. 4.</b> Plano No 4 de fabricação do radier e dos elementos de carga nas estacas. ....	201
<b>Figura C. 5.</b> Plano No 5 de fabricação do radier e dos elementos de carga nas estacas. ....	202
<b>Figura D. 1.</b> Plano No. 1 de elementos de suporte e aplicação da carga.....	204
<b>Figura D. 2.</b> Plano No. 2 de elementos de suporte e aplicação da carga.....	205

<b>Figura D. 3.</b> Plano No. 3 de elementos de suporte e aplicação da carga.....	206
<b>Figura E. 1.</b> Strain gauges Estaca E2 – Modelo M2 .....	208
<b>Figura E. 2.</b> Strain gauges Estaca E3 – Modelo M2 .....	209
<b>Figura E. 3.</b> Strain gauges Estaca E1 – Modelo M3 – Etapa 2 .....	210
<b>Figura E. 4.</b> Strain gauges Estaca E1 – Modelo M3 – Etapa 3 .....	211
<b>Figura E. 5.</b> Strain gauges Estaca E2 – Modelo M3 – Etapa 2 .....	212
<b>Figura E. 6.</b> Strain gauges Estaca E2 – Modelo M3 – Etapa 3 .....	213
<b>Figura E. 7.</b> Strain gauges Estaca E3 – Modelo M3 – Etapa 2 .....	214
<b>Figura E. 8.</b> Strain gauges Estaca E3 – Modelo M3 – Etapa 3 .....	215
<b>Figura E. 9.</b> Strain gauges Estaca E1 – Modelo M6 – Etapa 2 .....	216
<b>Figura E. 10.</b> Strain gauges Estaca E1 – Modelo M6 – Etapa 3 .....	217
<b>Figura E. 11.</b> Strain gauges Estaca E2 – Modelo M6 – Etapa 2 .....	218
<b>Figura E. 12.</b> Strain gauges Estaca E2 – Modelo M6 – Etapa 3 .....	219
<b>Figura E. 13.</b> Strain gauges Estaca E3 – Modelo M6 – Etapa 2 .....	220
<b>Figura E. 14.</b> Strain gauges Estaca E3 – Modelo M6 – Etapa 3 .....	221
<b>Figura E. 15.</b> Strain gauges Estaca E1 – Modelo M4 – Etapa 2 .....	222
<b>Figura E. 16.</b> Strain gauges Estaca E1 – Modelo M4 – Etapa 3 .....	223
<b>Figura E. 17.</b> Strain gauges Estaca E2 – Modelo M4 – Etapa 2 .....	224
<b>Figura E. 18.</b> Strain gauges Estaca E2 – Modelo M4 – Etapa 3 .....	225
<b>Figura E. 19.</b> Strain gauges Estaca E3 – Modelo M4 – Etapa 2 .....	226
<b>Figura E. 20.</b> Strain gauges Estaca E3 – Modelo M4 – Etapa 3 .....	227
<b>Figura F. 1.</b> Montagem para instrumentação e aplicação de carga nos modelos em escala 1/200 ..	229
<b>Figura F. 2.</b> Detalhe da montagem do tanque de controle de água e da caixa do molde para os modelos em escala 1/200.....	229
<b>Figura F. 3.</b> Modelo m1 – Só radier .....	229
<b>Figura F. 4.</b> Modelo m2 .....	229
<b>Figura F. 5.</b> Modelo m3 .....	229
<b>Figura F. 6.</b> Modelo m4 .....	229
<b>Figura F. 7.</b> Modelo m5 .....	230
<b>Figura F. 8.</b> Modelo m6 .....	230
<b>Figura F. 9.</b> Modelo m7 .....	230
<b>Figura F. 10.</b> Detalhe do nível da água durante o voo .....	230
<b>Figura F. 11.</b> Instalação das estacas no modelo M2.....	230
<b>Figura F. 12.</b> Montagem para leitura de carga e deslocamentos no modelo M2.....	230
<b>Figura F. 13.</b> Montagem do modelo M1 .....	231
<b>Figura F. 14.</b> Ruptura do solo no modelo M1 .....	231
<b>Figura F. 15.</b> Montagem para instalação das estacas nos modelos de radier estaqueado .....	231
<b>Figura F. 16.</b> Estacas instaladas no modelo M3.....	231
<b>Figura F. 17.</b> Células de carga na cabeça das estacas do modelo M3.....	231
<b>Figura F. 18.</b> Modelo m3 pronto para voo .....	231

<b>Figura F. 19.</b> Modelo M6.....	232
<b>Figura F. 20.</b> Montagem do modelo M6.....	232
<b>Figura F. 21.</b> Processo de instalação das estacas do modelo M4.....	232
<b>Figura F. 22.</b> Estacas do modelo M4.....	232
<b>Figura F. 23.</b> Placa de reação superior do modelo M4.....	232
<b>Figura F. 24.</b> Modelo M4 pronto para voo.....	232
<b>Figura F. 25.</b> Disposição do molde na centrífuga geotecnica.....	233
<b>Figura F. 26.</b> Centrífuga geotecnica em voo.....	233
<b>Figura G. 1.</b> Caso 1. Condições de modelagem para caixa de 40x60 cm.....	235
<b>Figura G. 2.</b> Caso 2. Condições de modelagem para Caixa de 140 x 140cm.....	236
<b>Figura G. 3.</b> Condição 1. Aplicação de carga externa de 50 kPa em condições sem drenagem.....	237
<b>Figura G. 4.</b> Condição 2. Aplicação de carga externa de 50 kPa em condições drenadas – Adensamento ao 100%.....	237
<b>Figura G. 5.</b> Condição 3. Aplicação de carga externa de 50 kPa e subsidencia regional em condições drenadas – Adensamento ao 100%.....	238

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES.

$A$	Superfície do grupo de estacas
$A_b$	Área na ponta da estaca
$A_p$	Área transversal da estaca
ABAQUS	Software de modelagem em elementos finitos Abaqus
$A_G$	Área do grupo
$A_R$	Área do radier
$b$	Base do elemento
$B$	Largura
BPT	Ensaio de penetração T-bar
$c$	Coesão
$c_a$	Adesão estaca – solo
cm	Centímetro
$C$	Centralizado no radier
$C$	Célula de carga
$C_c$	Índice de compressão
$C_r$	Índice de recompressão
$C_p$	Capacidade de carga da estaca
CPT	Ensaio de cone
CRS	Ensaio de adensamento com taxa de deformação controlada
$C_v$	Coefficiente de adensamento vertical
$C_{vm}$	Coefficiente de adensamento vertical no modelo
$C_{vp}$	Coefficiente de adensamento vertical no protótipo
$D$	Diâmetro da estaca
$d$	Diâmetro da estaca no projeto
$D_f$	Profundidade de fundação do radier
$Dr$	Recalque do radier estaqueado
$Dri$	Recalque do radier isolado
$Ds$	Deslocamento do solo
$E$	Módulo de elasticidade
$E_m$	Módulo de elasticidade de material no modelo
$E_p$	Módulo de elasticidade de material no protótipo
$e_R$	Espessura do radier
$Er$	Extensômetro no radier
$Es$	Extensômetro no solo
$E_{sav}$	Módulo de elasticidade médio do solo ao longo da estaca
$E_{sb}$	Módulo de elasticidade do solo no nível inferior da estaca
$E_{sl}$	Módulo de elasticidade do solo no nível superior da estaca
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
$ F^+ _{Z_0}^{Z_p}$	Adesão limite ao longo do fuste da estaca de $Z_0$ até $Z_p$
$ F^- _{D_f}^{Z_0}$	Adesão limite ao longo do fuste da estaca de $D_f$ até $Z_0$ .
$f_L _{D_f}^{Z_0}$	Resistência média ao cisalhamento ao longo do fuste das estacas de $D_f$ até $Z_0$
FF	Fator de forma ou geometria do radier estaqueado
FOPAE	<i>Fondo para Atención y Prevención de Emergencias</i>

$F_{s(-)}$	Carga de arrasto
$F_{s(+)}$	Resistência pelo fuste
f	Célula de carga individual em estaca
$f_u$	Atrito lateral na estaca
g	Aceleração da gravidade na superfície terrestre
gr	Grama
$G_s$	Gravidade específica
H	Comprimento máximo de drenagem
$H_m$	Comprimento máximo de drenagem no modelo
$H_p$	Comprimento máximo de drenagem no protótipo
HP	<i>Horse power</i>
$h_m$	Profundidade no modelo
$h_p$	Gradiente hidráulico no protótipo
$i_m$	Gradiente hidráulico no modelo
IP	Índice de plasticidade
$i_p$	Profundidade no protótipo
$I_m^{mm}$	Momento de inercia do material no modelo
$I_m^c$	Momento de inercia do concreto no protótipo
$K_0$	Coefficiente de empuxo lateral em repouso
kg	Quilograma
kN	Quilo Newton
$\bar{k}_m$	Permeabilidade no modelo
$\bar{k}_p$	Permeabilidade no protótipo
kPa	Quilo Pascal
$k_p$	Rigidez do grupo de estacas
$k_r$	Rigidez do radier isolado
L	Comprimento
Le	Comprimento da estaca
$L_m$	Comprimento no modelo
$L_p$	Comprimento no protótipo
LVDT	Transformador diferencial de variável linear
m	Metro
m	Modelo em escala 1/200g
ml	Mililitros
mm	Milímetros
M	Modelo em escala 1/70g
MPa	Mega Pascal
$n_l$	Fator de escala
N	Newton
N	Número de golpes do ensaio de penetração SPT
N	Número de vezes que se escala a gravidade da terra nos modelos em centrífuga geotécnica
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas técnicas
$N_c$	Fator de capacidade de carga pela coesão do solo
$N_q$	Fator de capacidade de carga pela sobrecarga
$N_\gamma$	Fator de capacidade de carga pelo peso específico do solo
$N_p$	Número de estacas
OCR	Relação de pré-adensamento
P	Perímetro da estaca

$P$	Tensão vertical aplicada no processo de fabricação de solo nos modelos
$P_e$	Carga na cabeça da estaca
PLAXIS	Software para modelagem geotécnica em elementos finitos
PP	Piezômetros tipo Haneywell
$P_p$	Carga total do sistema radier estaqueado
$P_r$	Carga do radier isolado
$P_{su}$	Capacidade de carga última por atrito lateral
$P_u$	Carga de trabalho teórica da estaca
Pz	Piezômetro tipo Metallux
$q$	Sobrecarga
$q_u$	Capacidade de carga última ou de rotura do radier
$Q$	Carga de trabalho da estaca
$Q_b$	Resistência pela ponta
$Q_j$	Carga na estaca $j$
$q_{pu}$	Carga última na ponta da estaca
RJ	Rio de Janeiro
$R_e$	Raio efetivo da centrífuga
$r_r$	Raio do radier
$r_p$	Raio da estaca
$s$	Espaçamento entre estacas
$s_t$	Deslocamento do solo em um tempo específico $t$
$s_\infty$	Deslocamento total do solo pelo adensamento
$S_u$	Resistência não drenada
$S_{uT}$	Resistência não drenada teórica
$S_{uM}$	Resistência não drenada ao final da fabricação do molde
$S_{u1V}$	Resistência não drenada ao final da primeira etapa de voo
$S_{u2V}$	Resistência não drenada ao final da segunda etapa de voo
$S_{u3V}$	Resistência não drenada ao final da terceira etapa de voo
$seg$	Segundos
SG	<i>Strain gauge</i>
SP	São Paulo
SPT	Ensaio de penetração standard
SPLT	Ensaio de carga estática em estaca simples
$S_r$	Relação de redução de recalques
$t$	Altura do elemento
$t$	Tempo
T	Distribuído na área do radier
$t_0$	Tempo de início da modelagem em centrífuga
$t_A$	Tempo para atingir a escala do modelo na Etapa 1
$t_B$	Tempo de parada da Etapa 1
$t_C$	Tempo para atingir a escala do modelo na Etapa 2
$t_D$	Tempo de início do carregamento na Etapa 2
$t_E$	Tempo de aplicação da carga máxima na Etapa 2
$t_F$	Tempo de parada da Etapa 2
$t_G$	Tempo para atingir a escala do modelo na Etapa 3
$t_H$	Tempo de início do carregamento na Etapa 3
$t_J$	Tempo de aplicação da carga máxima na Etapa 3
$t_K$	Tempo de parada da Etapa 3
$t_m$	Tempo no modelo
$t \frac{mm}{m}$	Altura do elemento no modelo, no material correspondente

$t_p$	Tempo no protótipo
$t_p^c$	Altura de concreto no protótipo
$T_v$	Fator adimensional de tempo
Uv	Grau de adensamento
V	Volt
$v_m$	Velocidade de fluxo no modelo
$v_p$	Velocidade de fluxo no protótipo
VST	Ensaio de palheta
$w$	Teor de umidade
$w_I$	Deslocamento causado por uma carga unitária na estaca $k$ e na estaca $j$
$w_L$	Limite de liquidez
$w_P$	Limite de plasticidade
$w_{pr}$	Recalque do sistema radier estaqueado para determinação dos fatores de interação
$Z$	Profundidade
$Z_0$	Profundidade do ponto neutro
$Z_P$	Profundidade da ponta da estaca
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

$\alpha_{kj}$	Fator de interação da estaca $k$ pela estaca $j$ dentro do grupo de estacas
$\alpha_L ; \alpha_{pr}$	Fator de distribuição de carga do sistema radier estaqueado
$\alpha_s$	Razão de recalques do sistema radier estaqueado
$\delta_v$	Deslocamento da estaca
$\Delta\sigma'(Z_0)$	Incremento da tensão média devido ao abatimento das poropressões na profundidade $Z_0$
$\Delta w_k$	Recalque adicional da estaca $k$ causada por outras estacas
$\beta$	Ângulo de inclinação da carga vertical em uma fundação superficial
$\phi$	Ângulo de atrito
$\gamma_T$	Peso específico
$\kappa$	Inclinação da linha de recompressão
$\lambda$	Inclinação da linha de compressão
$\mu$	Poropressão
$\rho$	Grau de homogeneidade do solo
$\sigma_{vb}$	Tensão vertical na base da estaca
$\sigma_v$	Tensão vertical pelo peso próprio do solo
$\sigma'_v$	Tensão efetiva vertical
$\sigma_{vp}$	Tensão vertical pelo peso próprio do solo no protótipo
$\nu_s$	Relação de Poisson do solo

# 1 - INTRODUÇÃO

Um número considerável de estruturas, especialmente “edifícios altos” (*tall buildings*), são apoiados em radier estaqueado (Poulos, 2001; García, 2015). A diferença primordial desta fundação em relação às demais fundações reside no fato que as cargas podem ser absorvidas tanto pelo radier como pelas estacas, considerando-se assim um fator de segurança adequado para cada caso.

O sistema radier estaqueado apresenta vantagens como a redução das tensões de relaxamento nos processos de escavação, o controle dos recalques diferenciais e totais e, a redução da possibilidade de inclinação, entre outros. (El Mossallamy, 2002).

No enfoque tradicional (projeto em termos de deformações) o radier apresenta suficiente capacidade de carga, porém, os recalques totais e diferenciais ultrapassam os limites admissíveis, tornando deste modo a utilização do radier em conjunto com as estacas recomendável, já que os dois critérios básicos de projetos serão supridos: suficiente capacidade de carga e recalques toleráveis. Outro critério de projeto (projeto em termos de capacidade de carga) consiste no uso das estacas para garantir suficiente capacidade de carga no radier e para controle dos recalques.

Comparando-se com os grupos de estacas tradicionais, em que a carga da superestrutura é transferida para o solo unicamente pelas estacas, as fundações do tipo radier estaqueado refletem uma abordagem de cálculo mais sofisticada, que é justificada economicamente sob o ponto de vista executivo (Cordeiro, 2007). Para projetar radier estaqueado com eficiência e economia é necessário saber como as cargas estruturais são transferidas ao solo de suporte pelos elementos da fundação, e, além disso, entender os fatores que afetam os recalques diferenciais e totais sob condições de trabalho.

Em solos moles submetidos a processos de adensamento, a interação entre o solo, o radier e as estacas depende do tempo. Entender o efeito do adensamento no sistema radier estaqueado, permitirá obter uma melhor avaliação, ou mais racional, do problema de interação (Roy *et al.*, 2011).

## 1.1 - MOTIVAÇÃO

No Brasil, em particular no Distrito Federal, sistemas do tipo radier estaqueado têm potencial para ser amplamente aplicados como alternativa econômica aos projetos de

fundação profunda para residências de classe média ou de baixo custo, assentes em argila porosa colapsível (Ayala, 2013).

Países como México e Colômbia, entre outros, têm desenvolvido pesquisas sobre o uso de sistemas radier estaqueado, como elemento de fundação de edifícios de altura baixa a média (em até sete níveis).

Ao longo do litoral brasileiro, são comuns os terrenos aluvionares marinhos constituídos de argilas (geralmente orgânicas), muito moles, nos quais são cada vez mais demandados para construção (Barata & Danziger, 1986). Krishnamoorthy & Kumar (2014) indicam que muitas vezes as estruturas são construídas sobre solos moles adensáveis, os quais têm baixa capacidade, recalques excessivos e longo tempo de adensamento. A determinação dos recalques das fundações, construídas nesses solos, constituem o principal problema do projeto geotécnico.

Segundo Banerjee (2009), muitas cidades estão se desenvolvendo sobre solos moles: Shanghai, Bangkok, Mumbai, Kuala Lumpur, Jakarta, Singapura, Bogotá, México, etc., e por isso é necessário entender o comportamento desses sistemas de fundação com as condições do solo apresentadas *in loco*. Nestas cidades, vêm ocorrendo fenômenos relacionados com o abatimento das poropressões no solo, o que muda as condições de trabalho das fundações apresentando-se danos como os que foram reportados por Bareño & Rodríguez (1999).

Nas estacas instaladas em solos moles que apresentam adensamento por carga vertical, abatimento das poropressões e readensamento do solo após processos de cravação, pode-se gerar atrito negativo. O atrito negativo induz cargas verticais adicionais e recalques, que em condições extremas, podem levar as estacas à ruptura. (Leung *et al.*, 2004)

Rodríguez (2010) refere que a nível mundial tem-se efetuado muitos estudos de campo em estacas individuais dispostas em um solo que se adensa pelo abatimento das poropressões, mas só alguns dele consideram estacas flutuantes. Outros autores têm proposto modelos analíticos para a análise e projeto de fundações com estacas flutuantes que interagem com o adensamento, mas não trabalham com modelos tridimensionais.

No entanto, considera-se necessário avançar no entendimento e na avaliação da influência do adensamento em sistemas radier estaqueado em solos moles, com estacas flutuantes, já que podem ser ajustados modelos analíticos, baseados nas pesquisas do comportamento desses sistemas. Estes modelos permitirão avaliar a magnitude das tensões na ponta e no fuste destas estacas, e também os deslocamentos no solo e no sistema radier estaqueado, o que refletirá na

otimização dos projetos de fundações.

## **1.2 - OBJETIVOS**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o comportamento de sistemas radier estaqueado assentes em solos moles em processos de adensamento, devido ao peso da estrutura e ao abatimento da poropressão, por meio de modelos em escala reduzida.

Para atender o objetivo proposto, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica das pesquisas desenvolvidas para avaliar o comportamento geral de sistemas radier estaqueado e das pesquisas efetuadas com o uso de modelos reduzidos;
- Analisar o comportamento teórico de estacas flutuantes e radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento;
- Projetar uma série de modelos em escala reduzida que permitam obter dados do comportamento para diferentes configurações de sistemas radier estaqueado assentes em solo mole em processo de adensamento;
- Executar ensaios de comportamento de sistemas radier estaqueado assentes em solo mole com o uso de modelos reduzidos, mediante o uso da centrífuga geotécnica;
- Analisar a influência do abatimento das poropressões na massa do solo, na resposta de diferentes configurações (diferente espaçamento e número de estacas) de sistemas radier estaqueado.

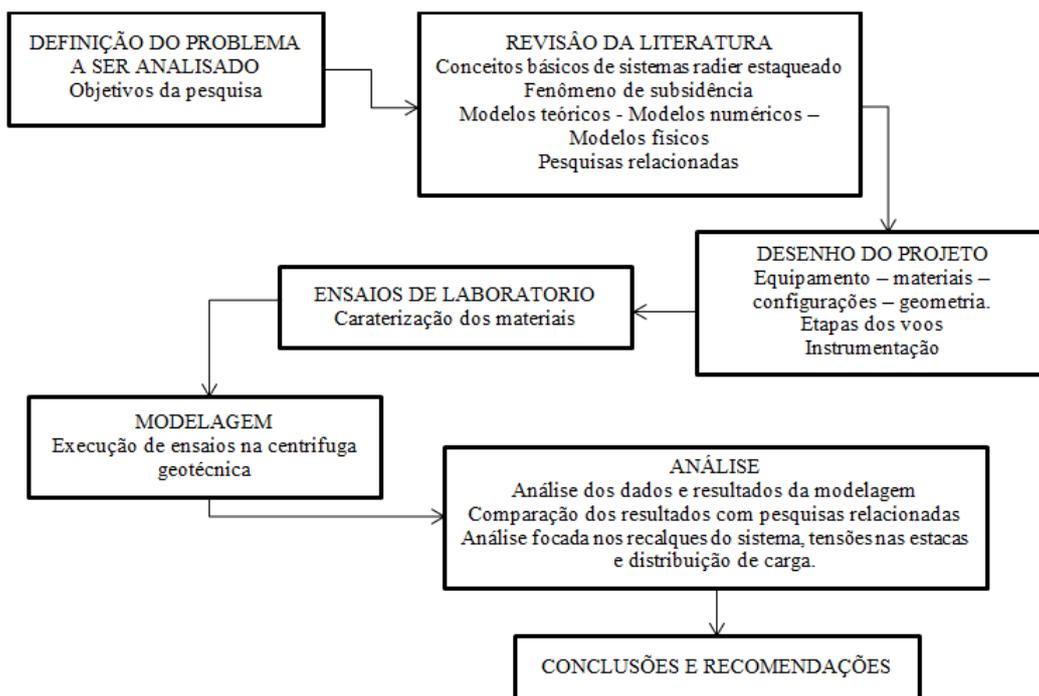
## **1.3 - METODOLOGIA**

Para alcançar os objetivos propostos para esta pesquisa foi elaborada e executada a metodologia apresentada na Figura 1.1.

## **1.4 - ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO**

O documento é organizado em vários capítulos que atendem as atividades apresentadas na metodologia proposta, com o intuito de alcançar o objetivo geral apresentado nesta pesquisa.

O capítulo 1 apresenta a justificativa para a realização desta pesquisa, com base na necessidade do entendimento da resposta de sistemas radier estaqueado construídos em solos moles com processos de adensamento. Neste capítulo é apresentada a metodologia geral da pesquisa, os objetivos, e as considerações prévias para o desenvolvimento do trabalho.



**Figura 1.1.** Metodologia da pesquisa

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica realizada, distribuída em vários conceitos que permitem entender o trabalho realizado, quais sejam: a definição e conceituação do sistema radier estaqueado, os princípios de comportamento destes sistemas, os métodos de análise, o problema da subsidência e sua relação com o atrito negativo, para assim explicar a evolução do uso destes sistemas em solos moles e as pesquisas realizadas. O capítulo também trata dos modelos reduzidos e os princípios da modelagem em centrífuga geotécnica.

O capítulo 3 apresenta o projeto experimental desenvolvido para a obtenção de dados na pesquisa, detalhando os elementos relacionados com materiais e metodologia da pesquisa. Apresenta-se a determinação das geometrias a ser avaliadas, o perfil de solo a representar e as etapas e tempos de voo.

O capítulo 4 apresenta as descrições das montagens realizadas para cada ensaio, os dados obtidos e observações realizadas, com base na execução dos ensaios na centrífuga geotécnica.

O capítulo 5 trata os resultados obtidos, a análise e discussão destes, focando-se especialmente nas respostas de recalques do sistema radier estaqueado, poropressão no solo e distribuição de carga no sistema, trabalhando sempre na escala do protótipo equivalente para cada modelo.

Finalmente, o capítulo 6 estabelece as principais conclusões, recomendações e limitações desta pesquisa, dando resposta aos objetivos propostos.

## 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se a discussão dos principais conceitos sobre fundações, sistemas radier estaqueado, subsidência e modelagem que permitem entender o objetivo da presente pesquisa. As considerações apresentadas estão relacionadas com avanço no uso da técnica do radier estaqueado em solos moles e como os processos de adensamento têm sido colocados na pauta das pesquisas, como um novo fenômeno a ser estudado.

### 2.1 - FUNDAÇÕES

Define-se uma fundação como um elemento que transmite as cargas da superestrutura ao solo de apoio. Segundo Carter *et al.* (2000), para realização do projeto de fundações utiliza-se, tradicionalmente, análise simples ou aproximações empíricas com o objetivo de garantir:

- A estabilidade local das estruturas e dos sistemas de suporte, além da estabilidade global, e;
- Que os movimentos induzidos sejam toleráveis tanto pela estrutura e o solo, como pelas estruturas vizinhas e os serviços instalados.

Assim, e segundo Sales (2000), em obras de infraestrutura, um sistema de fundação pode se definir como a associação do conjunto de elementos estruturais e o solo circunvizinho, responsáveis por suportar o acréscimo de carga oriundo daquela obra.

Complementarmente, uma fundação deve ser capaz de suportar o peso da estrutura e transmiti-lo ao solo sem recalques excessivos. Segundo a NBR 6122/2010, um projeto de fundações deve assegurar que as fundações apresentem segurança quanto aos:

- a) Estado limite último (ELU), associados a colapso parcial ou total da obra;
- b) Estado limite de serviço (ELS), quando ocorrem recalques, deformações, fissuras, etc., que comprometem o uso da obra.

Baseados na profundidade dentro da camada do solo até a qual são transmitidas as tensões geradas pelas cargas na fundação, estas se classificam em dois grupos gerais: superficiais e profundas, sendo os radieres um exemplo das primeiras e as estacas um exemplo das segundas.

O radier é um tipo de fundação superficial, executada em concreto armado ou protendido, que recebe todas as cargas através dos pilares ou alvenarias da edificação, distribuindo-as de forma uniformizada ao solo. Segundo Bowles (1998), a capacidade de carga de uma

cimentação superficial pode ser avaliada com o uso de equações como as de Terzaghi, Vesic, Hansen e Meyerhof, entre outras. Na Tabela 2.1 são apresentadas as equações propostas por Meyerhof para determinar a capacidade de carga de uma fundação superficial submetida a carregamento vertical.

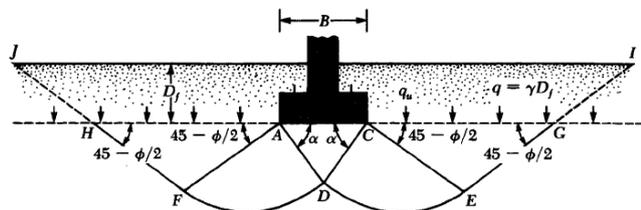
**Tabela 2.1.** Equações de capacidade de carga de Meyerhof.

Adaptado de Bowles (1998) e Das (2001)

Capacidade de carga	$q_u = c N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$	
	$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$	$F_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_c}$
Fatores de capacidade de carga	$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$	Fatores de forma $F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi$
	$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4 \phi)$	$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$
Fatores de profundidade	$\frac{D_f}{B} \leq 1$	$F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{D_f}{B}$
		$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B}$
		$F_{\gamma d} = 1$
	$\frac{D_f}{B} > 1$	$F_{cd} = 1 + 0.4 \tan^{-1} \left( \frac{D_f}{B} \right)$
		$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \left( \frac{D_f}{B} \right)$
		$F_{\gamma d} = 1$
Fatores de inclinação da carga	$F_{ci} = F_{qi} = \left( 1 - \frac{\beta}{90^\circ} \right)$	$F_{\gamma i} = \left( 1 - \frac{\beta}{\phi} \right)$

**Nomenclatura:**

$q_u$  = capacidade de carga de ruptura;  $c$  = coesão;  
 $\phi$  = Ângulo de atrito do solo de fundação;  
 $\gamma$  = Peso específico do solo;  $q$  = sobrecarga pelo peso do solo até o nível de apoio da base da fundação ( $D_f$ );  $B$  = Largura da fundação;  $L$  = Comprimento da fundação;  $\beta$  = Ângulo de inclinação da carga vertical sobre a fundação.



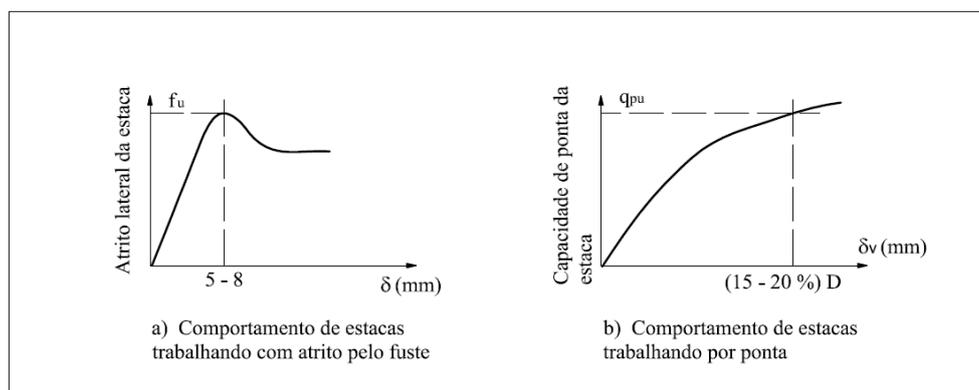
As estacas são elementos estruturais que transmitem as cargas ao solo circunvizinho pelo atrito lateral (estacas flutuantes) e/ou pela ponta do elemento. Segundo Poulos & Davis

(1980), a capacidade de carga geral pode ser determinada com a Equação 2.1, onde a primeira parte corresponde à capacidade pela ponta das estacas ( $P_{bu}$ ), e a segunda parte desta equação corresponde à capacidade de carga pelo atrito lateral ( $P_{su}$ ).

$$P_u = \underbrace{A_b \left( c N_c + \sigma_{vb} N_q + \frac{1}{2} \gamma d N_\gamma \right)}_{P_{bu}} + \underbrace{\int_0^L P (c_a + K_0 \sigma_v \tan \phi) dz}_{P_{su}} \quad (2.1)$$

Onde  $A_b$  é a área na ponta da estaca;  $\sigma_{vb}$  é a tensão na base da estaca;  $N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$  são fatores de capacidade de carga na ponta (Tabela 2.1);  $\gamma$  é o peso específico do solo,  $P$  é o perímetro da estaca,  $L$  o comprimento da estaca,  $c_a$  é a adesão estaca – solo,  $K_0$  é o coeficiente de empuxo lateral,  $\sigma_v$  a tensão vertical pelo peso próprio do solo e  $\phi$  o ângulo de atrito.

Segundo Durán (2003), para que uma estaca desenvolva seu atrito último no fuste, é preciso um deslocamento relativo de 5 a 8 mm, independente do diâmetro e do comprimento. Contudo, para desenvolver a resistência pela ponta é preciso um deslocamento entre 15 a 20% do diâmetro da estaca. Essas condições são apresentadas na Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Critérios de deslocamento e deformação para ruptura pelo fuste e pela ponta em estacas.

Adaptado de Durán (2003)

Como as cargas das estruturas normalmente são distribuídas em grandes áreas, as estacas não funcionam isoladas, portanto, a NBR 6122/2010 reconhece o grupo de estacas como mais um tipo de fundação. Neste caso, o grupo possui um bloco de coroamento na cabeça delas, que cumpre apenas o papel estrutural de ligação entre as mesmas (Cordeiro, 2007).

A avaliação destes grupos de estacas é realizada por meio de uma análise de interação solo – estrutura, considerando que o comportamento é influenciado por vários fatores entre os quais se podem citar, além das estruturas adjacentes (edificações, aterros, entre outros), o

método de instalação (com deslocamento ou com substituição do solo); a forma predominante de transferência de carga (estaca flutuante ou de ponta); a natureza do maciço do solo de fundação; a geometria tridimensional da configuração do grupo; a rigidez do bloco de coroamento, e a rigidez relativa do grupo, das estacas e do solo (Chan, 2006).

No caso dos radieres, quando eles são capazes de suportar o peso da estrutura, mas apresentam recalques que superam os limites toleráveis, é recomendável adicionar algumas estacas para reduzir esses recalques, convertendo-se no que se denomina um sistema radier estaqueado. O comportamento das estacas nos sistemas radier estaqueado está influenciado pelo seu comprimento, espaçamento e quantidade, além da espessura do radier no sistema. Assim, o maior questionamento é como projetar as estacas em uma configuração “ótima” para controlar os recalques (Cordeiro, 2007).

Em relação ao contato do radier com o solo, é possível aproveitar o aporte na capacidade de suportar a carga dele, pois se tem demonstrado que quando o radier mantém o contato com o solo no sistema radier estaqueado, é possível que o grupo de estacas, e em geral o sistema, suporte uma carga maior (Bajad & Sahu, 2008).

O sistema radier estaqueado possui grande aplicabilidade em lugares com solos superficiais de baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade em que é difícil o uso de fundações rasas. Segundo García (2015), alguns exemplos históricos de aplicação de radier estaqueado são: a Torre Commerzbank, em Frankfurt, com 300 m de altura; o Edifício Messeturm, em Frankfurt, com 256 m de altura; e o Edifício Burj Khalifah, em Dubai, com 828 m de altura.

Banerjee (2009) salienta que muitas cidades que utilizam sistemas do tipo radier estaqueado, estão se desenvolvendo sobre solos moles: Shangai, Bangkok, Mumbai, Kuala Lumpur, Jakarta, Singapura, Bogotá, México, etc., e por isso se faz necessário entender o comportamento desses sistemas de fundação.

Apresenta-se a necessidade de explorar alternativas de projetos que venham a suprir tanto a necessidade de garantir capacidade de carga, quanto a de controlar recalques diferenciais e elevados, além de proporcionar um menor custo e melhor critério técnico (Cordeiro, 2007; Sales, 2000; Tan *et al.*, 2006).

## **2.2 - SISTEMA RADIER ESTAQUEADO**

Um dos primeiros trabalhos em que foi utilizado o conceito de sistema radier estaqueado foi desenvolvido por Zeevaert (1957), no qual utilizou um grupo de estacas sobre as quais foram apoiadas sapatas, com o objetivo de reduzir os recalques da fundação da Torre Latinoamericana, no México. No entanto, um dos primeiros trabalhos teóricos nos quais foi considerado um elemento superficial apoiado sobre uma estaca, pode ser atribuído a Poulos no final da década dos 60. (Poulos & Mattes, 1971). O Autor concluiu que para estacas muito longas ( $L/d > 25$ ) os recalques eram controlados pelo contato do radier com o solo.

No Brasil, os primeiros casos relatados que consideram a contribuição das tensões bloco/solo em uma fundação estaqueada são dos Engenheiros Luciano Décourt (Estaca “T”) e Eduardo Cerqueira Do Val (Estapata). A diferença entre as duas concepções é o contato da estaca com o bloco. Na Estaca “T” as estacas são engastadas na sapata, e na estapata há um disco de poliestireno expandido, cuja espessura é determinada em função do recalque da sapata, nesse caso, a estaca passa a receber carga após a ocorrência de uma parcela do recalque da sapata isolada (García, 2015).

Segundo Janda *et al.* (2008), o sistema radier estaqueado corresponde a um sistema de fundação em que os dois componentes estruturais (estacas e placa) interagem entre si e também com o solo ao redor para suportar as cargas verticais, horizontais e os momentos que chegam da superestrutura. Assim, o sistema radier estaqueado pode ser definido como uma composição geotécnica que consiste na interação de três elementos: estacas, radier e solo.

### **2.2.1 - Comportamento do sistema radier estaqueado**

Os sistemas radier estaqueado podem ser projetados para apresentar segurança em estados limites, quais sejam: garantir capacidade de carga e controlar recalques; garantir somente capacidade de carga ou, somente controlar recalques (Mandolini *et al.*, 2013).

Na concepção tradicional de projeto de grupos de estacas, o número de estacas é calculado dividindo o carregamento total pela capacidade de carga de trabalho individual da estaca, buscando garantir um fator de segurança mínimo (“médio”) para todas as estacas. Quando se analisa a influência da rigidez do grupo, ainda dentro da concepção tradicional, geralmente se encontram carregamentos mais elevados nas estacas periféricas, o que em muitos projetos, leva a um aumento do número de estacas para garantir um fator de segurança (FS) mínimo, em todas as estacas (Sales *et al.*, 2002).

Sanctis *et al.* (2002) apresentaram duas classificações de sistemas radier estaqueado, que representam as filosofias de projeto consideradas por Randolph (1994):

- “*Small piled raft*”: a razão principal para adicionar estacas é incrementar o fator de segurança (normalmente radieres com larguras entre 5 e 15m);
- “*Large piled raft*”: o radier tem capacidade de suportar a carga aplicada com razoável margem de segurança, mais as estacas são usadas para reduzir os recalques totais e diferenciais. Neste caso, a largura do radier é maior do que o comprimento das estacas.

No entanto, considerando que a resposta mecânica de um grupo de estacas com bloco de coroamento na cabeça é diferente daquela de um radier estaqueado, Poulos (2001) apresentou três filosofias de projeto para radier estaqueado:

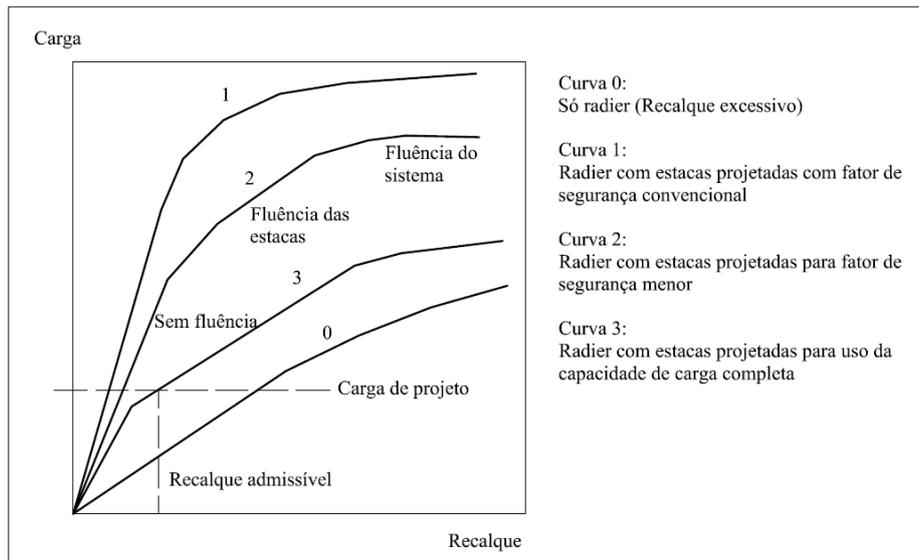
- Convencional: o termo “convencional” refere-se à fundação projetada em que a carga da superestrutura é transmitida para o topo das estacas e, em seguida, diretamente ao solo sem participação do bloco;
- *Creep Piling*: são projetos nos quais as estacas são usadas para que na carga de trabalho suportem entre 70% e 80% de sua capacidade máxima de carga, porém, alguma deformação plástica deverá ser notada;
- Controle de Recalques Diferenciais: poucas estacas são utilizadas e estrategicamente posicionadas, em geral na região central da fundação, a fim de reduzir ou anular os recalques diferenciais.

A Figura 2.2 ilustra conceitualmente o comportamento carga – recalque de sistemas radier estaqueado baseado nas filosofias de projeto apresentadas por Poulos (2001), como explicado a seguir:

- A curva 0 representa o comportamento do radier sem estacas com recalques excessivos para a carga de projeto;
- A curva 1 representa a filosofia de projeto convencional em que a resposta do sistema é controlada pelo comportamento como grupo com uma ampla linearidade na carga de projeto. Neste caso, as estacas suportam a totalidade da carga;
- A curva 2 representa a fluência das estacas, que trabalham com um fator de segurança menor. Pela presença de poucas estacas o radier suporta uma carga maior do que na curva 1;

- A curva 3 apresenta a estratégia de uso de estacas tanto para reduzir recalques, quanto para suportar carga mobilizando a capacidade completa das estacas.

A curva carga – recalque pode não ser linear na carga de projeto, mas o sistema tem um fator de segurança adequado e o critério de recalques é satisfeito. Portanto, o projeto representado pela curva 3 é aceitável e é provável que seja consideravelmente mais econômico do que os modelos representados pelas curvas 1 e 2.



**Figura 2.2.** Curvas carga – recalque de sistemas radier estaqueado para diferentes filosofias de projeto.

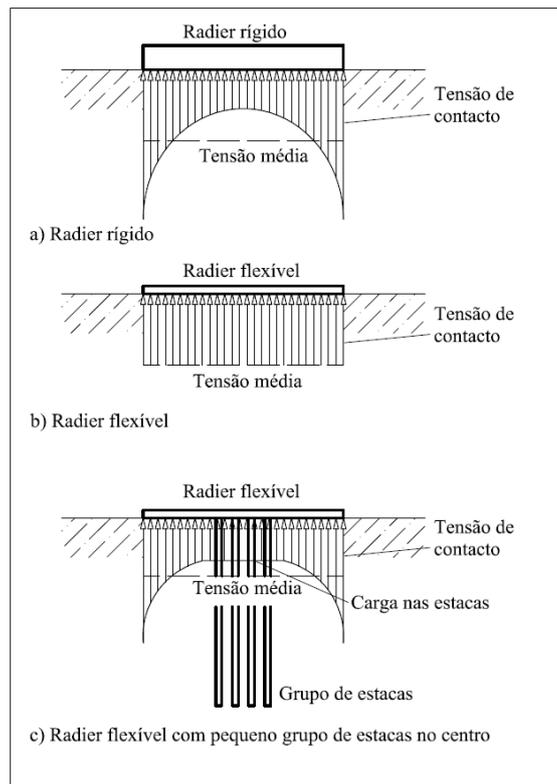
Adaptado de Van Impe (2001)

Nas últimas décadas, muitos trabalhos têm sido apresentados para entender o comportamento de sistemas radier estaqueado (Patil *et al.*, 2013). Segundo Balakumar (2008), o “novo” conceito de projeto de sistemas radier estaqueado considera as estacas como elemento para reduzir recalques e não para suportar carga.

Pode ser observado na Figura 2.3 o conceito que permite explicar como o sistema radier estaqueado reduz o recalque, especialmente o diferencial. Poulos (2001) menciona que quando as cargas aplicadas sobre um radier semi-flexível são bem distribuídas, os recalques no centro são maiores do que nas bordas. Esses recalques, totais ou diferenciais, quando excessivos, podem comprometer a funcionalidade, ou até mesmo a estabilidade da estrutura. Verifica-se que, a instalação de um pequeno número de estacas é suficiente para diminuir a intensidade de carga da placa sobre o solo, e assim, controlar os recalques sem que estes superem o valor limite de projeto.

A carga resistente das estacas deve ser suficiente para absorver de 50 a 70% da tensão

média aplicada em um radier considerado rígido. Ao se posicionar as estacas, estrategicamente, as tensões de contato de um radier flexível se comportam como a de um radier rígido, conduzindo a recalques diferenciais mínimos. A correta disposição destas estacas abaixo da placa é um exercício de “otimização” de projeto, que busca obter valores ótimos de número, comprimento e disposição de forma a se manter o sistema dentro de tensões externas e internas admissíveis (Cunha *et al.*, 2001).



**Figura 2.3.** Conceito geral de sistema radier estaqueado.

Adaptado de Poulos (2001)

Segundo Chow (2007), no projeto de sistemas radier estaqueado é necessário compreender o mecanismo de transferência de carga do radier para as estacas e para o solo, a fim de determinar:

- O comportamento do radier, incluindo os recalques, momentos e a proporção de carga que assume este elemento, e;
- O comportamento das estacas que inclui o deslocamento e a distribuição de carga ao longo destas.

O mecanismo de transferência de carga envolve uma interação complexa entre os elementos radier e estacas, além da consideração do solo circundante. O comportamento

tensão - deformação do conjunto é influenciado por muitos fatores, tais como: as propriedades do solo; a geometria do grupo; o tipo de carregamento; a metodologia executiva e a interação entre os diversos elementos.

O projeto tradicional das estacas, segundo Balakumar (2008) é realizado por metodologias empíricas ou semiempíricas; tal fato é ainda mais preponderante no Brasil, de acordo com Hachich *et al.* (1996). Quando as estacas atravessam camadas de areia, o projeto depende completamente da magnitude de N (número de golpes do ensaio de penetração SPT) e a capacidade de carga é determinada, em maior medida, pelo atrito lateral do fuste e pelo tipo de solo. Quando as estacas atravessam camadas de argila, o projeto é focado na determinação do fator de adesão, mais deve considerar também a avaliação de um eventual atrito negativo, às interações entre os componentes do sistema e a tridimensionalidade do problema.

Cho *et al.* (2012), mencionam que o comportamento de sistemas radier estaqueado encontra-se influenciado pela interação tridimensional dos elementos que conformam o sistema. Assim, por exemplo, no caso de prever a existência de recalques muito altos, invés de aumentar o comprimento das estacas para procurar aumentar a força de atrito ao longo destas, é mais conveniente considerar a contribuição do radier, em contato com o solo, e que as cargas sejam absorvidas tanto pelo radier, quanto pelas estacas. Porém, as estacas são incluídas para diminuir o recalque total ou diferencial, mais do que para suportar carga.

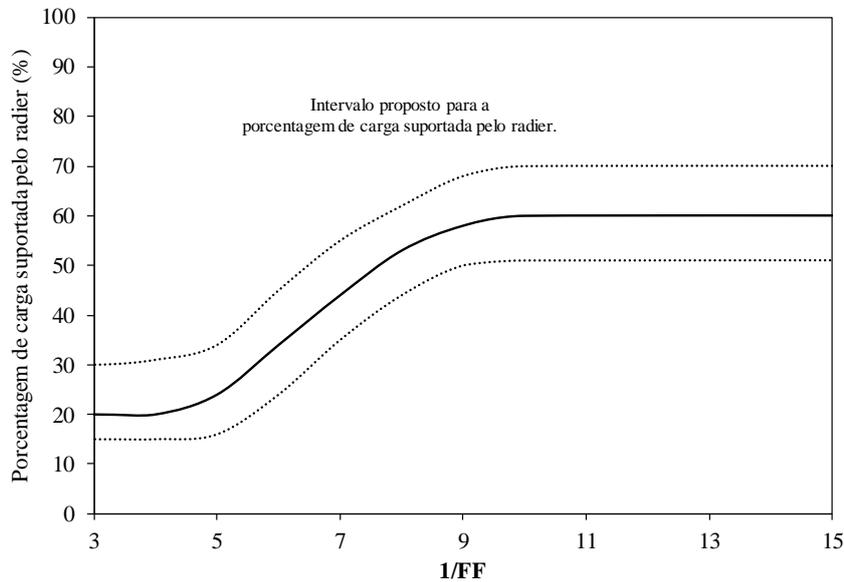
No sistema radier estaqueado, as estacas são responsáveis por absorver inicialmente a maior parte do carregamento imposta à fundação, mas em longo prazo sua função é reduzir os recalques absolutos ou diferenciais do conjunto.

Balakumar & Anirudhan (2011) consideram mais conveniente levar os recalques até limites toleráveis, além de não ser recomendável desprezar o aporte do radier. As estacas são dispostas como controladoras dos recalques e são usadas quando o radier é suportado por um depósito que apresenta adequada capacidade de carga. Na mesma linha, Chan (2006) indica que um sistema radier estaqueado tem que considerar a contribuição das estacas e do radier.

O radier, além de suportar parte da carga da fundação, parte esta que é função da geometria, número de estacas, flexibilidade do radier e do conjunto, espaçamento entre estacas, tipo de solo, estágio de deformação, etc., também tende a melhorar o desempenho das estacas em função do aumento do confinamento lateral das mesmas (Cunha *et al.*, 2001).

Na literatura, alguns autores (p. e. Durán, 2003 e Poulos, 1993) estabeleceram proporções de carga assumidas pelas estacas em até 20%, sendo que o radier assume 80% da carga total

em condições de carga sem mudanças nas condições da água no solo. Posteriormente, Mandolini *et al.* (2013) apresentaram um gráfico (Figura 2.4) em que foi estabelecido a variação da carga assumida pelo radier em um sistema radier estaqueado em função do Fator de Forma.



**Figura 2.4.** Proporção da carga assumida pelo radier em um sistema radier estaqueado.

Adaptado de Mandolini *et al.* (2013)

O Fator de Forma (FF) estabelece que o comportamento de sistemas radier estaqueado encontra-se influenciado pelo comportamento relativo do grupo de estacas e do radier, como exposto na Equação 2.2.

$$FF = \frac{A_G / A_R}{s / d} \quad (2.2)$$

onde:  $A_G$ : área do grupo de estacas, definida por Sanctis *et al.* (2002), Equação 2.3.

$$A_G = \left[ \left( \sqrt{N_p} - 1 \right) s \right]^2 \quad (2.3)$$

$A_R$ : área ocupada pelo radier;  $s$ : espaçamento;  $d$ : diâmetro das estacas e;  $N_p$ : número de estacas no grupo.

Determinar o recalque do sistema tende a ser o ponto crítico de projetos de radier estaqueado (Chung *et al.*, 2013). Uma forma de avaliar a influencia da inclusão das estacas sob um radier foi proposta por Bajad e Sahu (2008), por médio da relação de redução de

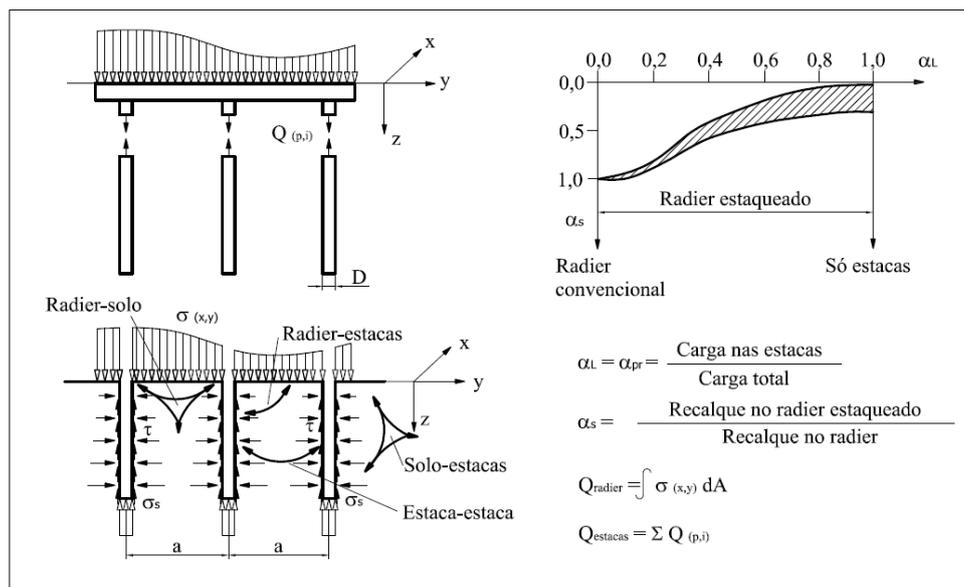
recalques,  $S_r$ , definida na Equação 2.4.

$$S_r = \frac{dri - dr}{dri} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Segundo Bajad & Sahu (2008), este parâmetro permite relacionar o deslocamento ou recalque do radier isolado ( $dri$ ) e o deslocamento ou recalque do radier estaqueado ( $dr$ ). Assim, quando o recalque das estacas é incrementado, o radier suporta uma carga maior. Neste caso as estacas atuam como redutor de recalques. Se a carga tomada pelas estacas se incrementa, este incremento torna-se mínimo e o grupo de estacas pode levar até 60% da carga. O recalque no sistema decresce quando aumenta o número de estacas, existindo um valor de recalque crítico a partir do qual as estacas não aportam na resistência do sistema.

Já que o comportamento de sistemas radier estaqueado se encontra altamente influenciado pelas interações entre o solo, as estacas e o radier, fatores de interação têm sido adotados para determinar as respostas destes sistemas. A interação estaca-estaca é definida como o recalque adicional de uma estaca ocasionado por outra adjacente carregada. A interação solo-estaca-radier é definida como uma superposição de campos de deslocamento. (Chung *et al.*, 2013).

Na Figura 2.5 são apresentados os fundamentos teóricos do sistema radier estaqueado com as diferentes interações que controlam o comportamento do mesmo e, na Tabela 2.2 são apresentadas algumas expressões para determinar os fatores de interação em sistemas radier estaqueado.



**Figura 2.5.** Fundamentos teóricos do sistema radier estaqueado.

Adaptado de El-Mossallamy (2011).

**Tabela 2.2.** Fatores de interação em sistemas radier estaqueado.

Adaptado de Chung *et al.* (2013)

Método	Tipo de interação	Equação	Observações
Poulos e Davis	Interação estaca-estaca	$\alpha = \frac{\Delta w}{w}$	Considerando o recalque adicional de uma estaca ( $\Delta w$ ) causado pela estaca adjacente.
Poulos	Interação estaca-estaca	$\Delta w_k = \alpha_1 \sum_{j=1}^n Q_j \alpha_{kj}$	A contribuição da estaca adjacente não é clara na equação. Considerando o recalque adicional de uma estaca causada pela estaca adjacente em função da força axial da estaca adjacente $Q_j$ .
Randolph	Interação radier-estaca	$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{r_r}{r_p}\right)}{\ln\left(\frac{2r_m}{r_p}\right)}$ $r_m = 2.5 \rho L(1 - \nu_s)$	Considerando o recalque adicional de um radier rígido circular causado por uma estaca. Não considera a variação na rigidez do solo ao longo das estacas e a flexibilidade do solo. O parâmetro para considerar a rigidez do solo é $\rho$ que corresponde com o grau de homogeneidade do solo.
Randolph	Interação radier-estaca	$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{r_r}{r_p}\right)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_p}\right)}$ $r_m = 0.25 + L\zeta [2.5 \rho L(1 - \nu) - 0.25]$ $\zeta = \frac{E_{sl}}{E_{sb}} \quad \rho = \frac{E_{sav}}{E_{sl}}$	Considerando o recalque adicional de um radier rígido circular causado por uma estaca. Considerando a rigidez do solo ao longo da estaca ( $E_{sav}$ ), no pé da estaca ( $E_{sb}$ ) e na cabeça da estaca ( $E_{sl}$ ). Não considera a flexibilidade do radier.
Clancy e Randolph	Interação estaca-radier	$\alpha_{rp} = \frac{k_p}{P_p} \left( w_{pr} - \frac{P_r}{k_r} \right)$	São necessários os valores de recalque do sistema radier estaqueado e a carga no radier e nas estacas. Pode considerar a flexibilidade do radier.

*Nomenclatura:*  $\Delta w_k$  = recalque adicional da estaca  $k$  causada por outras estacas;  $w_j$  = deslocamento causado por uma carga unitária na estaca  $k$  e na estaca  $j$ ;  $Q_j$  = carga na estaca  $j$ ;  $\alpha_{kj}$  = fator de interação da estaca  $k$  pela estaca  $j$  dentro do grupo;  $\alpha_{rp}$  = fator de interação entre estaca e radier;  $r_r$  = raio do radier;  $r_p$  = raio da estaca;  $\rho$  = grau de homogeneidade do solo;  $L$  = comprimento da estaca;  $\nu_s$  = relação de Poisson do solo;  $E_{sl}$  = módulo de elasticidade do solo no nível superior da estaca;  $E_{sb}$  = módulo de elasticidade do solo no nível inferior da estaca;  $E_{sav}$  = módulo de elasticidade médio do solo ao longo da estaca;  $P_p$  = carga total do sistema;  $P_r$  = carga do radier;  $k_p$  = rigidez do grupo de estacas isoladas;  $k_r$  = rigidez do radier isolado;  $w_{pr}$  = recalque do sistema radier estaqueado.

### 2.2.2 - Métodos de análise de sistemas radier estaqueado

O projeto de sistemas de fundação tridimensional inclui complicadas interações entre os elementos que as constituem, sendo possível dar uma solução aproximada, mediante o uso de complexos modelos numéricos que representem de maneira razoável as condições de campo.

Segundo Chow (2007), Balakumar (2008), Baziar, *et al.* (2009), Van Impe (2001), vários pesquisadores têm desenvolvido métodos de análise que, considerando a complexidade do sistema, resultaram incluindo simplificações em algumas das variáveis ou nos mesmos resultados: Van Impe & Lungue em 1996 e O'Neill *et al.* no mesmo ano, apresentaram revisões das metodologias utilizadas no projeto de fundações; uma contribuição completa da modelagem de sistemas radier estaqueado foi apresentada por El-Mossallamy e Franke no ano de 1997. Além disso, os autores mencionam que o conceito de trabalho ou comportamento de sistemas radier estaqueado tem sido descrito por autores como Zeevart (1957), Davis and Poulos (1972), Hooper (1974), Burland *et al.* (1984), Randolph (1994), Sommer *et al.* (1985), Price & Wardle (1986), Franke *et al.* (1994), Katzenbach *et al.* (1998, 2012) e Reul (2000), além de muitos outros.

Os métodos de análise de sistemas radier estaqueado reportados na literatura podem ser agrupados em:

- Métodos analíticos simplificados:

Embora não tenham sido propostos para sistemas radier estaqueado, estes métodos foram modificados com o objetivo de determinar o recalque de grupos de estacas. Neste caso, algumas aproximações foram feitas para tornar o processo computacional mais simples. O desenvolvimento computacional posterior levou os pesquisadores a adotarem métodos alternativos da modelagem numérica para resolver o mesmo problema. Teorias de estacas e radier equivalentes foram incluídas nesta categoria, e métodos que incluem matriz de rigidez foram classificados como métodos numéricos simplificados. No entanto, o método do radier equivalente só é usado para solução de grupos de estacas em que se considera que o radier não está em contato com o solo.

- Métodos numéricos simplificados:

Neste método, a interação solo-estrutura entre o elemento de fundação e o solo é modelada com o uso de molas (Modelo tipo Winkler) para o solo de fundação e de placas para a fundação. Este método é aproximado devido à inadequada representação da resposta do solo e a sua extensão semi-infinita. Apesar das limitações, este método é amplamente utilizado no projeto de fundações tipo radier ou radier estaqueado.

De acordo com Balakumar (2008), métodos numéricos simplificados têm sido trabalhados por Brown & Wiesner (1975, 1976), Poulos (1991), Poulos (1994), Clancy & Randolph (1993), Hain & Lee (1978), O'Neill *et al.* (1977), Chow (1986), Randolph & Wroth (1978),

Chow (1987) e outros.

- Métodos numéricos rigorosos:

O rápido desenvolvimento dos computadores e de métodos numéricos mais poderosos têm incentivado os pesquisadores a desenvolverem vários métodos numéricos para estudar a resposta carga–recalque e a distribuição da carga nos elementos dos sistemas radier estaqueado. Um resumo dos diferentes métodos que podem ser trabalhados com base em métodos numéricos rigorosos (elementos finitos 3D, entre outros) é apresentado por Balakumar (2008), Chow (2007) e Van Impe (2001).

### **2.3 - O PROBLEMA DE SUBSIDÊNCIA**

Do ponto de vista geral, NOAO (2002) define a subsidência como a perda de nível da superfície do solo que acontece devido à remoção de elementos de suporte, sendo uma das diferentes formas de falha do solo que atinge pequenos locais até grandes áreas de terreno. O fenômeno pode acontecer se fluidos e sólidos são removidos dos poros do solo, gerando-se vazios. Quando sólidos ou líquidos são removidos, a estabilidade dos vazios dependerá da resistência dos materiais remanentes. Sob os efeitos da gravidade os materiais podem colapsar.

No entanto, a subsidência é essencialmente um movimento descendente do material na superfície do solo, com um pequeno (ou não) movimento horizontal. Segundo Hewit (2011), o fenômeno de subsidência corresponde ao recalque progressivo do solo, associado a mudanças das propriedades em profundidade devido a: existência de materiais solúveis; processos de erosão mecânica superficial; fluxo plástico; compactação e subsidência tectônica.

Vários tipos de subsidência podem acontecer, produto da atividade humana ou de processos naturais tais como:

- Subsidência sobre depósitos compressíveis de grão fino ou solos orgânicos;
- Subsidência em argilas que contraem e expandem devido às mudanças de umidade;
- Subsidência pelo bombeamento da água e decomposição de depósitos orgânicos; e
- Subsidência pela mineração.

Outro tipo de subsidência é a associada à preparação de locais para construções. Escavações, drenagem, construção de estacas e, em geral, o abatimento da poropressão,

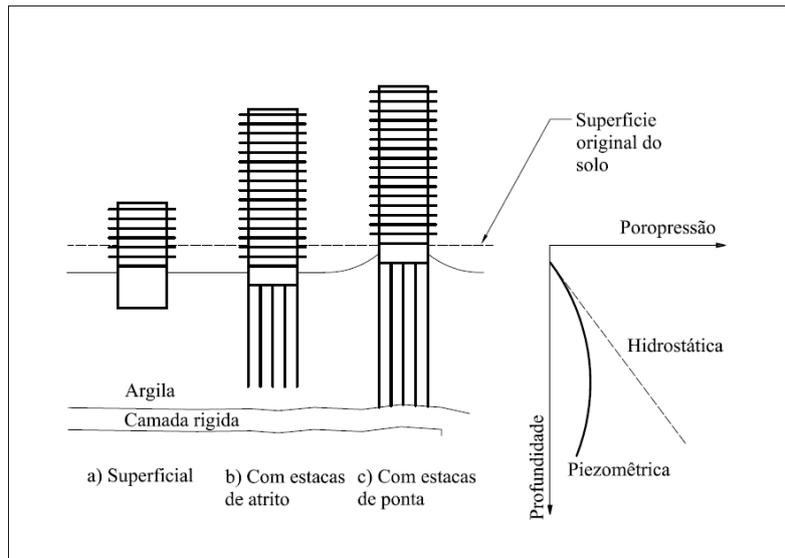
destroem o equilíbrio nas tensões do solo. A diferença da subsidência que pode ser gerada pela extração de água subterrânea, e que pode tomar muito tempo para se detectar, as operações *in situ* podem levar com que o solo recalque rapidamente (Wei, 2006).

Nos casos das cidades de Bogotá e do México, este último tipo de subsidência está altamente relacionado com os danos das estruturas vizinhas de projetos que apresentam vários níveis de altura, e que na maioria dos casos, também apresentam vários níveis de escavação para subsolos.

De acordo com Lobo-Guerrero (1992), o aproveitamento da água subterrânea em Bogotá - data dos tempos da colônia - e, naquela época, o nível freático regional baixava a taxas entre 3 e 5 m/ano, sendo o principal fator que influenciou na densificação e recalque das camadas superficiais da cidade, com o respectivo dano nas construções suportadas por elas. O “*Fondo para Atención y Prevención de Emergencias*” (FOPAE), no ano 2010, no documento da “*Zonificación de la respuesta Sísmica de Bogotá para el Diseño Sismoresistente de Edificaciones*”, realizou estudos observacionais que permitiram apreciar indícios de processos de subsidência local que se evidenciaram no deslocamento vertical de estruturas leves (plataformas e escadas de acesso), em bairros como *El Chicó, El Lago, El Polo* e *Chapinero*. Em alguns casos, segundo Bareño & Rodríguez (1999), recalques nestas zonas já foram reportados atingindo até 90 cm.

No caso do México, segundo Marsal & Mazari (1969) *apud* Rodríguez (2010), nas décadas de 40 e 60, se notou um recalque generalizado na cidade que ocasionou danos na infraestrutura e sérios problemas na estabilidade das construções dispostas sobre o antigo lago de *Texcoco*. De acordo com dados históricos, os registros mostraram que a cidade teve recalques que excederam os 10m. Também afirma que na medida em que avança o processo de adensamento, provocado pelo sobre-aproveitamento dos aquíferos subterrâneos, os edifícios tendem a apresentar maiores problemas de recalque (Rodríguez *et al.*, 2015).

Segundo Rodríguez *et al.* (2015), os processos de subsidência da zona do lago de México têm feito com que as estacas, que trabalham preferencialmente pela ponta, apresentem um fenômeno de “protrusão”, com a perda de confinamento da parte superior da estrutura e o dano das estruturas vizinhas. Por outro lado, quando as fundações de estacas flutuantes ou de atrito, não são projetadas adequadamente, estas podem apresentar recalques excessivos ou também sobressair do solo circunvizinho. Estas condições são esquematizadas na Figura 2.6.



**Figura 2.6.** Representação da resposta das fundações quando submetidas ao processo de subsidência.  
Adaptado de Rodríguez *et al.* (2015).

## 2.4 - ESTACAS COM ATRITO NEGATIVO

Quando não existe uma camada de rocha ou material duro e compacto a uma profundidade razoável, as estacas que trabalham por ponta tornam-se antieconômicas (condições dos solos das cidades de Bogotá e México, e do litoral brasileiro). Nestas condições, as estacas devem ser construídas em materiais moles superficiais até profundidades específicas e a capacidade de carga destas dependerá exclusivamente da componente de atrito lateral, que por sua vez dependerá do atrito ou da aderência entre a estaca e o solo.

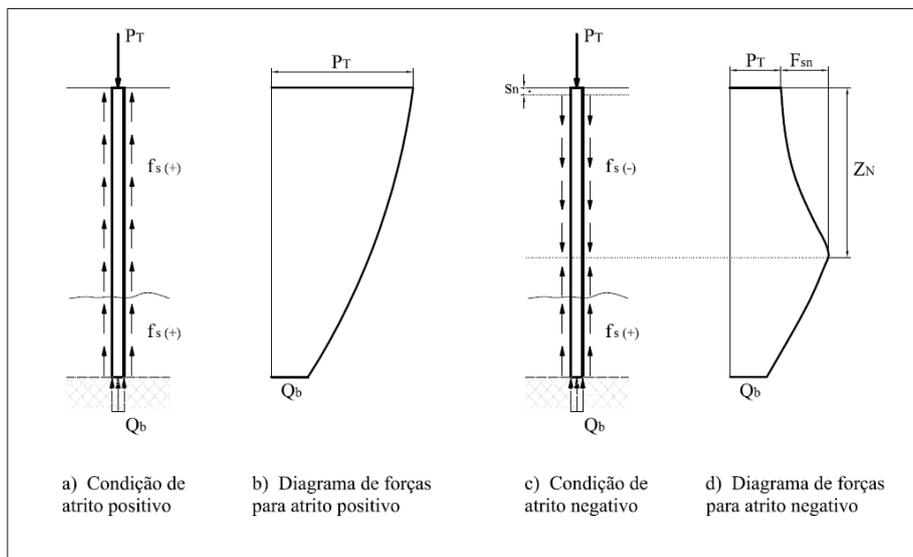
Os métodos de análise para prever o recalque e a distribuição da carga em estacas individuais normalmente não consideram os recalques devidos ao processo de adensamento nem o deslocamento relativo entre o solo e a estaca (Hewitt, 2011).

O atrito positivo no fuste da estaca é desenvolvido quando a estaca se desloca em relação ao solo ao seu redor. Por outro lado, o atrito negativo é desenvolvido quando o recalque do solo é maior do que o movimento vertical do fuste da estaca, ou quando existe um elevado recalque do solo ao redor da estaca, tal como apresentado na Figura 2.7.

O atrito negativo pode-se apresentar em solos submetidos a recalques de camadas compressíveis, recalques de solos colapsíveis por umedecimento, recalque associado com liquefação e recalque associado com o abatimento da poropressão. Também pode ocorrer em estacas instaladas em solos moles que apresentem adensamento por carga vertical, abatimento

das poropressões ou readensamento do solo, após o processo de cravação das estacas.

Os processos de adensamento e os recalques associados com ele, arrastam a estaca em direção descendente. O movimento de arrasto ocasiona carga adicional na estaca, a qual depende das propriedades da interface solo-estaca, do carregamento superficial e da carga axial (Indraratna *et al.*, 1992; Leung *et al.*, 2004; El-Sakhawy & Nassar, 2013). Os valores da carga induzida pelo atrito negativo podem ser importantes devido ao fato de que os valores unitários desse atrito podem ser tão altos quanto os valores de atrito positivo, sendo que a força de arrasto pode gerar recalques excessivos na estaca (Hewitt, 2011).



**Figura 2.7.** Condições de forças sobre estacas.

Adaptado de Hewitt (2011)

Geralmente, o atrito negativo tem dois efeitos nas estacas: o desenvolvimento de uma força de compressão, adicional a força aplicada (*dragload*) e um recalque em direção descendente ou de arrasto (*downdrag*). Devido à existência de deformação e resistência ao cisalhamento na interface solo-estaca, a distribuição do atrito negativo ao longo do fuste é dependente do tempo. Como o excesso de poropressão é dissipado com o tempo, os recalques e as tensões efetivas no solo aumentam. Por sua vez, este fenômeno causa um incremento na resistência ao cisalhamento na interface solo-estaca e o correspondente incremento na carga de arrasto “*dragload*” e no deslocamento de arrasto “*downdrag*”. O processo continua até atingir o adensamento completo (Chen *et al.*, 2009).

Fellenius (2006) esclarece os termos utilizados nos documentos que tratam sobre o atrito negativo (*Negative Skin Friction: NSF*). As cargas vivas e mortas aplicam para a avaliação da

capacidade de carga, a carga morta e a carga de arrasto (*dragload*) devem ser utilizadas para avaliar a resistência estrutural e, o deslocamento de arrasto (*downdrag*) faz referência somente ao recalque. A carga de arrasto não ocasiona recalques, mas ela mesma é produto do recalque do solo ao redor da estaca e é mobilizada quando a estaca se opõe a esse movimento.

As estacas com atrito negativo transferem a maior parte da carga da estrutura ao solo circunvizinho através do atrito perimetral. As maiores implicações de estacas submetidas ao atrito negativo, relacionam-se com o recalque induzido na estaca e a integridade estrutural devido à carga de arrasto gerada (Leung *et al.*, 2004; El-Sakhawy & Nassar, 2013).

De acordo com Auvinet & Rodríguez (2002), as estacas podem ser usadas como complemento de um radier para reduzir o recalque (projeto por deformação) ou podem ser usadas para suportar o peso total da estrutura garantindo estabilidade à fundação (projeto por capacidade de carga). Em qualquer destes casos é gerada uma complexa interação entre o solo, as estacas e a estrutura, devido ao fato do solo ser submetido a um duplo processo de adensamento: primeiro devido à carga que é transferida pela estrutura e segundo, devido às variações na poropressão pelo bombeamento de água ou a pouca recarga dos vazios do solo.

O projeto de fundações em estacas com atrito negativo se baseia na avaliação das tensões desenvolvidas na ponta e ao longo do perímetro da estaca e, nas deformações e forças desenvolvidas ao interior desta.

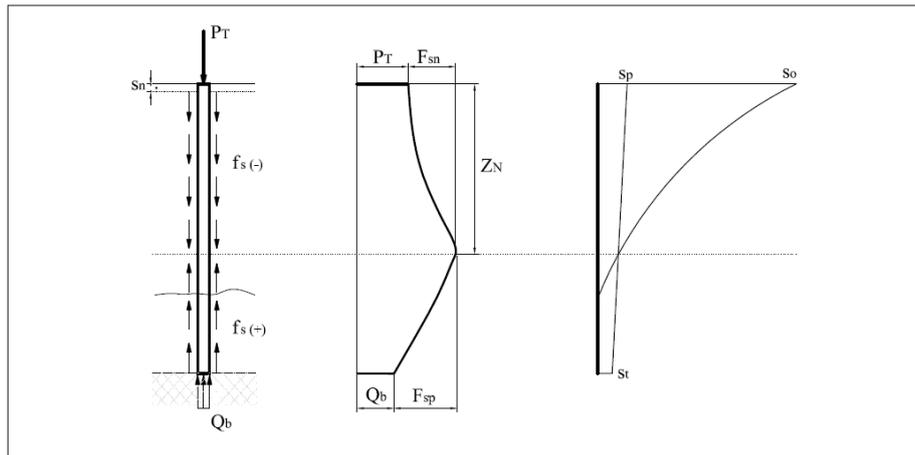
Fellenius (1984) expõe, baseado na Figura 2.8, que deve existir um equilíbrio entre a carga externa aplicada na cabeça das estacas ( $P_e + W$ ), a carga de arrasto ( $F_{s(-)}$ ), a resistência pelo fuste ( $F_{s(+)}$ ) e a resistência pela ponta ( $Q_b$ ). É comum que o atrito negativo seja desenvolvido na parte superior da estaca e o atrito positivo em sua parte inferior.

A profundidade na qual as tensões cisalhantes no fuste mudam de atrito negativo a atrito positivo é chamada de “plano neutro, eixo neutro ou ponto neutro”. No ponto neutro se estabelece um equilíbrio de forças, porém, não existe deslocamento relativo entre as estacas e o solo. No ponto neutro se apresenta a maior carga axial na estaca.

Bozozuk (1972) sugere que a profundidade do eixo neutro só depende da longitude de estaca embebida na camada de solo. Poorooshab *et al.* (1996) notam que o eixo neutro não é muito influenciado pela sobrecarga, no entanto, camadas rígidas próximas da pata das estacas tem uma influência marcante.

Prakash & Sharma (1990) sugeriram com base em algumas observações experimentais, que o ponto neutro se localiza a  $0,75L$  (75% do comprimento da estaca). Leung *et al.* (2004)

reportaram localizações do ponto neutro a 90% da profundidade das estacas. Fellenius (1984) estabelece que, considerando que as tensões cisalhantes no fuste das estacas não diminuem com a profundidade, o ponto neutro normalmente sempre está localizado embaixo do ponto médio das estacas. Se o solo embaixo do ponto médio é rígido, o ponto neutro se localizará mais próximo da ponta da estaca. Em solos homogêneos com resistência ao cisalhamento aumentando linearmente com a profundidade o ponto neutro se localiza no terço inferior da estaca (supondo que não existem cargas externas na cabeça do elemento).



**Figura 2.8.** Conceito do eixo neutro.

Adaptado de Hewit (2011)

Segundo Rodriguez (2010), a posição do ponto neutro pode ser determinada com a Equação 2.5.

$$Q - C_p = \left| F^+ \right|_{Z_0}^{Z_p} - \left| F^- \right|_{D_f}^{Z_0} \quad (2.5)$$

Onde:  $Q$  é a carga aplicada à estaca;  $C_p$  é a capacidade de carga da estaca;  $Z_0$  é a profundidade do ponto neutro;  $Z_p$  é a profundidade da ponta da estaca;  $D_f$  é a profundidade de fundação da placa;  $\left| F^+ \right|_{Z_0}^{Z_p}$  é a adesão limite ao longo do fuste da estaca de  $Z_0$  até  $Z_p$  e  $\left| F^- \right|_{D_f}^{Z_0}$  é a adesão limite ao longo do fuste da estaca de  $D_f$  até  $Z_0$ . O peso da estaca e o efeito de Arquimedes são considerados nos fatores de adesão e nas propriedades do solo.

Como o atrito negativo não pode ser maior que o incremento aparente do peso submerso da massa de solo que envolve a estaca por cima do eixo neutro, devido às forças de filtração induzidas pelo abatimento das porpressões, este pode ser avaliado com a Equação 2.6.

$$\left| F^- \right|_{D_f}^{Z_0} = \min \left\{ f_L \Big|_{D_f}^{Z_0} \cdot P \cdot (z_0 - D_f) \cdot N_p, \Delta \sigma' (Z_0) \cdot (A - N_p \cdot A_p) \right\} \quad (2.6)$$

Onde:  $f_{L|D_f}^{Z_0}$  é a resistência média ao cisalhamento ao longo do fuste das estacas de  $D_f$  até  $Z_0$ ;  $P$  é o perímetro da estacas,  $\Delta\sigma'(Z_0)$  é o incremento da tensão média devido ao abatimento das poropressões na profundidade  $Z_0$ ;  $A$  é a superfície do grupo de estacas;  $N_p$  é o número de estacas e  $A_p$  é a área transversal da estaca.

## **2.5 - SISTEMAS RADIER ESTAQUEADO EM SOLOS MOLES COM ADENSAMENTO**

Face à crescente expansão imobiliária e valorização de terrenos costeiros, existe uma tendência no mercado à verticalização das edificações, o que resulta em um maior carregamento nas fundações assentes sobre os diferentes depósitos litorâneos brasileiros. Ao longo do litoral brasileiro, desde o Chuí, até o Oiapoque, ocorrem solos aluvionares marinhos, constituídos de argilas de baixa consistência, muito moles e de idade geológica recente, que apresentam características bastante variadas do ponto de vista geotécnico. (Barata, 1986 e Romão & Gusmão, 2002).

Estes terrenos, de alta compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento, oferecem em consequência, grandes dificuldades para a construção de obras civis: aterros, estradas e edificações. Dentre as regiões que apresentam estas condições pode-se citar a Baixada Fluminense – RJ e a Baixada Santista – SP, sendo esta última já reconhecida no âmbito geotécnico pelos problemas associados às fundações dos prédios localizados em Santos.

No cenário mundial, muitas cidades estão se desenvolvendo sobre solos moles. Shangai, Bangkok, Mumbai, Kuala Lumpur, Jakarta, Singapura, Bogotá e México, são alguns exemplos de cidades que, além da presença deste tipo de solo, vem ganhando mais altura na verticalização das edificações. (Banerjee, 2009).

Quando se faz referência à fundação, se está falando do conjunto elemento estrutural-solo e, assim, todas as características necessárias ao sistema de fundação devem ocorrer na presença de qualquer solo, inclusive na presença de solos moles, sendo necessário entender o comportamento desses sistemas de fundação com as condições apresentadas *in loco*.

O radier estaqueado como tipo de fundação mista, que combina uma fundação em radier com estacas, as quais melhoram o comportamento do radier reduzindo e controlando recalques, tem aumentado sua aplicabilidade nos locais acima mencionados, ainda com pouco conhecimento teórico sobre a resposta do sistema nas condições específicas de uso em solos

moles.

Segundo Cunha *et al.* (2000), nas últimas décadas houve um aumento do interesse de diversos pesquisadores neste tipo de fundação. A maioria dos estudos realizados foi feito em casos históricos. Os autores mencionam que alguns pesquisadores já comentaram os benefícios deste tipo de fundação, dentre os quais podem se citar Butterfield e Banerjee (1971), Ottaviani (1975), Poulos (1991), Hansbo (1993), Ta e Small (1996), Poulos (1998) entre outros.

A seguir serão sumarizados os estudos relacionados com o uso de sistemas radier estaqueado em argilas moles, e posteriormente, como objetivos desta pesquisa são apresentados, cronologicamente, os estudos relacionados com o comportamento de grupos de estacas e sistemas radier estaqueado em argilas moles com processos de adensamento.

### **2.5.1 - Uso de sistemas radier estaqueado em solos moles**

Para Poulos e Davis (1980), os locais mais adequados para que sejam executados este tipo de fundações são aqueles onde predominam argilas relativamente rígidas, areias densas e perfis estratificados sem camadas moles abaixo do nível da ponta da estaca. Poulos (1993) apresentou algumas situações em que não é recomendável o uso de sistemas radier estaqueado, entre as quais incluía perfis de solos com argilas moles ou areias fofas próximos da superfície, ou aqueles que apresentem solos compressíveis, colapsíveis ou expansivos.

No Brasil, Cunha *et al.* (2000) e Sales (2000) têm voltado a atenção ao estudo do comportamento deste tipo de fundação no solo poroso de Brasília. De acordo com estes autores, o radier estaqueado vem a ser uma boa solução para problemas de fundações, embora não possa ser utilizado em qualquer caso.

No caso de argilas, Cunha *et al.* (2004) e Ayala (2013) mostraram que sistemas radier estaqueado podem ser utilizados em argilas tropicais, como é o caso de Brasília, com o comportamento adequado de carga e recalques para diminuir os custos das fundações, particularmente de pequenas edificações.

Van Impe (2001), Leung *et al.* (2004), Chan (2006), Lam (2006), Balakumar (2008), Abdrabbo & Ali (2015) e Rodríguez *et al.* (2015), reportaram vários trabalhos numéricos e experimentais que aprofundaram na resposta de estacas isoladas em solos moles com adensamento, analisando a distribuição da carga ao longo do fuste, a localização do eixo neutro, a presença de cargas de arrasto e a influência de recobrimentos na geração do atrito

negativo, sendo que, a maioria estão focados em estacas trabalhando pela ponta.

Lee *et al.* (2010) observam que para muitos pesquisadores, os sistemas radier estaqueado não apresentam relevância em solos argilosos devido principalmente à associação com recalques excessivos e capacidades de suporte muito baixas

Segundo Balakumar & Anirudhan (2011), o uso de sistemas radier estaqueado torna-se melhor quando são utilizados em depósitos de solo com presença de argilas sobreadensadas e em edifícios altos nos quais o radier se aprofunda, aliviando as condições de tensão nas bordas e, portanto, nos recalques.

### **2.5.2 - Grupos de estacas e sistemas radier estaqueado em solos moles com adensamento**

No que refere à inclusão de fenômenos de subsidência na análise de sistemas radier estaqueado em solos moles, a maioria das referências registram pesquisas sobre grupos de estacas com diferentes condições do bloco na cabeça delas, estudos de campo ou análise de estacas individuais, focadas a atrito negativo.

Assim, Ng *et al.* (1976) apresentaram um método analítico que permite estimar o atrito negativo para estacas que trabalham por ponta, com base na teoria elástica. Okabe (1977), com um estudo de campo reportou as medidas de carga de arrasto de um grupo de estacas submetidas a processos de abatimento das poropressões no solo e sobrecarga, concluindo que, se comparadas com estacas isoladas, as estacas no interior do grupo apresentam redução da carga de arrasto.

A *Canadian Geotechnical Society* (1978) apresentou um método empírico para determinar a magnitude da carga de arrasto. Inoue (1979), em um estudo de campo sobre grupos de estacas estabelece: a variação da carga de arrasto e sua dependência do tempo; a relação entre o atrito negativo e os recalques; a relação entre o atrito e as tensões ao redor das estacas; a influência da velocidade de recalque e das propriedades do solo na localização do eixo neutro e, por fim, apresenta um procedimento prático para determinar a carga de arrasto.

Shibata *et al.* (1982), com o uso de um modelo reduzido 1g analisaram estacas recobertas com betume e estacas sem betume, concluindo que, com aplicação do betume, o atrito negativo diminui, porém, a capacidade de carga da estaca resulta menor. Apresentaram também uma metodologia de determinação do efeito de grupo no atrito negativo para estacas sem recobrimento.

Foi proposta por Kuwabara & Poulos (1989), um método para avaliar a carga de arrasto

em um grupo de estacas, como uma extensão da metodologia apresentada por Poulos e Davis (1980) para avaliar o atrito negativo de estacas isoladas.

Thaher & Jessberger (1991) apresentaram um modelo experimental em centrífuga geotécnica (50g) para avaliar o efeito do número, diâmetro e comprimento das estacas em um radier estaqueado submetido a uma carga axial.

Em uma Nota Técnica, Poulos (1993) observa que em sistemas radier estaqueado, construídos sobre solos com adensamento, os recalques podem ser maiores do que aqueles determinados para grupos de estacas com a cabeça livre, e que, estes recalques estão associados ao movimento da superfície do solo. O maior recalque parece estar associado à carga imposta nas estacas por processos de adensamento e pela geração de atrito negativo que induzem maiores forças de compressão.

Lee (1993) descreve um método híbrido de transferência de carga para a análise da resposta de grupos de estacas com presença de atrito negativo utilizando a solução de Mindlin para a interação estaca-solo. Segundo Chan (2006), Little em 1994, com um estudo de campo à escala real sobre o grupo de estacas, concluiu que estacas trabalhando por ponta experimentam maior carga de arrasto que estacas flutuantes, nos dois casos, as estacas centrais apresentam maior carga de arrasto, se comparadas com estacas nas bordas.

Um método analítico iterativo para análise de cargas de arrasto em estacas que trabalham por ponta foi apresentado por Teh & Wong (1995). No mesmo ano, Ergun & Sonmez (1995) estudaram em um modelo 1g, estacas cravadas trabalhando por ponta, observando que o espaçamento influencia a magnitude do atrito negativo e o recalque ao interior das estacas (se comparado com o recalque do solo fora da área de influência) é um indicativo do efeito do grupo.

Horikoshi & Randolph (1996) realizaram um estudo experimental em centrífuga geotécnica (100g) onde analisaram: o efeito do número de estacas; a pressão sob o radier; os recalques; e a percentagem de carga nas estacas.

Katzenbach *et al.* (1998) analisaram a interação solo-estaca e sua influência nos recalques, a distribuição de carga e a distribuição das estacas, por meio do modelo numérico do Instituto de Geotecnia da Universidade Tecnológica de Darmstadt, caracterizando o solo com o modelo Drucker Prager.

Com o uso de análise tridimensional em um Modelo de Elementos Finitos, acoplando a poropressão e as tensões, no ano 2000, Reul realiza uma análise tridimensional do

comportamento de sistemas radier estaqueado e o efeito do adensamento por carga (Reul,2002).

Chow *et al.* (2001) propuseram um método variacional com o uso de modelos matriciais para determinar as constantes de interação, recalques, momentos no radier e força axial na cabeça das estacas. Reul (2002) realiza análise desacoplada a curto e longo prazo em parâmetros drenados e não drenados do comportamento de um sistema radier estaqueado, submetido a carga axial. Leet *et al.* (2002) utilizaram ABAQUS para analisar o comportamento da interfase solo-estacas.

Com um trabalho que analisa o comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles da cidade de Bogotá, Duran (2003) conclui que os sistemas radier-estaqueado estão mais bem preparados do que as soluções do radier sem estacas ou estacas compridas que trabalham por atrito lateral para suportar os processos de compressão secundária e subsidência gerados pelo abatimento das poropressões. Também refere que a subsidência regional produz excessivos recalques nas fundações superficiais tipo radier, além de produzir fenômenos de atrito negativo na parte superior das estacas longas, reduzindo o fator de segurança da fundação. No entanto, os sistemas radier estaqueado normalmente estão isentos desse fenômeno.

Lee & Ng (2004) simularam grupos de estacas em ABAQUS em solos com adensamento, sem radier e em condições drenadas. Só alguns anos depois, Sanctis & Mandolini (2006) apresentaram um método analítico para determinar a capacidade de carga do sistema, como resultado da soma das capacidades individuais dos componentes. O estudo apresentou uma análise paramétrica tridimensional para determinar os coeficientes que devem ser aplicados a cada uma das capacidades para determinar a capacidade total.

Shen *et al.* (2006) analisam o comportamento de estacas isoladas e de grupos de estacas apoiadas em uma camada rígida (trabalhando por ponta), com presença de atrito negativo por sobrecarga na superfície do solo, concluindo que, a carga de arrasto de estacas no interior do grupo foi similar à obtida para estacas isoladas.

Bajad & Sahu (2008) apresentaram os resultados de um estudo experimental (1g) concluindo que a distribuição da carga e o recalque são os parâmetros mais influenciados pelo comprimento das estacas e que algumas metodologias, como a de Poulos & Davis (1980), permitem avaliar a relação entre o número de estacas e o recalque médio, fornecendo um método rápido de avaliação do projeto.

Small & Liu (2008) apresentaram um estudo numérico (Elementos Finitos) incluindo o adensamento na análise, o solo como material elástico e elementos de adensamento infinito nas bordas.

Lee *et al.* (2010) apresentaram um modelado tridimensional em ABAQUS do comportamento de sistemas radier estaqueado submetidos a carga vertical, em argilas moles. Os autores analisaram a distribuição de carga no sistema, a influência do espaçamento e a interação solo-estaca-radier apresentando uma solução analítica para examinar o fator de segurança para um determinado recalque e, como este poderia ser utilizado para um projeto preliminar.

A importância de considerar o comportamento dependente do tempo na análise de fundações em solos devido ao adensamento e ao uso de métodos numéricos para estudar o efeito do tempo em um sistema radier estaqueado foi reportada por Cui *et al.* (2010).

Cui *et al.* (2010) também destacam que, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos para analisar o comportamento dependente do tempo de sistemas tridimensionais estrutura – estacas – radier – solo, devido a que normalmente não se representa a variação da poropressão no solo. Portanto, o comportamento tensão – deformação do solo não é linear, embora normalmente ele seja idealizado como um material linear, sendo recomendável o uso de modelos mais reais que reproduzam este fenômeno.

Tais autores também concluíram que o adensamento tem efeitos distintos sobre a resposta dos sistemas radier estaqueado especialmente quando o solo tem pouca drenagem e que, para estimar melhor as forças internas e deformações do sistema radier estaqueado, os efeitos do adensamento do solo e da rigidez da estrutura devem ser levados em consideração na análise.

Roy *et al.* (2011) apresentaram uma metodologia para projeto de sistemas radier estaqueado em solos com adensamento, analisando a resposta do solo e dos materiais com leis de comportamento linear. A metodologia foi proposta para determinar o tempo requerido para estabelecer a transferência de carga das estacas ao radier, avaliando separadamente as capacidades das estacas e do radier mesmo.

Com o uso do PLAXIS 3D, El-Mossallamy (2011) analisou o comportamento de sistemas radier estaqueado incluindo o comportamento linear do solo, o desenvolvimento de superfícies de ruptura ao longo do fuste das estacas e a rigidez do radier. Cho *et al.* (2012) por outro lado, pesquisaram a resposta de sistemas radier estaqueado considerando elementos de interface entre estacas e solo com o uso de ABAQUS.

Tran *et al.* (2012a) aprofundam nas consequências dos fenômenos de subsidência nas cidades de Ho Chi Min, Bangkok, México e Shangai, onde os recalques diferenciais das estruturas têm se incrementado pela mudança nas condições da água no solo argiloso destas cidades (fenômeno de subsidência). Concluindo que, nestes casos, a distribuição da carga nas estacas é o fator mais relevante para estimar o recalque das fundações ressaltando que poucos trabalhos têm se focado na resposta das fundações, quando submetidas a processos de subsidência do solo.

Tran *et al.* (2012b) utilizaram modelos tridimensionais em PLAXIS para analisar o efeito da subsidência e o espaçamento na capacidade de carga última de sistemas radier estaqueado e a distribuição de carga ao longo das estacas.

## **2.6 - MODELOS REDUZIDOS**

Caicedo *et al.* (2003) mencionam que os ensaios feitos com modelos reduzidos têm como objetivo simular um protótipo real e estudar a resposta dele em condições de contorno definidas para evidenciar certos modos de funcionamento e garantir dados para que sejam comparados com outras soluções do tipo numéricas.

Ainda quando os modelos numéricos tenham diminuído em parte o uso dos modelos físicos, estes últimos resultam úteis quando se apresentam geometrias complexas e o material do solo não se pode modelar com uma lei constitutiva adequada. No caso do uso de modelos em escala real, também não proporcionam dados indiscutíveis, pois na maioria dos casos não podem ser levados até a ruptura já que não se constroem para experimentação e formam parte de projetos reais, além de não se conhecer as condições de borda e também não ter uma caracterização completa dos materiais.

Os estudos reportados na literatura baseados em modelos de escala reduzida podem ser agrupados em Modelos de estudo em escala 1g e Modelos em centrífuga geotécnica.

### **2.6.1 - Modelos em escala 1g**

Um modelo reduzido 1g, pode ser entendido como a redução de uma estrutura complexa (um edifício, uma barragem ou uma ponte) conhecida como protótipo a uma estrutura relativamente mais simples, sem perder as características importantes do comportamento do protótipo (Reinhorn, 2008). Segundo Balakumar (2008), os modelos reduzidos em escala 1g são utilizados no campo da Engenharia Geotécnica para analisar a interação solo – estrutura e a influência de vários parâmetros no comportamento tensão – deformação.

A sequência de execução de um modelo físico a escala reduzida, atende aos seguintes passos:

- Definição do objetivo dos testes experimentais em função da variável de análise relevante: deslocamentos, mecanismos de falha, etc.;
- Seleção da escala normalmente regida pelos recursos de laboratório referidos a espaço, dispositivos de carregamento, etc.;
- Seleção do tipo de material para trabalho no modelo para o solo e os demais elementos;
- Determinação ou avaliação das condições de semelhança (o modelo pode não obedecer a um modelo real);
- Dimensionamento do modelo: plano de fabricação;
- Fabricação do modelo;
- Instalação de sensores para medir a resposta;
- Obtenção e armazenagem de dados experimentais (aquisição de dados);
- Análise de dados com base na resposta do modelo.

Para avaliação do comportamento de sistemas geotécnicos, especificamente sistemas de fundação profunda têm-se importantes referências na literatura de pesquisas que têm utilizado os modelos à escala reduzida 1g. O uso de modelos reduzidos envolvendo investigações geotécnicas têm-se apresentado como uma boa alternativa na análise e previsão de fenômenos que ocorrem na natureza.

Os ensaios com modelagem reduzida em laboratório possuem suas dificuldades e limitações, principalmente devido ao pequeno nível de tensão imposta (gravidade natural, 1g), dimensões da amostra, amolgamento, etc.

A dilatância a baixos níveis de tensão é um problema para que as areias densas sejam utilizadas nos modelos reduzidos. Desta forma, para reduzir os problemas apresentados, seriam necessários recipientes maiores com a aplicação de pressões superficiais (ou vácuo). Para as argilas, a maior dificuldade é a forma de preparação da amostra e instalação das fundações, que consomem um grande tempo de espera para a dissipação do excesso de poropressão para a realização de um único teste (Sales, 2000).

Mesmo com as suas limitações, os modelos reduzidos ou modelos 1g têm sido utilizados

como mostrado por Mokwa (1999). O autor apresenta uma revisão das pesquisas realizadas nos últimos 60 anos sobre o comportamento de grupos de estacas, relacionando 15 pesquisas em modelos reais, 16 em modelos 1g e 6 em centrífuga geotécnica. O autor observa que as pesquisas realizadas em modelos 1g são relativamente simples e não resultam custosas, além de prover resultados de maneira eficiente, trabalhar com condições controladas e permitir a reutilização de alguns materiais.

A primeira modelagem reportada por Mokwa (1999) é do ano 1967. Nesta modelagem foi realizado o estudo do comportamento de grupos de estacas com bloco fixo no topo das estacas, similar ao comportamento de sistemas radier estaqueado.

No entanto, Whitaker (1957 e 1961) *apud* Balakumar (2008) realizou uma serie de ensaios em modelos 1g para estudar a influência do número de estacas, comprimento e espaçamento, na resposta de um grupo de estacas com e sem bloco na cabeça. Brown (1972) avaliou o comportamento de radieres sobre solos argilosos com uso de modelos 1g, mostrando alguma correspondência entre o modelo Winkler e o comportamento do modelo em laboratório.

Wiesner & Brown (1978) apresentaram a avaliação de sistemas radier estaqueado instalados em argila sobreadensada tipo caulim, mostrando a aplicabilidade de teorias elásticas para previsão do comportamento de sistemas radier estaqueado. Akinmusuru (1980) *apud* Tavares (2012) apresentou um resultado de pesquisa em que modelos reduzidos foram utilizados para avaliar o comportamento do grupo ou do radier estaqueado. Este autor observou que a capacidade de carga desta solução composta, não é apenas a soma algébrica das capacidades individuais de cada elemento do conjunto, porém, poderá ser maior, face à interação existente entre as partes.

Bajad & Sahu (2008) elaboraram um modelo reduzido com argila, reportando uma duração de adensamento de nove dias ao máximo para camadas de 20 cm. Eles avaliaram o comportamento de sistemas radier estaqueado em argilas tentando analisar a influência da configuração das estacas no comportamento do sistema. Os autores também concluem que os modelos em escala reduzida (1g) podem ser considerados qualitativamente representativos do comportamento de elementos de fundações, e, portanto, passivos de serem usados para comprovar a aplicabilidade de estudos teóricos.

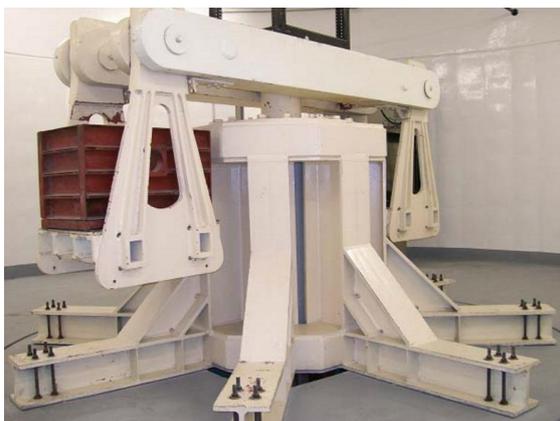
Na mesma linha, Krabbenhoft *et al.* (2010) anotam que embora o principal problema dos modelos 1g seja o fato de que os resultados não podem ser extrapolados imediatamente em uma estrutura em verdadeira grandeza devido ao comportamento não linear do solo, o que

conduz a efeitos de escala pelas tensões diferentes no modelo e no protótipo. Esse problema pode ser corrigido usando uma centrífuga geotécnica ou, nos casos em que se trata de uma questão de verificação de um projeto geotécnico, o modelo 1g pode ser utilizado sempre que a dependência dos parâmetros do solo com o nível de tensões seja incluída no modelo, utilizando modelos não lineares de solo nos modelos computacionais.

### 2.6.2 - Modelagem em centrífuga

Segundo Taylor (1995), a modelagem física em centrífuga consiste em tentar prever o comportamento que ocorrerá no protótipo, reproduzindo as condições em um modelo, que normalmente corresponde a uma versão reduzida do protótipo, onde os dois eventos têm que ser similares com base em leis de escalamento. Para o autor, basicamente a centrífuga geotécnica é um marco de carga em que, qualquer amostra de solo colocada em um extremo do braço da centrífuga se acelera de tal forma que é submetida a um campo de aceleração inercial radial que, pelo menos no modelo, é sentido como um campo de aceleração gravitacional  $N$  vezes mais forte do que a gravidade da terra.

Além da centrífuga geotécnica de braço, existe a centrífuga geotécnica de tambor, na qual o solo do modelo é colocado na parede interna (total ou parcialmente) do tambor que possui forma de anel. Na Figura 2.9 são apresentados os dois tipos de equipamento.



a) De braço. Universidade de Los Andes



b) De tambor. COPPE/UFRJ. (Jaime, 2004)

**Figura 2.9.** Tipos de centrífuga geotécnica.

O desenvolvimento histórico do uso da centrífuga geotécnica foi apresentado por Rincón & Rodríguez (2001). Na atualidade, o Japão tem o maior número de centrífugas com aproximadamente 25% (vinte e cinco por cento) do total mundial. Na América Latina são

conhecidas as centrífugas do Brasil, na Universidade Federal de Rio de Janeiro (UFRJ) e da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), além da centrífuga da Universidade de Los Andes, na Colômbia.

### **2.6.2.1 - Bases teóricas da modelagem em centrífuga geotécnica**

A seguir serão apresentados os elementos-chaves da modelagem em centrífuga:

- Preparação da amostra de solo:

No processo de fabricação do solo é importante duplicar o estado de tensões do protótipo no modelo, principalmente porque as propriedades de resistência do solo que controlam o comportamento deste são influenciadas pelo grau de confinamento. Para a fabricação do solo, podem ser utilizados solos artificiais, naturais remoldados ou naturais inalterados. Cada um deles com vantagens e desvantagens. As amostras inalteradas, por exemplo, podem apresentar intrusões de raízes ou grãos de solo de tamanho maior, além de fissuras, todos eles ficando fora de escala na modelagem. No caso de amostras remoldadas, as condições de história de tensões são perdidas.

Segundo Taylor (1995), a fabricação do solo com amostras remoldadas deve ser realizada com uma mistura do solo seco e água (próximo de 1,5 à 2 vezes o limite de liquidez do solo). Esta mistura é chamada de *slurry* (lama). O *slurry* é disposto em um molde e submetido a carregamento mediante uma prensa ou equipamento de adensamento. É preciso tomar cuidado para não deixar bolhas de ar presas dentro da mistura, devido ao fato da diminuição da saturação do solo.

A centrífuga geotécnica também pode ser utilizada na fabricação do solo a partir do *slurry*, no entanto, poderia gerar caminhos exclusivos de drenagem ou excessivo aumento da poropressão. Geralmente para fabricação de solo podem ser utilizadas as duas técnicas de fabricação associadas.

Outra opção na fabricação do solo consiste na utilização de caulim, um tipo de argila que, pelas suas características, pode minimizar o tempo de fabricação do solo e do ensaio na centrífuga.

- Leis de escala:

As leis de escala são obtidas com a necessidade de garantir a similitude das tensões no modelo e no protótipo. Segundo Taylor (1995), se um campo de aceleração de  $N$  vezes a gravidade da terra ( $g$ ) é aplicado em um material de densidade conhecida ( $\rho$ ), então a tensão

vertical  $\sigma_v$  para uma profundidade  $h_m$  no modelo, pode se escrever como:

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

e, no caso do protótipo:

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

as tensões no modelo e no protótipo têm que ser iguais na mesma profundidade, então:

$$h_m = N h_p \quad (2.9)$$

Neste caso, o modelo é uma representação escalada do protótipo. Para as dimensões lineares se obtém uma relação 1:N, de tal forma que as deformações no protótipo e no modelo serão correspondentes.

O campo gravitacional da terra é uniforme ao longo das profundidades de projeto utilizadas na engenharia civil. Quando usada centrífuga geotécnica para gerar uma maior aceleração, existe uma pequena variação da aceleração inercial radial no interior do modelo. Segundo Taylor (1995), o problema é menor se o raio ao qual é selecionado o fator de escala da gravidade  $N$  é adequado. Porém, a relação da altura do modelo ( $h_m$ ) e o raio efetivo da centrífuga ( $R_e$ ) é o parâmetro que determina o erro na modelagem. O autor afirma que para a maioria das centrífugas geotécnicas  $h_m/R_e$  é menor do que 0,2.

O erro máximo no perfil de tensões é baixo e geralmente menor do que 3% do protótipo. Ainda para centrífugas pequenas o erro na distribuição de tensões é muito pequeno para modelos maiores (30 cm de altura aproximadamente). Na Figura 2.10 são apresentadas as distribuições de tensões na profundidade.

- Adensamento e fluxo:

O adensamento está ligado com a dissipação da poropressão no solo. O grau de adensamento está descrito pelo fator adimensional de tempo  $T_v$  da Equação 2.10, abaixo:

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad (2.10)$$

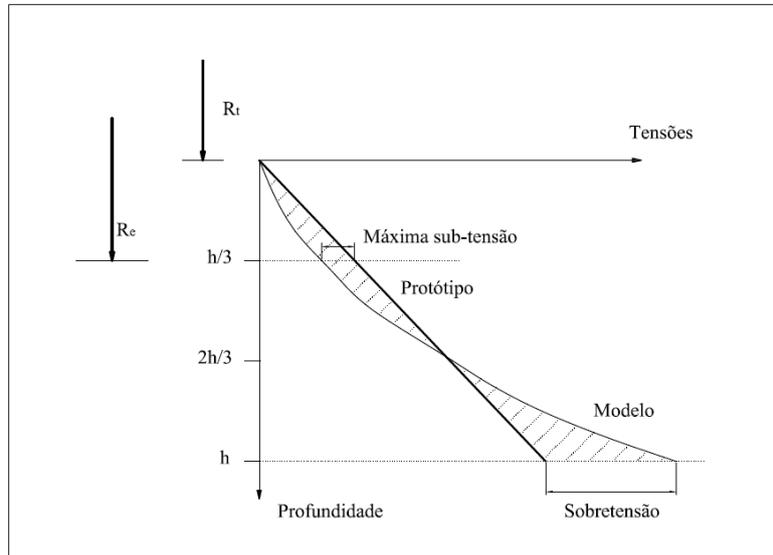
Onde:  $C_v$  é o coeficiente de adensamento vertical,  $t$  é o tempo de adensamento e  $H$  o comprimento máximo de drenagem. Para um mesmo grau de adensamento, os fatores adimensionais de tempo têm que ser iguais tanto no modelo quanto no protótipo:

$$\frac{C_{vm} t_m}{H_m^2} = \frac{C_{vp} t_p}{H_p^2} \quad (2.11)$$

Com base na Equação 2.11, é obtido:

$$t_m = \frac{1}{N^2} \frac{C_{vp}}{C_{vm}} t_p \quad (2.12)$$

Assim, pode-se observar que se o solo utilizado no modelo e no protótipo é igual e o fator de escala de tempo no adensamento é 1:  $N^2$ , onde a aparente aceleração dos processos relacionados com o tempo é consequência da escala geométrica reduzida do modelo.



**Figura 2.10.** Comparação da variação das tensões na profundidade em um modelo em centrífuga e seu protótipo. Adaptado de Taylor (1995).

As leis de escala para fluxo têm duas condições que precisam ser avaliadas: a interpretação do gradiente hidráulico e a aplicabilidade da lei de Darcy, sendo claro que a taxa de fluxo em um modelo é maior do que no protótipo (Equação 2.13).

$$v_m = i_m \bar{k}_m = i_p N \bar{k}_p = N v_p \quad (2.13)$$

Neste caso  $v_m$  e  $v_p$  correspondem às velocidades de fluxo no modelo e no protótipo respectivamente, e assim a velocidade de fluxo no modelo é  $N$  vezes maior do que no protótipo.

Se o fluxo é suposto como consequência da gravidade, implica que o solo vai se tornar

impermeável em um campo de gravidade zero. No entanto, analisando o gradiente hidráulico como uma queda de pressão em uma distância e considerando que as tensões são as mesmas no modelo e no protótipo, se estabelece que  $i_m = N i_p$ . A permeabilidade pode se tratar como uma propriedade intrínseca do material, e assim:

$$v_m = i_m k_m = N i_p k_p = N v_p \quad (2.14)$$

A velocidade de fluxo é N vezes maior no modelo do que no protótipo, como dito anteriormente.

As trajetórias de fluxo ao longo das quais o fluxo viaja, têm um fator de escala para comprimento de 1:N, logo, o tempo de drenagem pode se avaliar como:

$$t_m = \frac{L_m}{v_m} = \left( \frac{L_p}{N} \right) \left( \frac{1}{N v_p} \right) = \frac{1}{N^2} t_p \quad (2.15)$$

Com base na Equação 2.15, o fator de escala para o tempo nos problemas de fluxo é  $N^2$ , igual ao que é avaliado nos processos de adensamento.

Na Tabela 2.3 é apresentado um resumo das principais leis de escalamento que têm que ser consideradas para a modelagem na centrífuga geotécnica.

**Tabela 2.3.** Leis de escalamento na centrífuga geotécnica

Parâmetro	Unidade	Fator de Escala
Aceleração	L/T <sup>2</sup>	N
Densidade	M	1
Tensões	M/LT <sup>2</sup>	1
Deformações	-	1
Velocidade	L/T	1
Comprimento	L	1/N
Tempo (evento estático)	T	1/N <sup>2</sup>
Tempo (evento dinâmico)	T	1/N
Deslocamento	L	1/N
Peso unitário	M/L <sup>2</sup> T <sup>2</sup>	N
Velocidade de fluxo	L/T	N
Temperatura	°	1

- Efeitos de escala:

Nos estudos de modelagem física é possível reproduzir com precisão todos os detalhes do protótipo com algumas limitações, especialmente o campo de aceleração não uniforme gerado na modelagem. A maioria dos problemas associados com os efeitos de escala é controlada

quando realizados os modelos em escalas adequadas associadas com o tamanho do modelo. O controle é maior quando se possuem resultados do comportamento do protótipo comparáveis com aqueles obtidos no modelo. Porém, as faixas de escala de trabalho dos modelos tornam-se limitadas.

- Efeitos do tamanho das partículas:

No caso da modelagem em centrífuga geotécnica, o tamanho das partículas é uma das questões a serem analisadas. Segundo Taylor (1995), como o tamanho das partículas não pode ser escalado, é possível pensar que ao aumentar a escala do modelo pode-se aumentar a escala do tamanho da partícula, ou seja, uma areia fina pode-se comportar como uma partícula maior, ou uma argila pode-se comportar como uma areia fina.

O autor conclui que isto não é completamente válido, devido principalmente ao fato de que cada material possui diferentes características tensão-deformação. Podem-se apresentar problemas na modelagem se a escala do modelo é tão baixa que o tamanho do grão do solo seja similar com o tamanho do modelo, e assim, é pouco provável que o modelo apresente uma resposta tensão-deformação igual a do protótipo.

- Efeitos da construção:

Normalmente na engenharia geotécnica os processos de construção são muito importantes e são aqueles que se tentam representar na maioria dos projetos de modelagem. Qualquer equipamento a ser utilizado na modelagem tem que ser pequeno, leve e muito resistente, precisando um desenho muito detalhado e específico. De fato, uma das áreas de maior desenvolvimento na centrífuga geotécnica é o projeto e a construção de equipamentos a serem usados durante os processos de modelagem.

Na modelagem tem que ser definidos os detalhes essenciais que realmente precisam ser modelados, e aqueles que podem ser considerados como secundários. Ainda que sejam feitas aproximações, a informação obtida na centrífuga geotécnica é muito útil se interpretada da forma adequada.

Às vezes a modelagem em centrífuga é questionada porque a aceleração não é uniforme ao longo do solo e isso induz erros nas leis de escala. Além disso, em algumas ocasiões não é possível representar todas as condições do protótipo em um modelo em pequena escala, pois não podem ser representados alguns detalhes.

### **2.6.2.2 - Instrumentação**

O comportamento dos modelos na centrífuga geotécnica pode ser monitorado com uma variedade de instrumentos que incluem não somente equipamentos eletrônicos (transdutores), como também técnicas visuais. Os transdutores em contato com o modelo geotécnico têm que ser suficientemente pequenos e resistentes para suportar o próprio peso incrementado no voo, além de manter o funcionamento mecânico durante o mesmo.

A taxa de aquisição de dados durante o ensaio vai depender das necessidades de precisão, de resolução e das considerações de comportamento do modelo geotécnico. Além de suportar o próprio peso, é importante considerar que a instrumentação instalada no modelo tem que ser capaz de suportar a pressão gerada pelo solo e pela água sobre eles, se introduzidos no modelo.

Os elementos introduzidos no modelo têm que ter o tamanho adequado para que não influenciem o comportamento do solo, já que em alguns casos podem atuar como reforço. O modelo tem que ser projetado para garantir que o solo, com a instrumentação introduzida nele, não se comporte como um solo reforçado. Contudo, a instrumentação deve-se dispor de forma a não apresentar efeitos de reforço e de controle ou direcionamento das tensões e da resposta do solo.

Além dos transdutores que proporcionam uma medida detalhada da resposta do modelo, uma técnica útil consiste no uso de sinais ou marcas no solo que permitam avaliar comportamentos iniciais e finais do modelo, além de permitir determinar os vetores de movimento do solo e das estruturas colocadas no sistema.

### **2.6.2.3 - Outras considerações na modelagem da centrífuga geotécnica.**

Um ensaio na centrífuga normalmente é realizado para se modelar a condição de um projeto maior denominado protótipo. Igual do que em outras técnicas de modelagem em escala reduzida, nem todos os aspectos de protótipo podem ser modelados diretamente. Torna-se importante definir os fatores que realmente vão controlar o comportamento geral do modelo. Para aqueles fatores que não podem ser modelados diretamente, é recomendável apresentar uma aproximação adequada para que o comportamento do modelo não seja influenciado por esses fatores.

Na modelagem centrífuga, aqueles processos controlados pela gravidade são automaticamente reproduzidos. Taylor (1995) analisou os efeitos dos campos gravitacionais

baseado em uma técnica de modelagem de maquetes reduzidas. Normalmente o nível de aceleração centrífuga não é constante e se incrementa com o raio da centrífuga. Schofield (1998) mostrou que o nível adequado deve ser selecionado a um terço da profundidade do modelo no solo e, considerando que o comprimento do solo não vai exceder em 10% do raio da centrífuga, o erro por assumir a aceleração constante é insignificante. O efeito diminui se a área de interesse se dispõe ao longo do eixo central da caixa de ensaio (contêiner).

Segundo Taylor (1995), o fator de escala geométrico para o modelo é selecionado de maneira que possa encaixar no contêiner ou recipiente a fim de diminuir os efeitos de borda. A seleção do fator de escala é restringida pelo máximo tamanho do modelo que está relacionado com a capacidade operacional e de carga da centrífuga. Geralmente é recomendável um fator de escala tão pequeno quanto possível para se maximizar o tamanho do modelo.

Taylor (1995) também menciona que o projeto do modelo tem que incluir o efeito do ambiente da centrífuga. Quando a centrífuga rotaciona, a maior parte da energia requerida para o movimento é dissipada como calor, gerando um aumento da temperatura dentro da câmara centrífuga. O calor pode se dissipar pela ventilação da caixa ao rotacionar. A movimentação do ar pode causar efeitos indesejáveis no modelo, como o aumento das taxas de evaporação, o que faz recomendável proteger o modelo.

O controle do fluxo no modelo é importante para se garantir uma drenagem adequada e as condições de tensões efetivas. Segundo Taylor (1995), na medida em que a velocidade da centrífuga muda, as superfícies do líquido usado na modelagem ficam livres e perpendiculares à resultante do campo da aceleração. O movimento do fluido através da amostra pode causar erosão. Os efeitos do movimento podem ser diminuídos mantendo submersa a superfície da amostra (do solo) ou limitando a quantidade de fluido na superfície. No caso de solos coesivos, a superfície pode ser coberta para evitar o ressecamento do solo, controlando a evaporação. É recomendável o uso de piezômetros para monitorar o nível de fluido na amostra.

Para Schofield (1998), o uso da centrifuga torna-se tão valioso quanto o método observacional. Não podem ser extrapolados os resultados de modelos em escala reduzida diretamente aos protótipos, mas o método observacional permite obter dados aproximados do comportamento de fenômenos que nunca serão observados de forma natural.

## 2.7 - PESQUISAS DE REFERÊNCIA EM CENTRIFUGA

Como apresentado anteriormente, na revisão da literatura foram encontradas diferentes pesquisas teóricas e experimentais de sistemas radier estaqueado. No entanto, aquelas que se referem ao trabalho em centrífuga geotécnica são muito poucas, sendo que o número diminui quando a pesquisa se orienta a sistemas radier estaqueado em solos moles, com adensamento e estacas trabalhando por atrito ou flutuantes.

Assim, as principais pesquisas relacionadas com o tema deste documento se concentram em três trabalhos: Thaher & Jessberger (1991), Horikoshi & Randolph (1996) e Tran *et al.* (2012b), que se detalham a seguir.

### 2.7.1 - Pesquisa de Thaher & Jessberger (1991)

A pesquisa foi feita na centrífuga geotécnica da *Ruhr-University Bochum* na Alemanha. As características gerais da pesquisa são apresentadas na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4.** Características da pesquisa de Thaher & Jessberger (1991)

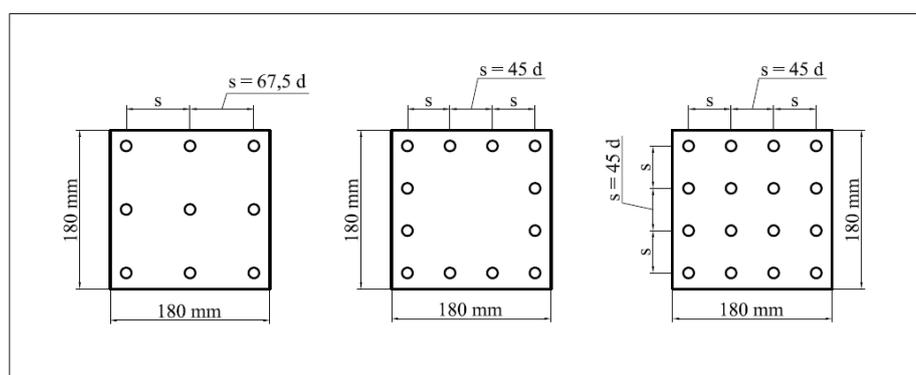
Autor	Thaher & Jessberger (1991)
Título	<i>The Behaviour of Pile-Raft Foundations, Investigated in Centrifuge Model Tests</i>
Equipamento	<i>Ruhr-University Bochum – ISMFE</i>
Escala do modelo	1/150
Forma do radier	Quadrado
Área do radier	180 x 180 mm
Espessura do radier	15 mm
Material do radier	Alumínio
Espessura do modelo	360 mm
Variáveis analisadas	Efeito do número de estacas Efeito do diâmetro das estacas Efeito do comprimento das estacas
Número de estacas	8, 12, 16
Diâmetro das estacas	Variável entre 6,7 e 16,7 mm
Comprimento das estacas	Variável entre 135 e 315 mm
Material das estacas	Alumínio
Tipo de solo	Argila sobreadensada tipo <i>London</i> ou <i>Frankfurt</i>
Carga aplicada	19,44 kN
Tempo de voo	30 horas

O estudo pesquisou o efeito do número, diâmetro e comprimento das estacas para diferentes configurações como apresentado na Tabela 2.5.

**Tabela 2.5.** Distribuição dos modelos da pesquisa de Thaher & Jessberger (1991)

Serie No.	Modelo No.	Número de estacas	Comprimento da estaca (mm)	Diâmetro da estaca (mm)
I	1	0	-	-
	2	8	135	16,7
	3	12	135	16,7
	4	16	135	16,7
II	1	8	135	16,7
	2	8	135	16,7
	3	8	135	16,7
III	1	8	135	16,7
	2	8	135	16,7
	3	8	135	16,7

Um esquema indicativo das distribuições de estacas utilizadas na pesquisa é apresentado na Figura 2.11.



**Figura 2.11.** Distribuições do sistema radier estaqueado nos ensaios realizados na pesquisa de Thaher & Jessberger (1991)

As principais conclusões apresentadas pelos autores foram:

- Em um arranjo simétrico e regular de estacas sob um radier rígido, a pressão de contato e a distribuição da carga são similares com uma condição sem estacas;
- Como resultado do adensamento pela carga, a carga total das estacas incrementa-se só em um 10% rebaixando na mesma proporção no radier;
- A relação espaçamento–diâmetro é uma variável importante no projeto de sistemas radier estaqueado.

## 2.7.2 - Pesquisa de Horikoshi & Randolph (1996)

O estudo foi realizado utilizando a centrífuga geotécnica da Universidade de Western, na Austrália. Esta pesquisa utilizou diferentes tipos de carregamento, avaliando o efeito do número de estacas e a distribuição na resposta mecânica do radier estaqueado. As principais características desta pesquisa são sumarizadas na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6.** Características da pesquisa de Horikoshi & Randolph (1996)

Autor	Horikoshi & Randolph (1996)
Título	<i>Centrifuge modelling of piled raft foundations on clay</i>
Equipamento	<i>University of Western – Australia</i>
Escala do modelo	1/100
Forma do radier	Circular
Área do radier	140 mm de diâmetro
Espessura do radier	0,25 mm
Material do radier	Alumínio
Espessura do modelo	250 mm
Variáveis analisadas	Efeito de número de estacas Pressão sob o radier Recalques Porcentagem de carga nos elementos tipo estacas
Número de estacas	5, 9, 21 e 69
Diâmetro das estacas	3,15mm externo e 2,45 externo.
Comprimento das estacas	150 mm
Material das estacas	Alumínio
Tipo de solo	Argila sobreadensada
Carga aplicada	120 kPa
Resistência média do solo	40 kPa
Tempo de voo	31 horas

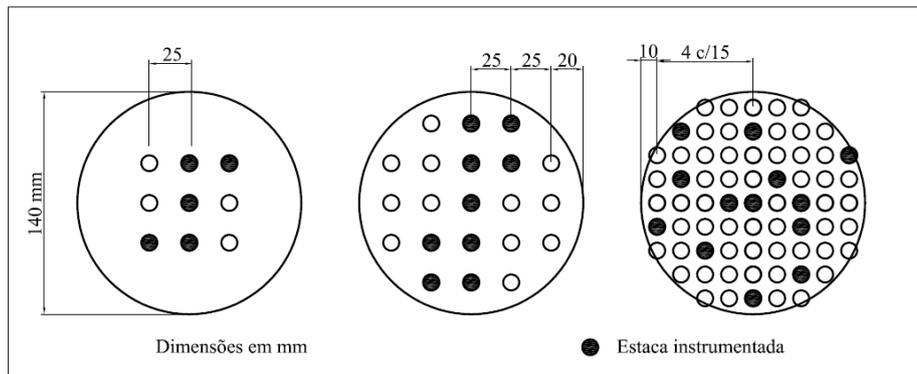
Na Tabela 2.7 são apresentadas as condições de carregamento utilizadas na pesquisa, junto com os ensaios realizados para caracterizar o solo.

**Tabela 2.7.** Modelos da pesquisa de Horikoshi & Randolph (1996)

Prova	Geometria	Tipo de carga	Ensaio adicional
1	Somente radier	Estática	SPLT, CPT, VST
2	Radier estaqueado (9) e (5)	Cíclica	CPT, VST
3	Radier estaqueado (9) e so radier	Cíclica	SPLT, CPT, VST
4	Radier estaqueado (9) e só radier	Cíclica	SPLT, CPT, VST
5	Radier estaqueado (21) e só radier	Cíclica	SPLT, CPT, VST
6	Radier estaqueado (69)	Cíclica	SPLT, CPT, VST, BPT

SPLT: Ensaio de carga estática em estaca simples com e sem bloco superior em voo; CPT: Ensaio de cone em voo; VST: Ensaio de palheta depois do voo; BPT: Ensaio de penetração T-bar em voo.

A pesquisa utilizou diferentes arranjos de estacas sob radieres circulares como esquematizado na Figura 2.12.



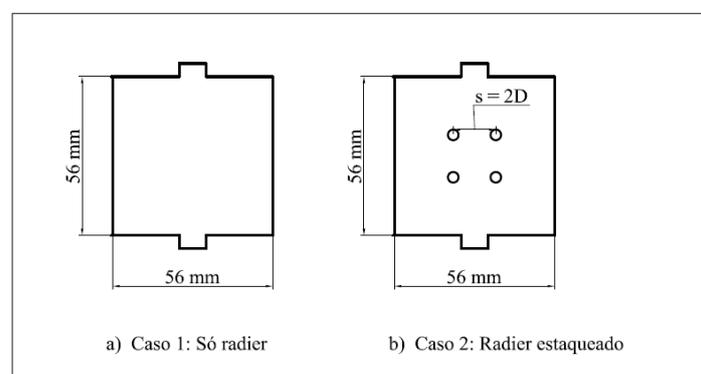
**Figura 2.12.** Distribuições do sistema radier estaqueado nos ensaios realizados na pesquisa de Horikoshi & Randolph (1996)

As principais conclusões do trabalho foram:

- A capacidade de suporte em estacas com bloco resulta maior do que aquelas que não o apresentam, provavelmente pelo confinamento lateral gerado;
- Os radieres com estacas concentradas no centro apresentam um recalque diferencial menor do que 30%, se comparadas com radieres sem estacas;
- Sob a condição de carga última, as estacas suportam 70% da carga total do sistema.

### 2.7.3 - Pesquisa de Tran *et al.* (2012b)

A pesquisa foi realizada no *Disaster Prevention Research Institute* (DPRI) da Universidade de Kyoto. Os modelos utilizados são esquematizados na Figura 2.13.



**Figura 2.13.** Distribuições do sistema radier estaqueado nos ensaios realizados na pesquisa de Tran *et al.* (2012b)

Na pesquisa foram avaliadas duas estruturas: um radier sem estacas e um radier com 4 estacas em condições com e sem rebaixamento, aplicando diferentes valores de carga em cada modelo. As principais características da pesquisa são apresentadas na Tabela 2.8.

**Tabela 2.8.** Características da pesquisa de Tran *et al.* (2012b)

Autor	Tran, Teramoto, Kimura, Boonyatee & Le Ba Vinh
Título	<i>Effect of ground subsidence on load sharing and settlement of raft and piled raft foundations</i>
Equipamento	<i>Disaster Prevention Research Institute (DPRI) -Kyoto University</i>
Escala do modelo	1/50
Forma do radier	Quadrado
Área do radier	56 x 56 mm
Espessura do radier	15 mm
Material do radier	Alumínio
Espessura do modelo	235 mm
Variáveis analisadas	Influência do bombeamento na distribuição das cargas Comparação das condições drenada e não drenada
Número de estacas	4
Diâmetro das estacas	8 mm (espessura 1mm)
Comprimento das estacas	205 mm
Material das estacas	Alumínio
Tipo de solo	Argila sobreadensada
Carga aplicada	200 N e 660 N
Resistência média do solo	35 kPa
Tempo de voo	7 horas

Os autores concluem:

- A influência da subsidência é maior no radier isolado do que no radier estaqueado;
- A carga tomada pelas estacas decresce rapidamente;
- A efetividade das estacas para reduzir os recalques diminui quando submetidas a processos de subsidência.

## 2.8 - RESUMO DO CAPITULO

Neste capítulo foram apresentadas as principais características de funcionamento de sistemas radier estaqueado e sua possibilidade de uso em solos moles, sendo que, para alguns autores esses sistemas podem ser amplamente utilizados porque provem uma maior capacidade de carga e menor recalque diferencial.

Foi explicado o fenômeno de subsidência, que pode ser gerado pelo abatimento das poropressões do solo pelos processos de bombeamento. Este processo de subsidência traz,

como consequência, a presença de atrito negativo em estacas inseridas nas camadas de solos moles afetadas pelo fenômeno.

Por sua vez, o atrito negativo está associado com cargas de arrasto (*download*) geradas pelo recalque de arrasto (*downdrag*). A presença do atrito negativo e da carga de arrasto gera uma mudança na distribuição da carga pelo atrito ao longo do fuste das estacas.

Diferentes estudos têm sido realizados para entender o comportamento de estacas individuais inseridas em camadas de solos moles com processos de adensamento por carga ou por abatimento das poropressões, a maioria deles, associados com estacas que trabalham por ponta.

Já para os sistemas radier estaqueados construídos em solos moles e submetidos somente a carregamento, a maioria dos estudos realizados foram teóricos, e têm sido focados na análise da influência do atrito negativo na resposta do sistema (recalques, pressão sob radier, distribuição de carga ao longo do fuste e distribuição da carga nas estacas e o radier).

Estudos experimentais são reportados pela literatura. As pesquisas têm utilizado modelos reduzidos em escala 1g ou em centrifuga geotécnica. A modelagem em centrifuga permite obter, de maneira controlada, dados e observações do fenômeno analisado que podem posteriormente ser validadas com metodologias teóricas.

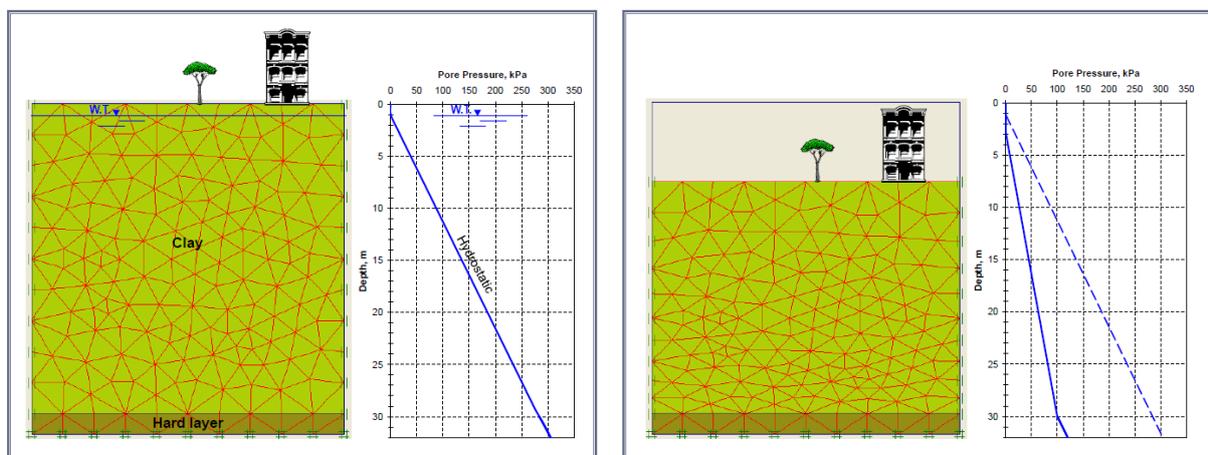
Observa-se a necessidade de obter dados experimentais e de campo do comportamento de sistemas radier estaqueado com estacas flutuantes (de atrito), quando submetidos a processos de abatimento das poropressões. Os dados poderão complementar as metodologias de análise e, no futuro, permitirão propor metodologias analíticas simples que permitam um projeto mais eficiente e rápido destes sistemas de fundação, quando construídos em solos moles com as condições mencionadas.

### 3 - MATERIAIS E METODOS

Neste capítulo são descritas aquelas atividades de preparação para a modelagem: os equipamentos utilizados; uma descrição do processo de seleção dos materiais tanto para o solo, quanto para os elementos radier e estacas, o processo de fabricação do solo e as configurações geométricas avaliadas.

#### 3.1 - FENÔMENO A MODELAR

Como mencionado no objetivo geral desta pesquisa, procurou-se avaliar o comportamento de sistemas radier estaqueado dispostos em solos moles em processo de adensamento. Neste caso, o adensamento pode ser gerado tanto pela carga das estruturas, quanto pelo abatimento das poropressões em profundidade. Este abatimento, na presente pesquisa foi associado com os processos de subsidência induzidos pela extração da água de camadas permeáveis profundas (bombeamento da água), como apresentado na Figura 3.1.



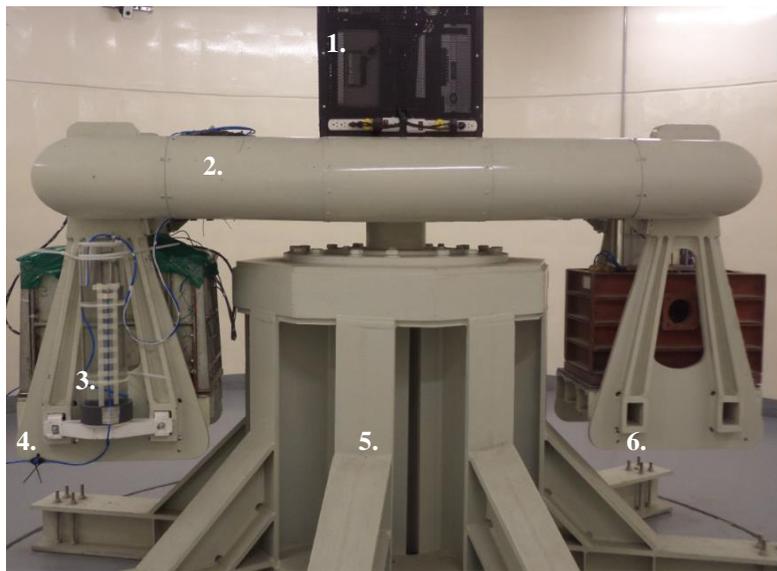
**Figura 3.1.** Fenômeno de abatimento da poropressão em profundidade.

Adaptado de Rodríguez (2011).

Para gerar o abatimento das poropressões em uma profundidade específica, os modelos deviam contar com uma camada de material impermeável sob a camada de argila em que seriam inseridas as estacas. Através desta camada impermeável se podia garantir a condição de equilíbrio de poropressões da água ao interior do modelo, quando avaliada somente a influência do carregamento, ou permitir a saída de água para simular abatimento das poropressões.

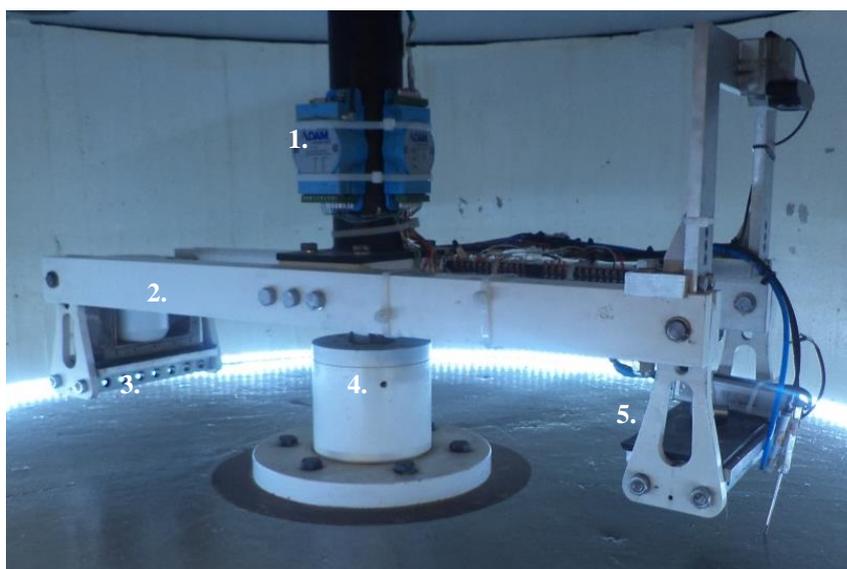
### 3.2 - DESCRIÇÃO DA CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA

Para a presente pesquisa foram ensaiados modelos reduzidos na centrífuga geotécnica da Universidade *de Los Andes*. A universidade possui dois equipamentos para modelagem em centrífuga geotécnica, sendo que os dois foram usados nesta pesquisa. O maior deles corresponde a um equipamento de escala média para os padrões internacionais e suas características são apresentadas na Figura 3.2 e na Tabela 3.1. Há também mais um equipamento de tamanho menor com as características apresentadas na Figura 3.3 e na Tabela 3.2.



1. Painel de aquisição de dados
2. Braço
3. Tanque de controle da água
4. Plataforma para caixas de modelagem
5. Motor
6. Plataforma de contrapeso

**Figura 3.2.** Centrífuga geotécnica de maior tamanho da Universidade *de Los Andes*



1. Painel de aquisição de dados
2. Braço
3. Plataforma do contrapeso
4. Eixo do motor
5. Plataforma para caixas de modelagem

**Figura 3.3.** Centrífuga geotécnica de menor tamanho da Universidade *de Los Andes*

**Tabela 3.1.** Características da centrífuga geotécnica de maior tamanho

Raio de giro	1,90 m
Dimensões das caixas para modelagem	40 cm x 50 cm x 50 cm
Campo máximo	200 g
Peso máximo do modelo	400 kg
Potência nominal	400 HP
Canais para medição	50 aprox.

**Tabela 3.2.** Características da centrífuga geotécnica de menor tamanho

Raio de giro	0,56 m
Dimensões das caixas para modelagem	7 cm x 14 cm x 12 cm
Campo máximo	300 g
Peso máximo do modelo	5000 gr
Potência nominal	3 HP
Canais para medição	40

### 3.3 - PARÂMETROS A SEREM AVALIADOS NOS MODELOS

A pesquisa foi direcionada à avaliação do comportamento de sistemas radier estaqueado dispostas em argilas moles, quando submetidos a processos de adensamento. Como apresentado no item 2.5, vários autores têm trabalhado modelos teóricos, numéricos e simplificados, avaliando a influência de diferentes elementos na resposta do sistema radier estaqueado.

Elementos tais como a área do radier; o comprimento das estacas; o diâmetro das estacas; o tipo de carga; o material; o espaçamento das estacas; o processo de fabricação; a disposição das estacas; etc. foram considerados nessas pesquisas, porém, em poucas delas foram considerados os efeitos do abatimento da poropressão. A pesquisa de Tran *et al.* (2012b) foi a única que referenciou o uso de centrífuga geotécnica para avaliar a influência dos processos de subsidência em sistemas radier estaqueado.

Baseados nessas considerações, as variáveis que foram definidas para serem avaliadas na pesquisa foram as seguintes:

- Os recalques do sistema: Procurou-se avaliar o recalque comparativo do radier sem estacas e do radier com estacas, além do recalque adicional gerado pelo abatimento da poropressão no solo. O recalque foi uma das principais variáveis a se analisar, devido ao fato de que ele é a resposta mais evidente de processos associados com a alteração das condições de tensões, carga e poropressão;
- Variação da poropressão no solo: Para estabelecer a relação das variações nas cargas

das estacas e dos recalques com as condições de trabalho do solo (com abatimento e sem abatimento), considerou-se necessário medir a poropressão no interior do solo e estabelecer a influência da variação no comportamento do sistema;

- Distribuição da carga nas estacas: No caso de radieres rígidos especialmente, é possível que as estacas suportem cargas diferentes com base na localização ou na configuração geométrica, que pode variar quando se apresentam processos adicionais de adensamento pelo abatimento da poropressão (Poulos & Davis, 1980).
- Carga ao longo da estaca: Como apresentado na revisão da literatura, os processos associados com recalques ou variação de poropressão ao interior do solo, geram normalmente uma variação das cargas ao longo do fuste das estacas, além da variação gerada pela distribuição da carga de trabalho do sistema.

### 3.4 - MATERIAIS PARA O RADIER E ESTACAS

Os elementos do modelo podem ser trabalhados em vários materiais como alumínio, microconcreto e acrílico (Balakumar, 2008). Devido a pouca experiência prévia e, especialmente pelo tipo de elementos que se desejavam modelar, o uso de estacas e placas de microconcreto não foram aplicáveis nesta pesquisa. Baseado na experiência existente de modelagem se decidiu trabalhar com elementos em alumínio para os modelos realizados na centrifuga de maior porte e acrílico e madeira para os modelos menores.

Para garantir similitude entre o modelo e o protótipo, o módulo de flexão dos elementos do modelo tinha que ser similar àquele do protótipo. Porém, o modelo não correspondeu a um protótipo conhecido, então, se buscou garantir pelo menos que os valores dos módulos fossem coerentes com valores típicos da literatura. Assim, a similitude entre o modelo e protótipo é representada pela Equação 3.1 (Taylor, 1995).

$$E_m^{mm} I_m^{mm} = E_m^c I_m^c \quad (3.1)$$

onde,

$E_m^{mm}$  Módulo elástico do material no modelo.

Para os modelos na centrifuga de maior tamanho, alumínio com Módulo de 50000 a 70000 MPa.

Para os modelos de menor tamanho, madeira com Módulo de 15000 a 20000 MPa e, acrílico com Módulo de 6000 MPa.

$E_m^c$  Módulo elástico do concreto (20000 – 30000 MPa)

$$I_m = \frac{b t^3}{12} \quad \text{Momento de inércia, } b: \text{ base do elemento e, } t: \text{ altura do elemento.}$$

Esta similitude entre módulos de flexão permite escalar as dimensões de elementos que estejam sometidos a este tipo de solicitação, por exemplo, neste caso o radier. Para todos os outros elementos a conversão das dimensões é linear, dependendo do fator de escala.

### 3.5 - FATOR DE ESCALA E DIMENSÕES DOS ELEMENTOS

Normalmente, o fator de escala é selecionado para reproduzir as condições do protótipo. Nesta pesquisa não foi reproduzido um protótipo específico, portanto, foi preciso garantir que o modelo representasse algumas características gerais de uma fundação típica em solos moles. Assim, neste caso, o fator de escala ficou condicionado às dimensões da caixa de modelagem, tal como mencionado na revisão da literatura em pesquisas prévias e nas condições de borda. O fator de escala avaliado para os modelos foi de 1/70 ou 70 g para o equipamento de maior tamanho e de 1/200 ou 200g para os modelos de menor tamanho.

As dimensões dos elementos radier (submetidos a flexão) foram determinadas a partir da Equação 3.1. Assim, considerando uma base unitária para o radier foi obtida a Equação 3.2.

$$t_p^c = \frac{t_m^{mm} n_l}{\sqrt[3]{\frac{E_m^c}{E_m^{mm}}}} \quad (3.2)$$

onde:  $t_p^c$  é a altura em concreto do protótipo,  $t_m^{mm}$  é a altura do modelo no material correspondente,  $n_l$  é o fator de escala,  $E_m^{mm}$  é o módulo elástico do material usado no modelo e,  $E_m^c$  é o módulo elástico do concreto.

Para as estacas, as dimensões foram determinadas com a aplicação das leis apresentadas na Tabela 2.3 já que o comprimento e o diâmetro das mesmas se escalaram linearmente. Na Tabela 3.3 são apresentadas as dimensões dos elementos e a similitude com elementos em escala real (protótipo), considerando que foram usados elementos de alumínio com dimensões comerciais para garantir a sua aquisição.

A Tabela 3.3 apresenta os resultados do dimensionamento para os modelos na centrífuga de maior tamanho em escala 1/70. Com similares condições, na Tabela 3.4 são apresentadas as dimensões dos elementos e a similitude com elementos em escala real (protótipo equivalente) para modelos em escala 1/200.

As dimensões dos elementos usados dependeram dos materiais trabalhados. Nos modelos

em escala 1/200 foi utilizado bambu para as estacas e acrílico para o radier, já nos modelos em escala 1/70 foi utilizado alumínio, considerando dimensões comerciais a fim de garantir a sua aquisição.

**Tabela 3.3.** Determinação das dimensões dos elementos do sistema radier estaqueado para os modelos em escala 1/70.

		NO MODELO	NO PROTÓTIPO
Radier	Fator de escala	70 g	
	Material	Alumínio	Concreto
	Espessura	$e_R$ 13 mm	1.147 m
	Módulo de Elasticidade	E 70000 Mpa	35000 Mpa
	Largura	B 200 mm	14 m
Estacas	Comprimento	L 200 mm	14 m
	Material	Alumínio	Concreto
	Diâmetro	D 9 mm	63 cm
	Módulo de Elasticidade	E 70000 Mpa	30000 Mpa
	Comprimento	L 320 mm	22,4 m

**Tabela 3.4.** Determinação das dimensões dos elementos do sistema radier estaqueado para os modelos em escala 1/200.

		NO MODELO	NO PROTÓTIPO
Radier	Fator de escala	200 g	
	Material	Acrílico	Concreto
	Espessura	$e_R$ 9 mm	1.0 m
	Módulo de Elasticidade	E 6000 Mpa	35000 Mpa
	Largura	B 40 mm	8 m
Estacas	Comprimento	L 40 mm	8 m
	Material	Bambu	Concreto
	Diâmetro	D 3 mm	60 cm
	Módulo de Elasticidade	E 18000 Mpa	30000 Mpa
	Comprimento	L 80 mm	16 m

### 3.6 - DETERMINAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS MODELOS

Baseados nas pesquisas de referência apresentadas no item 2.7, propuseram-se configurações que permitiram avaliar o comportamento de sistemas radier estaqueado com foco nos parâmetros apresentados no item 3.3. Algumas características dos modelos foram mantidas constantes e outras variáveis, para uma melhor análise da resposta. Os parâmetros

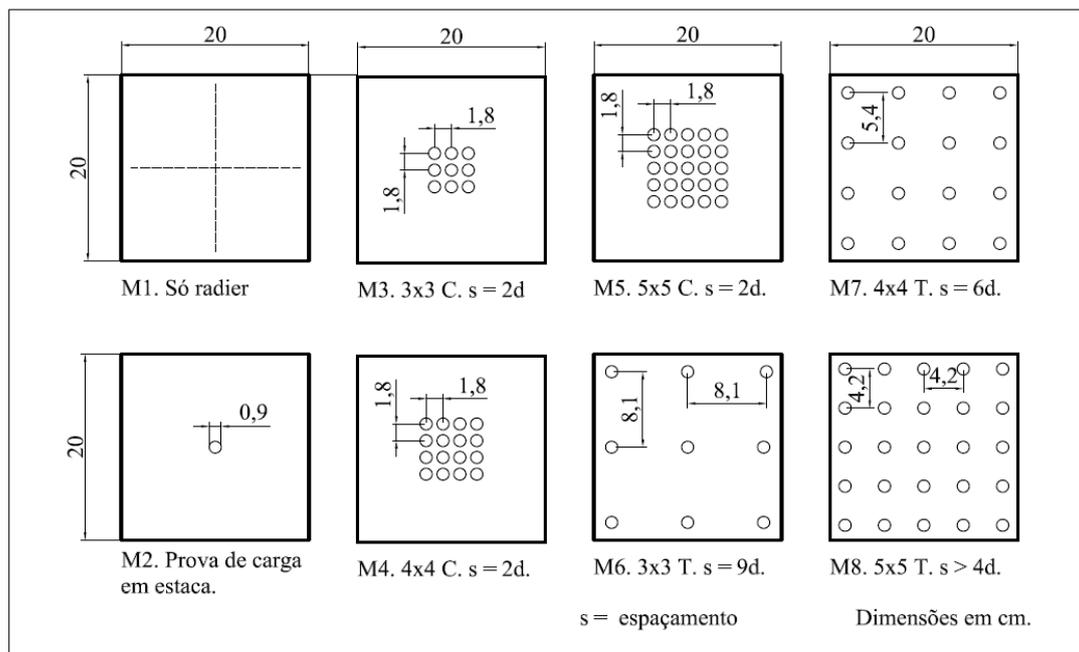
que foram considerados variáveis para avaliar sua influência na resposta de radier estaqueado em argilas foram: o espaçamento das estacas; a quantidade de estacas e; a distribuição geométrica no sistema.

Na Tabela 3.5 e Figura 3.4 são apresentadas as principais características dos modelos propostos. Os nomes dos modelos dispostos na coluna da esquerda da Tabela 3.5, com letras maiúsculas (M), indicam que correspondem ao modelo a ser avaliado na centrifuga de maior tamanho e em escala 1/70 ou 70g.

**Tabela 3.5.** Modelos propostos em escala 1/70.

Nome do Modelo	Dimensões do radier (cm)	Espessura do radier (cm)	Diâmetro das estacas (cm)	Comprimento das estacas (cm)	Configuração	Espaçamento (cm)	Número de estacas
M1	20 x 20	1,3			-		0
M2	-	-	0,9	32,0	1		
M3	20 x 20	1,3	0,9	32,0	3 x 3 C	1,8	9
M4	20 x 20	1,3	0,9	32,0	4 x 4 C	1,8	16
M5	20 x 20	1,3	0,9	32,0	5 x 5 C	1,8	25
M6	20 x 20	1,3	0,9	32,0	3 x 3 T	8,1	9
M7	20 x 20	1,3	0,9	32,0	4 x 4 T	5,4	16
M8	20 x 20	1,3	0,9	32,0	5 x 5 T	4,2	25

C: no centro do radier. T: distribuídas em toda a área do radier.



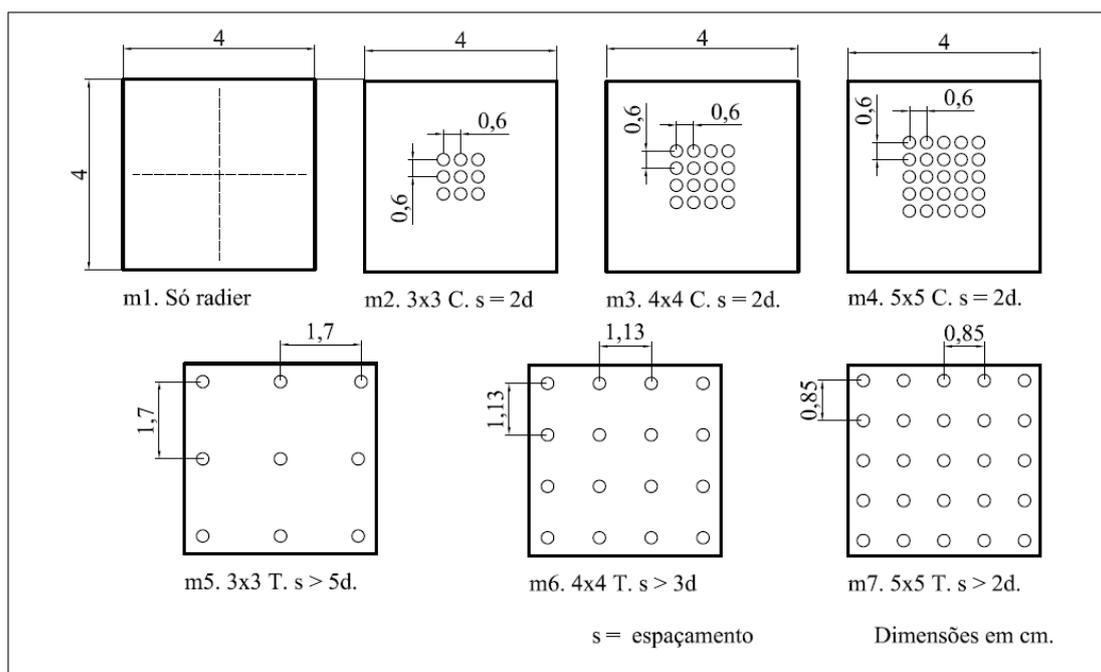
**Figura 3.4.** Configurações geométricas dos modelos propostos em escala 1/70.

Na Tabela 3.6 e Figura 3.5 são apresentados os modelos propostos para avaliação na centrífuga de menor tamanho. Neste caso, a denominação feita com a letra minúscula (m), que indica que os modelos foram avaliados em escala 1/200 ou 200g.

**Tabela 3.6.** Modelos propostos em escala 1/200.

Nome do Modelo	Dimensões do radier (cm)	Espessura do radier (cm)	Diâmetro das estacas (cm)	Comprimento das estacas (cm)	Configuração	Espaçamento (cm)	Número de estacas
m1	4x4	0,9			-		0
m2	4x4	0,9	0,3	8,0	3 x 3 C	0,6	9
m3	4x4	0,9	0,3	8,0	4 x 4 C	0,6	16
m4	4x4	0,9	0,3	8,0	5 x 5 C	0,6	25
m5	4x4	0,9	0,3	8,0	3 x 3 T	1,7	9
m6	4x4	0,9	0,3	8,0	4 x 4 T	1,13	16
m7	4x4	0,9	0,3	8,0	5 x 5 T	0,85	25

C: no centro do radier. T: distribuídas em toda a área do radier.



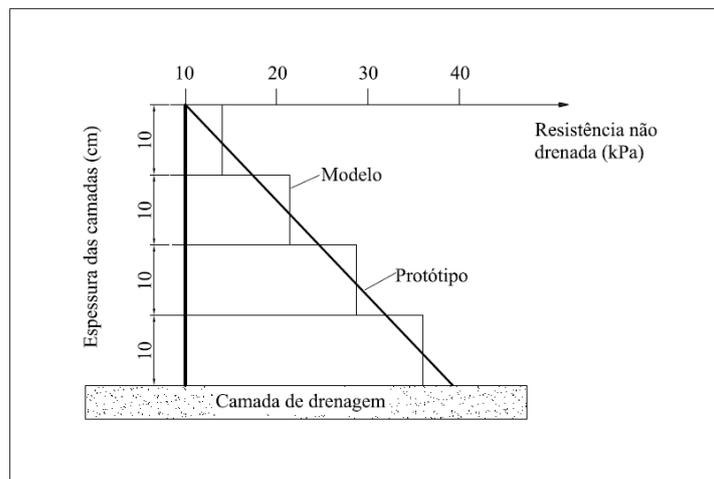
**Figura 3.5.** Configurações geométricas dos modelos propostos em escala 1/200.

### 3.7 - PERFIL DO SOLO A REPRESENTAR

Com base nas recomendações da modelagem em centrífuga geotécnica, qualquer modelo tem que duplicar os fatores que influenciam a resposta do solo: o nível de tensões e a resistência. No caso das argilas, é preciso controlar a relação de vazios e a pressão aplicada na

fabricação dos solos para cumprir com esses requisitos.

Como os modelos trabalhados não representaram um protótipo específico foi preciso estabelecer um perfil que correspondesse a uma argila mole. Assim, baseados nos parâmetros geotécnicos relatados na literatura para poder representar o comportamento dos solos moles de tipo argiloso, na *Microzonificación Sísmica de Bogotá* (FOPAE, 2010) e no trabalho apresentado por Rincón & Rodríguez (2001), foi utilizado como referência o perfil apresentado na Figura 3.6. O solo, neste caso, representou uma argila de resistência variável na profundidade, de 10 kPa na superfície até 40 kPa no fundo da camada.



**Figura 3.6.** Perfil proposto de resistência não drenada do solo. Rincón e Rodríguez (2001)

### 3.8 - MATERIAL PARA FABRICAÇÃO DO SOLO

De acordo com Garzón (2010), é possível preparar misturas de materiais que permitam obter parâmetros de resistência como os apresentados na Figura 3.6, representando um solo mole, e valores de limite de liquidez acima de 50%. Com base nessa recomendação foi preparada uma amostra de caulim e bentonita em proporções de 65% e 35% em peso respectivamente. A mistura foi caracterizada com ensaios básicos, além de análise granulométrica por sedimentação e adensamento com taxa de deformação controlada (CRS).

Os resultados dos ensaios de adensamento normal demonstraram que os valores do coeficiente de adensamento vertical  $C_v$  apresentaram resultados muito baixos, da ordem de  $1.17 \times 10^{-7}$  cm/s. O baixo valor obtido influencia o comportamento do modelo controlando o tempo de fabricação da amostra nas caixas da centrífuga e os tempos de voo na modelagem,

os quais se tornariam muito altos (superiores às 8 horas)

Optou-se pelo uso de caulim nos modelos. Este material pode ser descrito como um material de origem argilosa, que permite fabricar solos no laboratório, garantindo homogeneidade, linearidade no perfil de tensões e a coesão da amostra com permeabilidade maior do que a mistura com bentonita.

O material foi obtido comercialmente da companhia *Cementos Boyacá* da Cidade de Bogotá D.C. Para o caulim também foram realizados ensaios de caracterização, análise granulométrica por sedimentação, dois ensaios de adensamento por método CRS, três de adensamento em ensaio convencional e três ensaios triaxiais.

Devido ao caulim se apresentar em pó, para a realização dos ensaios de adensamento e triaxiais foi realizado o processo de fabricação descrito por Garzón (2010), que consiste na fabricação de uma mistura de caulim em pó com água, com teor de umidade maior do que 1,5 vezes o limite de liquidez. A mistura preparada é colocada em um tubo de PVC, com papel filtro na parte interna das paredes do tubo, as quais possuem perfurações uniformemente distribuídas na área superficial do mesmo.

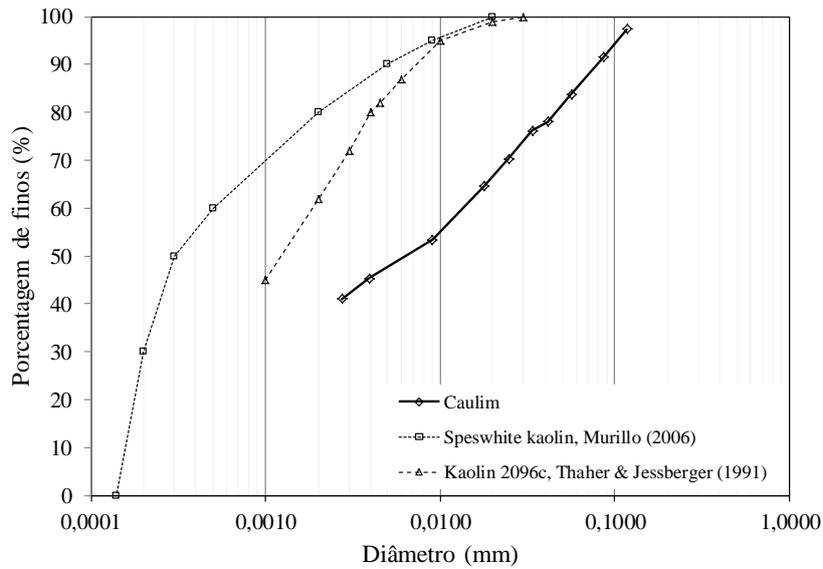
Posteriormente, a mistura é colocada em uma prensa controlada eletronicamente e foi aplicada a carga utilizando pressão de ar. Controlando os tempos de adensamento foram utilizadas cargas de 31,2 N, 62,5 N, 12,5 N, 25,0 N e 50,0 N. A amostra foi consolidada pelas duas faces para garantir uniformidade. O diâmetro do tubo utilizado foi de 6 cm e altura de 25 cm, obtendo-se uma amostra de tamanho suficiente para realizar ensaios triaxiais. No caso das amostras para o ensaio de adensamento, o procedimento foi similar, utilizando um tubo de 10 cm de diâmetro.

O resultado da análise granulométrica por sedimentação é apresentado na Figura 3.7, incluindo-se as curvas granulométricas de alguns dos materiais de referência. Pode-se observar que o material utilizado apresenta uma curva de gradação indicativa de um tamanho maior de partículas, se comparado com os materiais de referência.

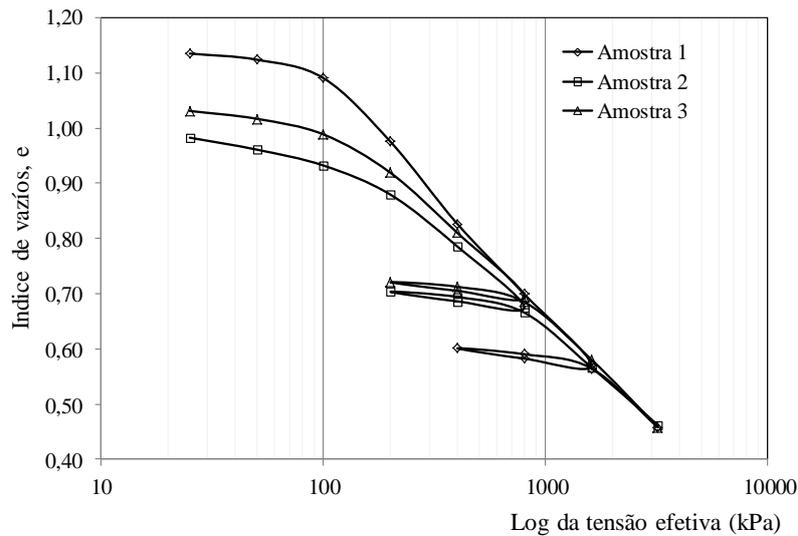
A curva de adensamento com o resultado dos três ensaios é apresentada na Figura 3.8 e o resultado de um dos ensaios triaxiais (tipo CU) na Figura 3.9. Os resultados completos de todos os ensaios são apresentados no Apêndice A.

Os resultados dos ensaios de caracterização geral são sumarizados na Tabela 3.7, onde se inclui um resumo das propriedades do caulim utilizado, comparando-o com os parâmetros dos materiais clássicos utilizados em outros centros e pesquisas de referência. Pode-se observar

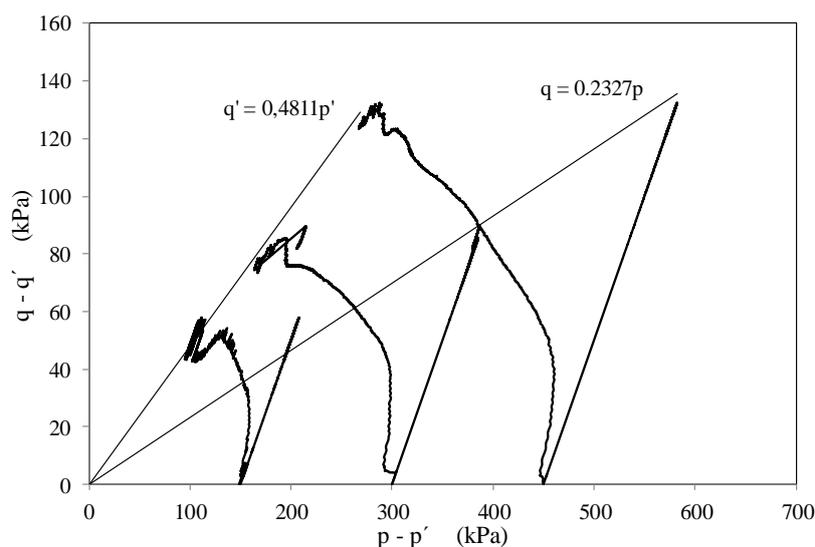
que os valores dos ensaios de caracterização se encontram em intervalos similares a dos reportados para o *Speswhite caulim*, que é o material mais utilizado nos centros de pesquisa que utilizam a centrífuga geotécnica. Contudo, o valor do coeficiente de adensamento vertical ( $C_v$ ) encontra-se dentro do intervalo dos valores reportados para os outros materiais, e é superior ao obtido para a mistura com bentonita.



**Figura 3.7.** Análise granulométrica por sedimentação do caulim.



**Figura 3.8.** Resultado de compressibilidade no ensaio de adensamento para caulim.



**Figura 3.9.** Resultado de ensaios triaxiais (Tipo CU) em amostras de caulim.

**Tabela 3.7.** Comparativo das propriedades do caulim com materiais de referência.

Parâmetro	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
G <sub>s</sub>	<b>2,68</b>	2,62	2,60 – 2,61			2,634	
w <sub>L</sub> (%)	<b>54</b>	55	62 – 69	54	44,4	45,54	61
I <sub>P</sub> (%)	<b>33</b>	25	30 – 31	34	16,3	11,82	27
w <sub>P</sub> (%)	<b>21</b>	30	31 – 38	20	28,1	33,72	34
λ	<b>0,16**</b>		0,18 – 0,25	0,089		0,133	0,205
κ	<b>0,04**</b>		0,04 – 0,05	0,016		0,050	0,044
C <sub>c</sub>	<b>0,37</b>			0,245			
C <sub>s</sub>	<b>0,09</b>			0,033			
*C <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>-6</sup>	<b>0,49 – 0,62</b>		0,0158 – 0,0317	1,95 – 2,76			0,0634
(1) Caulim utilizado nesta pesquisa; (2) Speswhite caulim, Murillo, C. (2006); (3) Speswhite caulim, Lima, P.E. (1988); (4) Caulim 605-325 COPPE, Da Silva, G. (2015) (5) Kaolin 2096c – Erbloh & Co, Thaher, M. & Jessberger, H.L. (1991) (6) Kaolin clay, Tran, T.V., <i>et al.</i> (2012) (7) UWA Kaolin clay, Teh, K. L., <i>et al.</i> (2010)				G <sub>s</sub> = Gravidade específica w <sub>L</sub> = Limite de liquidez I <sub>P</sub> = Índice de plasticidade w <sub>P</sub> = Limite de plasticidade λ = Inclinação da linha de compressão κ = Inclinação da linha de recompressão C <sub>c</sub> = Índice de compressão C <sub>s</sub> = Índice de recompressão C <sub>v</sub> = Coeficiente de adensamento vertical.			
*C <sub>v</sub> para tensão vertical de 100 kPa;				** Estimados. $\lambda = \frac{C_c}{Ln10}$ $\kappa \cong \frac{C_s}{Ln10}$			

### **3.9 - FABRICAÇÃO DO SOLO**

A fabricação de um solo com um perfil que varie linearmente com a profundidade é um processo complexo na centrífuga geotécnica. Segundo Taher & Jessberger (1991), Taylor (1995), Rincón & Rodriguez (2001) e Dallos (2007), o processo pode ser realizado fora do equipamento com aplicação de pressão sem que seja necessário utilizar campos gravitacionais. Na Figura 3.6 pode-se observar que realmente se estabelece uma aproximação linear do perfil desejado mediante camadas de argila.

O processo de fabricação de solo nos moldes da centrífuga geotécnica apresentado por Rincón & Rodríguez (2001), consiste em estabelecer uma relação entre o valor da tensão vertical que se aplica ao solo e o valor da resistência ao cisalhamento em condição não drenada, avaliado através de um método mecânico. De forma geral, o processo realizado para estabelecer a relação entre tensão e resistência consistiu em fabricar uma camada de solo de prova como segue:

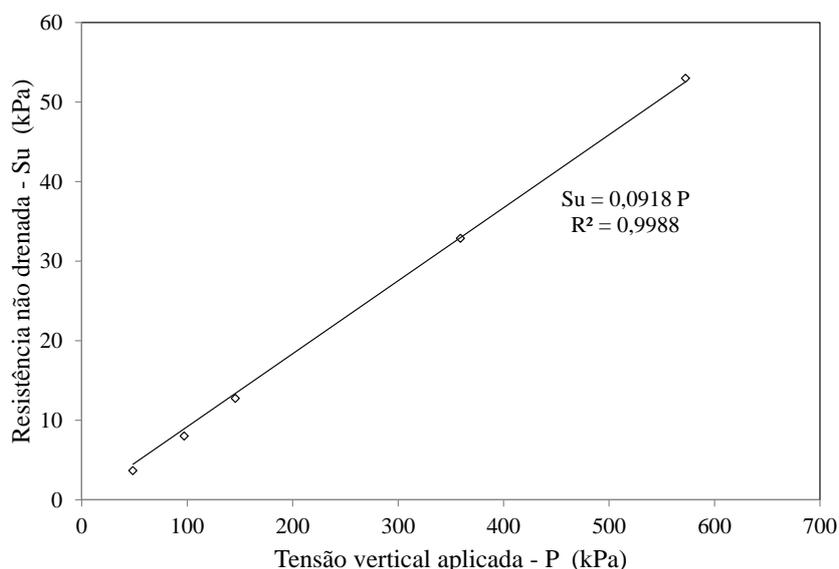
- Realizou-se uma mistura de caulim e água em quantidade necessária para obter 1,5 vezes o limite de liquidez;
- A mistura foi colocada na caixa de modelagem, com geotêxtil superior e inferior;
- Colocou-se uma tampa metálica de aço de 1 polegada e sobre ela foram aplicadas diferentes tensões verticais com ajuda de um equipamento adequado (atuador pneumático ou macaco hidráulico, nesta pesquisa);
- Mediu-se a resistência do solo ao final de cada passo de carga e em diferentes pontos da camada, para cada uma das tensões aplicadas, mediante um ensaio de palheta de laboratório;
- Durante o processo de adensamento foi estabelecido também o teor de umidade em cada um dos passos de carga, tomando uma amostra da camada.

Com os dados desta camada de prova puderam ser estabelecidas as condições de fabricação do solo e a relação tensão – resistência, como apresentado na Figura 3.10.

#### **3.9.1 - Molde inicial para ensaios em escala 1/70**

Inicialmente foi proposto um processo de fabricação de solo conformado por uma capa inferior de areia, um geotêxtil e 4 camadas de argila, sem elementos de separação entre elas. Devido ao fato de não apresentar elementos entre as camadas de argila, estas funcionariam como uma única camada de 40 cm de altura.

Na Tabela 3.8 são resumidas as condições de fabricação por camada dos moldes do solo, para garantir um perfil aproximado com o apresentado na Figura 3.6. Os valores da tabela foram obtidos com base nos resultados da camada de prova e a relação entre as tensões aplicadas e a resistência ao cisalhamento apresentada na Figura 3.10.



**Figura 3.10.** Relação tensão aplicada – resistência do solo para fabricação dos moldes da centrífuga geotécnica.

**Tabela 3.8.** Quantidades e parâmetros utilizados na fabricação dos moldes (4 camadas).

Espessura final da camada (cm)	Resistência não drenada teórica (Figura 3.5) (kPa)	Resistência não drenada média na camada (kPa)	Tensão vertical aplicada (kPa)	Carga aplicada (kN)	Espessura inicial da camada (cm)	Peso de caulim seco (N)	Peso de água adicionado (N)
0 – 10	10,0 – 17,5	13,8	156,6	37	14,2	298,00	241,38
10 – 20	17,5 – 20,0	21,3	236,2	56	15,08	317,00	256,77
20 – 30	25,0 – 32,5	28,8	315,7	75	15,78	332,00	268,92
30 – 40	32,5 – 40,0	36,3	395,2	94	16,36	344,00	278,64

### 3.9.2 - Processo de fabricação do solo para modelos em escala 1/70 - 3 camadas

Ao fazer uma revisão dos diferentes valores obtidos do coeficiente de adensamento vertical ( $C_v$ ) que controla os tempos de voo e as velocidades de adensamento do solo, concluiu-se que era preciso gerar um mecanismo que permitisse reduzir a distância máxima de drenagem que, no caso do molde fabricado com as condições apresentadas na Tabela 3.8, era de 40 cm.

O valor de  $C_v$  médio obtido dos diferentes ensaios, para os níveis de tensão que tinham

que ser suportados pelo solo, foi de  $0,33 \text{ cm}^2/\text{min}$  ( $0,55 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Se trabalhados os modelos com esse valor, não somente poderiam ser obtidos tempos de fabricação muito altos, mas também tempos de voo superiores às oito horas em cada etapa.

Assim, o processo de fabricação do solo foi modificado para ser feito em três camadas de 13,33 cm (distância máxima de drenagem) separadas por uma camada de areia filtrante de 0,7 – 0,9 cm de espessura, disposta entre dois papéis filtro tipo Wathman No. 42. Além dessas camadas, utilizou-se geotêxtil não tecido (referência NT 2000 de PAVCO), como recobrimento nas paredes das caixas para garantir a continuidade dos fluxos de água tanto no processo de adensamento na fabricação, quanto no voo dos modelos.

O processo que foi utilizado para fabricação do solo nos modelos em escala 1/70, em três camadas, se descreve a seguir:

- A quantidade inicial de caulim seco foi determinada segundo o procedimento apresentado por Rincón & Rodríguez (2001);
- Misturou-se o caulim com uma quantidade de água necessária para obter 1.5 vezes o limite de liquidez, utilizando misturador mecânico (Figura 3.11), e por um tempo médio de 30 minutos para garantir uniformidade da mistura;



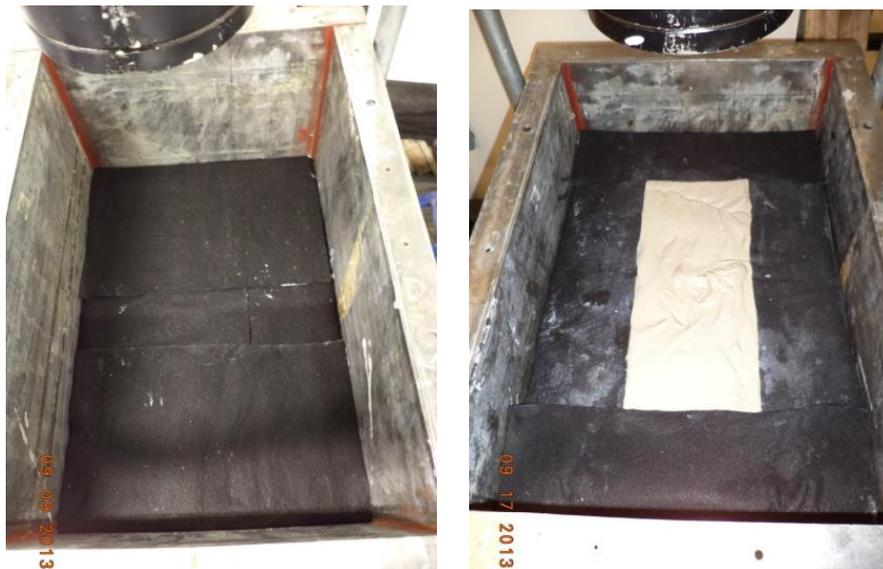
**Figura 3.11.** Processo de mistura do caulim com água.

- Na base da caixa e nas paredes foi colocado geotêxtil. Sobre a parte inferior da caixa de modelos da centrífuga colocou-se uma camada de areia, tipo filtro, para garantir a drenagem, conforme recomendado por Horikoshi & Randolph (1996) e como apresentado na Figura 3.12;



**Figura 3.12.** Colocação de geotêxtil e camada de areia inferior.

- Sobre a camada de areia foi colocado um geotêxtil não tecido para evitar a saída do caulim e permitir a circulação da água. Acima do geotêxtil foi colocada a mistura já preparada de caulim e água (*slurry*) e foi homogeneizado o material com vibrador mecânico. Sobre o material homogeneizado, e nivelado, foi dobrado o geotêxtil lateral encapsulando a mistura (Figura 3.13);



**Figura 3.13.** Cobertura da mistura com geotêxtil.

- Após coberta a mistura com o geotêxtil foi colocada uma tampa metálica de aço de 1 polegada (2,54 cm) de espessura sobre a qual foi aplicada a carga determinada segundo o nível da camada;
- A amostra foi adensada com diferentes valores de tensão. Para aplicação da tensão no solo, foram utilizados dois tipos de elementos: um atuador pneumático para valores de até 200 kPa, e um macaco hidráulico para os carregamentos maiores (Figura 3.14);



**Figura 3.14.** Aplicação de carga com (esquerda) atuador pneumático, (direita) macaco hidráulico.

- O processo de adensamento foi controlado com o método de Taylor, procurando atingir pelo menos 90% do adensamento total. Para isso, foi colocado um extensômetro na tampa de carregamento durante o processo;
- Como mencionado, foram construídos filtros de areia entre camadas, como apresentado na Figura 3.15;



**Figura 3.15.** Construção de filtros intermediários.

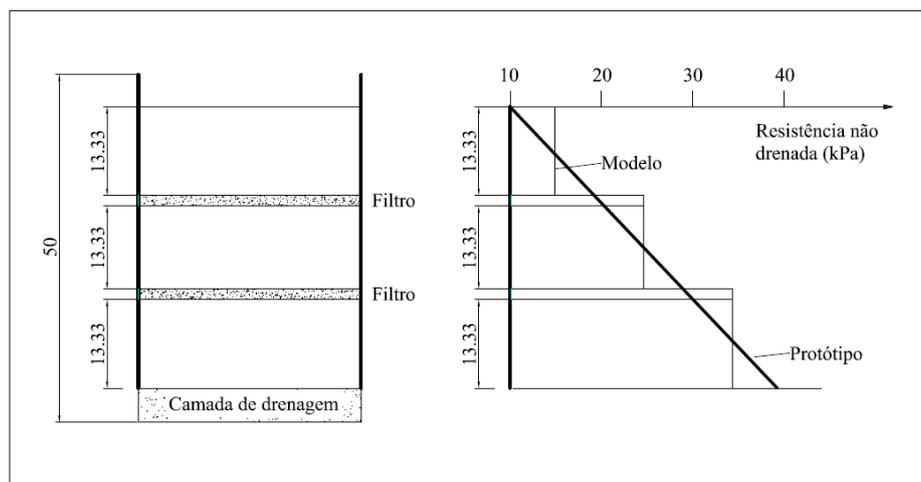
- Durante o processo de fabricação do solo, as caixas de modelagem foram conectadas

com um depósito externo de água (tanque). A função do tanque foi manter um nível constante de água externa, para garantir a poropressão na camada de areia inferior (Figura 3.16).



**Figura 3.16.** Depósito externo de água.

A distribuição das camadas na caixa de modelagem e o perfil de solo trabalhado na presente pesquisa são apresentados na Figura 3.17. Nesta figura se observa que acima das camadas existe um espaço livre na caixa, o que foi utilizado para a colocação dos elementos de carga e instrumentos. Na Tabela 3.9 são apresentadas as condições de fabricação do solo para os modelos em escala 1/70 (M).



**Figura 3.17.** Distribuição das camadas e perfil de resistência não drenada do solo.

**Tabela 3.9.** Quantidades e parâmetros aplicados na fabricação dos moldes em três camadas nos modelos em escala 1/70.

Espessura final da camada (cm)	Resistência não drenada teórica (kPa)	Resistência não drenada média na camada (kPa)	Tensão vertical aplicada (kPa)	Carga aplicada (kN)	Espessura inicial da camada (cm)	Peso de caulim seco (N)	Peso de água adicionado (N)
0 – 13,3	10,0 – 20,0	15,0	170,0	41	19,15	411,00	332,91
13,3 – 26,6	20,0 – 30,0	25,0	276,0	66	20,59	442,00	358,02
26,6 – 40	30,0 – 40,0	35,0	382,0	91	21,68	466,00	377,46

### 3.9.3 - Processo de fabricação de solo para modelos em escala 1/200

O processo de fabricação da amostra para estes modelos foi similar ao apresentado no subitem anterior. No entanto, este foi ajustado para atingir os valores de resistência em camadas de menor espessura segundo as dimensões da caixa de modelos deste equipamento.

A amostra foi fabricada em três camadas sem filtros entre elas e, considerando que as caixas dos modelos permitem dispor de uma pedra porosa na base completa da caixa, não foi necessária a inclusão da camada inferior de areia para drenagem. Na Tabela 3.10 são apresentadas as características de fabricação dos moldes para os modelos em escala 1/200.

Os modelos foram adensados na parte externa da centrífuga geotécnica nos equipamentos pneumáticos de adensamento controlado, pertencentes ao laboratório da Universidade *de Los Andes*. Além disto, foi utilizado mais um, construído para aplicação das cargas maiores, como apresentado na Figura 3.18. Esses equipamentos permitem aplicar carga controlada durante um período de tempo e, com ajuda de extensômetros dispostos sobre as placas de carga, obter os deslocamentos do material adensado.

**Tabela 3.10.** Quantidades e parâmetros a serem aplicados na fabricação dos moldes em três camadas nos modelos em escala 1/200.

Espessura final da camada (cm)	Resistência não drenada teórica (kPa)	Resistência não drenada média na camada (kPa)	Tensão vertical aplicada (kPa)	Carga aplicada (kN)	Espessura inicial da camada (cm)	Peso de caulim seco (N)	Peso de água adicionado (N)
0 – 3,66	10,0 – 20,0	15,0	170,0	1,66	5,25	3,79	3,00
3,66 – 7,33	20,0 – 30,0	25,0	276,0	2,70	5,65	4,95	3,94
7,33 – 11,0	30,0 – 40,0	35,0	382,0	3,74	5,95	5,22	4,14



a) Equipamentos para adensamento controlado.      b) Equipamento construído para cargas maiores.

**Figura 3.18.** Detalhe dos equipamentos de adensamento dos modelos em escala 1/200.

As paredes laterais das caixas deste equipamento são fabricadas de madeira e, na frente e no verso tem tampas de acrílico, possibilitando observar a distribuição do material dentro dessas e realizar observações qualitativas da resposta dos modelos neles colocados.

Uma das tampas acrílicas possui uma saída de água conectada com a pedra porosa interna. Para controle das condições da água no modelo, foram dispostos recipientes laterais de capacidade máxima de 20 ml obtidos de um corpo de seringa.

### 3.10 - ETAPAS DE VOO

Para avaliar o comportamento dos sistemas propostos tinham que ser reproduzidos, de forma adequada os tempos de adensamento nos ensaios, os quais dependem do material utilizado para representar o solo. A literatura tem mostrado nas pesquisas que esses tempos são variáveis, alguns deles atingindo até 30 horas (10 horas foram necessárias para o readensamento do solo e 21 para adensamento pela carga colocada no modelo apresentado por Horikoshi & Randolph, 1996). Nestes tempos, algumas das pesquisas incluem um valor inicial de fabricação ou “construção” do solo. No tempo inicial, o material que vai ser utilizado para representar o solo é adensado na centrífuga por peso próprio. O tempo também varia segundo o material escolhido e o fator de escala, tendo-se relatado tempos de até 24 horas.

Segundo Taher & Jessberger (1991), Taylor (1995), Rincón & Rodriguez (2001) e Dallos (2007), ainda quando o solo seja fabricado inicialmente fora do campo gravitacional da centrífuga, é preciso realizar um voo prévio, permitindo que sejam gerados campos de tensões

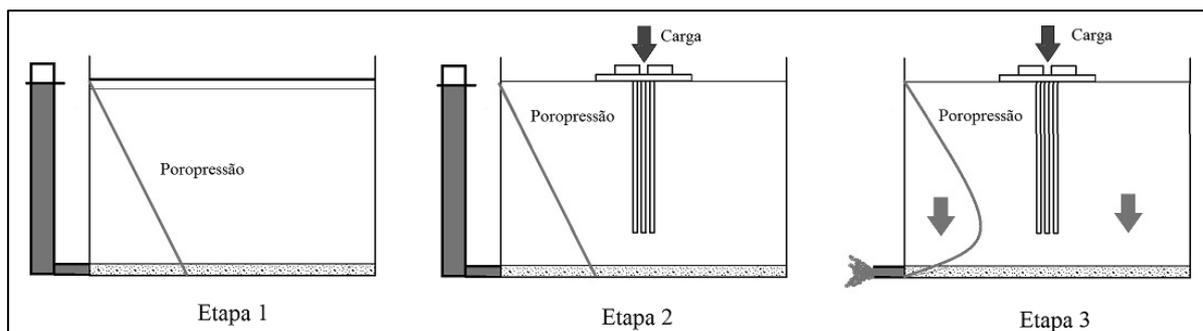
lineares na massa de solo e uniformizadas as condições da poropressão.

Outro condicionamento do trabalho na centrífuga é a impossibilidade atual de realizar processos construtivos durante o voo dos modelos. Assim, os voos têm que ser realizados em etapas e parados, quando for necessário realizar alguma modificação física do modelo que não possa se substituir por um processo automático.

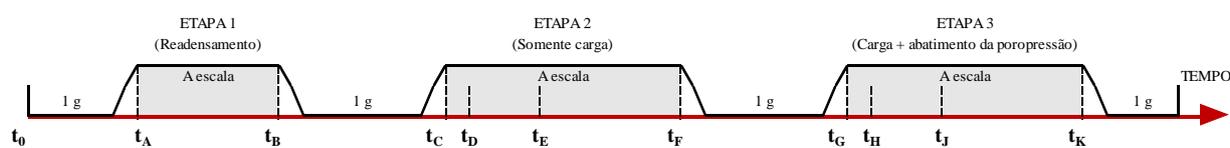
Nessas condições foram definidas as atividades e etapas de voo que se relacionam a seguir:

- Fabricação da amostra do solo fora da centrífuga e preparo do ensaio (instalação dos equipamentos de instrumentação);
- Etapa 1: Etapa de voo sem carga (readensamento), para garantir que seja gerado um perfil de tensões inicial, devido ao peso próprio do solo, e uma distribuição linear da poropressão. Neste caso, considerou-se um nível de água na superfície do solo;
- Parada para instalação de elementos do sistema radier estaqueado, elementos de carga e elementos de instrumentação dos sistemas ou aqueles adicionais;
- Etapa 2: Etapa de voo com carga, até atingir 80 – 90% do adensamento do solo somente pela aplicação da carga, mantendo constante o nível de água na camada inferior de areia;
- Parada para desconexão do equipamento que permite manter um nível de água externo constante, induzindo o abatimento das poropressões no ponto inferior da camada de areia pela possibilidade de saída da água do modelo;
- Etapa 3: Etapa de voo com carga, até atingir 80 - 90% do adensamento do solo, com abatimento da poropressão na camada inferior de areia. Para fins práticos, nesta etapa o adensamento é gerado tanto pela carga quanto pelo abatimento da poropressão. Esta última condição é simulada pela drenagem da camada de areia (representação do fenômeno de subsidência).

Uma representação esquemática das condições da poropressão é apresentada na Figura 3.19. De igual forma, uma representação gráfica das etapas estabelecidas e das condições de cada uma destas é apresentada na Figura 3.20, onde são especificados os tempos “chave” dos modelos, que permitirão as posteriores análises.



**Figura 3.19.** Representação das condições de poropressão nas etapas de voo.



Tempo	Descrição	Processo	Condições	Etapa
$t_0$	Início da modelagem	Fabricação do solo – Instalação de instrumentos		
$t_A$	Atinge a escala do modelo	Readensamento na centrifuga	Sem modelo	Etapa 1
$t_B$	Parada		Sem carga Sem abatimento	
Instalação de modelos e instrumentos adicionais				
$t_C$	Atinge a escala do modelo	Adensamento com carga	Com modelo	Etapa 2
$t_D$	Início do carregamento		Com carga	
$t_E$	Carga máxima mantida		Sem abatimento	
$t_F$	Parada			
Abertura de válvula para abatimento da poropressão				
$t_G$	Atinge a escala do modelo	Adensamento com carga e abatimento da poropressão	Com modelo	Etapa 3
$t_H$	Início do carregamento		Com carga	
$t_J$	Carga máxima mantida		Com abatimento	
$t_K$	Parada			

**Figura 3.20.** Linha de tempo e etapas de voo para os modelos.

### 3.11 - PREPARO DO ENSAIO PARA OS MODELOS EM ESCALA 1/70 (M)

#### 3.11.1 - Instrumentação

Baseados nos parâmetros a serem avaliados nos modelos, foram selecionados elementos de instrumentação que puderam ser efetivamente utilizados, segundo o tamanho dos modelos. A instrumentação utilizada para os modelos em escala 1/70 correspondeu aos equipamentos a seguir:

- Extensômetros: para medida de recalque no radier e no solo ao redor;
- Células de carga: para medida de carga no sistema e nas estacas;

- *Strain gauges*: para medida de deformação nas estacas como medida indireta das cargas ao longo do fuste delas;
- Piezômetros: para variação da poropressão na massa do solo.

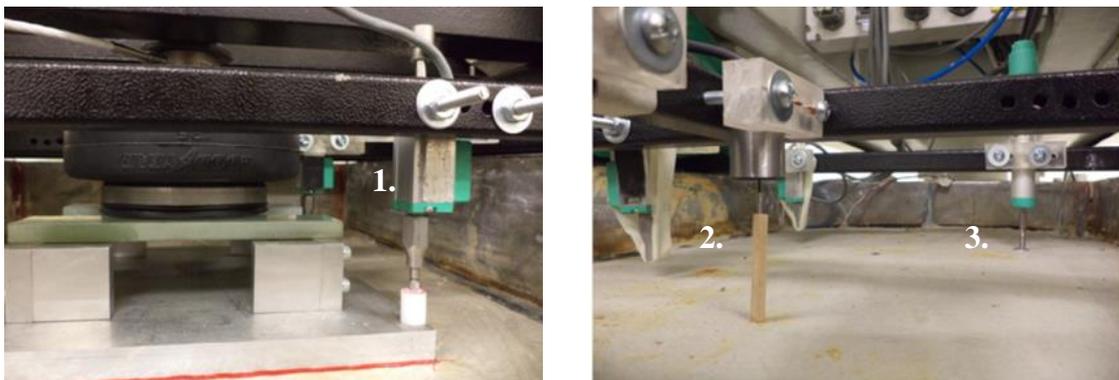
Um detalhe da disposição destes instrumentos será apresentado mais na frente, para cada um dos modelos ensaiados.

### 3.11.1.1 - *Extensômetros*

Este equipamento é chamado de LVDT ou Transformador Diferencial de Variável Linear. É um sensor que permite medir o deslocamento linear entre dois elementos, baseado na condução de energia elétrica através de bobinas.

Para os modelos em escala 1/70 foram utilizados diferentes tipos de extensômetros, segundo os disponibilizados pelo laboratório de modelos geotécnicos da Universidade *de Los Andes*. Eles possuem diferentes faixas de medição, dependendo da distância máxima que será medida. Foram utilizados extensômetros com possibilidade de leitura de 1cm e 5cm, sendo que os extensômetros são calibrados periodicamente no laboratório, portanto, as constantes já foram obtidas destas informações.

Na Figura 3.21 são apresentados alguns tipos de extensômetros utilizados na pesquisa.



Extensômetros 1 e 2 com leitura máxima 1cm. Extensômetro 3, leitura máxima 5cm.

**Figura 3.21.** Extensômetros.

### 3.11.1.2 - *Células de carga*

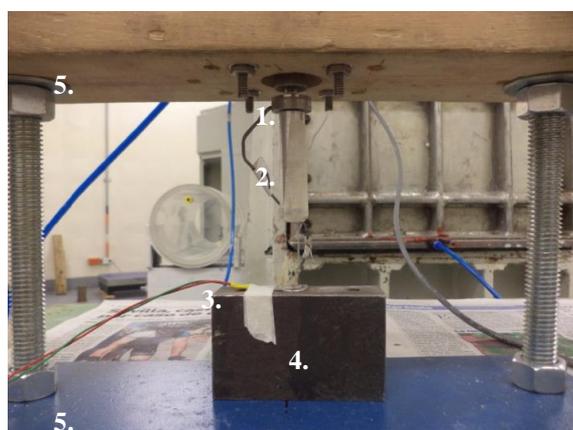
Foram utilizados três tipos de células de carga, como relacionado na Tabela 3.11.

**Tabela 3.11.** Células de carga.

Tipo	Detalhe	Uso	Caraterísticas principais*
LC201 OMEGA		Carga em estaca individual	Capacidade: 0,5 kN Diâmetro: 1,9 cm Erro: $\pm 1\%$
LTH350 FUTEK		Carga nos modelos radier estaqueado	Capacidade: 9 kN Diâmetro: 3,7 cm Erro: $\pm 3\%$
A301@25 FLEXIFORCE		Carga na cabeça da estaca em sistemas radier estaqueado	Capacidade: 0,4kN Diâmetro: 0,9 cm Erro: $<\pm 3\%$

\* Dados obtidos dos catálogos do fabricante.

Para as células de carga tipo LC201 OMEGA e LTH350 FUTEK, foram utilizadas as curvas de calibração do laboratório de modelos geotécnicos. Já para as células de carga tipo A301@25 FLEXIFORCE, estas foram calibradas mediante aplicação de carga com atuador pneumático, como apresentado na Figura 3.22. Com essa metodologia, foram determinadas as curvas de Carga – Voltagem, incluídas no Apêndice B, das quais foram obtidas as equações de calibração apresentadas na Tabela 3.12.



1. Célula tipo LC201 OMEGA
2. Barra de extensão
3. Célula a calibrar
4. Bloco metálico de apoio da célula
5. Armação de reação

**Figura 3.22.** Montagem para a calibração de células de carga Flexiforce.

**Tabela 3.12.** Equações de calibração das células de carga FLEXIFORCE A 301.

Célula	Constante (kN/V)
f1	$C = 6,328 \text{ V}^{-1,087}$
f2	$C = 7,701 \text{ V}^{-1,089}$
f3	$C = 6,070 \text{ V}^{-1,181}$
f4	$C = 6,136 \text{ V}^{-1,04}$

### 3.11.1.3 - Piezômetros

Para medir as condições da poropressão, foram utilizados medidores de poropressão em todos os ensaios. Inicialmente foram utilizados e testados medidores tipo Metallux ME 506 (Tabela 3.13), mas no primeiro teste realizado não se conseguiu uma leitura adequada do equipamento, como explicado mais à frente.

Para os outros modelos foram utilizados piezômetros do tipo Honeywell 40PC015G (Tabela 3.13), condicionados no laboratório de modelos geotécnicos da Universidade *de Los Andes*. Estes medidores possuem uma pedra porosa na ponta pela qual circula a água, sendo possível avaliar a diferença de pressão da água ao interior do material em que são instalados os elementos e a pressão atmosférica.

**Tabela 3.13.** Piezômetros.

Tipo	Detalhe	Ensamblado	Caraterísticas principais*
METALLUX ME 506			Capacidade: 500 kPa (73 psi) Diâmetro: 1,8 cm Sensitividade: 2,2–4,0 mV/psi
HONEYWELL 40PC015G			Capacidade: 690 kPa (100psi) Diâmetro: 1,4 cm Sensitividade: 40 mV/psi

\* Dados obtidos dos catálogos do fabricante.

Os piezômetros foram calibrados mediante dois ensaios hidráulicos que permitiram verificar a condição de leitura dos mesmos. Um dos ensaios de calibração consistiu em colocá-los em uma das caixas dos modelos da centrífuga geotécnica com água até uma altura de 29 cm e realizar a leitura das pressões registradas em um campo gravitacional de 70 g. A outra prova consistiu em conectar uma mangueira na pedra porosa do elemento e aplicar pressão de água por gravidade.

Os resultados das calibrações assim feitas permitiram determinar os valores das constantes que transformam a leitura da voltagem dos canais da centrífuga geotécnica em pressão de água. As constantes de calibração determinadas nos ensaios são apresentadas na Tabela 3.14.

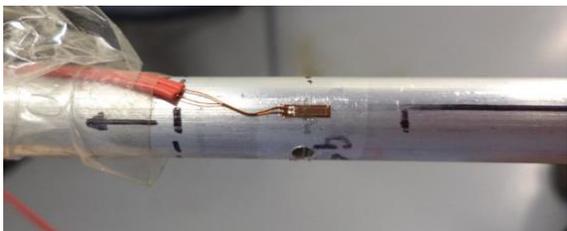
**Tabela 3.14.** Constantes de calibração dos piezômetros Honeywell 40PC015G

Piezômetro	Constante (kPa/V)
1	3,2507
2	3,8201
3	3,8395
4	3,8313

#### 3.11.1.4 - *Strain gauges*

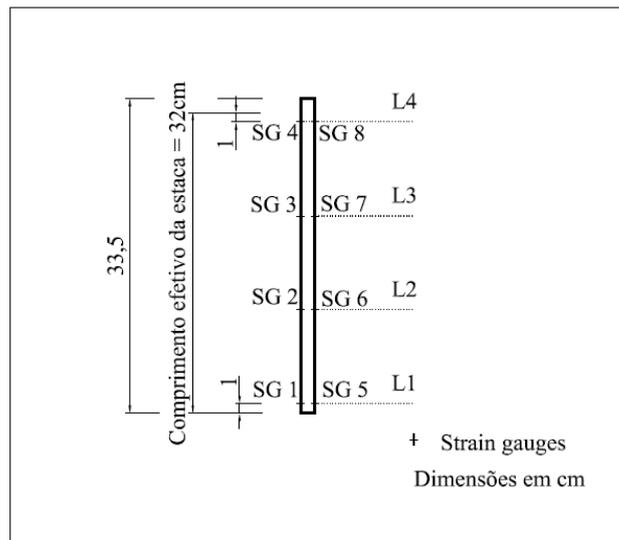
Foram instalados medidores de deformação (*strain gauges* tipo KFG-2N-120-C1-11L1M2R OMEGA detalhados na Tabela 3.15), em três estacas utilizadas em todos os ensaios realizados, e nomeadas como E1, E2 e E3.

**Tabela 3.15.** *Strain gauge.*

Tipo	Detalhe do instrumento instalado	Caraterísticas principais*
KFG-2N-120-C1-11L1M2R OMEGA		Resistência: 120 Ω Comprimento: 0,53 cm

\* Dados obtidos dos catálogos do fabricante.

Os *strain gauges* foram dispostos com igual espaçamento ao longo do fuste das estacas, enumerados por pares, começando desde a ponta e nomeados como apresentado na Figura 3.23. Na figura, a letra L faz referência a uma linha de dois *strain gauges* (SG); ou um par instalado de forma simetricamente oposta.



**Figura 3.23.** Distribuição dos *strain gauges* nas estacas e nomenclatura utilizada.

Depois de colados os *strain gauges*, os cabos foram inseridos no espaço interno da estaca. Na parte superior da estaca foi realizado um furo em cada lado do elemento, por onde foram passados os cabos, garantindo que fosse possível a conexão com os equipamentos de leitura. O furo para passagem dos cabos foi feito de tal forma que na parte superior ficaram 1,8cm de tubo de alumínio livres, a fim de que as estacas pudessem ser encaixadas no radier dos modelos.

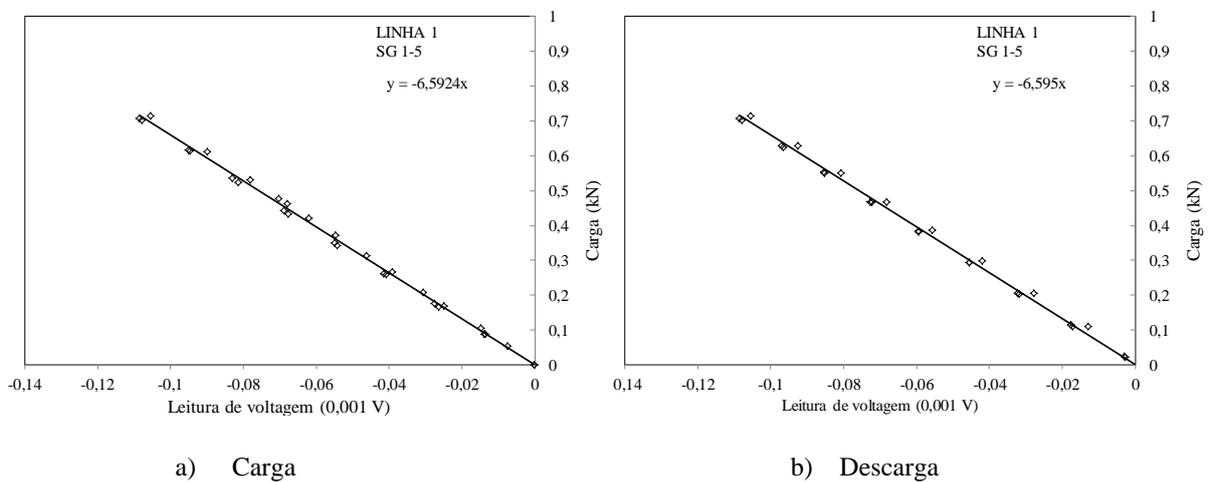
Para avaliar a resposta dos *strain gauges* foram realizados vários ensaios de calibração, tanto de tração quanto de compressão, já que não se podia garantir a uniformidade do alumínio ao longo da estaca, sendo necessário realizar calibração para cada linha (L) ou par de *strain gauges* (SG). Com base na forma em que trabalharam as estacas, foram utilizadas as curvas de compressão como parâmetros de calibração para assim, obter as constantes necessárias para converter o valor das leituras em valores de carga no fuste da estaca.

Para calibração em compressão das estacas foi necessário construir uma armação de carga que garantisse a sua verticalidade. A armação possuía na parte superior um atuador pneumático e uma célula de carga, como detalhado na Figura 3.24. A curva de calibração é

apresentada na Figura 3.25 para a estaca 2 (E2) na linha 1 (L1) com os *strain gauges* 1 e 5 (SG 1 e SG 5). Foram realizadas curvas de calibração iguais para a estaca 1 (E1) e para a estaca 3 (E3).



**Figura 3.24.** Armação para calibração dos *strain gauges*.



**Figura 3.25.** Curva de calibração em compressão da estaca 2 (E2): L1- SG1 e SG5.

A Tabela 3.16 apresenta os valores das constantes obtidas para cada linha de *strain gauges* nas estacas, baseadas nas curvas de calibração apresentadas no Apêndice B.

**Tabela 3.16.** Constantes de calibração dos *strain gauges*.

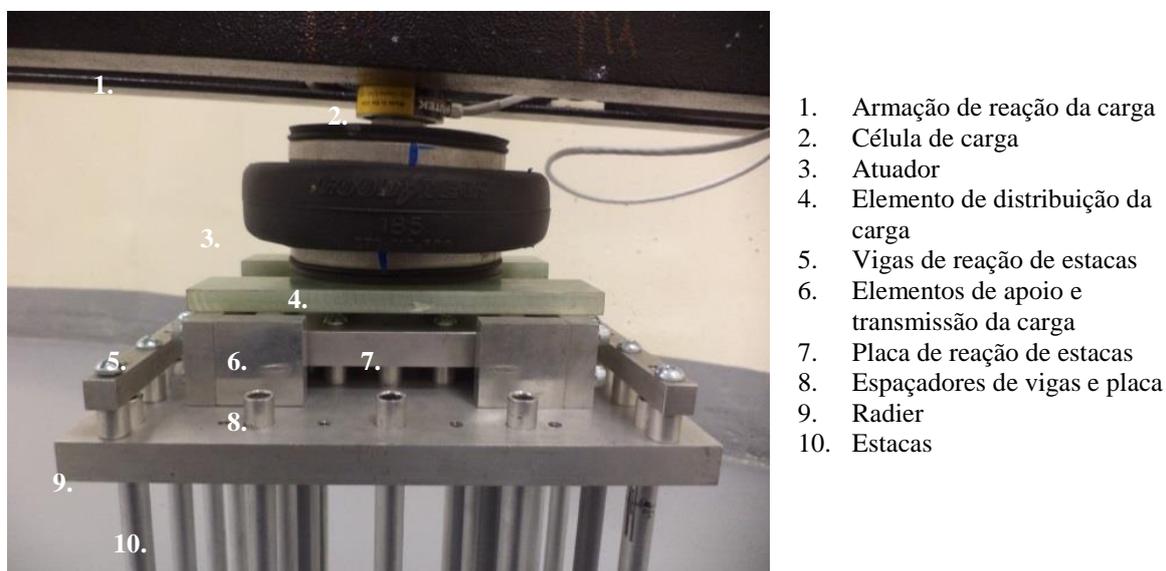
Linha	Estaca 1 (E1)		Estaca 2 (E2)		Estaca 3 (E3)	
	Carga	Descarga	Carga	Descarga	Carga	Descarga
L4	-5,8519	-5,8053	-6,4993	-6,3709		
L3	-5,9711	-5,8068	-6,5891	-6,5931	-4,8117	-4,5515
L2	-5,2336	-5,2094	-5,8106	-5,1901	-5,1824	-5,152
L1	-5,8947	-5,8437	-6,5924	-6,5950	-4,3966	-4,3424

As constantes representam os valores que permitem transformar a leitura da voltagem em uma leitura de força em kN. Unidades: (kN/V).

### 3.11.2 - Projeto mecânico para modelos em escala 1/70

Um dos principais problemas relatados nas pesquisas de referência é a conexão entre o radier e as estacas que garanta a realização das medições necessárias, incluindo os instrumentos e a transmissão de carga entre os elementos. Uma vez conhecidas algumas das características da instrumentação com possibilidade de uso para realizar medições nos modelos, foi projetada uma configuração mecânica como apresentada na Figura 3.26.

Os detalhes do projeto de todos os sistemas radier estaqueado são apresentados no Apêndice C mediante os desenhos esquemáticos que serviram para o processo de fabricação dos equipamentos mecânicos.



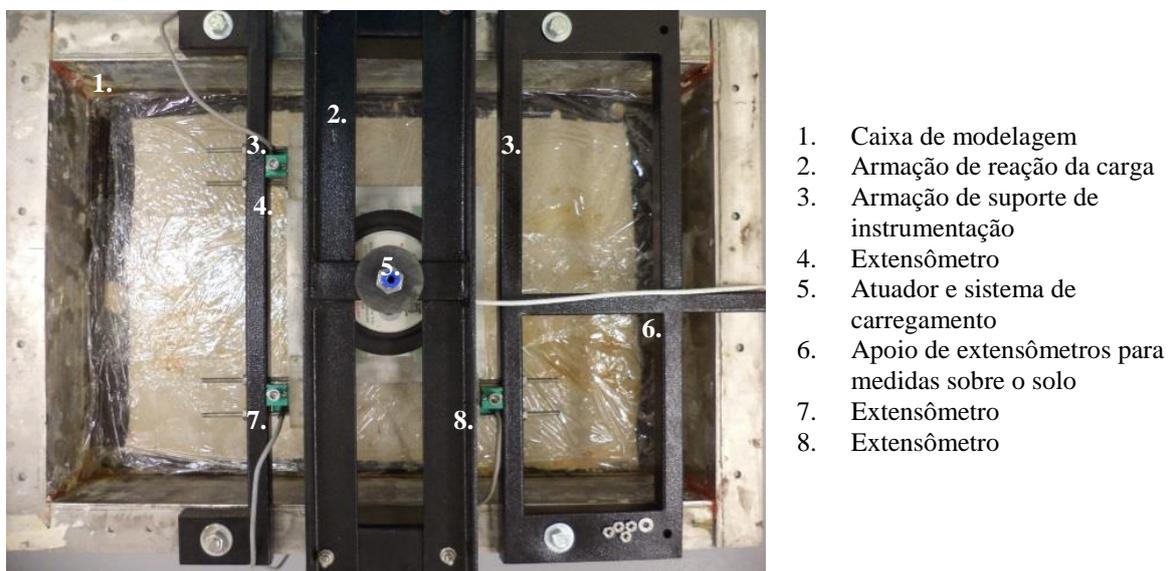
**Figura 3.26.** Projeto mecânico de conexão, reação e disposição do radier e as estacas nos modelos de sistemas radier estaqueado.

### 3.11.3 - Carga no sistema

Baseados na teoria de Meyerhoff (Bowles, 1998; Tabela 2.1) e com a resistência não

drenada do perfil de solo proposto, foi calculada a capacidade de carga última do radier obtendo-se um valor de 92 kPa. A tensão admissível foi de 62,4kPa, com um fator de redução de 1,5. A carga que devia ser aplicada ao radier foi de 2,46 kN, obtida ao converter o valor da tensão admissível real em tensão admissível no modelo, considerando a área do radier protótipo e do radier modelado.

Para aplicação da carga foi utilizado um atuador pneumático (*air spring*), disposto em uma armação metálica projetada e construída para a pesquisa, como apresentado na Figura 3.27. Esta armação permitia também a fixação de alguns extensômetros.



**Figura 3.27.** Detalhe da armação e montagem para carga e suporte de instrumentos.

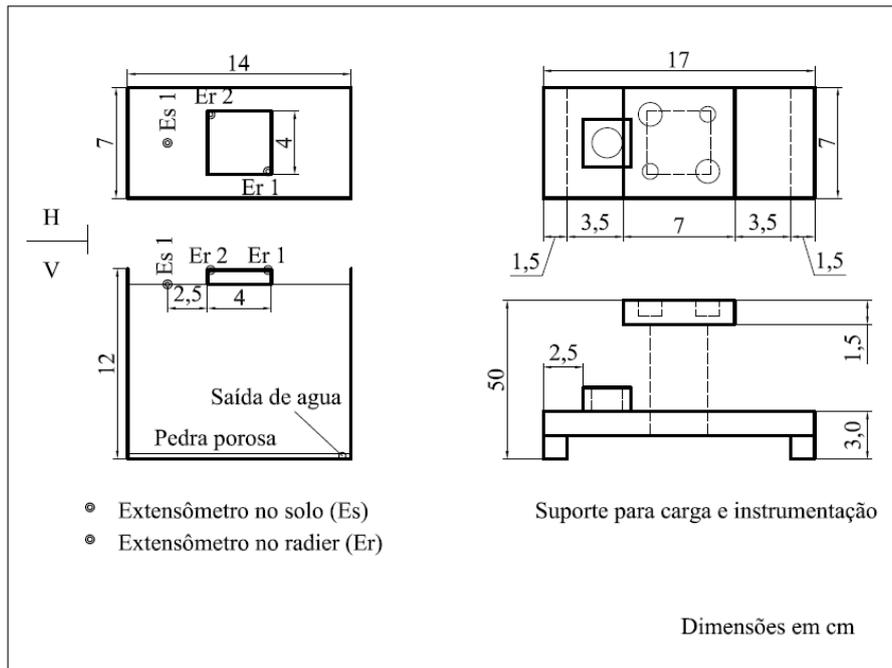
Os planos de projeto da armação que suportou tanto a instrumentação quanto o sistema de carregamento são apresentados no Apêndice D.

### **3.12 - PREPARO DO ENSAIO PARA OS MODELOS EM ESCALA 1/200 (m)**

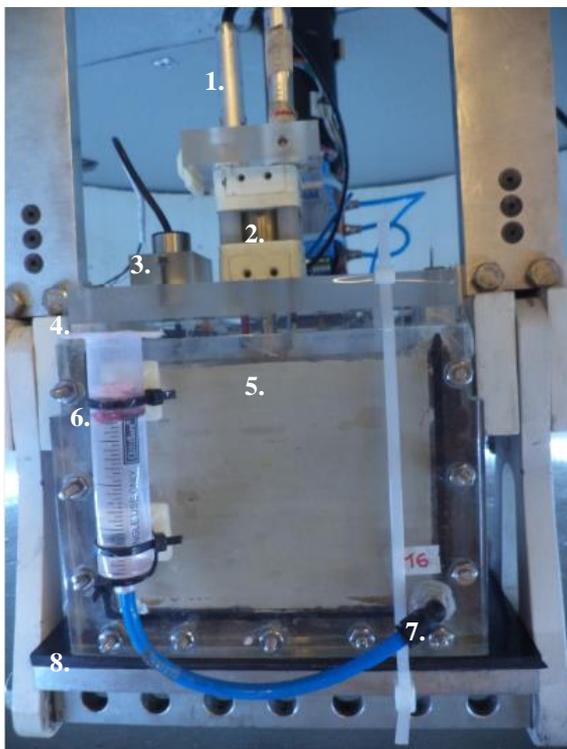
#### **3.12.1 - Instrumentação**

Devido ao tamanho dos moldes e dos equipamentos de instrumentação, somente foram utilizados extensômetros (com capacidade de leitura de até 1cm) nestes modelos.

Na Figura 3.28 é apresentado, junto com a localização dos extensômetros utilizados, o projeto do suporte para o apoio dos extensômetros e do atuador para aplicação de carga. Um detalhe da montagem é apresentado na Figura 3.29.



**Figura 3.28.** Projeto do suporte para carga, localização e apoio da instrumentação em modelos 1/200.



1. Extensômetros no radier
2. Atuador para carga
3. Extensômetro no solo
4. Suporte de carga e instrumentação
5. Caixa de modelagem
6. Depósito para controle do nível da água
7. Saída de água da caixa
8. Plataforma da centrífuga

**Figura 3.29.** Montagem geral dos modelos 1/200.

### 3.12.2 - Carga no sistema

Como mencionado, os modelos em escala 1/200 foram fabricados utilizando acrílico para o radier e madeira para as estacas. Uma vez avaliadas, as condições geotécnicas do solo e com a metodologia de Meyerhoff (Bowles, 1980; Tabela 2.1) a tensão admissível obtida para o radier foi de 37 kPa equivalente a 60 N no modelo. A carga foi aplicada mediante um atuador pneumático de capacidade máxima de 100 N (Figura 3.29).

### 3.13 - RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o projeto experimental desenvolvido para a pesquisa. Inicialmente apresentou-se a descrição do fenômeno a ser analisado, dos equipamentos utilizados, e se continuou com o processo de seleção dos materiais para o radier e as estacas e as escalas a serem trabalhadas, como apresentado na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4, para finalmente se estabelecer as configurações geométricas a serem pesquisadas (Tabela 3.5; Tabela 3.6; Figura 3.4 e Figura 3.5).

O perfil de solo a representar também foi determinado (Figura 3.17), sendo que o mesmo foi fabricado a partir de caulim, em processos detalhados neste capítulo, com ajuda de equipamentos hidráulicos e pneumáticos.

Com base nas variáveis avaliadas e aos fenômenos analisados, foram estabelecidas as etapas de voo descritas na Figura 3.20, as quais são resumidas na Figura 3.30.

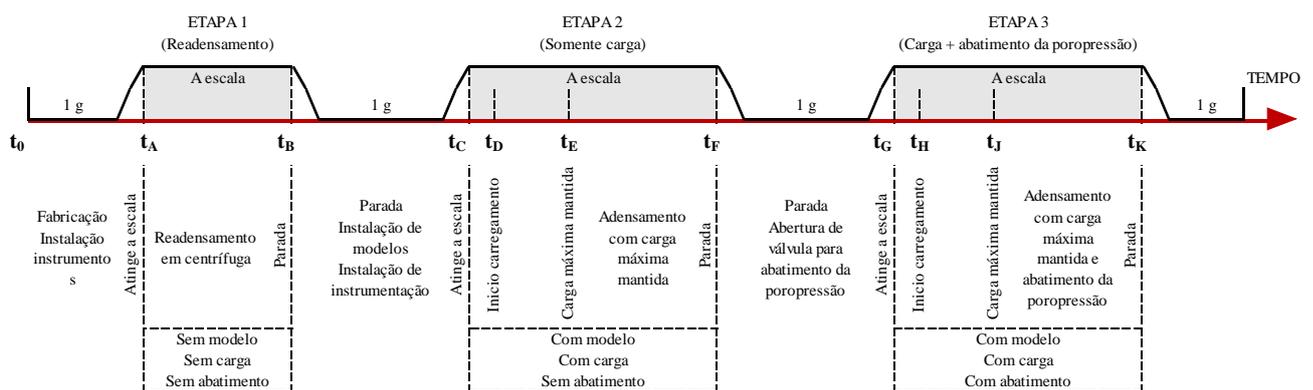


Figura 3.30. Resumo das etapas de voo para os modelos.

Foram incluídas no capítulo, descrições da instrumentação utilizada para a leitura de deslocamentos (extensômetros), poropressão (piezômetros), deformação nas estacas (*strain*

*gauges*) e cargas nos elementos (células de carga). Também é apresentado no capítulo o processo de calibração dos instrumentos e a descrição dos elementos que funcionaram como armação para suporte tanto da instrumentação, quanto dos elementos de carga.

## 4 - MODELAGEM E DADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos os processos de montagem de cada modelo, apresentados os dados “brutos” obtidos como resposta e descritas as particularidades de cada modelo. Incluem-se também, algumas observações dos dados e observações que permitiram aperfeiçoar as modelagens. Os dados obtidos dos *strain gauges*, para todos os modelos, são apresentados no Apêndice E. Os resultados serão analisados e discutidos no Capítulo 5.

### 4.1 - MODELOS EM ESCALA 1/70

#### 4.1.1 - Tempos de voo

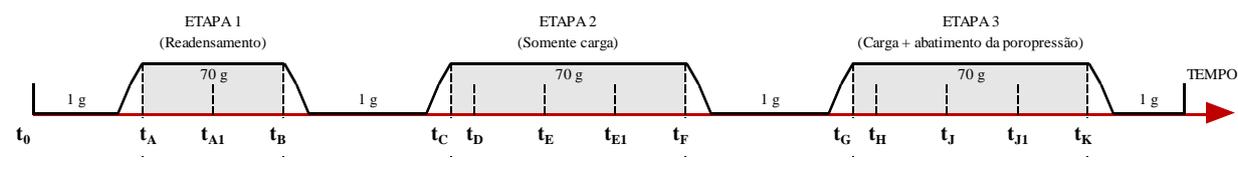
Baseados no coeficiente de adensamento vertical do solo ( $C_v = 0,33 \text{ cm}^2/\text{min}$ ), conhecida a distância máxima de drenagem para cada camada do modelo ( $H = 13,33 \text{ cm}$ ) e para garantir um grau de adensamento de pelo menos 90% ( $T_v = 0,848$ ), foram determinados os tempos de voo com a Equação 2.10, e escalados com a Equação 2.12.

O tempo de voo ( $t_{90}$ ) calculado foi de 1 hora e 54 minutos, para escala 1/70. Nas etapas 2 e 3, em que devia ser adicionada carga, o tempo de colocação de carga suposto foi de 1 ano, que escalado equivale a 1 hora em voo.

Os tempos de voo calculado para cada etapa são apresentados na Tabela 4.1 junto com a linha de tempo para a modelagem dos sistemas radier estaqueado em escala 1/70.

**Tabela 4.1.** Atividades e tempos de voo para os modelos em escala 1/70.

Atividade	Intervalo	Tempo de voo (horas:minutos)
Preparação da amostra	$t_0 - t_A$	
Etapa 1: Sem carga	$t_A - t_B$	1:54
Parada para instalação de elementos	$t_B - t_C$	
Etapa 2: Voo com carga – sem abatimento da poropressão	$t_C - t_F$	2:54
Parada desconexão da água	$t_F - t_G$	0:30
Etapa 3: Voo com carga – e abatimento da poropressão	$t_G - t_K$	2:54



#### 4.1.2 - Organização dos ensaios

Os ensaios foram realizados em diferentes datas, segundo as possibilidades de construção e montagem, disponibilidade dos equipamentos e do laboratório de Modelos Geotécnicos da Universidade *de Los Andes*, e atendendo os ajustes que foram identificados durante o avanço dos ensaios. Na Tabela 4.2 é apresentado um resumo das datas de realização dos modelos.

A ordem em que foram realizados os modelos obedeceu, como mencionado, à disponibilidade de equipamentos e ajustes durante o processo. Assim, por exemplo, o modelo M2 (prova de carga nas estacas) foi o primeiro a ser realizado, pois foi o que apresentou menor dificuldade.

**Tabela 4.2.** Datas de fabricação e voos para modelos em escala 1/70.

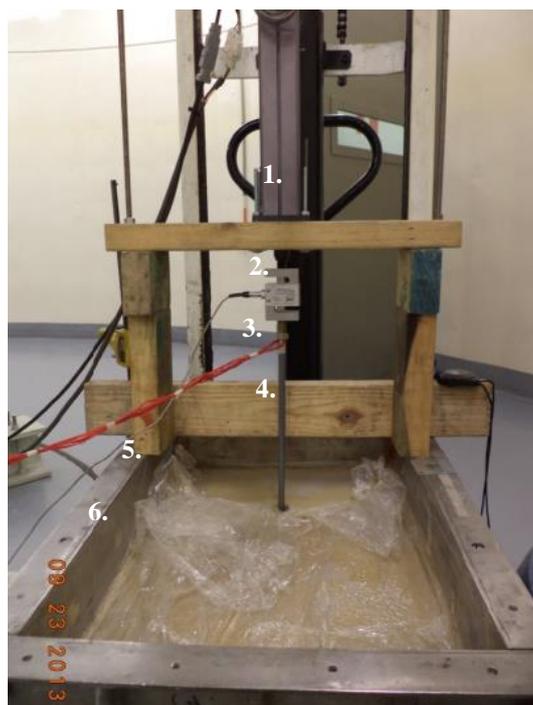
Ensaio	MODELO	Data de início da fabricação	Data de finalização da fabricação	Data de início do voo em centrífuga	Data de finalização do voo em centrífuga
Ensaio 1	M2	29/07/2013	03/09/2013	14/10/2013	17/10/2013
Ensaio 2	M1	09/09/2013	30/10/2013	27/01/2014	28/01/2014
Ensaio 3	M1	21/01/2014	14/05/2014	27/05/2014	28/05/2014
Ensaio 4	M3	04/06/2014	25/07/2014	03/09/2014	04/09/2014
Ensaio 5	M6	25/07/2014	10/09/2014	15/09/2014	16/09/2014
Ensaio 6	M4	11/09/2014	03/10/2014	06/10/2014	07/10/2014

Os modelos, condições, ajustes e observações, são explicados nos itens a seguir.

#### 4.1.3 - Ensaio 1 – Modelo M2

O objetivo deste ensaio foi avaliar a capacidade de carga das estacas individuais em longo prazo. O solo neste molde foi fabricado em quatro camadas com as condições apresentadas na Tabela 3.8. Neste molde realizou-se a prova de carga de duas estacas isoladas, as nomeadas como E2 e E3 (Modelo M2). As estacas foram colocadas no solo mediante pressão aplicada uniformemente utilizando um macaco elétrico suportado numa armação de madeira, como apresentado na Figura 4.1. A velocidade de instalação foi de 5 mm/seg, controlada com base nas recomendações de Horikoshi e Randolph (1996), já que estes autores concluíram que o processo de penetração das estacas não influencia consideravelmente o valor da capacidade de carga.

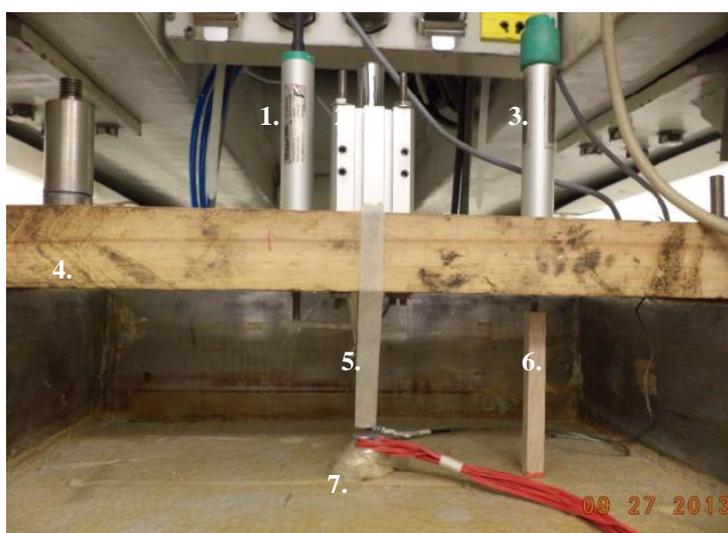
A capacidade de carga teórica das estacas foi avaliada usando a metodologia proposta por Poulos e Davis (1980) para condições não drenadas, obtendo-se um valor de 1089 kN para as estacas em verdadeira grandeza. Com base no fator de escala, a carga equivalente para as estacas no modelo foi de 0,22 kN.



1. Macaco elétrico
2. Armação de suporte
3. Célula de carga
4. Estaca
5. Apoios laterais
6. Caixa de modelagem

**Figura 4.1.** Montagem para cravação das estacas individuais no modelo M2.

A carga máxima utilizada para a colocação (no campo gravitacional normal) da estaca 2 (E2) foi de 0,168 kN, e para a estaca 3 (E3) foi de 0,214 kN. Após colocadas as estacas, a prova de carga foi realizada em voo utilizando uma armação que permitiu aplicar carga mediante atuador pneumático. Além disso, foram medidas as deformações na cabeça da estaca, os deslocamentos do solo a uma distância de 5cm do eixo de carga e, os valores das cargas ao longo da mesma (Figura 4.2).

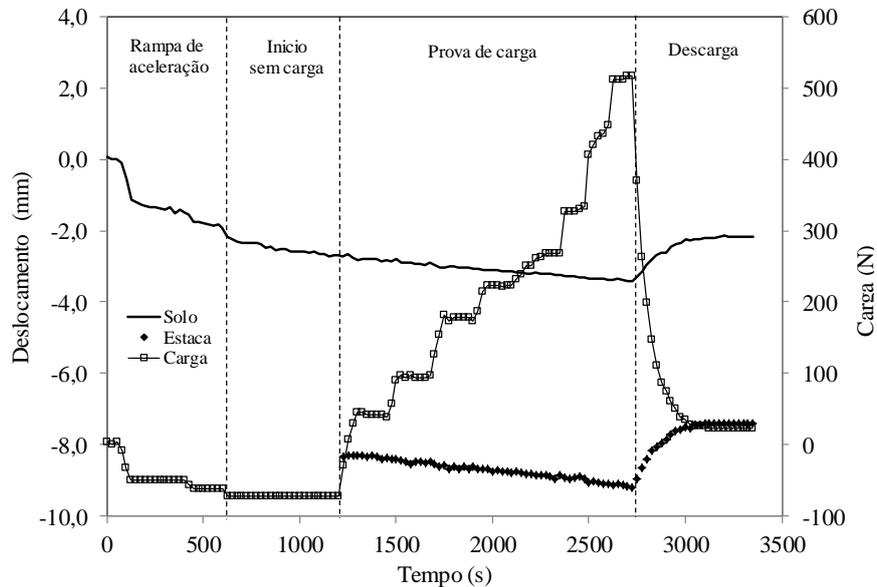


1. Extensômetro para deslocamento da estaca
2. Atuador para carga
3. Extensômetro para deslocamento do solo
4. Suporte de carga e instrumentação
5. Embolo do atuador
6. Elemento de extensão do extensômetro
7. Estaca

**Figura 4.2.** Montagem para ensaio das estacas individuais no modelo M2.

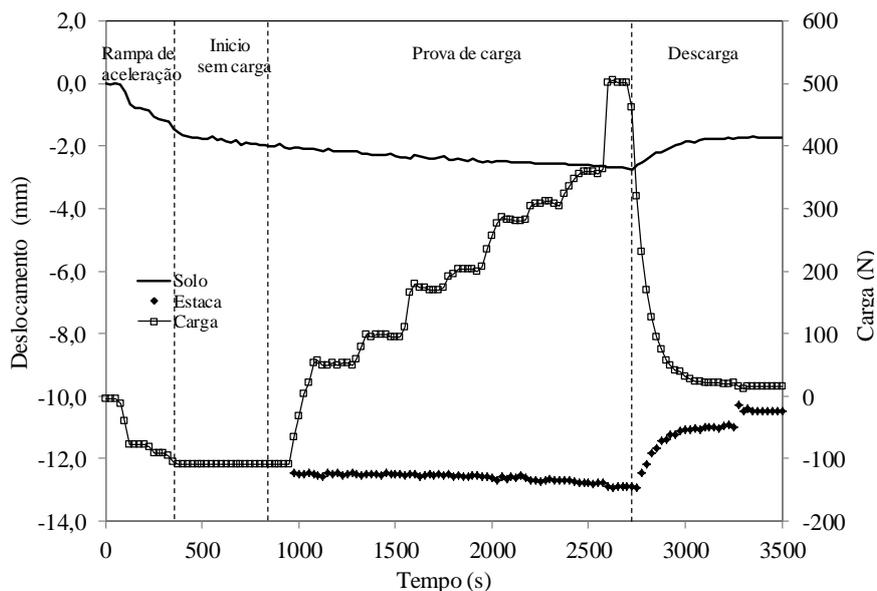
Este modelo foi ensaiado em três etapas: uma primeira, de início sem carga (10 minutos), para estabilidade dos instrumentos instalados e para garantir a aderência das estacas com o solo; a segunda, a prova de carga como tal; e a terceira, de descarga. Para realizar o ensaio.

Na Figura 4.3 são apresentados os dados de carga e deslocamento para a Estaca 2 (E2), e as leituras dos *strain gauges* são apresentadas no Apêndice E.



**Figura 4.3.** Carga–deslocamento no solo e na estaca. Prova de carga na Estaca 2 (E2) - Modelo M2.

Para a Estaca 3 (E3), os dados de carga e deslocamento são apresentados na Figura 4.4, e as leituras dos *strain gauges* no Apêndice E.



**Figura 4.4.** Carga–deslocamento no solo e na estaca. Prova de carga na Estaca 3 (E3) - Modelo M2.

Salienta-se que neste ensaio a carga aplicada na estaca foi superior à teórica estimada (0,22 kN), devido a que os tempos de carregamento não simularam um ensaio não drenado (rápido). Neste ensaio não se realizaram medidas da poropressão, ainda quando se evitou a saída de água da caixa de modelagem, pelo menos pela camada inferior de areia.

#### 4.1.4 - Ensaio 2 – Modelo M1

No ensaio 2 se realizou uma prova de carga no radier sem estacas (Modelo M1). O solo no molde foi fabricado em três camadas com as características apresentadas na Tabela 3.9. A instrumentação neste modelo consistiu de três extensômetros tipo LVDT dispostos sobre o solo, três extensômetros dispostos sobre três cantos do radier, uma célula de carga sob o atuador que aplicou a carga e quatro medidores de poropressão tipo Metallux. Além da instrumentação implementada, instalou-se um tubo de metal de 2 polegadas de diâmetro para o controle externo do nível de água, garantindo a poropressão na base da camada de areia inferior (Figura 4.5).

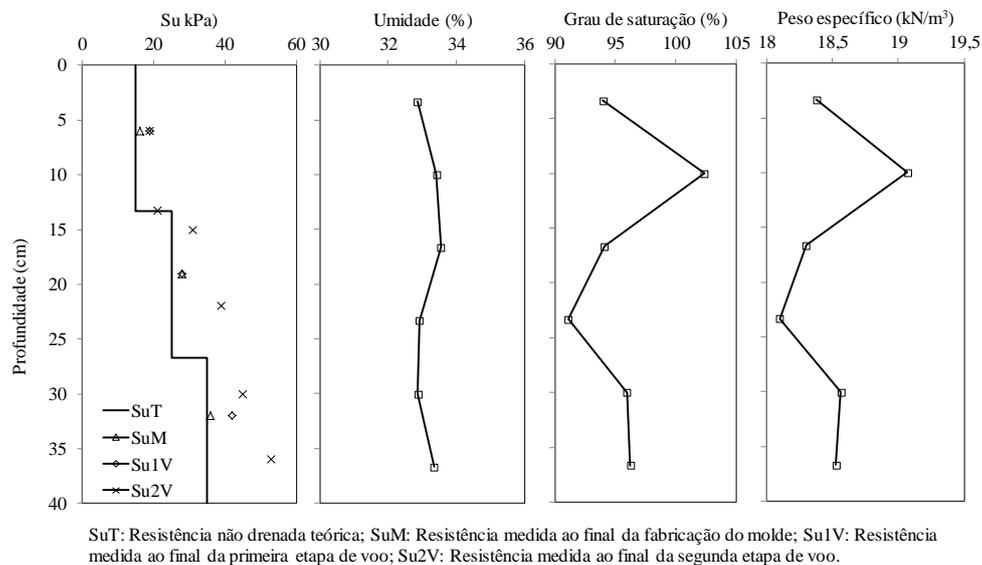


**Figura 4.5.** Tubo de controle externo do nível de água no ensaio 2.

Foram realizados ensaios de palheta ao início do voo em cada tempo de parada do ensaio e ao final deste. Foram também realizadas medidas de peso unitário, teor de umidade e grau de saturação, no final do ensaio.

Este ensaio não reportou dados, mas permitiu realizar algumas observações para ajustar os modelos posteriores:

- O solo apresentou um recalque maior do que 1 cm associado com o seu adensamento, devido ao fato de que o tubo de controle externo do nível da água não funcionou como esperado, gerando-se perda de água, sem possibilidade de recarga, durante o voo;
- Não foi possível garantir a leitura dos extensômetros dispostos nos cantos do radier durante toda a prova, já que estes alcançaram o máximo percurso do êmbolo de leitura quando o recalque foi maior do que o esperado;
- Os piezômetros instalados (Metallux) não apresentaram leituras quando instalados no caulim;
- Foi possível aplicar a carga com o atuador selecionado e com as armações planejadas, já que suportaram as condições de voo;
- Os valores de resistência não drenada do solo corresponderam a um perfil linear quando medidos após as etapas de voo, o que pode indicar que o valor da resistência na superfície do solo pode ser menor que a esperada como observado na Figura 4.6.



**Figura 4.6.** Perfis de resistência, umidade, grau de saturação e peso específico no molde 2 - Modelo 1 (M1)

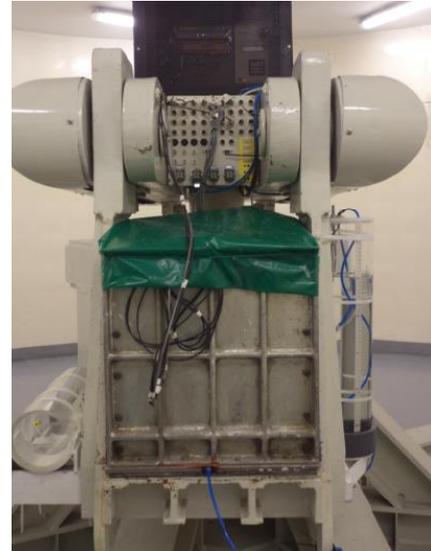
#### 4.1.5 - Sistema de controle externo do nível da água

Baseados nas observações do Ensaio 2, foi implementado um sistema para controle externo do nível da água. Este sistema consiste de um tanque pressurizado colocado na caixa de contrapeso da centrífuga, o qual mantém o nível da água em mais outro tanque vertical colocado na lateral da plataforma de modelos. O nível neste último tanque é controlado por

médio de um sensor (flutuador) de nível vertical, e uma válvula solenoide. Do outro lado da plataforma foi instalado mais outro tanque (horizontal) para receber a água que sai do modelo na etapa de adensamento com abatimento da poropressão.



a) Tanque pressurizado reservatório da água na plataforma de contrapeso.



b) Tanque vertical (direita) para controle externo do nível da água.



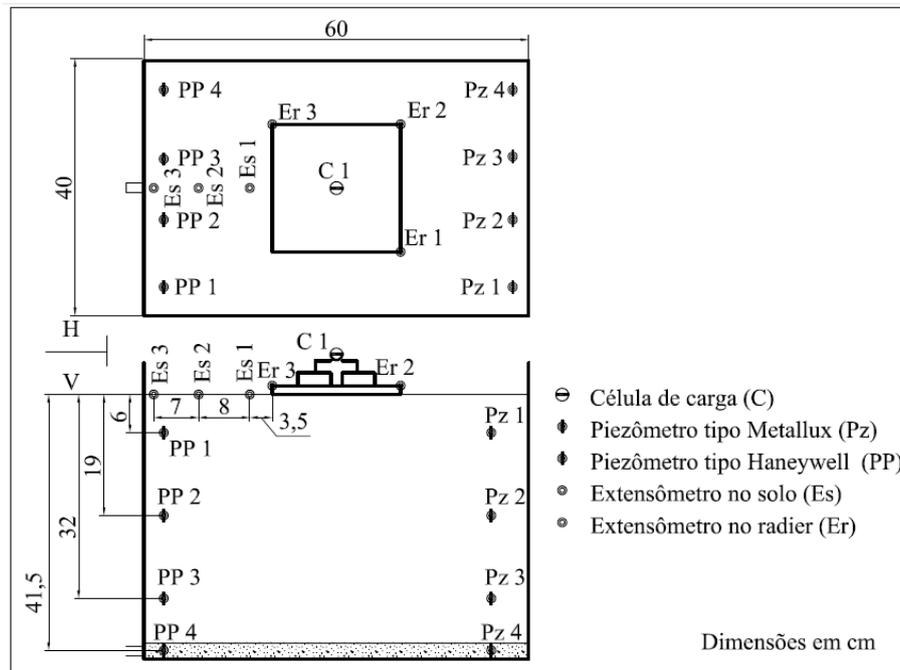
c) Sensor de controle do nível.

**Figura 4.7.** Sistema de controle externo do nível da água.

#### 4.1.6 - Ensaio 3 – Modelo M1

No Ensaio 3, foi realizada uma prova de carga no radier sem estacas. O objetivo deste ensaio foi obter a resposta do radier quando submetido a processos de carga e carga com abatimento da poropressão, para poder realizar uma análise comparativa da resposta do radier com e sem estacas.

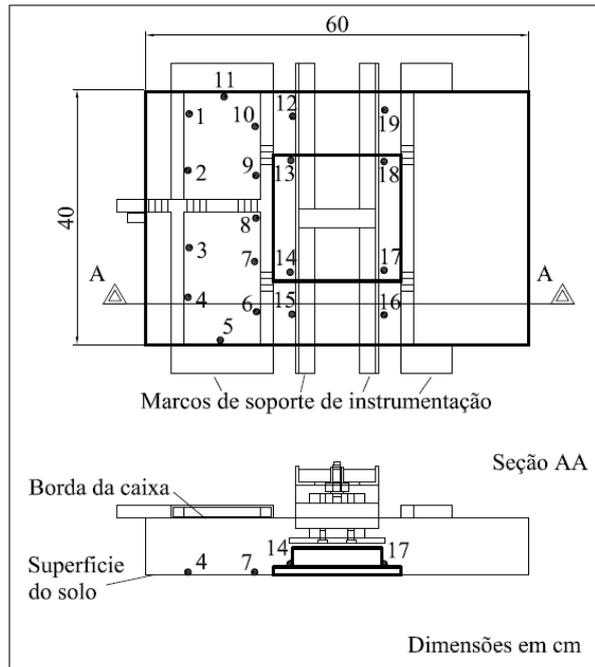
O molde foi fabricado em três camadas, com filtros de areia intermediários como apresentado na Tabela 3.9. Os detalhes da localização da instrumentação são apresentados na Figura 4.8 e um registro fotográfico da montagem pode ser consultado no Apêndice F.



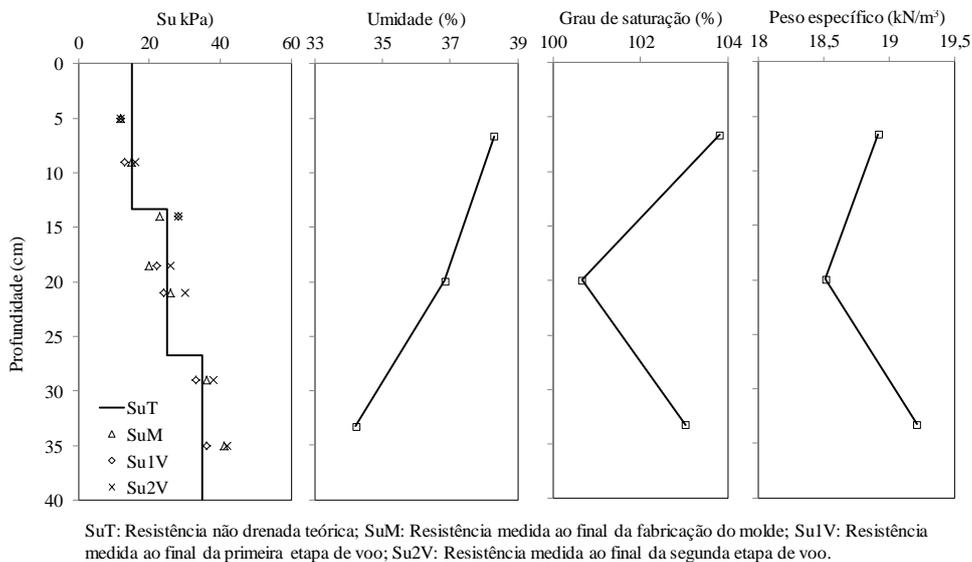
**Figura 4.8.** Distribuição da instrumentação no molde 3 - modelo 1 M1.

Na instrumentação foram incluídos os piezômetros Haneywell (de maior tamanho, testados e calibrados) e foi estendido o percurso dos êmbolos dos extensômetros. As medidas de deslocamento dos extensômetros foram complementadas com medidas diretas sobre a superfície do modelo nos tempos de parada. As medidas foram feitas com paquímetro na superfície do solo e do radier, nos pontos apresentados na Figura 4.9. Salienta-se que, ainda quando a precisão destas leituras não é similar com a obtida dos extensômetros, em alguns casos permitem obter um valor aproximado dos deslocamentos e assim complementar as gráficas de dados.

Foram realizados ensaios de palheta para medida da resistência não drenada nas diferentes etapas dos voos. Ao final, foram recuperadas amostras de solo para determinar o grau de saturação e teor de umidade final, como apresentado na Figura 4.10.



**Figura 4.9.** Pontos complementares de medida de deslocamento durante os tempos de parada.

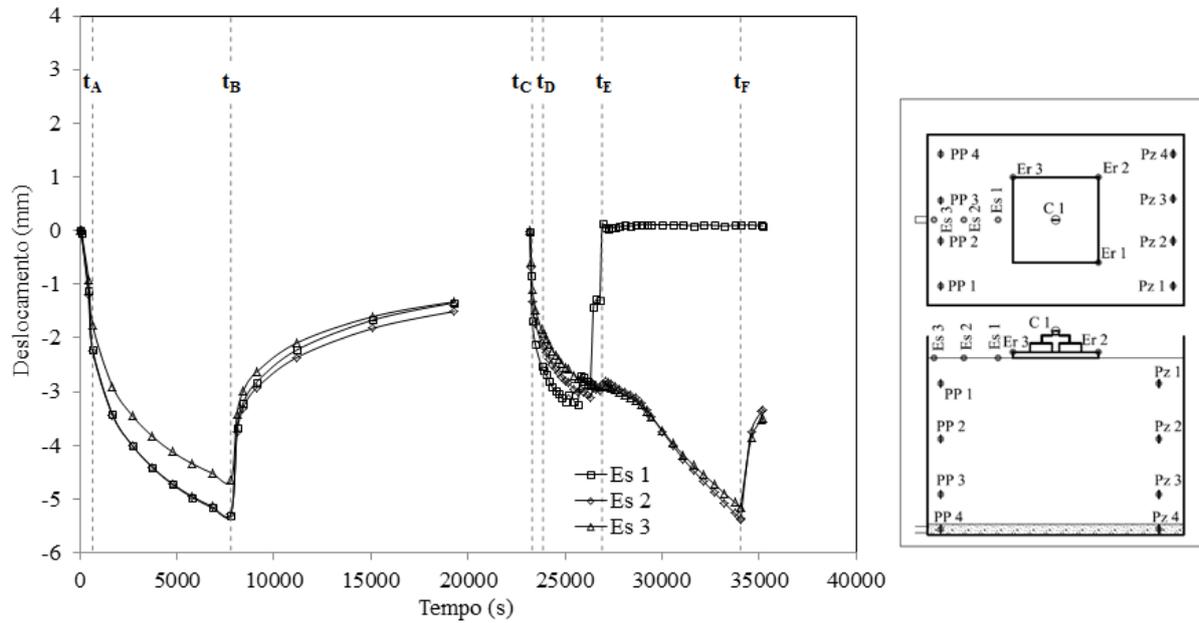


**Figura 4.10.** Perfil de resistência não drenada, umidade, grau de saturação e peso específico no ensaio 3 – modelo M1.

Desde a Figura 4.11 até a Figura 4.14, são apresentados os dados completos do ensaio realizado, referente às etapas apresentadas na Tabela 4.1 e à instrumentação da Figura 4.8, além disso, é apresentado em cada figura o plano de localização da instrumentação.

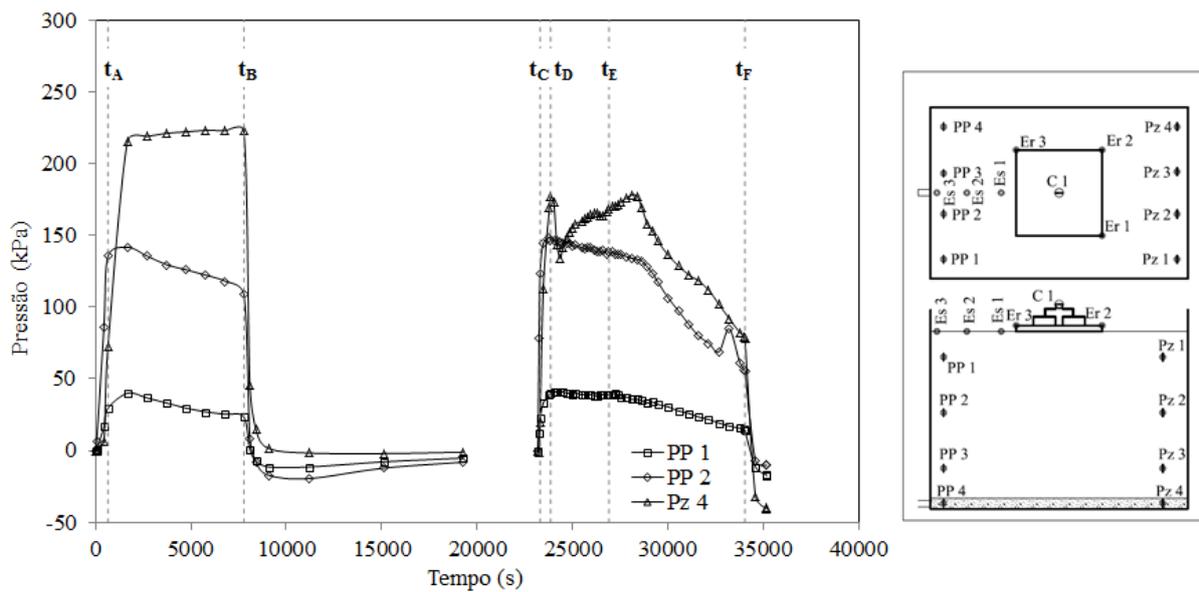
Na Figura 4.11, são apresentados os dados de deslocamento do solo nas etapas de voo,

tanto para as etapas de adensamento pelo peso próprio ( $t_A$ - $t_B$ ) e adensamento com carga ( $t_C$ - $t_F$ ), quanto nas etapas de parada.



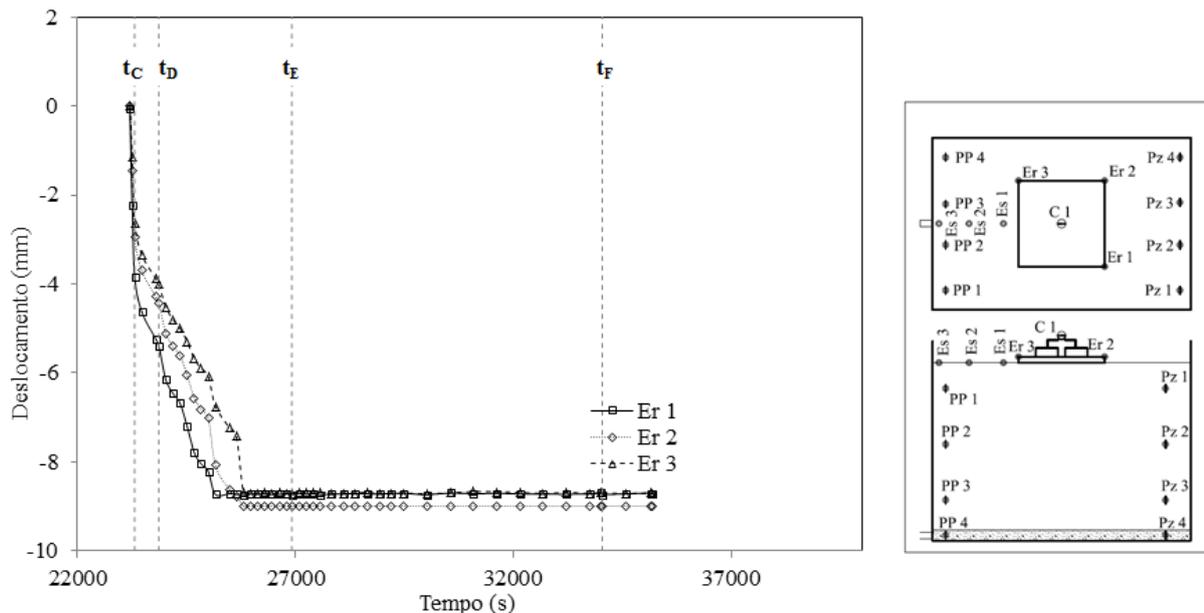
**Figura 4.11.** Leituras de deslocamento do solo no modelo M1.

Na Figura 4.12 são apresentados os dados das poropressões medidas pelos piezômetros instalados nas diferentes profundidades.



**Figura 4.12.** Leituras dos piezômetros no modelo M1.

Em relação aos valores dos deslocamentos medidos sobre o radier, na Figura 4.13 pode-se observar que todos os extensômetros alcançaram a máxima saída do êmbolo de leitura na etapa de adensamento com carga ( $t_C-t_F$ ), assim, como apresentado mais à frente, as leituras foram complementadas com aquelas realizadas com o paquímetro nos pontos apresentados na Figura 4.9.



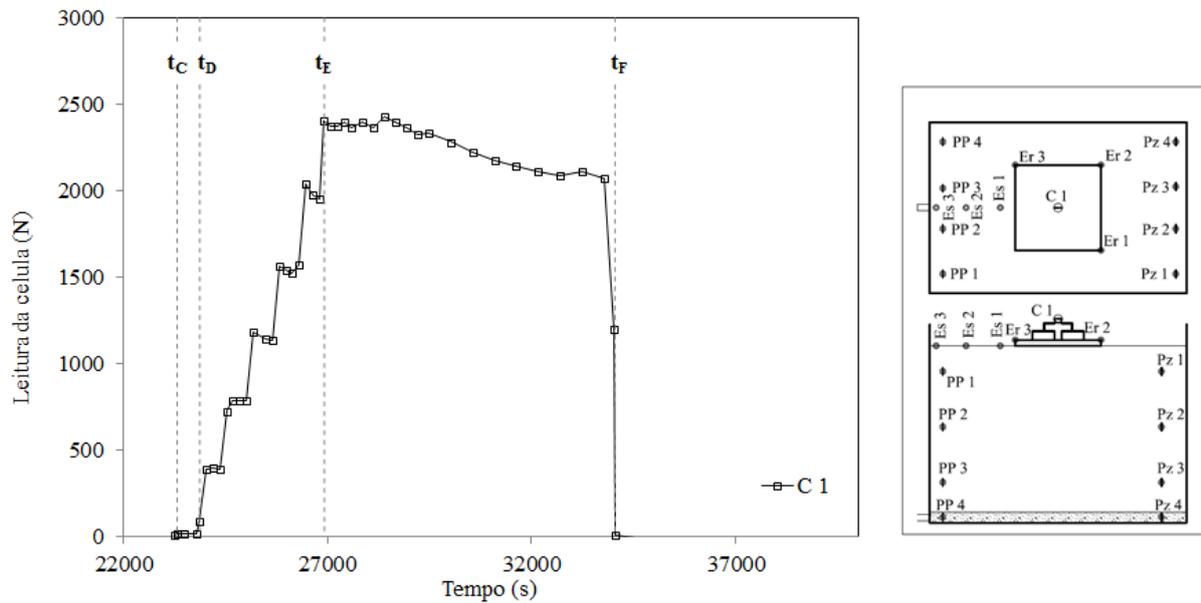
**Figura 4.13.** Leituras de deslocamento do radier no modelo M1.

A evolução da carga no ensaio é apresentada na Figura 4.14. Nela pode-se observar que esta foi aplicada por etapas até atingir a carga máxima de projeto (2,46 kN, subitem 3.11.3), a qual foi mantida até o final dessa etapa de adensamento ( $t_C-t_F$ ).

Deste modelo pôde-se observar que:

- A montagem permitiu obter dados de deslocamento do solo e do radier, da poropressão ao longo do perfil de solo e da carga aplicada;
- A carga aplicada levou o radier à falha ao superar o valor da capacidade do solo, como apresentado na Figura 4.15;
- A pressão de água manteve-se constante na etapa inicial de readensamento e variou na etapa de carga, sendo que os piezômetros PP2 e PP4 apresentam quedas rápidas possivelmente associadas com a ruptura do solo;
- Os valores de resistência não drenada (Figura 4.10) apresentaram uma variação linear

quando medidos após as etapas de voo, o que indica que o valor da resistência na superfície do solo pôde ser menor do que o esperado. Ao apresentar-se uma resistência menor na superfície do solo, a capacidade de carga pode ser menor, explicando a ruptura do solo.



**Figura 4.14.** Leituras de carga sobre o radier no modelo M1.



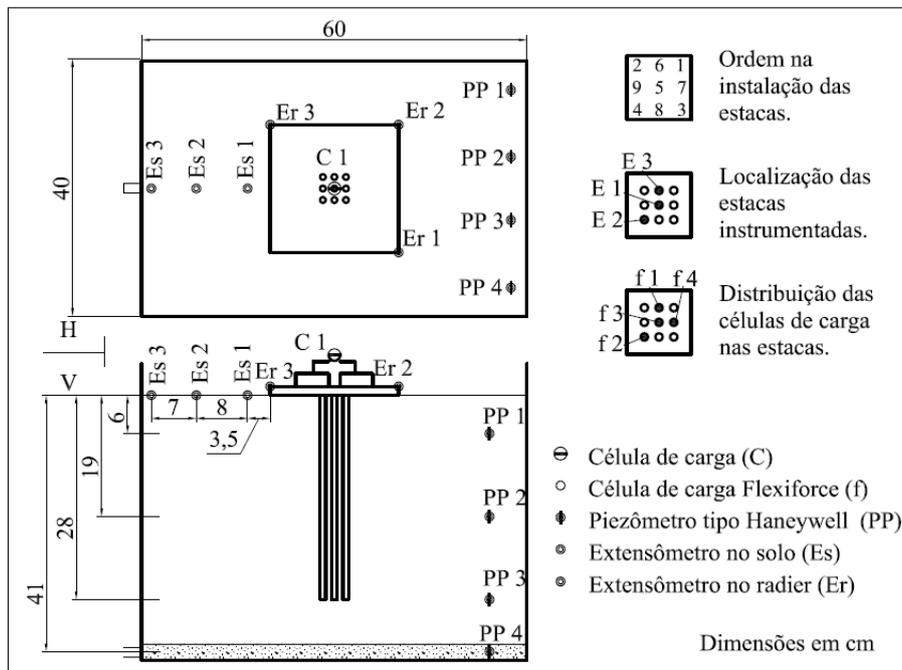
**Figura 4.15.** Detalhe da instrumentação e falha do radier no modelo M1.

#### 4.1.7 - Ensaio 4 – Modelo M3

No ensaio 4 foi realizado o modelo M3: um radier estaqueado com nove estacas dispostas no centro, com espaçamento de dois diâmetros entre elas (Figura 3.4). O solo deste modelo foi fabricado em três camadas (Tabela 3.9).

Para este modelo foram modificadas as condições de carga devido à ruptura apresentada nos moldes anteriores. A tensão admissível inicialmente calculada (62,4 kPa) levou a calcular um valor de carga de 2,46 kN aplicada no radier (fator de redução 1,5). O fator de redução agora utilizado foi de 2,5, desta forma a carga real aplicada no modelo foi de 1,47 kN.

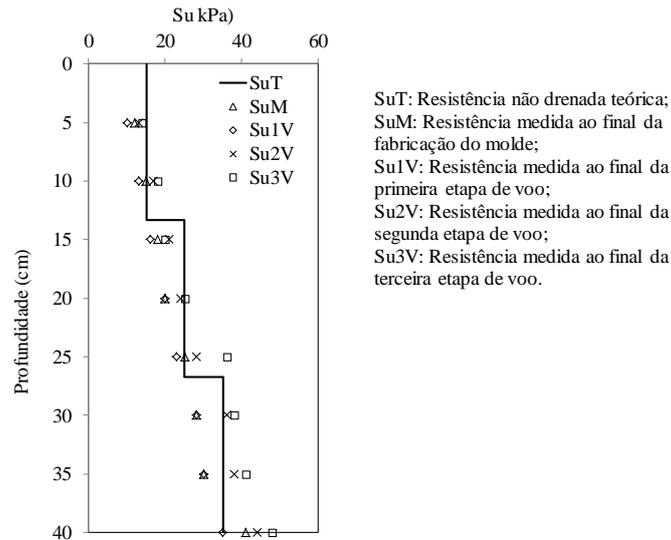
Como instrumentação foram instalados três extensômetros no solo e três no radier, quatro piezômetros tipo Haneywell, uma célula de carga sobre o atuador tipo *air spring* e células de carga miniatura (tipo Flexiforce) sobre quatro das estacas instaladas, sendo três dessas estacas com *strain gauges*. A distribuição da instrumentação é apresentada na Figura 4.16 e alguns detalhes da montagem podem ser consultados no Apêndice F.



**Figura 4.16.** Distribuição da instrumentação no molde 4 - Modelo 3 (M3).

Foram realizados ensaios de resistência não drenada nas diferentes etapas dos voos mediante ensaio de palheta para determinar um perfil de resistência da Figura 4.17.

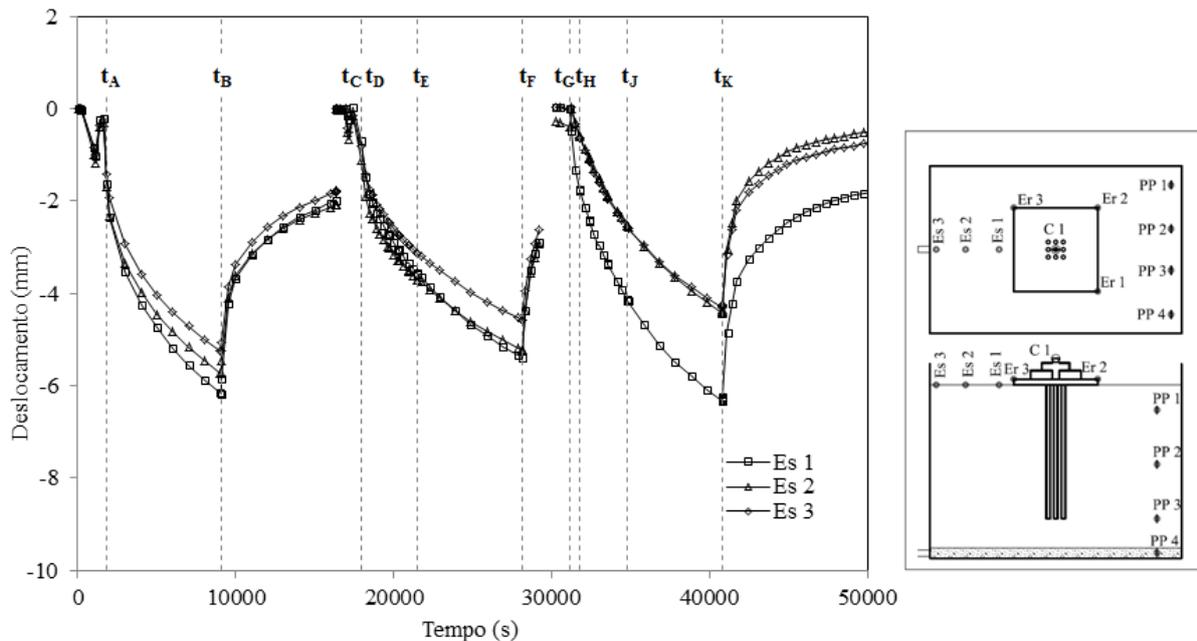
Para a instalação das estacas foi utilizado um atuador elétrico (Figura 4.1) com percurso de êmbolo de 25cm, com velocidade de instalação de 5mm/seg. As medidas de deslocamento de alguns dos extensômetros foram complementadas com medidas diretas realizadas com paquímetro nos tempos de parada dos ensaios, com base nos pontos apresentados na Figura 4.9.



**Figura 4.17.** Perfil de resistência não drenada no ensaio 4 – modelo M3.

Da Figura 4.18 até a Figura 4.21 são apresentados os dados completos do ensaio realizado referidos às etapas apresentadas na Tabela 4.1 e à instrumentação apresentada na Figura 4.16. Os dados dos *strain gauges* são apresentados no Apêndice E.

A Figura 4.18 apresenta os deslocamentos do solo em todas as etapas do ensaio.



**Figura 4.18.** Leituras de deslocamento do solo no modelo M3.

Os dados das propressões são apresentados na Figura 4.19.

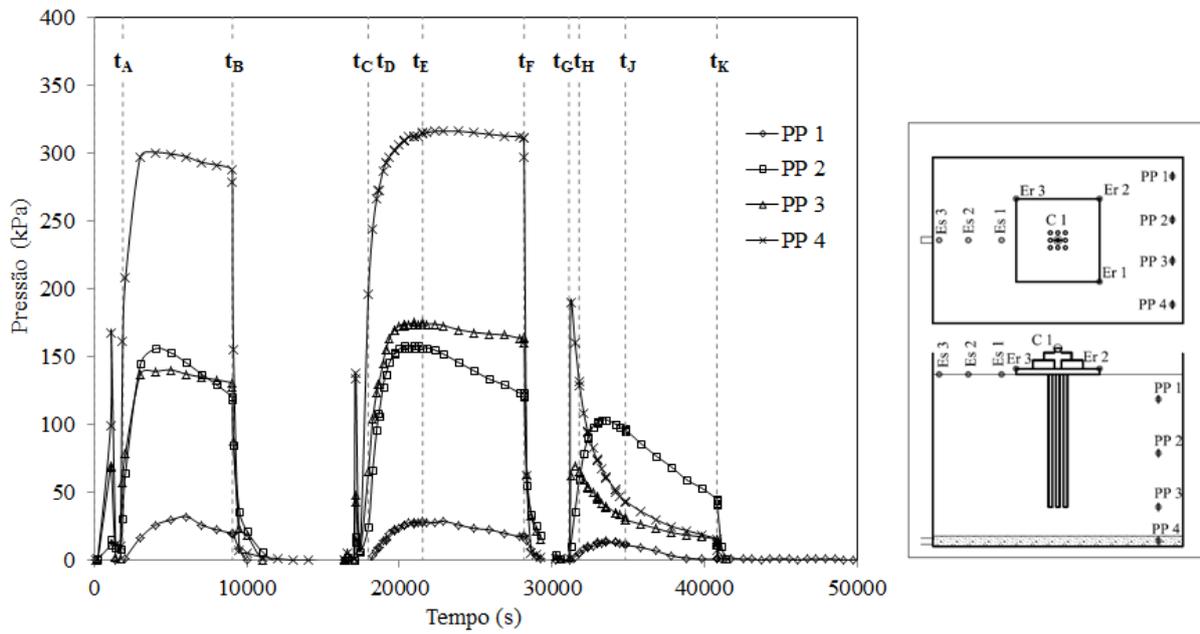


Figura 4.19. Leituras dos piezômetros do modelo M3.

Os dados obtidos de deslocamento para os extensômetros dispostos sobre o radier são apresentados na Figura 4.20. O extensômetro Er1 foi substituído neste voo por um elemento de maior percurso do êmbolo, a fim de obter tda a trajetória do deslocamento.

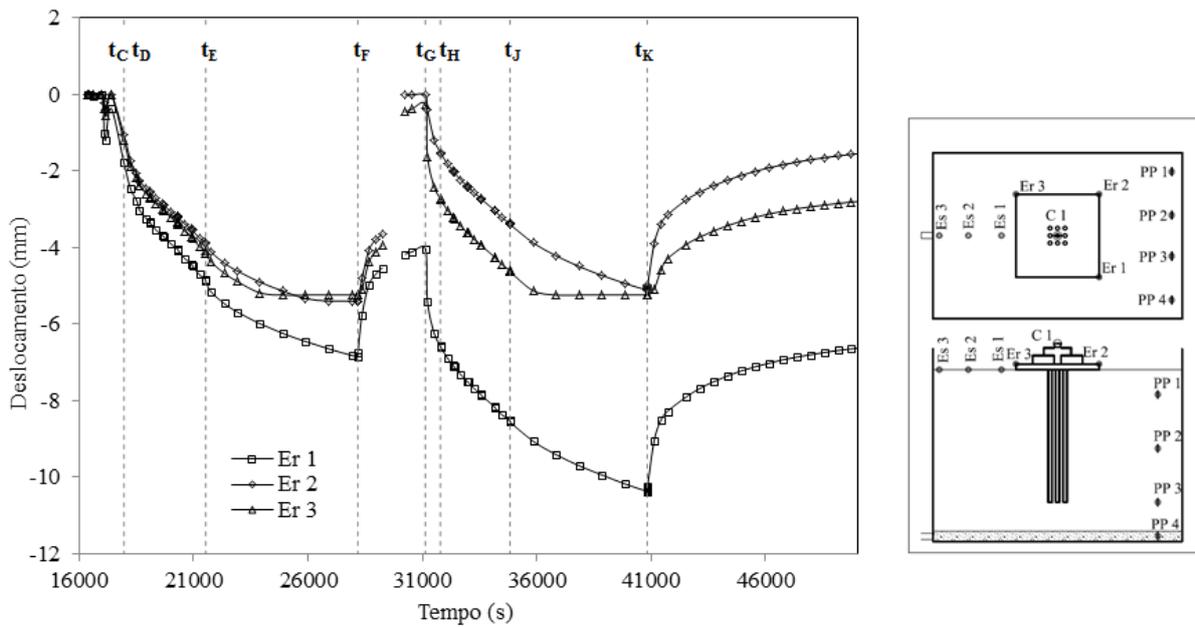
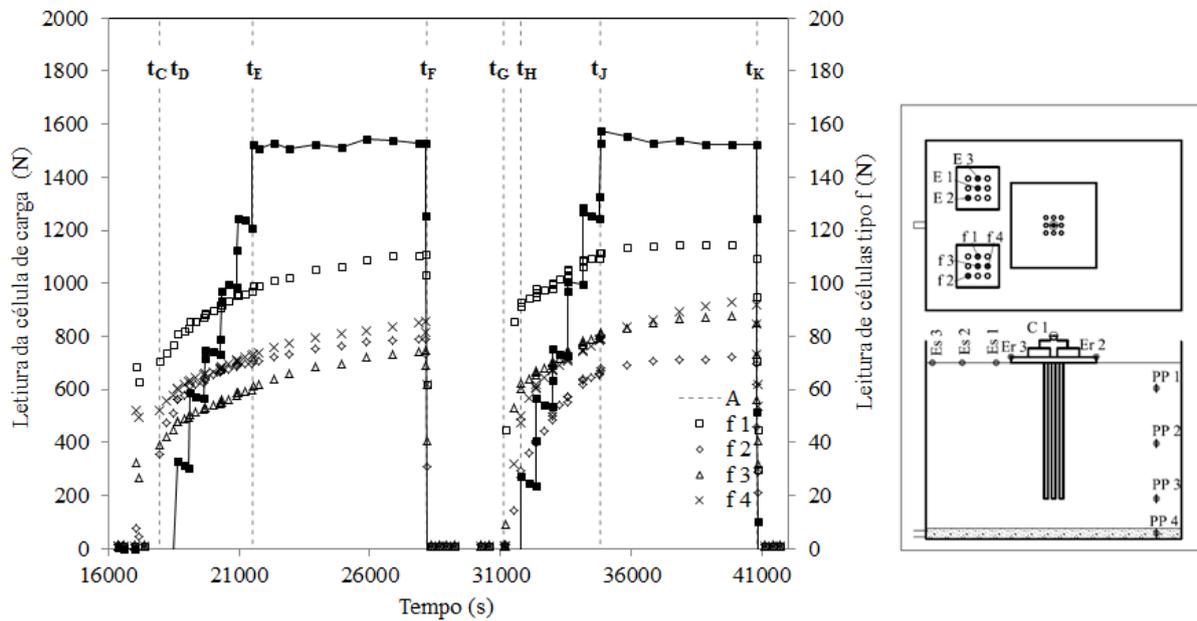


Figura 4.20. Leituras de deslocamento do radier no modelo M3.

Os dados da carga tanto no sistema total quanto nas estacas são apresentados na Figura 4.21, para as etapas 2 e 3 de voo que apresentam carga no sistema.



**Figura 4.21.** Leituras de carga sobre o radier e as estacas, no modelo M3.



**Figura 4.22.** Detalhe da instrumentação e montagem do modelo 3 (M3)

Deste modelo pôde se observar que:

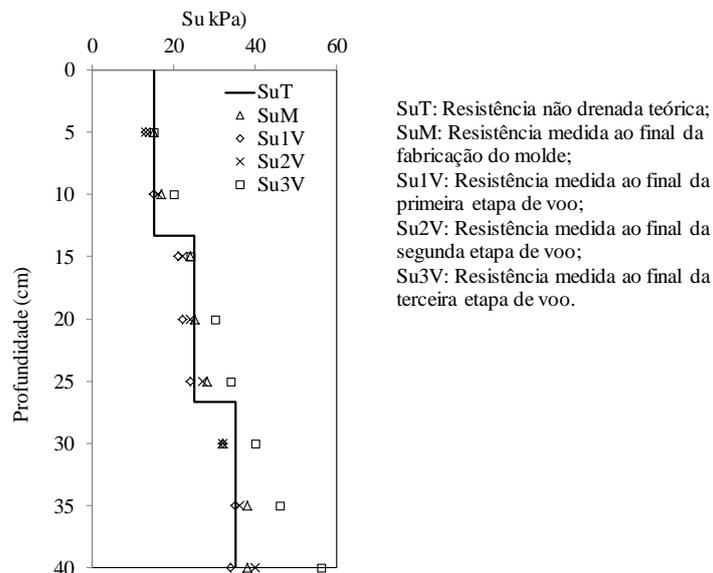
- Os valores de resistência do solo, medidos com palheta, aumentam com o avanço do ensaio, sendo maiores quando é realizado o abatimento da poropressão dentro do solo (Etapa 3);
- A leitura do extensômetro Es1 na Etapa 3, indicou que o radier ocasionou um deslocamento maior do solo nas proximidades, ainda com a inclusão das estacas;

- Os valores de carga registrados pelas células de carga nas estacas permitem observar como são incrementadas as cargas individuais nas estacas, quando realizados os respectivos aumentos de carga no sistema geral.

#### 4.1.8 - Ensaio 5 – Modelo M6

O modelo 6 (M6) foi realizado no molde 5. O modelo corresponde a um radier estaqueado com nove estacas dispostas em todo o radier com espaçamento de nove diâmetros (Figura 3.4). O solo do molde utilizado neste modelo foi fabricado com as condições apresentadas na Tabela 3.9. A carga aplicada no sistema, igual à do modelo anterior, foi de 1,47 kN.

Foram realizados ensaios de resistência com ensaio de palheta em distintas profundidades nas diferentes etapas de voo. O perfil de resistência é apresentado na Figura 4.23.



**Figura 4.23.** Perfil de resistência não drenada no molde 5 – modelo 6 (M6).

Na instrumentação foram instalados extensômetros no solo e no radier, quatro piezômetros tipo Haneywell, uma célula de carga sobre o atuador tipo *air spring* e células de carga miniatura (Flexiforce) sobre quatro das estacas instaladas, três das estacas com *strain gauges*.

A distribuição da instrumentação é apresentada na Figura 4.24 e alguns detalhes da montagem são apresentados no Apêndice F.

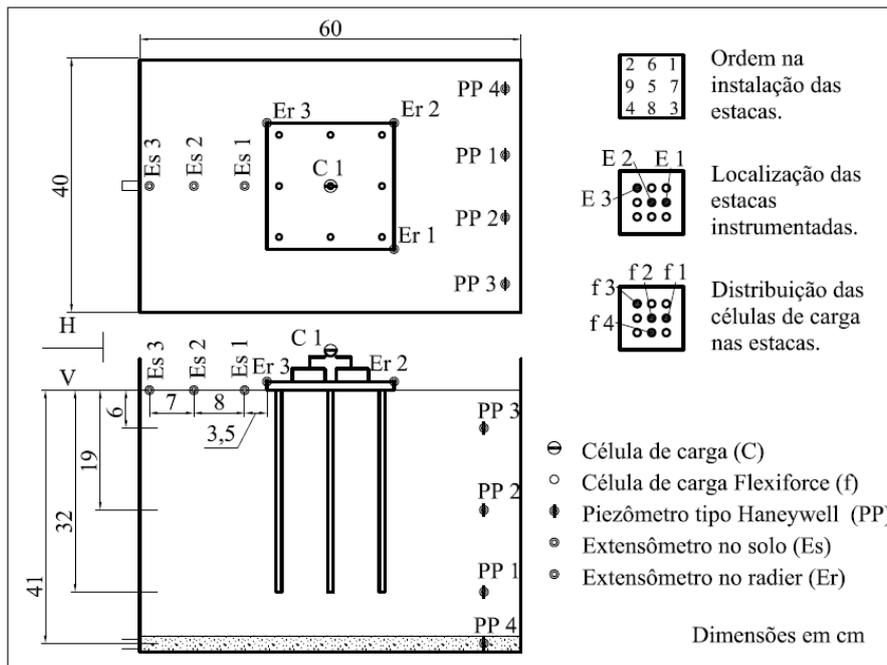


Figura 4.24. Distribuição da instrumentação no ensaio 5 - modelo M6.

Na Figura 4.25 são apresentados os dados de recalque do solo para o modelo (M6).

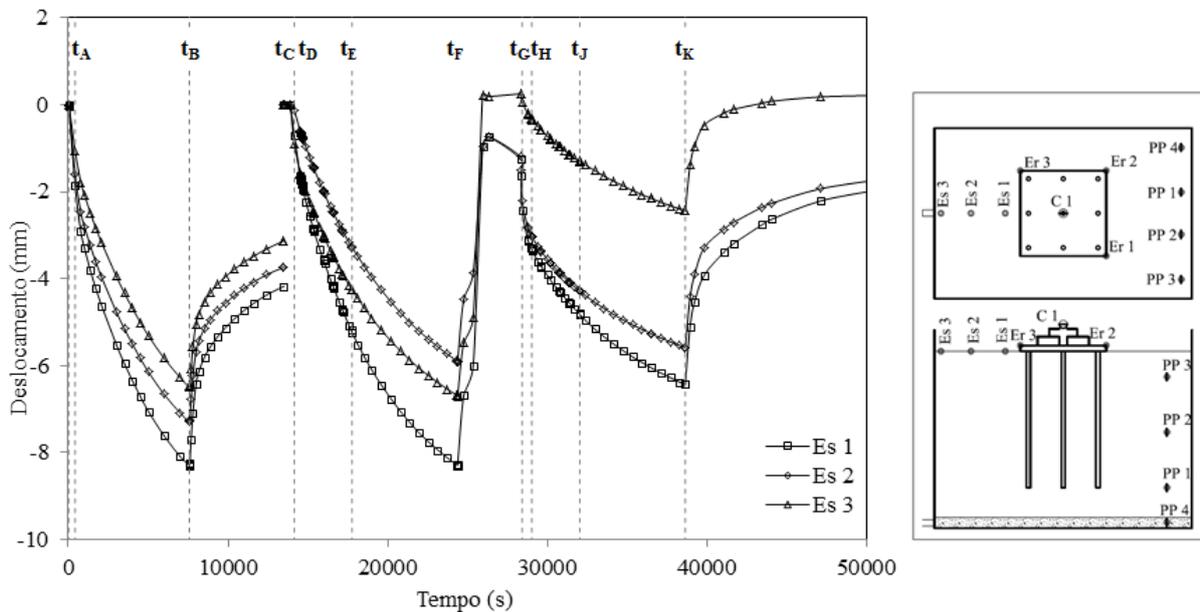


Figura 4.25. Leituras de deslocamento do solo no modelo M6.

As leituras de poropressão das etapas de voo são apresentadas na Figura 4.26. Embora a maioria dos piezômetros não registrassem muita estabilidade nas leituras das duas primeiras

etapas, devido à saída de água dos tanques de compensação, pode-se observar uma queda maior nas leituras de poropressão para a Etapa 3.

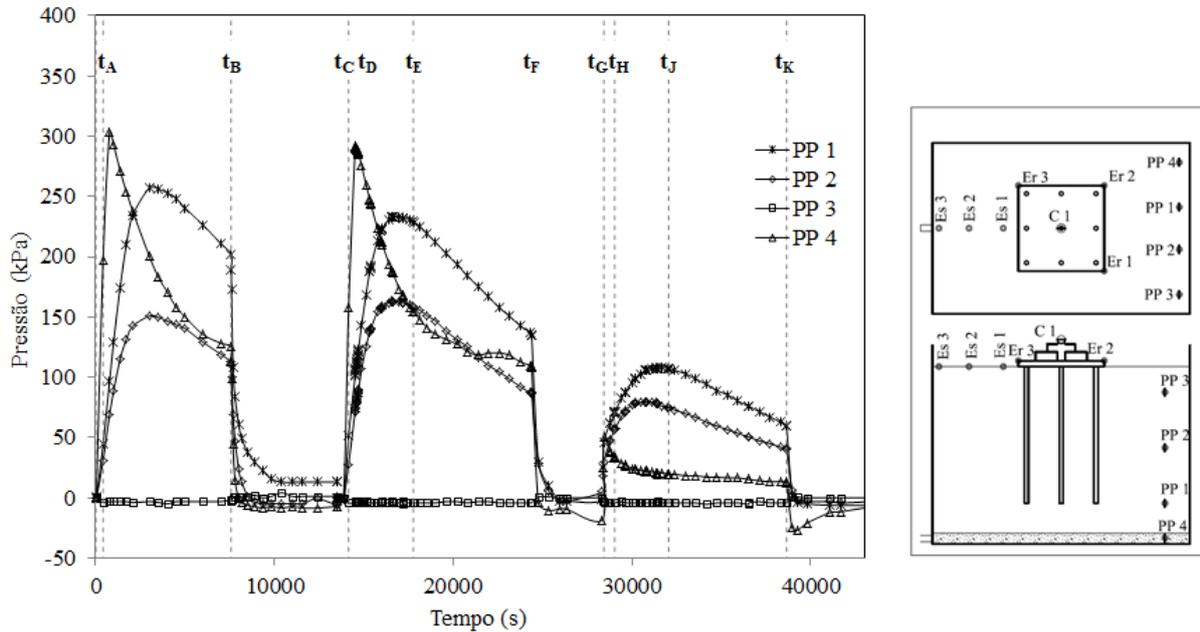


Figura 4.26. Leituras dos piezômetros no modelo M6.

Na Figura 4.27 são apresentados os deslocamentos medidos sobre o radier. Neste modelo também foi instalado um extensômetro de maior percurso, na posição Er 1. Para obter a tendência da trajetória de deslocamento completa, ainda quando foram realizadas leituras complementares feitas com paquímetro, ao final de cada etapa de voo.

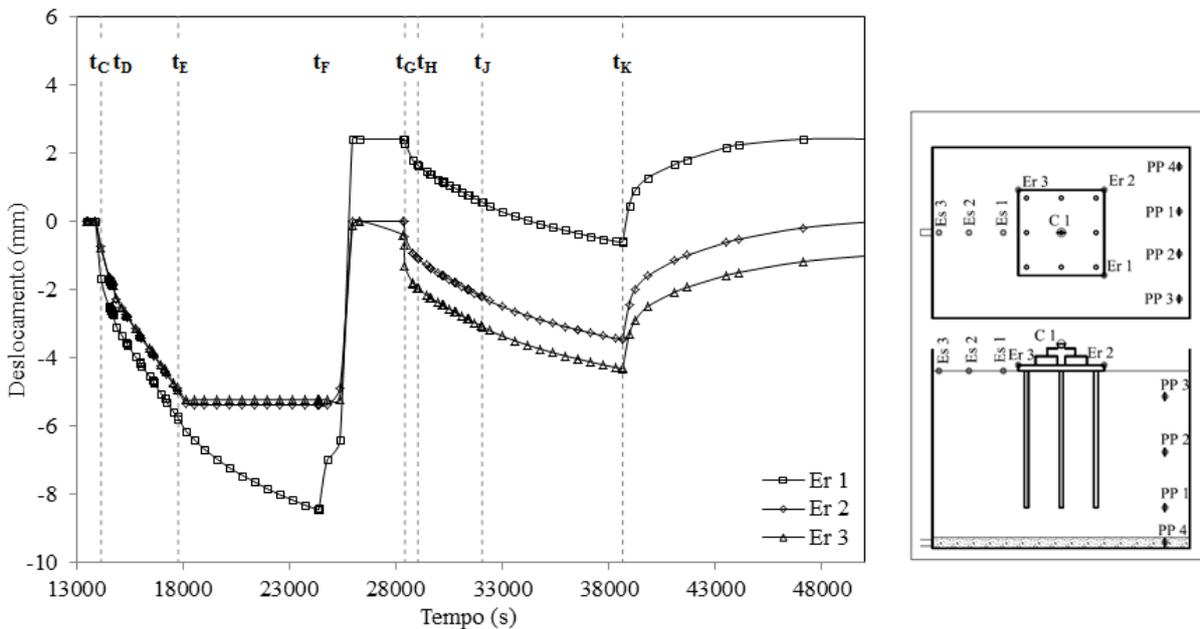


Figura 4.27. Leituras de deslocamento do radier no modelo M6.

Para a carga, a Figura 4.28 apresenta as respostas das células instaladas tanto no sistema total, quanto sobre a cabeça das estacas.

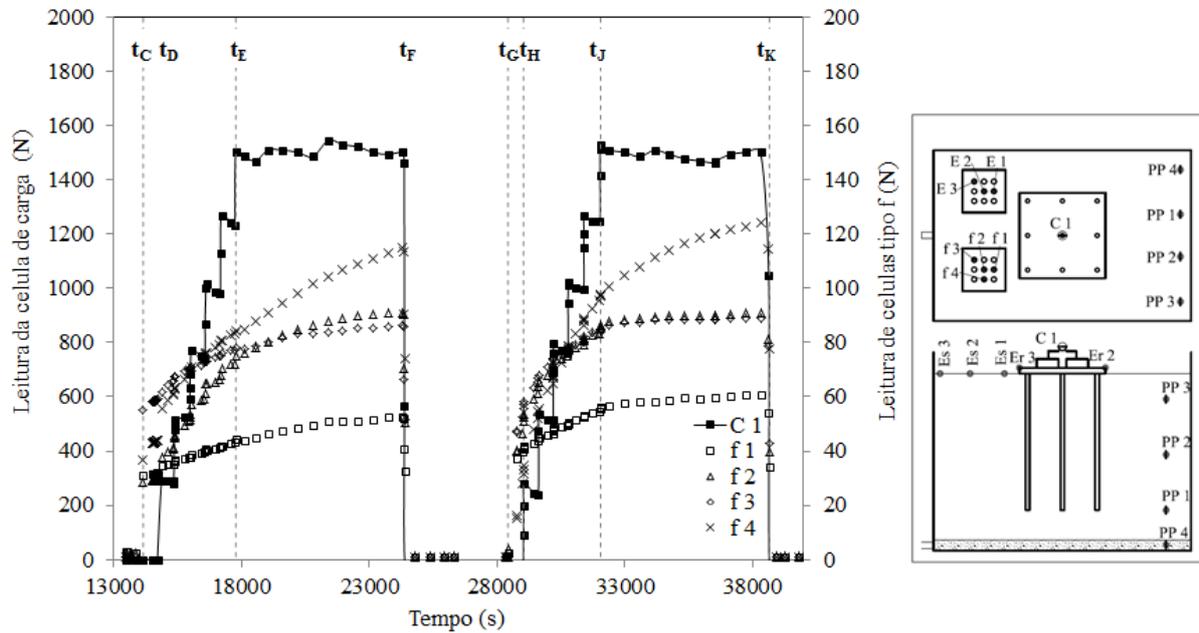


Figura 4.28. Leituras de carga sobre o radier e as estacas, no modelo M6.

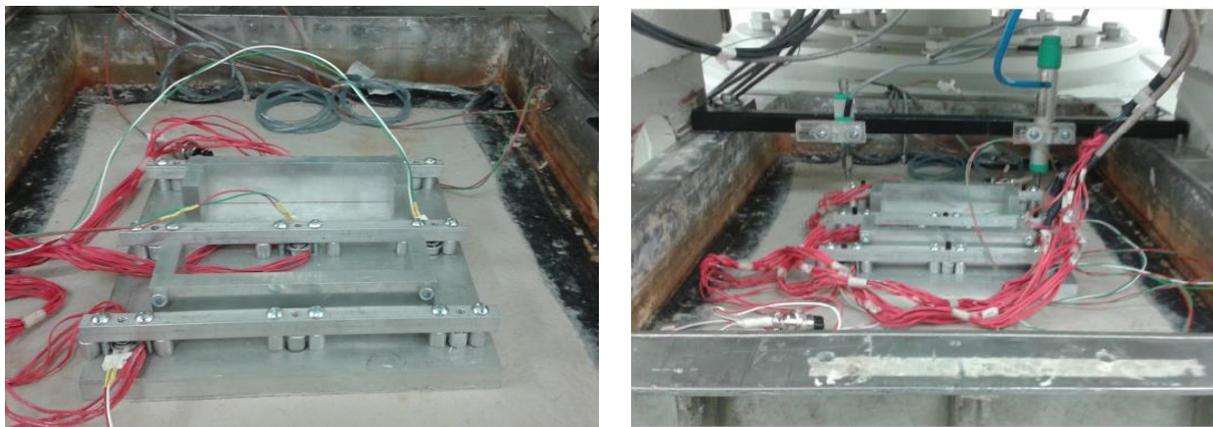


Figura 4.29. Detalhe da instrumentação no modelo M6.

Deste modelo pôde se observar que:

- Os deslocamentos do solo aparentemente foram maiores na Etapa 2 se comparada com a Etapa 3;
- A pressão lida pelos piezômetros instalados no modelo apresenta uma queda nas duas

primeiras etapas, associada com a perda de pressão na câmara de compensação de água, instalada na caixa de contrapeso;

- A queda da poropressão na Etapa 2, pode estar associada com os maiores deslocamentos reportados nesta etapa.
- A carga registrada pelas células de carga permite observar como são incrementadas as cargas individuais nas estacas. No caso da célula f4 o acréscimo é maior se comparado com os outros, o que poderia ser consequência de excentricidade da carga.

#### 4.1.9 - Ensaio 6 – Modelo 4 (M4)

No molde 6 foi disposto o modelo 4 (M4), que corresponde a um radier estaqueado com dezesseis estacas dispostas no centro do radier, com espaçamento de dois diâmetros (Figura 3.4). O solo deste molde foi fabricado segundo as condições apresentadas na Tabela 3.9. A carga aplicada no sistema também foi de 1,47 kN.

A distribuição da instrumentação é apresentada na Figura 4.30 e um registro fotográfico da montagem pode ser consultado no Apêndice F.

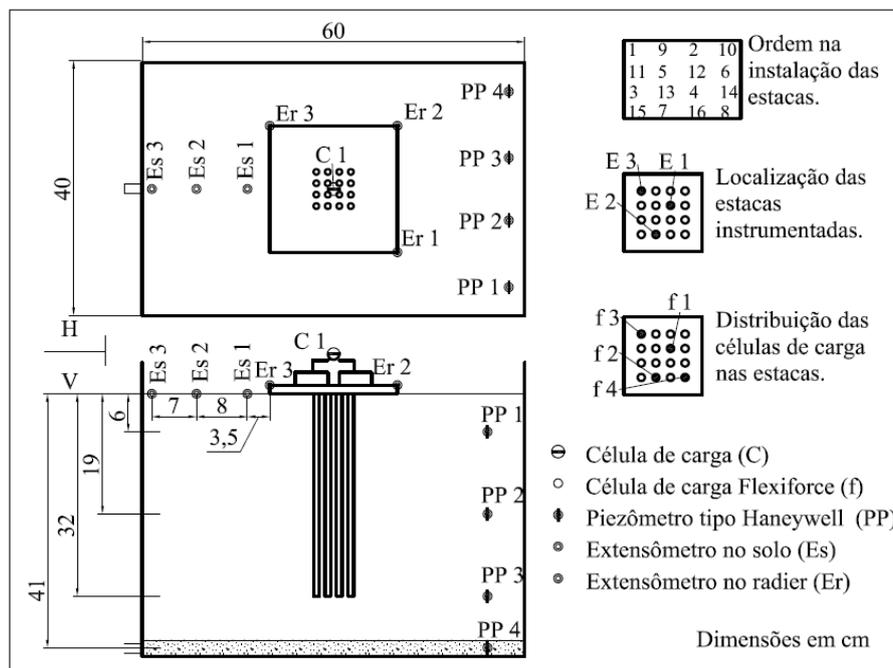


Figura 4.30. Distribuição da instrumentação no molde 6 - Modelo 4 (M4).

Como instrumentação foram instalados extensômetros no solo e no radier, quatro

piezômetros tipo Haneywell, uma célula de carga sobre o atuador tipo *air spring* e células de carga miniatura (Flexiforce) sobre quatro das estacas instaladas, três delas com *strain gauges*.

Foram realizados neste modelo ensaios de resistência não drenada com palheta em diferentes profundidades nas diferentes etapas de voo. O perfil de resistência é apresentado na Figura 4.31.

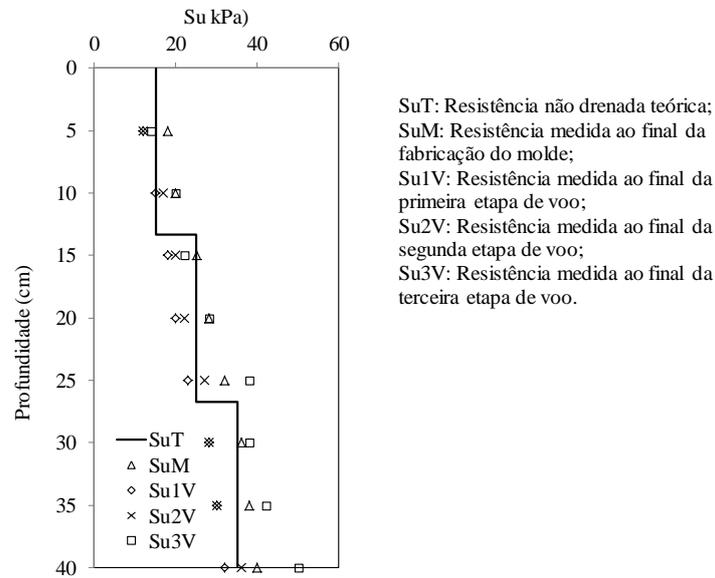


Figura 4.31. Perfil de resistência não drenada no ensaio 6 – modelo M4.

Os dados do recalque do solo para as diferentes etapas do ensaio são apresentados na Figura 4.32.

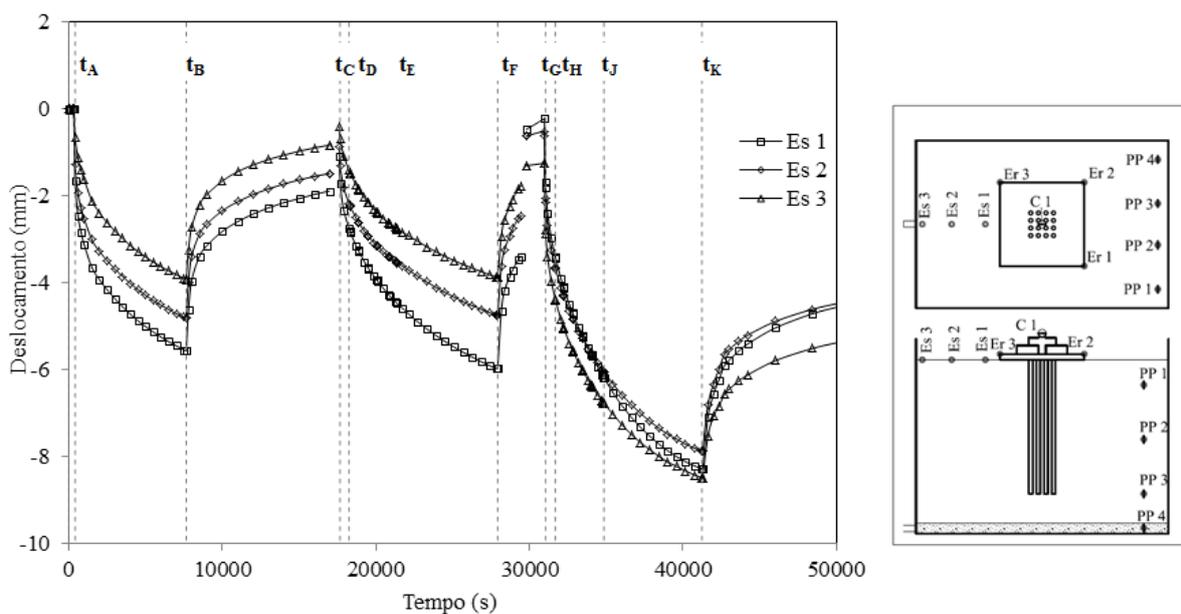


Figura 4.32. Leituras de deslocamento do solo no modelo M4.

As leituras dos piezômetros são apresentadas na Figura 4.33. Na primeira etapa do ensaio ( $t_A$ - $t_B$ ) as leituras não foram muito estáveis. Na Etapa 2, os piezômetros PP 2 e PP3 não apresentam estabilidade. O PP3 tem uma queda que poderia estar associada com o processo de carregamento e a dissipação do excesso de poropressão. O PP2 apresenta um ganho no valor da poropressão que não dissipa.

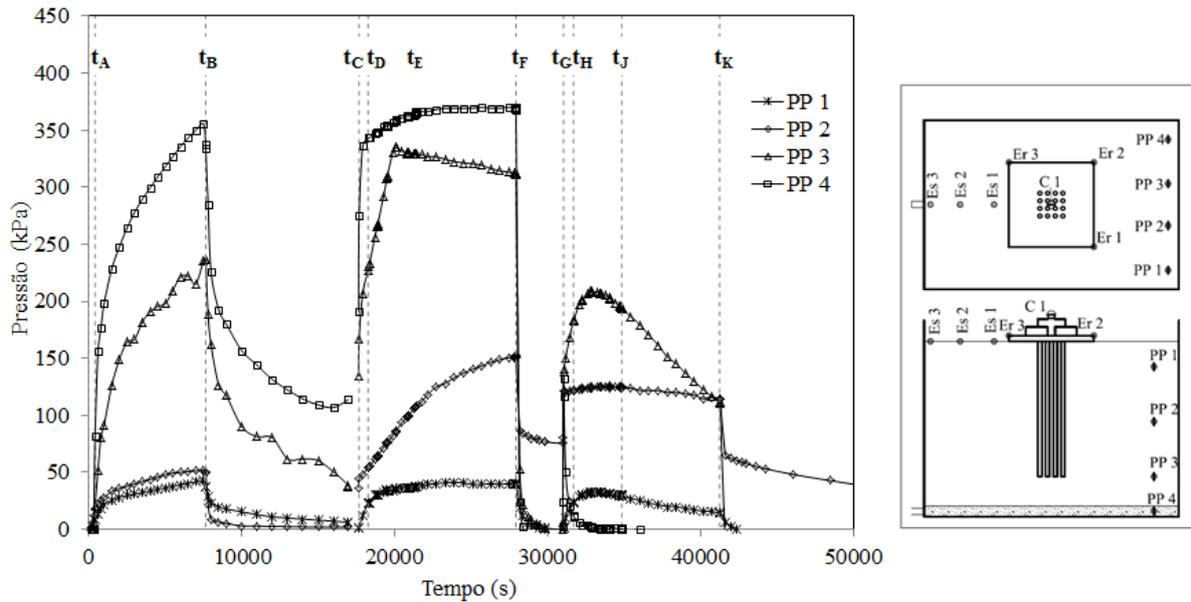


Figura 4.33. Leituras dos piezômetros no modelo M4.

Os deslocamentos do radier são apresentados na Figura 4.34.

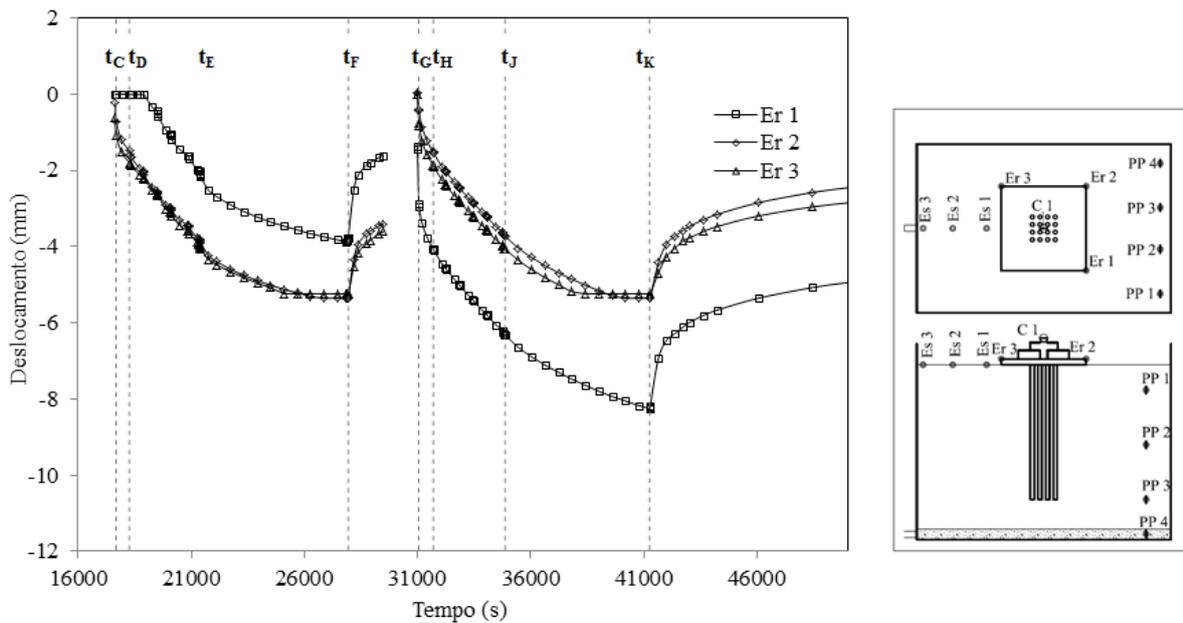
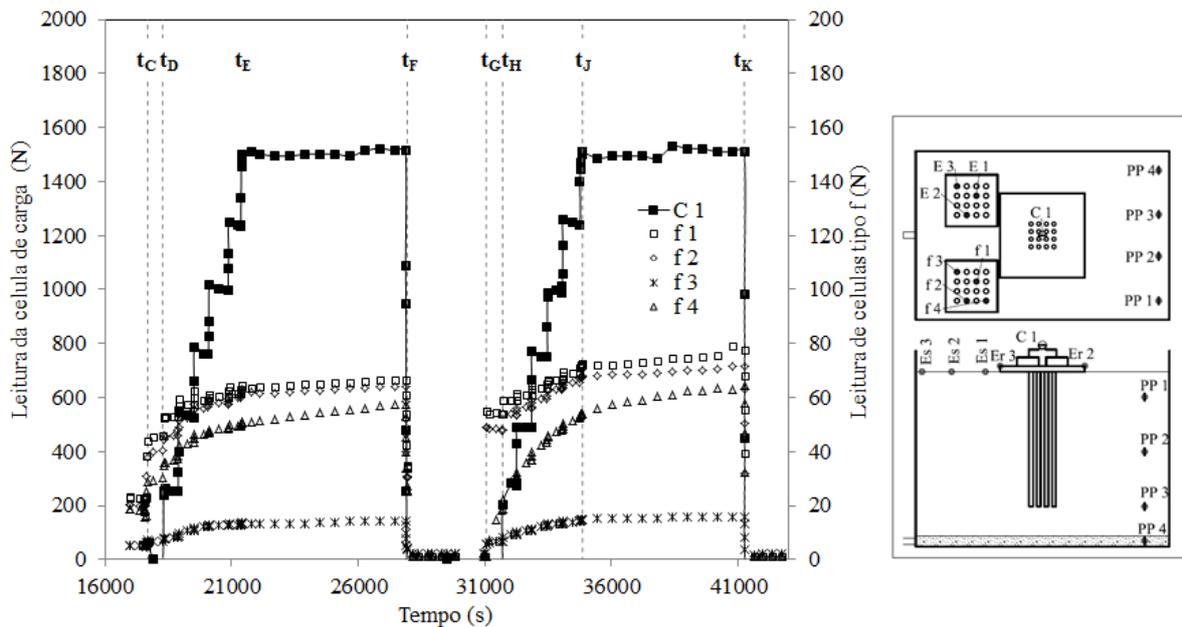


Figura 4.34. Leituras de deslocamento do radier no modelo M4.

As respostas das células de carga instaladas tanto no sistema geral, quanto nas estacas individuais são apresentadas na Figura 4.35.



**Figura 4.35.** Leituras de carga sobre o radier e as estacas, no modelo M4.



**Figura 4.36.** Detalhes das estacas instrumentadas e a montagem do modelo 4 (M4).

Deste modelo pôde-se observar que:

- Os valores de resistência do solo medidos com a palheta permitem estabelecer uma variação linear da resposta com a profundidade. Esta resistência se incrementa com a saída de água na etapa de rebaixamento;
- Os valores de leitura dos piezômetros não apresentam estabilidade. Os ganhos de propressão provavelmente estiveram associados com o processo de carregamento, no

entanto, constatando o relatório do ensaio, foi comprovado que na Etapa 2 o equipamento de controle de água não funcionou de forma adequada o que gerou sobrecarga de água no modelo;

- Os valores de carga registrados pelos instrumentos permitem observar a resposta do sistema diante dos incrementos de carga geral e a resposta individual das estacas.

## 4.2 - MODELOS EM ESCALA 1/200

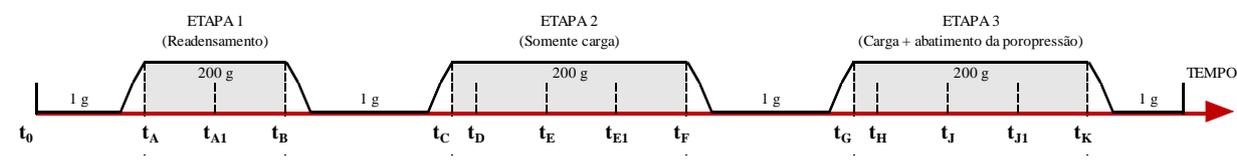
### 4.2.1 - Tempos de voo para Modelos em Escala 1/200

Baseados no coeficiente de adensamento vertical do solo ( $C_v = 0,33 \text{ cm}^2/\text{min}$ ), conhecida a distância máxima de drenagem para cada camada do modelo ( $H = 11,00 \text{ cm}$ ) e para garantir um grau de adensamento de pelo menos 90% ( $T_v = 0,848$ ), foram determinados os tempos de voo com a Equação 2.10, e escalados com a Equação 2.12.

O tempo de voo ( $t_{90}$ ) calculado foi de 1 hora e 20 minutos, para escala 1/200. Nas etapas 2 e 3, em que devia ser adicionada carga, o tempo de colocação de carga suposto foi de 1 ano, que escalado equivale a 25 minutos em voo. Assim, os tempos de voo calculados para os ensaios em escala 1/200 são apresentados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Atividades e tempos de voo para os modelos em escala 1/200.

Atividade	Intervalo	Tempo de voo (horas:minutos)
Preparação da amostra	$t_0 - t_A$	
Etapa 1: sem carga	$t_A - t_B$	1:20
Parada para instalação de elementos	$t_B - t_C$	
Etapa 2: Ensaio o voo com carga – sem abatimento do nível da água	$t_C - t_F$	1:45
Parada desconexão da água	$t_F - t_G$	0:15
Etapa 3: Ensaio o voo com carga – e abatimento do nível de água	$t_G - t_K$	1:45



### 4.2.2 - Organização dos ensaios

Os ensaios foram realizados em diferentes datas, simultaneamente com os modelos em escala 1/70. Foram executados segundo as possibilidades de construção e montagem, disponibilidade dos equipamentos e do laboratório de Modelos Geotécnicos da Universidade

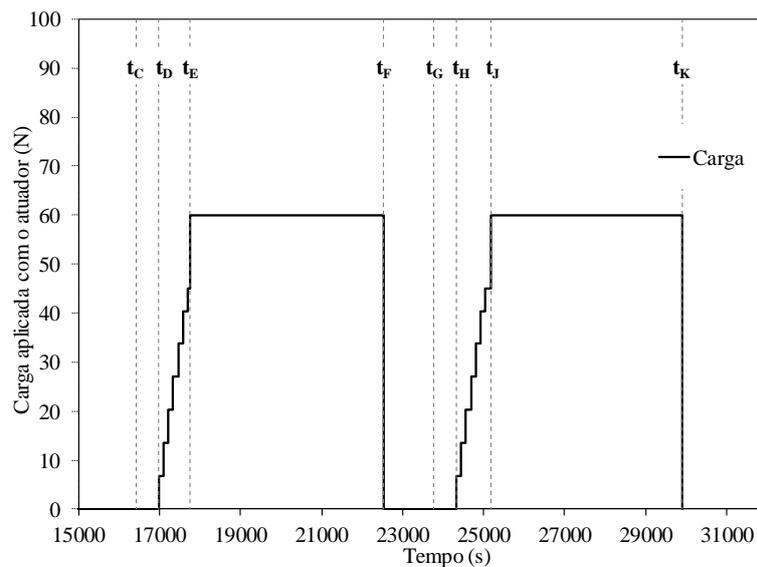
de Los Andes, e atendendo os ajustes que foram identificados durante o avanço dos ensaios. Na Tabela 4.4 é apresentado um resumo das datas de realização dos modelos. Alguns ensaios iniciais com estes tipos de modelos foram realizados com anterioridade a os modelos que posteriormente são analisados, sendo eles incluídos na tabela.

**Tabela 4.4.** Datas de fabricação e voos para modelos em escala 1/200.

Ensaio	MODELO	Data de início da fabricação	Data de finalização da fabricação	Data de voo em centrifuga
Ensaio 1	Ensaio de leitura	17/03/2014	18/04/2014	30/04/2014
Ensaio 2	Ensaio de adensamento	22/04/2014	22/05/2014	31/05/2014
Ensaio 3	Ensaio do radier	12/05/2014	07/06/2014	10/06/2014
Ensaio 4	m1	05/05/2014	12/06/2014	16/06/2014
Ensaio 5	m2	20/06/2014	19/07/2014	22/07/2014
Ensaio 6	m3	11/07/2014	09/08/2014	12/08/2014
Ensaio 7	m4	18/07/2014	16/08/2014	19/08/2014
Ensaio 8	m5	01/08/2014	30/08/2014	03/09/2014
Ensaio 9	m6	22/08/2014	20/09/2014	23/09/2014
Ensaio 10	m7	29/08/2014	27/09/2014	01/10/2014

### 4.2.3 - Carga aplicada

A carga foi aplicada mediante um atuador pneumático de capacidade máxima de 100 N. Os detalhes do sistema de carregamento e montagem foram apresentados no item 3.12. O gráfico que apresenta a forma em que foi aplicado o carregamento é mostrado na Figura 4.38.



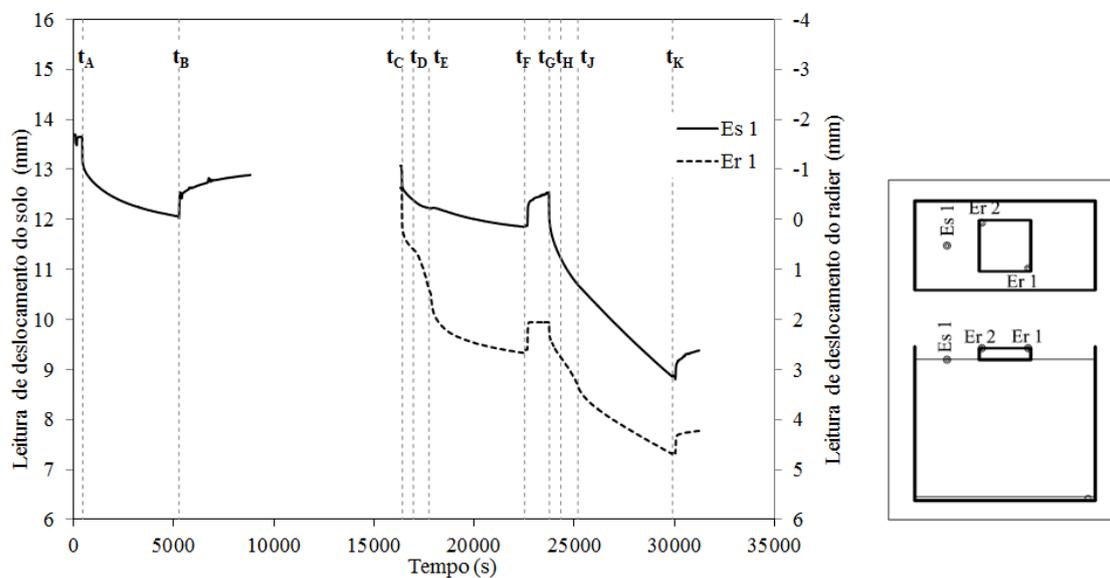
**Figura 4.37.** Carga aplicada nos modelos em escala 1/200.

#### 4.2.4 - Deslocamentos nos modelos

A seguir são apresentados os dados obtidos para os deslocamentos nos modelos em escala 1/200 com as condições apresentadas anteriormente.

- Modelo m1: Figura 4.38.

Na figura se observa que o extensômetro 1 registrou um maior recalque entre os tempos  $t_D$  e  $t_E$ , pela aplicação da carga, se comparado com o recalque registrado no solo. O Extensômetro Er 2 não registrou leituras.



**Figura 4.38.** Deslocamento do solo e do radier no modelo 1 (m1).

- Modelo m2: Figura 4.39.

Neste caso o extensômetro Es 2 não registrou leituras. Pode-se observar na Figura que os deslocamentos do solo na Etapa 3 ( $t_G - t_K$ ) são maiores que os recalques do solo. Esta etapa corresponde à etapa com carga e abatimento da poropressão.

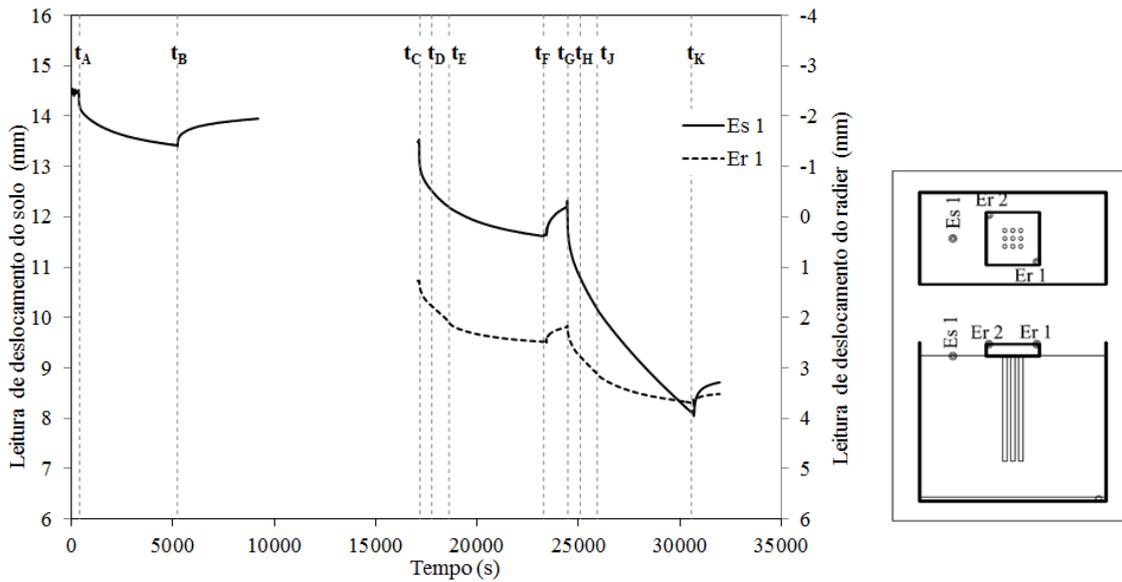


Figura 4.39. Deslocamento do solo e do radier no modelo 2 (m2).

- Modelo m3: Figura 4.40.

Os registros dos extensômetros dispostos no radier (Er 1 e Er 2) apresentam comportamento similar na Etapa 3 ( $t_G - t_K$ ), ainda quando na Etapa 2 ( $t_C - t_F$ ) o Extensômetro 2 não registrou variação na leitura. Os registros permitem apreciar um maior deslocamento do solo se comparado com os recalques do radier.

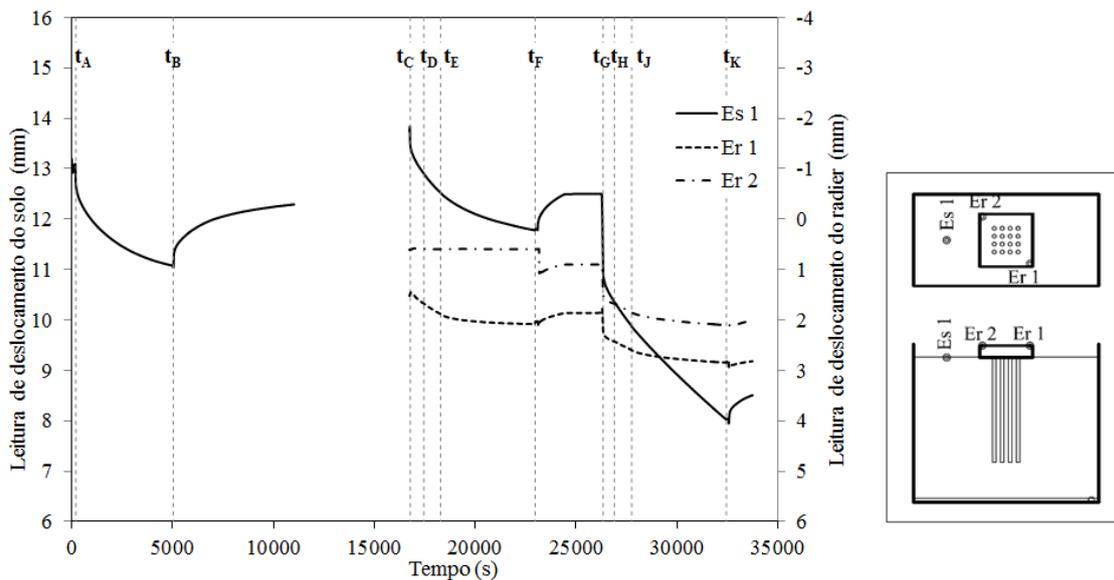
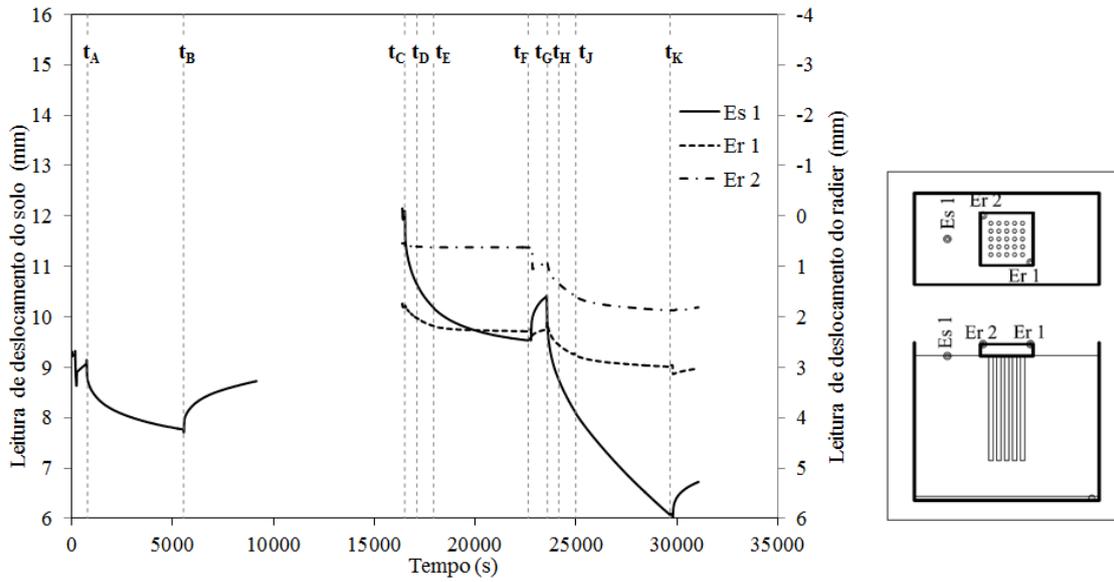


Figura 4.40. Deslocamento do solo e do radier no modelo 3 (m3).

- Modelo m4: Figura 4.41.

A tendência de comportamento é similar à apresentada no modelo m3, com maior

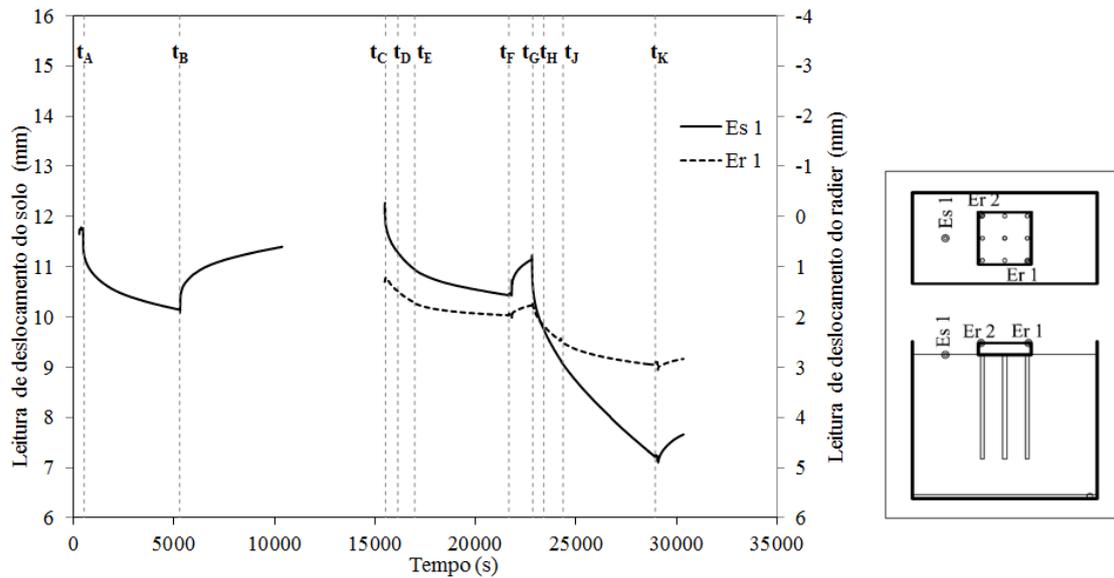
deslocamento do solo que do radier, na Etapa 3.



**Figura 4.41.** Deslocamento do solo e do radier no modelo 4 (m4).

- Modelo m5: Figura 4.42.

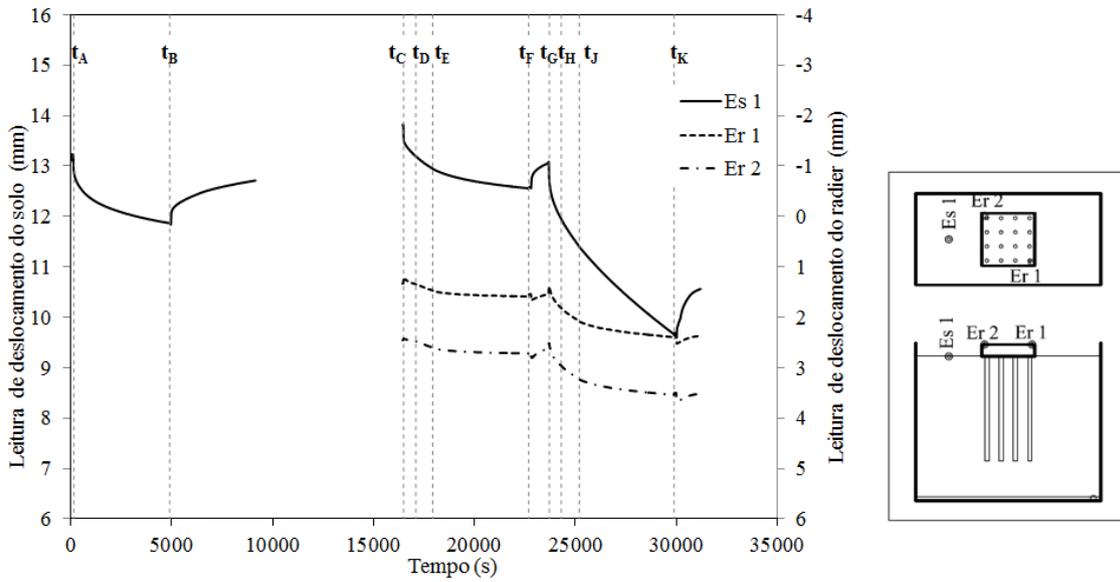
O extensômetro Er 2 não registrou dados, no entanto pode-se apreciar o maior deslocamento do solo, se comparado com o radier, nas duas etapas de voo, com carga, e com carga e abatimento.



**Figura 4.42.** Deslocamento do solo e do radier no modelo 5 (m5).

- Modelo m6: Figura 4.43. A tendência de comportamento é similar e se registram

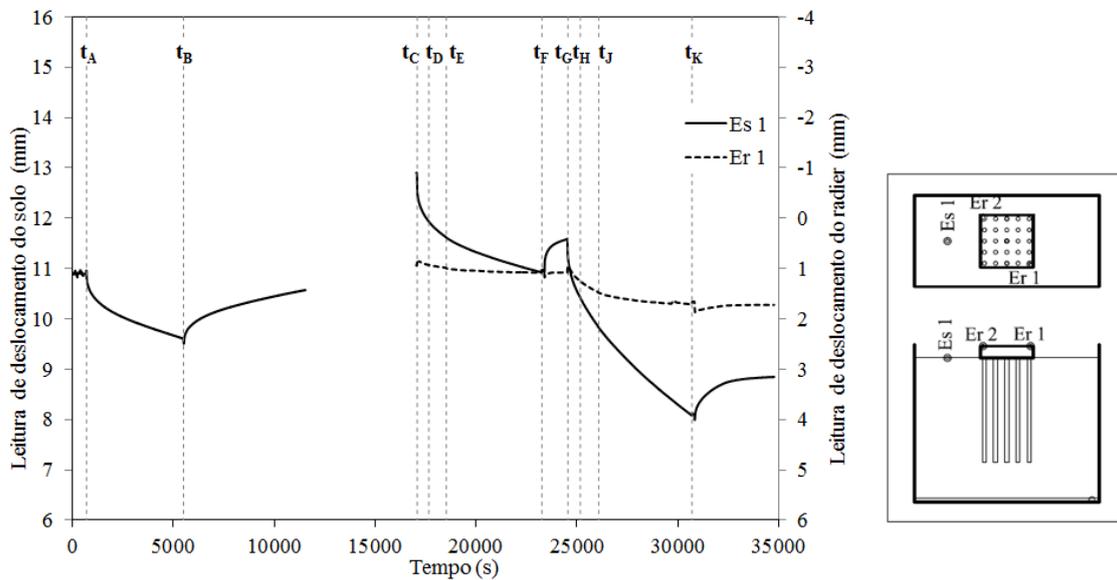
dados nos dois extensômetros instalados no radier.



**Figura 4.43.** Deslocamento do solo e do radier no modelo 6 (m6).

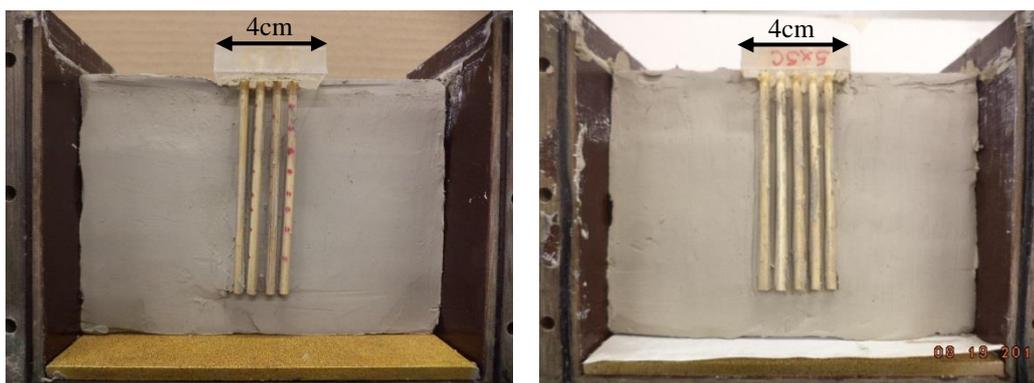
- Modelo m7: Figura 4.44.

Os deslocamentos do solo nas duas etapas (com e sem abatimento da poropressão) são maiores que os deslocamentos do radier.



**Figura 4.44.** Deslocamento do solo e do radier no modelo 7 (m7).

Na Figura 4.45 apresentam-se detalhes ao final dos ensaios das configurações do modelo m3 (4x4 estacas centralizadas) e m4 (5x5 estacas centralizadas).



**Figura 4.45.** Detalhe dos modelos m3 e m4 em escala 1/200.

### **4.3 - RESUMO DO CAPÍTULO**

Neste capítulo foi apresentado o detalhe dos ensaios desenvolvidos na pesquisa junto com os dados obtidos em cada um destes ensaios e algumas observações feitas durante os voos, como resumido na Tabela 4.5.

As etapas específicas com os tempos de voo referidos a cada uma delas, foram apresentadas na Tabela 4.1 para os modelos em escala 1/70 e, na Tabela 3.10 para os modelos em escala 1/200.

**Tabela 4.5.** Resumo das respostas dos modelos trabalhados na pesquisa.

No. Modelo	Nomenclatura	Escala	Seção do radier B x L x e <sub>R</sub> (cm*cm*cm)	Seção da estaca D x Le (cm*cm)	Espaça-mento s (cm)	Distribuição geométrica	Referência de instrumentação e geometria	OBSERVAÇÕES
1	M1				-	Radier sem estacas	Figura 4.8	No modelo usou-se só radier e pôde-se comprovar a carga de trabalho e as condições dos recalques obtidos em condição sem estacas. A resposta das equipes de medida de poropressão permitiu observar a estabilização ao interior do solo e a mudança no momento da ruptura.
2	M2	1/70	20*20*1,3	0,9*32	-	1	-	Na prova de carga para as estacas pôde-se observar que a aderência das estacas e o solo foi desenvolvida só com colocação de fita na superfície do fuste. As estacas foram carregadas até o valor de carga última teórica avaliada.
3	M3				1,8	3x3 C	Figura 4.16	Os valores de resistência não drenada do solo se incrementam com o avanço do ensaio. As células de carga registram incrementos de carga individuais nas estacas.
4	M6				8,1	3x3 T	Figura 4.24	A inclusão de estacas no modelo diminui o recalque.
5	M4				1,8	4x4 C	Figura 4.30	O abatimento em geral aumenta os recalques e as cargas suportadas pelas estacas são maiores se comparadas com a etapa sem abatimento.
6	m1				-	Radier sem estacas		Nestes ensaios foi possível observar que os recalques dependem das configurações utilizadas na modelagem. Como esperado, aquelas configurações com número maior de estacas apresentaram recalques menores. Todos os recalques aumentaram quando se aplicou um abatimento da poropressão no solo.
7	m2				0,6	3x3 C		
8	m3	1/200	4*4*0,9	0,3*8	0,6	4x4 C	Figura 3.28	
9	m4				0,6	5x5 C		
10	m5				1,7	3x3 T		
11	m6				1,13	4x4 T		
12	m7				0,85	5x5 T		

**M:** Modelo em escala 1/70; **m:** modelo em escala 1/200; **B:** Largura do radier; **L:** Comprimento do radier; **e<sub>R</sub>:** Espessura do radier; **D:** Diâmetro da estaca; **Le:** Comprimento da estaca; **s:** Espaçamento das estacas; **C:** Estacas dispostas na área central do radier; **T:** Estacas distribuídas em toda a área do radier.

## 5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como apresentado no item 3.3, as principais variáveis de comportamento a serem analisadas foram:

- Os recalques do sistema;
- A variação da poropressão;
- A distribuição da carga;
- As tensões nas estacas.

Assim, neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir do processamento dos dados expostos no Capítulo 3, especialmente voltados à análise das variáveis supracitadas. Para todas as análises deste capítulo, as leituras estão referidas às dimensões e magnitudes do protótipo (modelo real), a menos que seja indicado o contrário.

### 5.1 - RESISTÊNCIA DO SOLO

O processo de readensamento no campo da centrífuga geotécnica tem por objeto equilibrar as tensões efetivas dentro do solo. O processo de fabricação do solo proposto por Rincón & Rodríguez (2001), no qual o solo é adensado no campo de 1g, e depois readensado na centrífuga geotécnica, foi utilizado nessa pesquisa para a modelagem de um elemento de contenção. Um procedimento similar foi utilizado nas pesquisas de Horikoshi & Randolph (1996), Thaher & Jessberger (1991), Leung *et al.* (2004) e Tran *et al.* (2012b), entre outros.

Para avaliar as condições do processo de fabricação do solo foi utilizada como parâmetro de controle a resistência não drenada do solo, medida com palheta nos moldes dos ensaios de 1/70 a fim de estabelecer uma correspondência com o perfil proposto (Figura 3.6). Salienta-se que os ensaios não foram realizados em todos os modelos usados nesta pesquisa, devido ao pouco espaço disponível nos modelos que continham uma maior quantidade de elementos para a modelagem. Além disso, aos dados não foi aplicada correção, devido ao fato que a palheta utilizada no laboratório possuía escala de leitura direta da resistência e que o solo utilizado foi o mesmo, portanto a correção pelo Índice de Plasticidade é constante.

Os dados de resistência não drenada do solo, medidos com palheta em todos os moldes nas diferentes etapas dos ensaios são apresentados na Figura 5.1. Na figura é apresentada a linha teórica de resistência que, como explicado, corresponde com o processo próprio de

fabricação feito em camadas, em que cada camada apresenta um valor médio de resistência.

As linhas pontilhadas da figura representam os valores médios de resistência obtidos em todos os voos ao final de cada Etapa. Para a etapa de fabricação (Etapa 1) os valores de resistência dos modelos variam linearmente com a profundidade entre 6 e 39 kPa, para a Etapa 2, entre 6 e 46 kPa e, no final da Etapa 3, os valores variam entre 8 e 50 kPa.

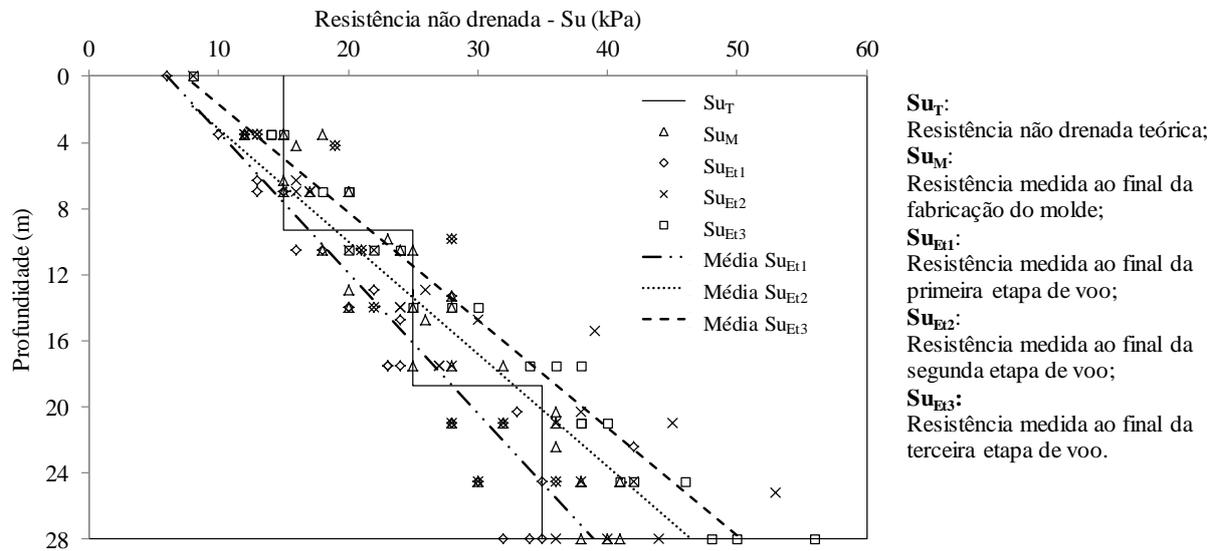


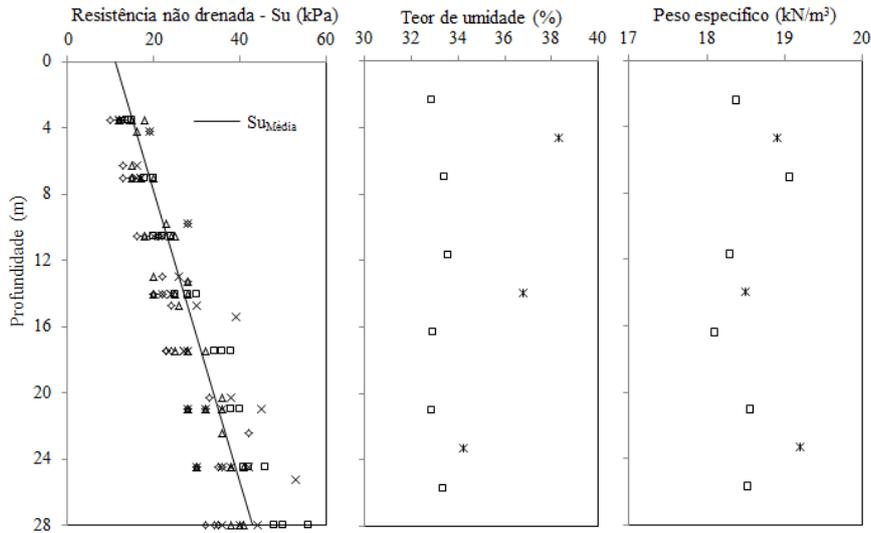
Figura 5.1. Resistência não drenada média do solo fabricado.

Os valores apresentam maior acréscimo de resistência na parte inferior do solo e a principal variação se apresenta entre a Etapa 1 e a Etapa 2 (18 %). O abatimento da poropressão gera um incremento máximo de 9%.

Na Figura 5.2 é apresentado um resumo dos parâmetros do solo, obtidos a partir de amostras tomadas dos modelos fabricados. Pode-se notar que a resistência não drenada média de todos os valores se encontra entre 11 e 43 kPa para profundidades entre 0 e 28 m. Os valores máximos e mínimos da resistência apresentam uma variação de até 28%, se comparados com a média e, de até 22%, se comparada a resistência média com a resistência teórica.

Como mencionado, o processo de fabricação do solo foi similar ao utilizado por Leung *et al.* (2004), que reportou uma variação da resistência linear com a profundidade, sendo que a resistência do solo medida em voo é 30% maior, se comparada com a medida em 1g.

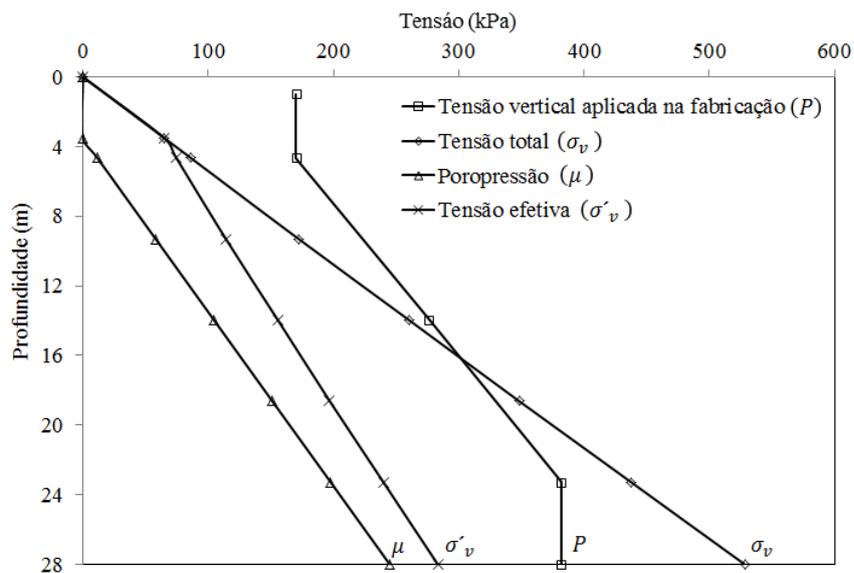
O valor médio do teor de umidade é 34%, evidenciando-se maior variabilidade na faixa mais próxima da superfície do solo, devido principalmente a processos de perda de água no primeiro molde, o qual foi evitado selando o molde com plástico por cima.



**Figura 5.2.** Parâmetros do solo no protótipo.

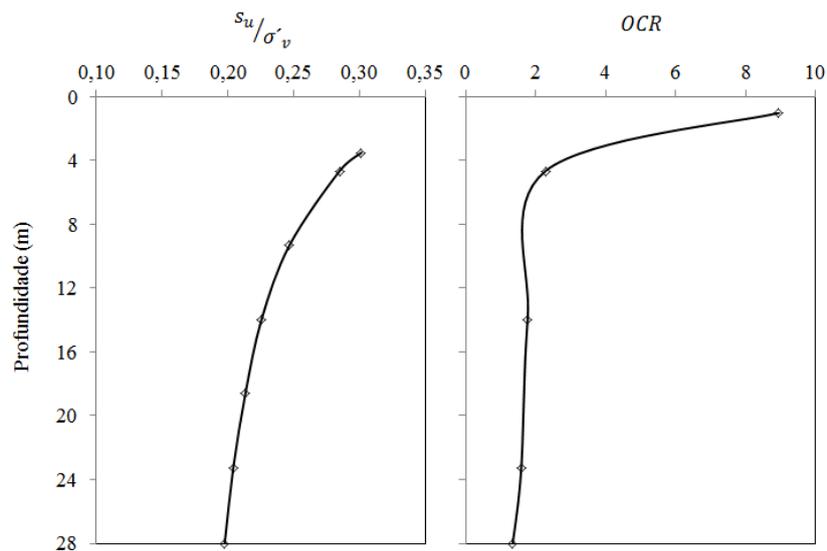
Com os dados de peso específico foi possível estabelecer um perfil aproximado das tensões no solo como apresentado na Figura 5.3. Para a obtenção do perfil de tensões efetivas o lençol freático foi considerado a 3,5m de profundidade (escala real) com referência à superfície, controlado pelo tanque de água vertical externo.

No perfil de tensões são incluídos os valores de resistência média (Figura 5.2) e da tensão vertical aplicada no processo de fabricação do solo,  $P$  (Tabela 3.9). A tensão vertical aplicada na fabricação pode ser considerada como a carga de pré-adensamento do material, tal como apresentado por Thaher & Jessberger (1991) e Tran *et al.* (2012b).



**Figura 5.3.** Perfil aproximado de tensões no protótipo.

Calculados os valores de tensão efetiva e de resistência não drenada nas camadas de solo, é possível estabelecer a variação destes parâmetros com a profundidade, como apresentado na Figura 5.4. A relação entre a resistência não drenada média ( $s_u$ ) e a tensão efetiva vertical ( $\sigma'_v$ ) nos moldes, apresenta uma variação de 0,19 até 0,30. Palmeira (2012) menciona que em depósitos naturais de argila, estes valores podem-se encontrar na faixa de 0,25 até 0,31, para argilas levemente pré-adensadas.



**Figura 5.4.** Perfil de resistência e OCR.

O processo de fabricação do solo permitiu obter um perfil com a presença de uma camada superior de até 4,7m de argila com valores de OCR maiores que 5 (como normalmente apresenta-se em cidades como Bogotá e México), e valores de resistência não drenada muito próximos dos valores teóricos propostos. Bowles (1998) considera que valores de OCR abaixo de 2 correspondem a argilas com baixo ou pouco pré-adensamento.

Horikoshi & Randolph (1996) mencionam que as medidas de resistência não drenada realizados com palheta resultam ser mais confiáveis e reais. Para melhorar a proximidade destes valores com os valores que se podem apresentar durante o voo, sugere-se diminuir a rampa de descida ou detenção da centrífuga geotécnica e realizar as medidas antes do relaxamento excessivo do solo (tempos não maiores que 20 minutos).

Foram realizadas medições de resistência não drenada com palheta para os modelos em escala 1/200, mas elas não são apresentadas nesta análise devido à influência do tamanho da palheta, se comparada com o tamanho do molde.

Finalmente, com os dados e resultados obtidos, pode ser estabelecido um modelo

geotécnico do solo utilizado na presente pesquisa, como resumido na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1.** Resumo do modelo geotécnico para o solo utilizado nos modelos.

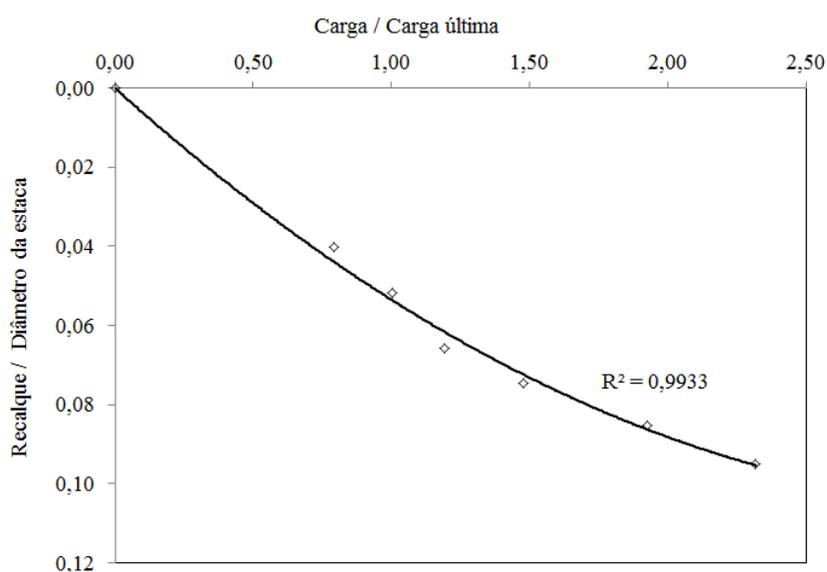
z (m)	Material	OCR	Su (kPa)	Parâmetros
0,0 – 4,7	Argila sobreadensada	8,9 – 2,2	11 – 16,4	w = 34,0 %; $\gamma_T = 18,6 \text{ kN/m}^3$ ;
4,7 - 28,0	Argila levemente sobreadensada	2,2 – 1,34	16,4 – 43,0	w <sub>L</sub> = 60 %; LP= 40%, Cc = - 0,373 ; Cr = -0,099.

z: Profundidade; OCR: Relação de pré-adensamento ;Su: Resistência não drenada; w = Teor de umidade;  $\gamma_T$  = Peso específico; w<sub>L</sub>= Limite de liquidez; w<sub>p</sub>= Limite de plasticidade; Cc = Índice de compressão; Cr = Índice de recompressão.

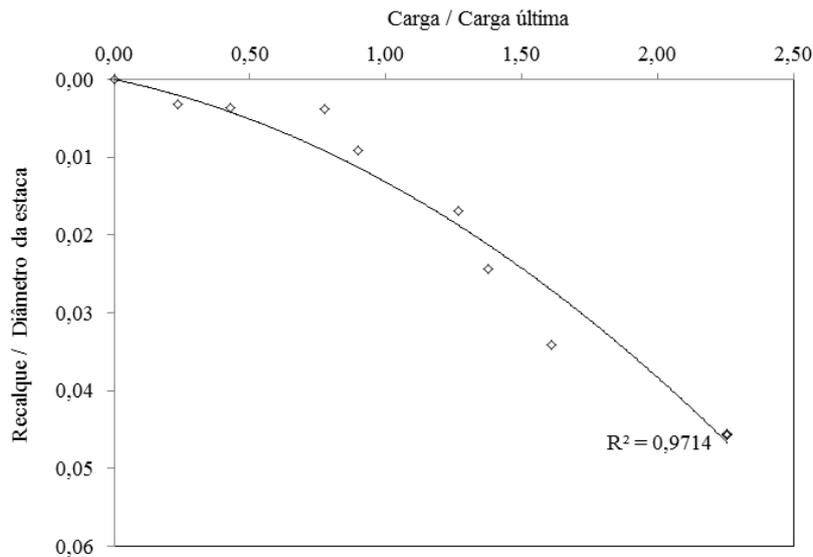
## 5.2 - AVALIAÇÃO DA CARGA NAS ESTACAS

No ensaio M2 foram feitos ensaios de carga em estacas isoladas. Neste caso sobre as nomeadas como E2 e E3, as quais se encontravam instrumentadas. O diâmetro das estacas em medidas do protótipo é de 63 cm e, a capacidade de carga última teórica foi de 1089 kN, avaliada com a metodologia de Poulos e Davis (1980).

Foram elaboradas curvas normalizadas de carga – recalque. As leituras do recalque foram normalizadas com o diâmetro da estaca e, a carga foi normalizada com a carga última teórica avaliada. Os resultados são apresentados na Figura 5.5 para a estaca 2 (E2) e, na Figura 5.6 para a estaca 3 (E3).



**Figura 5.5.** Curva carga – recalque padronizado para estaca E2.



**Figura 5.6.** Curva carga – recalque padronizado para estaca E3.

Este ensaio foi realizado para avaliar a capacidade de carga real das estacas com o objetivo de estabelecer um parâmetro de comportamento para a análise da carga máxima que poderão suportar estas, quando incluídas em um sistema radier estaqueado.

A capacidade de carga das estacas geralmente é determinada em ensaios de carga em condições rápidas (não drenadas), sendo que normalmente esse valor é considerado o valor crítico de projeto. No entanto, como nos ensaios realizados nesta pesquisa, os tempos de variação entre cada intervalo da carga aplicada na estaca foram superiores aos 15 dias (em escala real), não podem considerar-se como ensaios rápidos.

O fenômeno anteriormente anotado teve efeito sobre a curvatura das curvas carga – recalque. Pode-se observar que os valores de recalque têm tendência a estabilizar, o que não acontece normalmente em ensaios de carga reais.

Estes ensaios podem-se considerar representativo das condições de carga em longo prazo e poderão ser comparados em essas condições com os resultados obtidos.

De outra parte, Vesic *apud* Bowles (1988), estabelece que para que seja considerada uma ruptura das estacas, deverá existir um deslocamento na cabeça maior do que 10% do diâmetro desta. Para as duas estacas ensaiadas o deslocamento foi inferior aos 10% propostos por Vesic, ainda quando se atinge o dobro da carga última de trabalho da estaca. Assim, considera-se que para conseguir a falha das estacas, o valor da carga tem que ser superior a 2,5 vezes o valor da carga última de trabalho teórico.

### 5.3 - RESULTADOS DA MODELAGEM EM ESCALA 1/70

Neste item são apresentados os resultados obtidos para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/70, no que refere a recalques, poropressões e cargas nas estacas. Os resultados são apresentados para cada um dos modelos e para cada uma das etapas de voo já definidas e indicadas nas respectivas figuras. Para uma melhor análise dos resultados, são incluídos alguns tempos adicionais, intermediários àqueles definidos nas etapas do voo e uma distribuição do registro das poropressões com a profundidade.

Os resultados aqui apresentados servem de base para uma posterior discussão e comparação dos modelos e a determinação da influência de alguns parâmetros no comportamento mecânico deles.

Para as diferentes etapas foram definidos tempos intermediários como é apresentado na Figura 5.7. Além dos tempos de início e final de cada etapa do ensaio, foram incluídos os tempos que correspondem ao tempo médio (50%) da Etapa 1 de readensamento  $t_{A1}$ , e os tempos médios da condição em que é mantida a carga durante o voo ( $t_{E1}$  para a Etapa 2 e tempo  $t_{J1}$  para a Etapa 3), obtendo-se a linha de tempo apresentada na Figura 5.7.

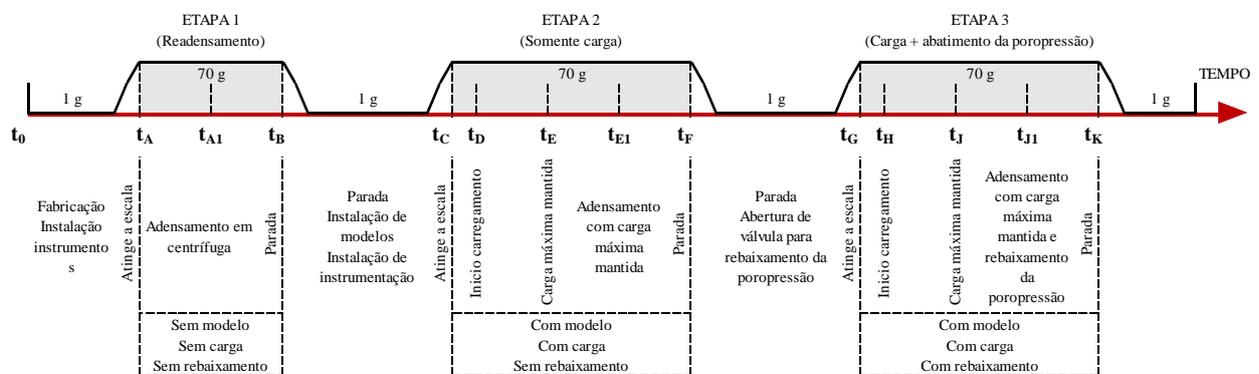


Figura 5.7. Linha de tempo para análise de resultados nos modelos em escala 1/70.

#### 5.3.1 - Modelo M1

O modelo M1 avaliou o comportamento de um radier isolado submetido aos processos de carga e carga mais rebaixamento, estabelecidos para todos os modelos. Este ensaio permitiria estabelecer a influência da inclusão de estacas no comportamento do radier isolado. No entanto, este modelo foi levado até a Etapa 2 com aplicação de carga sem abatimento, devido a apresentação de falha do solo nesta etapa.

### 5.3.1.1 - Etapa 1

Para a Etapa 1 (adensamento pelo peso próprio), os resultados deste modelo são apresentados na Figura 5.8 e, as leituras dos instrumentos para os tempos especificados na linha de tempo de voo indicados nesta figura são sumarizadas na Tabela 5.2.

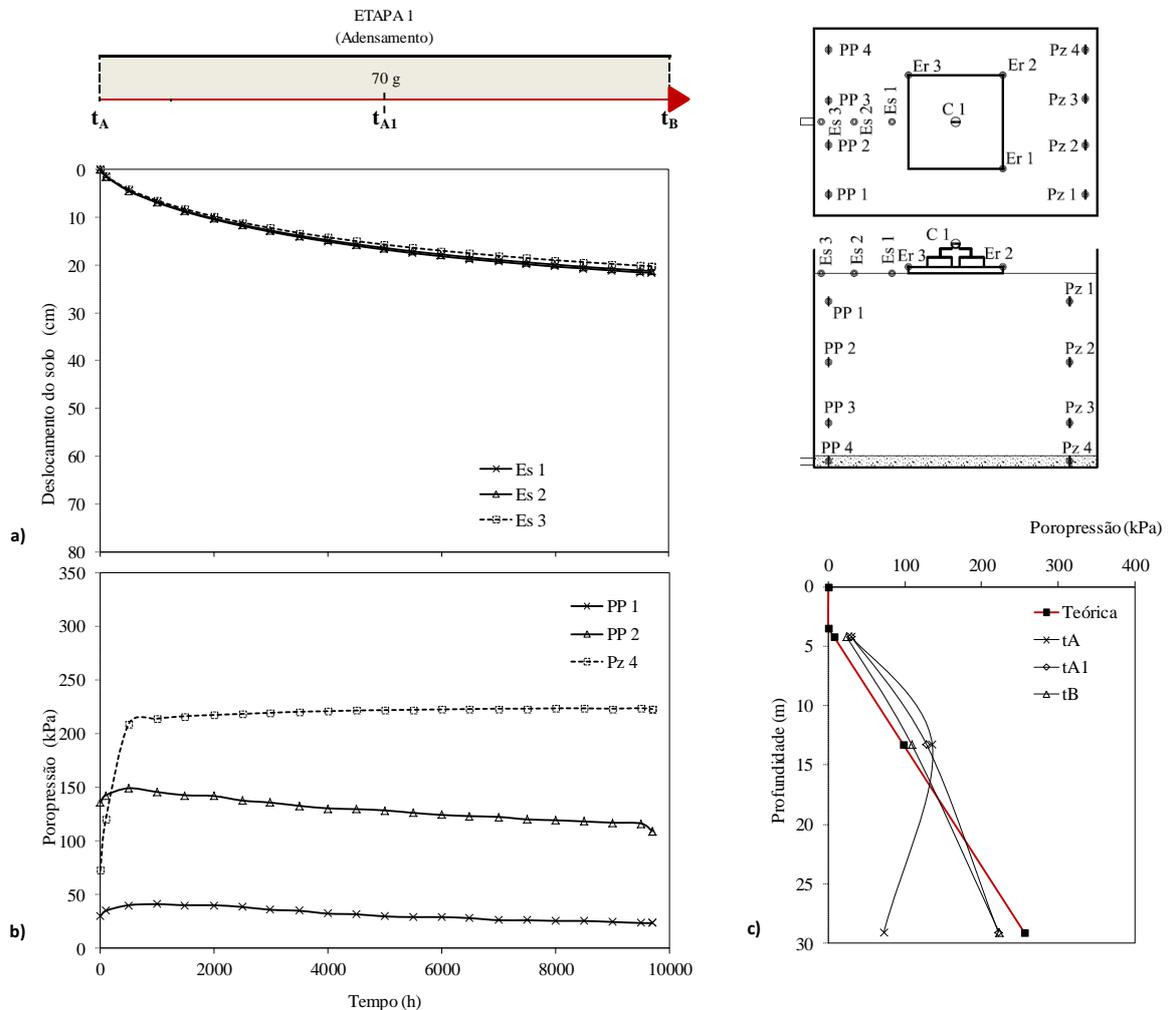


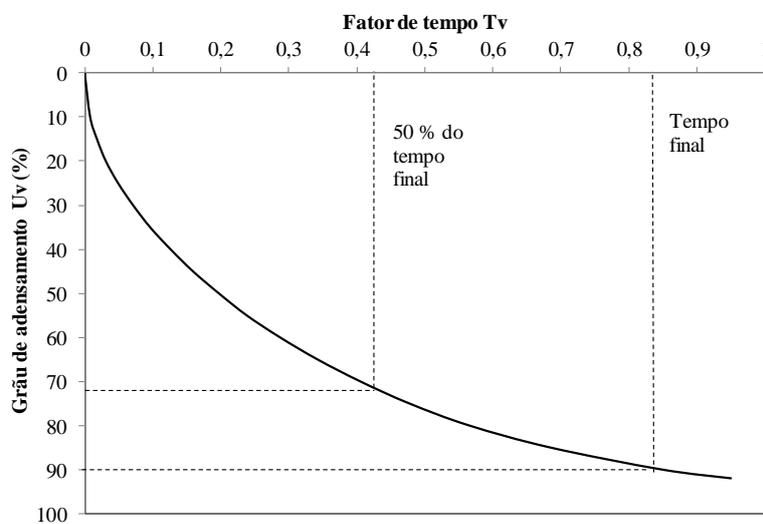
Figura 5.8. Resultados do protótipo equivalente ao modelo M1 na Etapa 1.

Tabela 5.2. Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M1 na Etapa 1.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento			Razão de leituras $t_{A1}/t_B$
		$t_A$ (0 h)	$t_{A1}$ (5000 h)	$t_B$ (10000 h)	
Es 1	(cm)	0,0	16,8	21,6	78%
Es 2	(cm)	0,0	16,4	21,2	77%
Es 3	(cm)	0,0	15,7	20,2	78%
<b>Média</b>	(cm)	<b>0,0</b>	<b>16,3</b>	<b>21,0</b>	<b>78%</b>
PP 1	(kPa)	29,6	29,6	23,4	
PP 2	(kPa)	135,6	128,4	108,9	
Pz 4	(kPa)	72,4	221,8	222,8	

Dos resultados apresentados, pode-se observar que o valor final máximo do recalque é de 21,6 cm para o extensômetro Es 1, e o menor é de 20,2 cm para o extensômetro Es 3, próximo das paredes do molde. Essa diferença nas leituras está associada com a menor restrição ao deslocamento do solo no centro do molde, com a maior restrição ao deslocamento nas proximidades das paredes do molde, e com a distribuição das forças no campo gravitacional da centrifuga geotécnica.

Como os voos foram levados até o 90% do adensamento total e o tempo  $t_{A1}$  corresponde ao 50% do tempo final, nesse tempo o grau de adensamento deve ser de 72%, como apresentado na Figura 5.9.



**Figura 5.9.** Grau de adensamento em função do fator de tempo, segundo Terzaghi.

O grau de adensamento ( $U_v$ ) pode ser definido como a relação entre o deslocamento do solo em um tempo específico ( $s_t$ ) e o deslocamento total do solo ( $s_\infty$ ), Equação 4.1.

$$U_v = \frac{s_t}{s_\infty} \quad (5.1)$$

Assumindo que o deslocamento do solo ao final da etapa ( $t_B$ ) é o máximo que apresentará o solo, pode-se comparar o grau de adensamento com a relação entre as leituras de deslocamento para os tempos médio e final ( $t_{A1}/t_B$ ).

Assim, se o recalque médio total do solo é de 21,0 cm e o valor de recalque médio no tempo  $t_{A1}$  (50% do tempo total) é de 16,3 cm, então, pode-se avaliar que o solo nesse tempo  $t_{A1}$  atingiu 78% do recalque final, valor próximo ao valor do grau de adensamento que deveria apresentar (72%), como apresentado na Tabela 5.2.

As leituras dos piezômetros na Etapa 1, de adensamento pelo peso próprio foram quase constantes. Se apresenta uma pequena queda no piezômetro PP2, do tempo  $t_{A1}$  até o tempo  $t_B$ , no final do ensaio. Pode-se observar na Figura 5.8.c, que no final da Etapa 1 os valores da poropressão registrados pelos piezômetros são muito similares à pressão hidrostática teórica.

### **5.3.1.2 - Etapa 2**

Os resultados da Etapa 2 para este modelo (M1) são apresentados na Figura 5.10, indicando alguns tempos específicos desta etapa de voo. As leituras registradas pelos instrumentos nesses tempos são apresentadas na Tabela 5.3. Salienta-se que neste modelo apresentou-se falha do solo nesta etapa, logo o voo terminou sem que se pudesse realizar a Etapa 3.

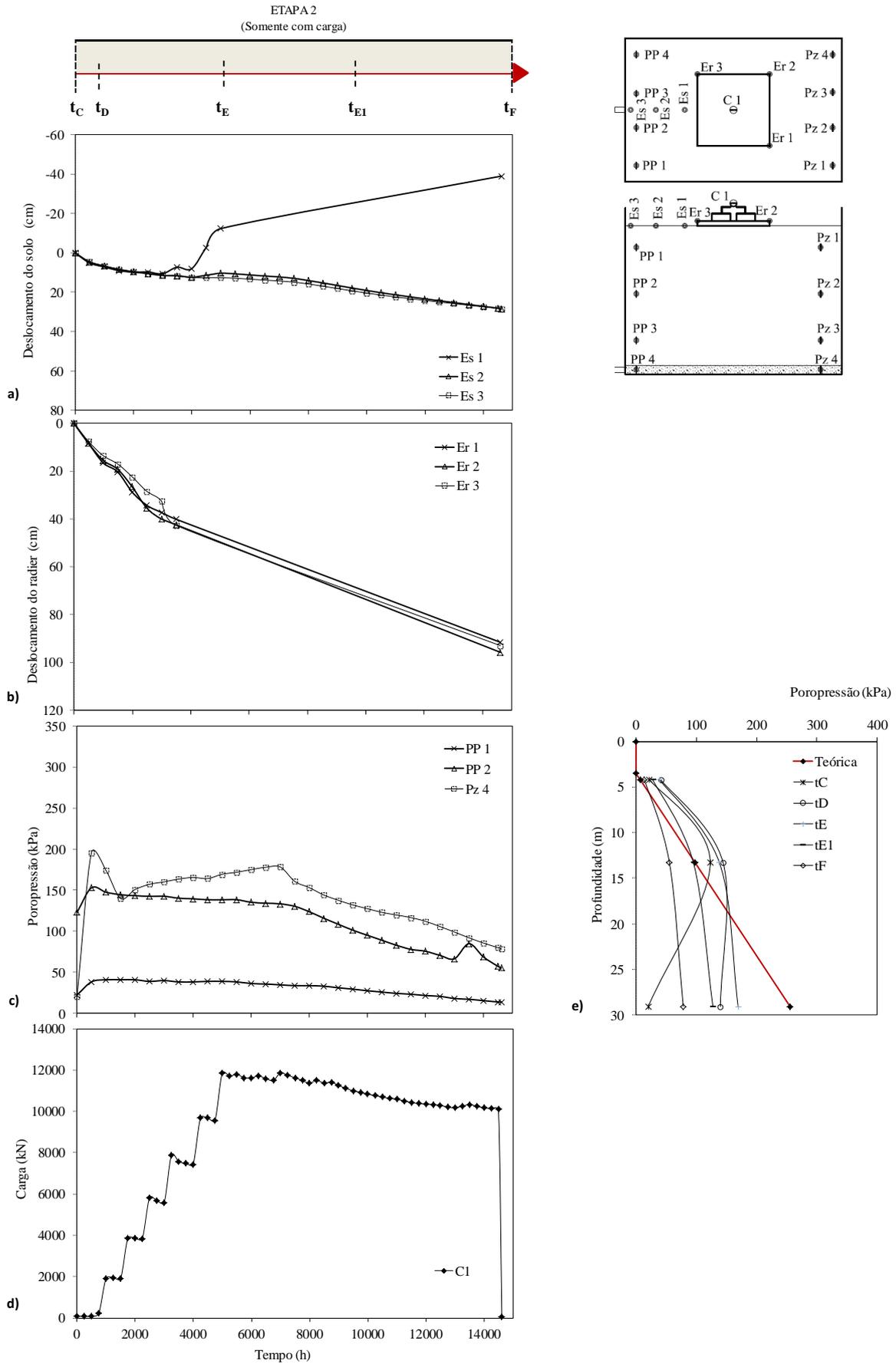
A Figura 5.10.a, apresenta a evolução do deslocamento do solo. Os registros reportados pelos extensômetros permitem ver como o solo levantou nas proximidades do radier, de fato, a leitura do extensômetro Es 1 teve que ser complementada, registrando-se um valor final de -39 cm (Tabela 5.3). Vale a pena anotar que já para o final do carregamento ( $t_E$ ) os extensômetros registraram a ruptura do solo e o levantamento do mesmo.

Os extensômetros Es 2 e Es 3 apresentam um pequeno levantamento quando registrada a ruptura do solo pela carga no radier e, posteriormente continuam com o deslocamento em sentido descendente com um valor final médio de 28,5 cm (Tabela 5.3).

Enquanto aos recalques do radier (Figura 5.10.b), estes atingiram um valor máximo de 95,8 cm, próximo da espessura do radier (114 cm). Pode-se observar que posterior à ruptura, os recalques crescem linearmente com a profundidade.

Neste modelo, tanto os deslocamentos do solo, quanto os recalques do radier mostraram a ruptura do modelo pela penetração do radier no solo. Pode-se evidenciar também que o solo rompe antes de se atingir a carga máxima (Figura 5.10.d).

As poropressões apresentam alguma estabilidade entre os tempos  $t_D$  e  $t_E$ , quando é aplicada a carga. No entanto, as poropressões caem depois de apresentada a falha no solo. O gráfico das poropressões com a profundidade (Figura 5.10.e), exhibe um excesso de poropressão no PP2, se comparado com a pressão hidrostática teórica. Este excesso de pressão está relacionado com o aumento da carga e diminui após a ruptura do solo.



**Figura 5.10.** Resultados do protótipo equivalente ao modelo M1 na Etapa 2

**Tabela 5.3.** Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M1 na Etapa 2.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento				
		$t_C$ (0 h)	$t_D$ (1500 h)	$t_E$ (5000 h)	$t_{E1}$ (10000 h)	$t_F$ (15000 h)
Es 1	(cm)	0,0	9,0	-12,3		-39,0
Es 2	(cm)	0,0	8,4	10,4	19,1	28,5
Es 3	(cm)	0,0	8,3	12,6	20,4	28,6
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>8,6</b>	<b>3,6</b>	<b>19,8</b>	
Er 1	(cm)	0,0	20,4		40,1	91,6
Er 2	(cm)	0,0	19,2		42,4	95,8
Er 3	(cm)	0,0	17,0		42,7	93,0
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>18,9</b>		<b>41,7</b>	<b>93,5</b>
PP 1	(kPa)	22,4	41,0	39,0	27,6	14,0
PP 2	(kPa)	123,0	144,4	138,3	95,1	55,4
Pz 4	(kPa)	20,2	139,8	169,3	127,5	78,3

Apresenta-se um maior valor da poropressão no piezômetro PP1, próximo da superfície do solo, evidenciando uma carga hidráulica maior que a teórica (7 kPa) e que poderia ter contribuído ao amolecimento da superfície do solo e a consequente perda de resistência, apresentando-se portanto, a ruptura do solo e a falha do radier, como discutido anteriormente.

Não foram determinados graus de adensamento nesta etapa devido à ruptura do modelo e ao comportamento já mencionado dos extensômetros.

### 5.3.2 - Modelo M3

O modelo M3 avaliou o comportamento de um sistema radier estaqueado com 9 estacas em configuração de 3x3, com um espaçamento de 2 diâmetros e centralizadas no radier.

#### 5.3.2.1 - Etapa 1

Os resultados da Etapa 1 (adensamento pelo peso próprio) são apresentados na Figura 5.11, indicando os tempos específicos em que foram tomadas algumas leituras que permitiram construir a Tabela 5.4.

Nesta primeira etapa do modelo M3, a leitura média de deslocamento do solo foi de 29,0 cm, sendo que o maior deslocamento foi apresentado pelo extensômetro mais próximo do centro do molde (Tabela 5.4). A leitura de recalque no tempo  $t_{A1}$  é de 21,3 cm e corresponde a 74% da leitura de deslocamento médio final da etapa. Este valor se encontra próximo do grau de adensamento médio para o solo nesse tempo, que como foi apresentado é de 72%.

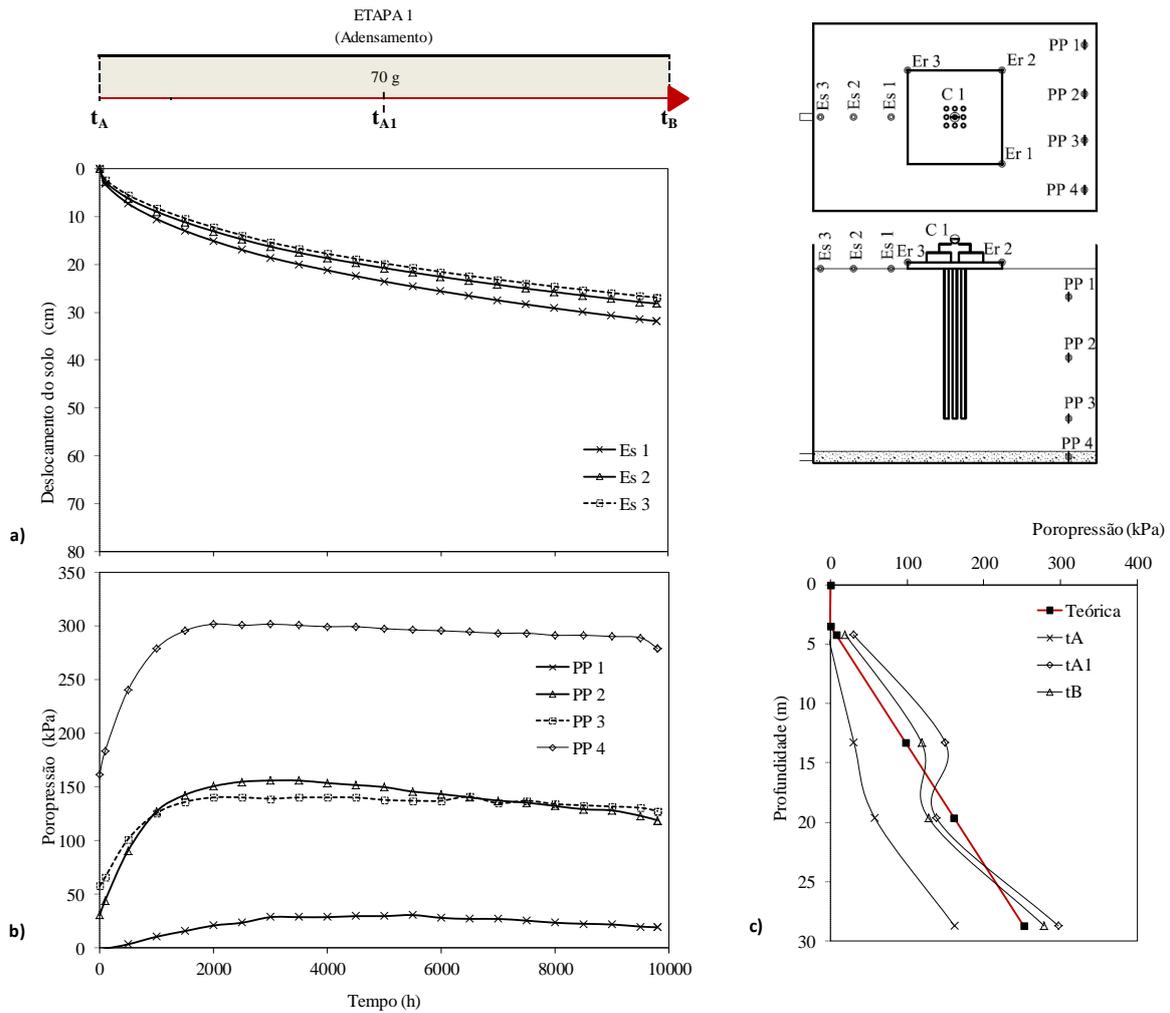


Figura 5.11. Resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 1

Tabela 5.4. Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 1.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento			Razão de leituras
		$t_A$ (0 h)	$t_{A1}$ (5000 h)	$t_B$ (10000 h)	$t_{A1}/t_B$
Es 1	(cm)	0,0	23,5	31,8	73,9%
Es 2	(cm)	0,0	20,7	28,2	73,6%
Es 3	(cm)	0,0	19,7	26,9	73,5%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>21,3</b>	<b>29,0</b>	<b>73,7%</b>
PP 1	(kPa)	-3,6	29,6	19,2	
PP 2	(kPa)	30,6	149,7	118,8	
PP 3	(kPa)	57,6	137,8	127,5	
PP 4	(kPa)	161,7	297,3	278,9	

Os piezômetros PP2 e PP3 registraram leituras similares entre eles. O PP2 registrou um valor maior de poropressão se comparado com a hidrostática, devido principalmente ao fato de que o piezômetro se encontrava dentro da camada de argila intermediária, que tarda mais

tempo em dissipar as poropressões geradas nela.

### **5.3.2.2 - Etapa 2**

Para a Etapa 2, os resultados são apresentados na Figura 5.12, junto com os tempos chave de leitura para construção da Tabela 5.5. Esta tabela permite observar o comportamento da taxa de evolução dos recalques no solo e no radier com o tempo, além do ganho de carregamento das estacas.

Neste modelo, os deslocamentos do solo são maiores na área próxima do radier (Es 1) do que na borda (Es 3), sendo que os extensômetros das bordas (Es 2 e Es 3) apresentam valores de deslocamento similares, como apresentado na Figura 5.12.a.

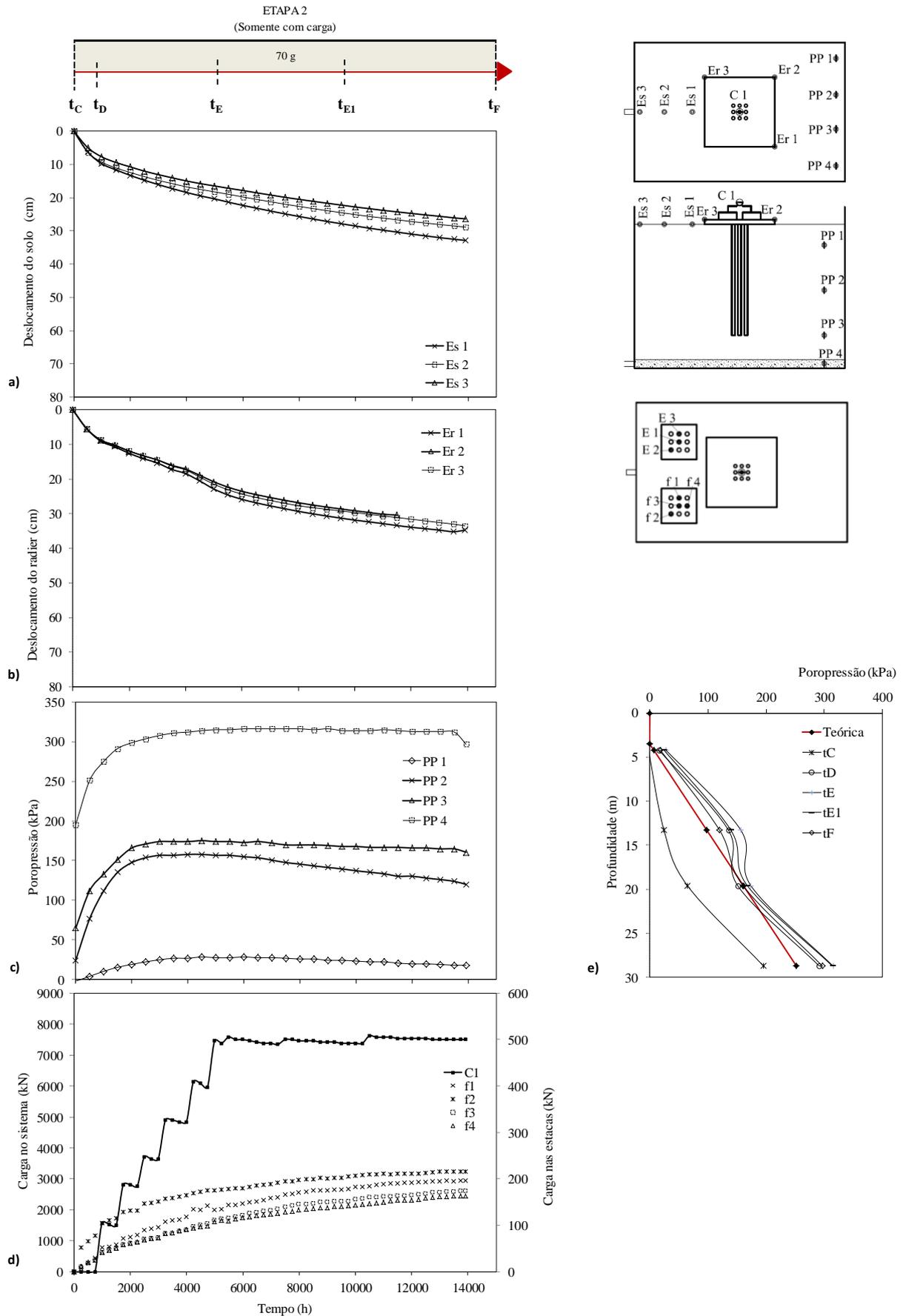
A porcentagem de deslocamento do solo ao início da etapa de carregamento ( $t_D$ ) foi de 36% do recalque final. Com a colocação da carga incrementou até 63% ao final da etapa de carregamento ( $t_E$ ). Neste intervalo de tempo o recalque médio do sistema radier estaqueado atingiu 64%, porcentagem muito similar ao apresentado pelo solo, especialmente se é considerado que a poropressão permanece relativamente estável.

O grau de adensamento médio do solo no tempo  $t_{E1}$  foi de 85%, 13% a mais do que o esperado com base no grau de adensamento.

Os valores médios finais de recalque do sistema radier estaqueado foram de 34,1 cm, que resultam ligeiramente maiores, se comparados com deslocamento do solo na área próxima do radier, 32,9 cm (Es 1), como apresentado na Tabela 5.5. Esta diferença indica que o sistema radier estaqueado penetra dentro do solo.

As poropressões aumentaram com a adição da carga no sistema e, uma vez a carga tinha estabilizado os valores de poropressão apresentaram tendência decrescente, indicando que o excesso de poropressão gerado pela carga foi dissipado, como esperado. No final do voo os valores foram muito mais próximos da linha da poropressão hidrostática (Figura 5.12.e).

Com o processo de carregamento pode se observar que a estaca E2 (com a célula de carga f2), localizada na esquina do radier foi a que apresentou um maior incremento de carga. No entanto, no tempo  $t_{E1}$ , as estacas apresentaram um 86% ou mais da carga final indicando estabilidade a partir deste momento, de igual forma como aconteceu com os recalques.



**Figura 5.12.** Resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 2

**Tabela 5.5.** Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 2.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento					Razão de leituras		
		$t_c$ (0 h)	$t_D$ (1500 h)	$t_E$ (5000 h)	$t_{E1}$ (10000 h)	$t_F$ (15000 h)	$t_D/t_F$	$t_E/t_F$	$t_{E1}/t_F$
Es 1	(cm)	0,0	11,6	20,4	27,8	32,9	35%	62%	85%
Es 2	(cm)	0,0	11,0	18,2	24,5	28,8	38%	63%	85%
Es 3	(cm)	0,0	9,4	16,5	22,2	26,4	36%	62%	84%
<b>Média</b>	(cm)		<b>10,7</b>	<b>18,4</b>	<b>24,9</b>	<b>29,4</b>	<b>36%</b>	<b>63%</b>	<b>85%</b>
Er 1	(cm)	0,0	10,7	22,8	31,3	34,7	31%	66%	90%
Er 2	(cm)	0,0	10,3	20,8	28,6				
Er 3	(cm)	0,0	10,1	21,4	29,2	33,5	30%	64%	87%
<b>Média</b>	(cm)		<b>10,4</b>	<b>21,7</b>	<b>29,7</b>	<b>34,1</b>	<b>30%</b>	<b>64%</b>	<b>87%</b>
PP 1	(kPa)	-2,0	15,6	27,6	24,4	18,2			
PP 2	(kPa)	24,4	135,2	156,6	139,4	120,0			
PP 3	(kPa)	64,9	151,3	173,9	167,8	160,5			
PP 4	(kPa)	195,4	291,2	314,9	313,8	296,5			
C 1	(kN)	0,0	1495,4	7457,2	7378,5	7496,6			
f 1	(kN)	0,0	58,9	133,8	176,4	196,2	30%	68%	90%
f 2	(kN)	0,0	114,6	174,9	201,9	215,1	53%	81%	94%
f 3	(kN)	0,0	49,8	111,3	150,6	173,2	29%	64%	87%
f 4	(kN)	0,0	50,8	107,6	140,8	164,0	31%	66%	86%

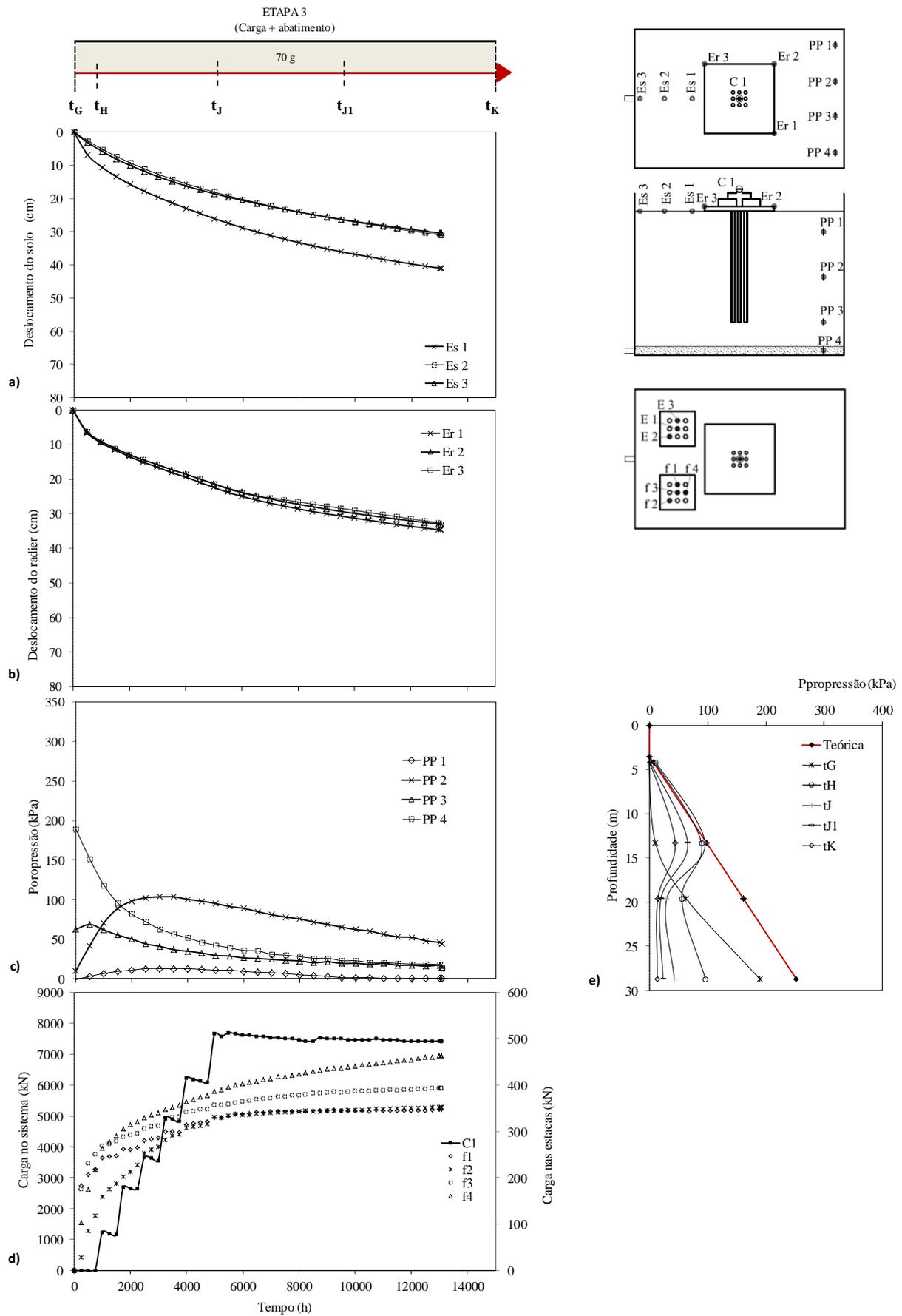
As duas estacas de esquina que possuem as células de carga f2 e f4, apresentaram a maior e a menor leitura de carga, respectivamente. A diferença de leituras demonstra que o carregamento não foi regular, porém, os recalques do sistema radier estaqueado não apresentaram variação superior a 3%.

### 5.3.2.3 - Etapa 3

Para a Etapa 3 deste modelo (M3), os resultados são apresentados na Figura 5.13 e resumidos na Tabela 5.6 para os tempos específicos apresentados. Nessa tabela, a razão de leituras, permite observar a evolução dos processos de recalque do solo e do radier, e a transferência de carga para as estacas.

Os deslocamentos do solo na Etapa 3 do modelo M3 (Figura 5.13.a), na área próxima do radier (Es 1) continuaram sendo maiores que nas bordas (Es 2 e Es 3). Ao início do carregamento ( $t_D$ ) o Extensômetro Es 1 apresentou um 33% do deslocamento final e os outros extensômetros (Es 2 e Es 3) apresentaram entre 23 e 26%.

No ponto médio da etapa de carga mantida, no tempo  $t_{E1}$ , os valores de deslocamento do solo atingiram entre 86 e 88% do valor final, valor similar à porcentagem reportada pelos Extensômetros dispostos no radier, que em média registraram 88% para este tempo.



**Figura 5.13.** Resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 3

**Tabela 5.6.** Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M3 na Etapa 3.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento					Razão de leituras		
		$t_G$ (0 h)	$t_H$ (1500 h)	$t_J$ (5000 h)	$t_{JI}$ (10000 h)	$t_K$ (15000 h)	$t_H/t_K$	$t_J/t_K$	$t_{JI}/t_K$
Es 1	(cm)	0,0	13,4	26,0	36,0	41,0	33%	64%	88%
Es 2	(cm)	0,0	7,2	18,0	26,4	30,9	23%	58%	86%
Es 3	(cm)	0,0	8,0	18,5	26,2	30,3	26%	61%	86%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>9,5</b>	<b>20,9</b>	<b>29,6</b>	<b>34,1</b>	<b>28%</b>	<b>61%</b>	<b>87%</b>
Er 1	(cm)	0,0	11,4	22,3	30,6	34,5	33%	65%	89%
Er 2	(cm)	0,0	11,0	21,2	29,2	32,8	33%	65%	89%
Er 3	(cm)	0,0	10,9	21,3	28,3	33,2	33%	64%	85%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>11,1</b>	<b>21,6</b>	<b>29,4</b>	<b>33,5</b>	<b>33%</b>	<b>64%</b>	<b>88%</b>
PP 1	(kPa)	-1,0	9,4	11,1	1,6	0,7			
PP 2	(kPa)	10,3	89,0	95,1	65,3	43,9			
PP 3	(kPa)	62,6	55,3	29,6	19,6	14,2			
PP 4	(kPa)	189,3	95,8	42,5	23,0	13,4			
C 1	(kN)	0,0	1160,9	7654,0	7496,6	7417,9			
f 1	(kN)	0,0	247,4	329,8	344,4	346,9	71%	95%	99%
f 2	(kN)	0,0	187,8	331,0	344,6	352,4	53%	94%	98%
f 3	(kN)	0,0	278,4	356,4	384,3	393,2	71%	91%	98%
f 4	(kN)	0,0	290,3	386,7	436,1	463,2	63%	83%	94%

Os recalques finais do radier foram de 32,8 até 34,5 cm, menores que os registrados pelo solo na proximidade do radier, 41,0 cm, entendendo-se que neste caso o solo tem um recalque maior do que o radier pelo processo de abatimento (Figura 5.13.b.)

Os piezômetros registraram o abatimento da poropressão, observando-se a queda da poropressão pelo abatimento (Figura 5.13.e) especialmente nos instrumentos dispostos na proximidade da zona de saída de água. Neste caso, os piezômetros PP4 e PP3 apresentam menores valores de poropressão desde o início da etapa de carregamento, no tempo  $t_D$ . É importante anotar que o piezômetro PP2 apresentou uma menor variação da poropressão, devido ao fato de encontrar-se na camada intermediária de argila.

Nesta etapa de voo, a carga sobre a estaca que possui a célula de carga f4, localizada na esquina do radier, é a que apresenta uma maior carga no final, como apresentado na Figura 5.13.d).

É importante ressaltar que já no final da fase de carregamento ( $t_E$ ), a maioria das estacas tinham atingido porcentagens maiores ao 90% da carga ao final da Etapa 3. Este incremento rápido de carga, que indica transferência de carga do radier para as estacas, está associado com o abatimento e um aumento no deslocamento do solo.

### 5.3.3 - Modelo M4

O modelo M4 avaliou o comportamento de um sistema radier estaqueado com 16 estacas em configuração de 4x4, espaçamento de 2 diâmetros e centralizadas no radier.

#### 5.3.3.1 - Etapa 1

Os resultados da Etapa 1 (adensamento pelo peso próprio) são apresentados na Figura 5.14, sendo indicados os tempos nos quais se realizaram algumas leituras que permitiram elaborar a Tabela 5.7 em que é apresentada a razão de leituras como uma medida da evolução do adensamento.

O deslocamento do solo na zona central (Es 1) continuou sendo maior do que o deslocamento na área próxima das paredes (Es 2 e Es 3) como apresentado na Figura 5.14.a., atingindo em média 79% do recalque final para o tempo  $t_{A1}$ , que ainda é maior do que o grau de adensamento do 72% esperado.

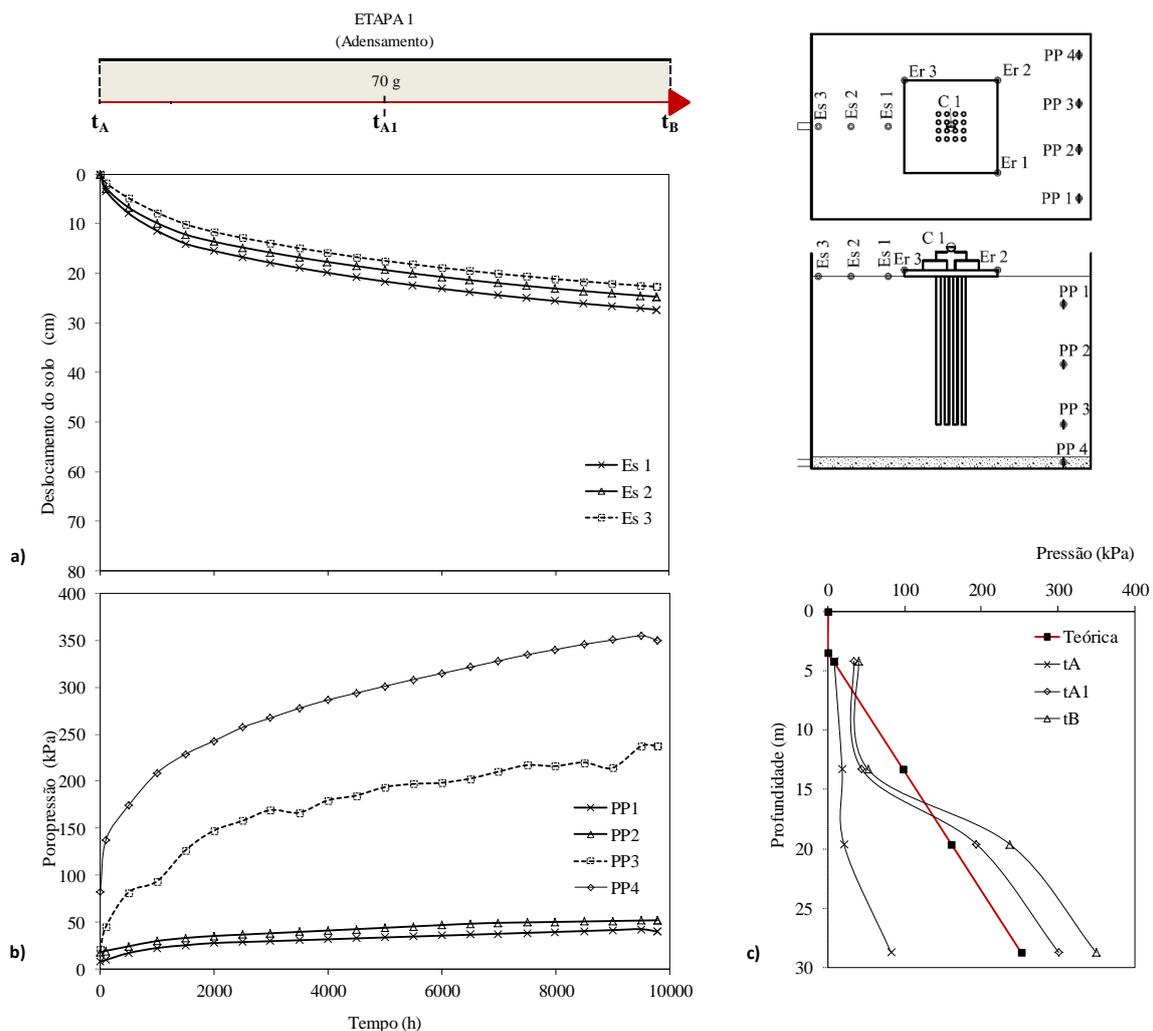


Figura 5.14. Resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 1

**Tabela 5.7.** Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 1.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento			Razão de leituras
		$t_A$ (0 h)	$t_{A1}$ (5000 h)	$t_B$ (10000 h)	$t_{A1}/t_B$
Es 1	(cm)	0,0	21,7	27,3	79%
Es 2	(cm)	0,0	19,3	24,7	78%
Es 3	(cm)	0,0	17,5	22,7	77%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>19,5</b>	<b>24,9</b>	<b>78%</b>
PP 1	(kPa)	8,1	33,8	39,9	
PP 2	(kPa)	18,4	44,1	52,1	
PP 3	(kPa)	20,7	193,7	237,3	
PP 4	(kPa)	82,1	301,1	349,9	

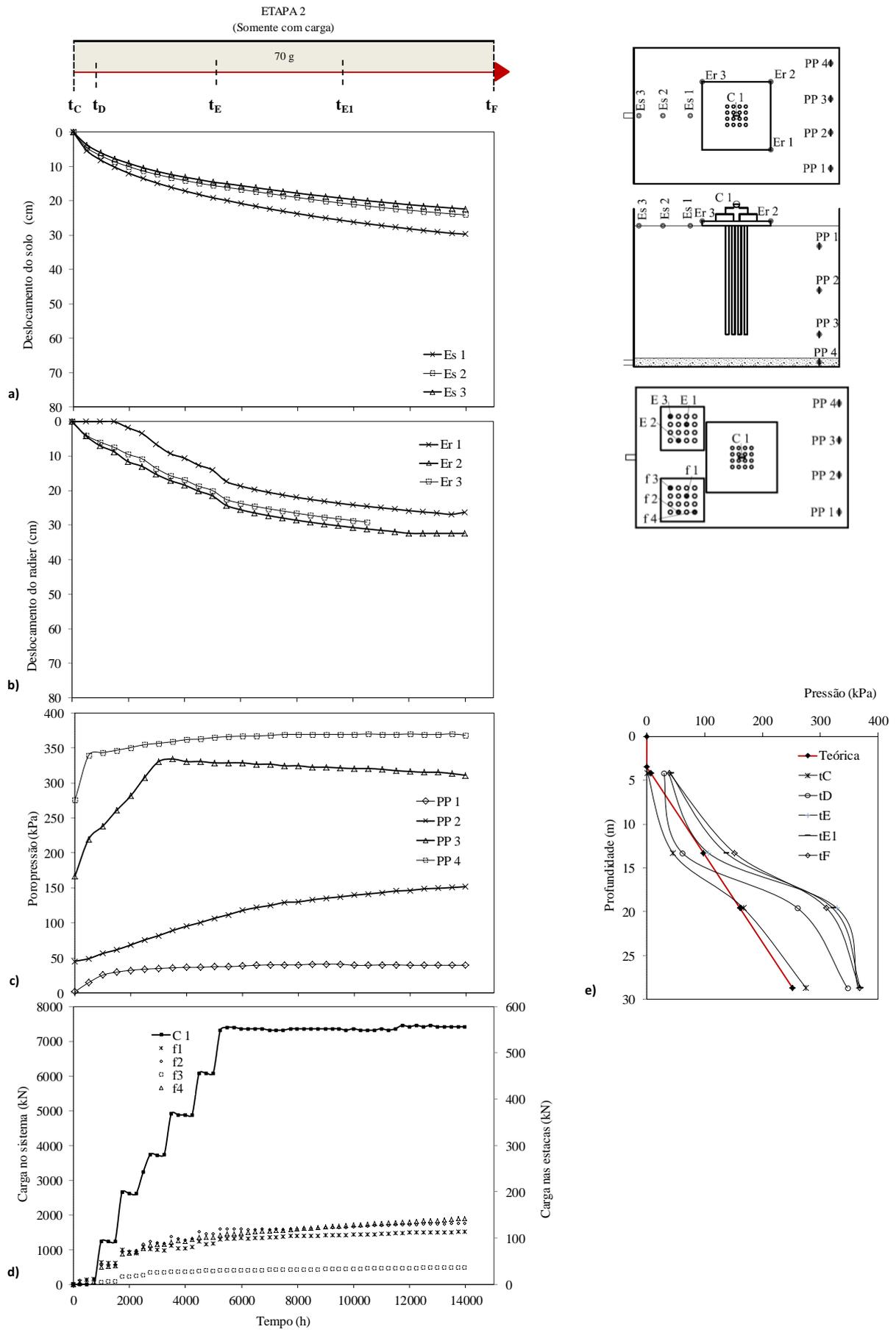
Na Figura 5.14.b pode-se observar um ganho de pressão nos piezômetros PP3 (de 20,7 para 237 kPa) e PP4 (de 82,1 para 350 kPa). Este fenômeno está relacionado com um ajuste do sistema de balanceamento e ajuste do tanque de controle de água, o qual não permitiu manter o nível constante, gerando uma maior leitura de poropressão ao aumentar o nível de água neste tanque lateral.

O incremento da poropressão pelo fenômeno de perda de controle no nível da água no tanque lateral não foi registrado pelo piezômetro PP2, devido à presença de leituras menores que as de pressão hidrostática e, menores que as registradas pelos outros piezômetros (Figura 5.14.c).

### 5.3.3.2 - Etapa 2

Os resultados da Etapa 2 são apresentados na Figura 5.15, indicando os tempos em que foram realizadas leituras que permitem compor a Tabela 5.8, que por sua vez, permite observar a evolução das respostas do modelo, com base nas taxas de resposta dadas pela razão de leituras.

Na Figura 5.15.a, pode-se observar que existe uma tendência similar nos deslocamentos do solo, se comparada com os outros modelos (M3 e M6), com maior deslocamento no centro do molde (Es 1) e menores nas bordas (Es 2 e Es 3). Observa-se que no tempo  $t_{E1}$  os deslocamentos do solo atingiram em média 85% do deslocamento que será apresentado no final da etapa.



**Figura 5.15.** Resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 2

**Tabela 5.8.** Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 2.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento					Razão de leituras		
		$t_C$ (0 h)	$t_D$ (1500 h)	$t_E$ (5000 h)	$t_{E1}$ (10000 h)	$t_F$ (15000 h)	$t_D/t_F$	$t_E/t_F$	$t_{E1}/t_F$
Es 1	(cm)	0,0	10,2	19,2	25,6	29,7	34%	64%	86%
Es 2	(cm)	0,0	8,7	15,6	20,6	24,1	36%	65%	85%
Es 3	(cm)	0,0	7,8	14,6	19,2	22,4	35%	65%	86%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>8,9</b>	<b>16,4</b>	<b>21,8</b>	<b>25,4</b>	<b>35%</b>	<b>65%</b>	<b>86%</b>
Er 1	(cm)	0,0	0,0	14,0	23,6	26,3		53%	90%
Er 2	(cm)	0,0	8,7	21,5	30,2	32,4	27%	66%	93%
Er 3	(cm)	0,0	7,4	19,9	28,2	29,1	26%	69%	97%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>5,4</b>	<b>18,5</b>	<b>27,3</b>	<b>29,3</b>	<b>27%</b>	<b>63%</b>	<b>93%</b>
PP 1	(kPa)	1,6	29,6	37,4	41,0	39,3			
PP 2	(kPa)	45,1	61,5	106,6	137,1	151,7			
PP 3	(kPa)	167,0	260,7	328,7	321,4	311,0			
PP 4	(kPa)	275,5	346,7	365,1	369,3	368,2			
C 1	(kN)	295,1	1239,6	6079,9	7358,8	7417,9			
f 1	(kN)	0,0	46,5	89,0	106,3	113,5	41%	78%	94%
f 2	(kN)	0,0	42,0	109,2	122,9	131,7	32%	83%	93%
f 3	(kN)	0,0	6,0	29,0	32,6	35,8	17%	81%	91%
f 4	(kN)	0,0	40,9	102,1	126,5	141,7	29%	72%	89%

Os recalques do radier são apresentados na Figura 5.15.b, notando-se que o extensômetro Er 2 apresentou um recalque maior (32,4 cm) que os outros extensômetros dispostos no radier. Esse recalque também é maior que o deslocamento do solo próximo ao radier (29,7 cm), dando a impressão de que o radier penetra o solo.

O extensômetro Er 1 apresentou um recalque menor, se comparado com o Er 2, pelo fato que na parte inicial das leituras ele não apresentou registro algum, somente foram registradas leituras após o tempo  $t_D$ . Como o outro extensômetro, o Er 3 reportou leituras mais parecidas com as do Er 2, podendo ser considerados estas como os recalques do radier.

Os piezômetros PP1 e PP4 apresentaram estabilidade nas leituras (Figura 5.15.c), já os piezômetros PP 2 e PP 3 expõem variações nos registros. Como observado na Figura 5.15.e, todos os piezômetros registraram leituras maiores que a hidrostática, consequência do ganho de nível de água no tanque de controle lateral, que não podem ser relacionados neste caso de forma direta com a aplicação da carga.

As células de carga registraram valores iniciais dispares enquanto ao valor da carga suportada pelas estacas. No tempo final foi evidenciado que as estacas com as células f2 e f4 foram aquelas que suportam maior carga dentro do sistema. Estas estacas correspondem as estacas de borda e de esquina, na mesma zona do radier, portanto, indicam concentração da carga em uma das áreas deste.

Para o tempo  $t_{J1}$  a maioria das estacas têm atingido valores superiores aos 89% da carga final que irão suportar, portanto, pode-se afirmar que devido ao abatimento, e se mantidas as condições de carga, a partir deste tempo não será gerado incrementos maiores que os 11% de carga adicional nas estacas.

### **5.3.3.3 - Etapa 3**

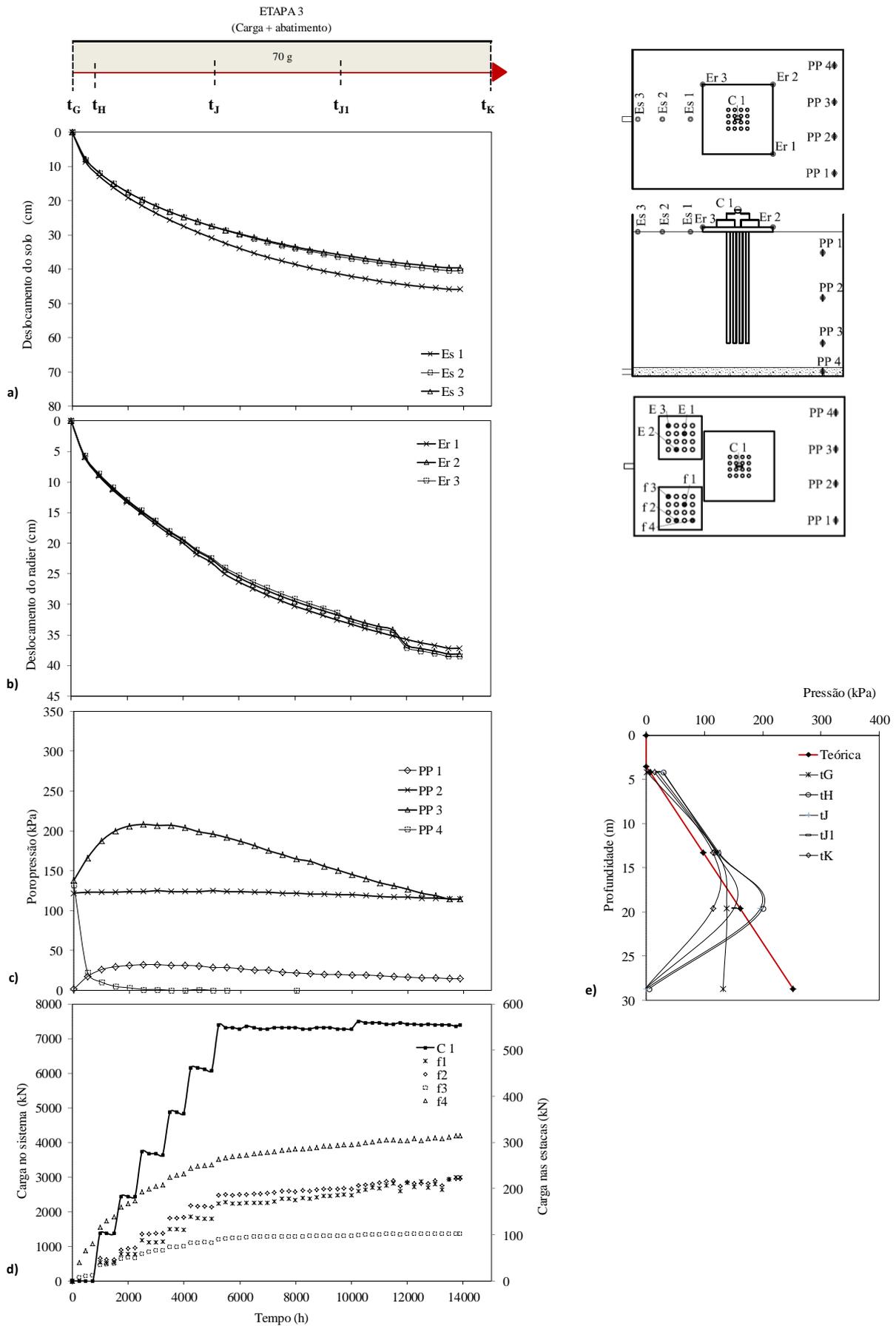
Os resultados desta etapa são apresentados na Figura 5.16. Nesta figura são indicados os tempos nos quais foram feitas leituras que permitiram elaborar a Tabela 5.9, na qual é estabelecida a taxa de evolução das leituras registradas no modelo, por meio da razão de leituras.

Na Etapa 3, o modelo M4 apresentou de novo uma tendência similar às mencionadas anteriormente, com maior deslocamento do solo na zona central do molde (Es 1) e menor nas bordas ou próximo das paredes do molde (Es 2 e Es 3), como apresentado na Figura 5.16.a. Os recalques do radier (Figura 5.16.b) foram menores, se comparados com os deslocamentos do solo próximo (Es 1). No tempo  $t_{J1}$ , apresentaram-se porcentagens de deslocamento final médio de 90%. No entanto, os recalques do radier apresentaram porcentagens de 81% ou superiores.

Nesta etapa, os valores da poropressão reportada pelos piezômetros PP1 (15 kPa) e PP2 (115 kPa) foram quase constantes e similares com a hidrostática (Figura 5.16.c e Figura 5.16.e). Como esperado, foram reportadas quedas na poropressão para as camadas inferiores (piezômetros PP3 e PP4), sendo observável a queda a partir do tempo  $t_G$ , no início da etapa.

A variação da poropressão com a profundidade, Figura 5.16.e, permite ver que os piezômetros instalados em maior profundidade registraram a dissipação dos excessos de poropressão pela saída da água, enquanto que o piezômetro PP2 instalado na camada intermediária de argila dissipou com menor velocidade a poropressão. O piezômetro PP1 apresentou umas pequenas perdas de pressão, devido ao fato de ficar mais próximo da superfície e estas perdas serem devidas a possível evaporação da água.

As estacas dispostas no modelo apresentaram ganho de carregamento ao longo da etapa observável com o registro das leituras das células de carga apresentadas na Figura 5.16.d. A estaca com a célula f4 apresentou maior carga no final da etapa e, já as que possuem as células f1 e f2, apresentaram valores de carga similares. A estaca f1 apresentou menor ganho de carga, indicando novamente que a carga não foi distribuída simetricamente no radier.



**Figura 5.16.** Resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 3

**Tabela 5.9.** Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M4 na Etapa 3.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento					Razão de leituras		
		$t_G$ (0 h)	$t_H$ (1500 h)	$t_J$ (5000 h)	$t_{JI}$ (10000 h)	$t_K$ (15000 h)	$t_H/t_K$	$t_J/t_K$	$t_{JI}/t_K$
Es 1	(cm)	0,0	16,2	30,9	41,3	45,9	35%	67%	90%
Es 2	(cm)	0,0	15,0	27,5	36,3	40,5	37%	68%	90%
Es 3	(cm)	0,0	15,0	27,4	35,7	39,6	38%	69%	90%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>15,4</b>	<b>28,6</b>	<b>37,7</b>	<b>42,0</b>	<b>37%</b>	<b>68%</b>	<b>90%</b>
Er 1	(cm)	0,0	11,3	23,1	32,5	37,2	30%	62%	88%
Er 2	(cm)	0,0	11,0	22,5	31,7	38,1	29%	59%	83%
Er 3	(cm)	0,0	10,8	22,3	31,3	38,5	28%	58%	81%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>11,0</b>	<b>22,7</b>	<b>31,9</b>	<b>37,9</b>	<b>29%</b>	<b>60%</b>	<b>84%</b>
PP 1	(kPa)	1,6	29,6	28,6	19,8	14,6			
PP 2	(kPa)	121,9	123,0	124,9	120,0	114,6			
PP 3	(kPa)	138,2	200,0	195,8	150,5	114,4			
PP 4	(kPa)	131,8	5,0	0,0	-1,9	-1,9			
C 1	(kN)	-39,4	1377,3	6079,9	7280,1	7398,2			
f 1	(kN)	0,0	40,1	134,4	185,1	225,0	18%	60%	82%
f 2	(kN)	0,0	46,6	160,7	199,7	221,5	21%	73%	90%
f 3	(kN)	0,0	37,2	82,6	97,0	102,0	36%	81%	95%
f 4	(kN)	0,0	139,6	252,4	293,6	314,0	44%	80%	93%

### 5.3.4 - Modelo M6

O modelo M6 avaliou o comportamento de um sistema radier estaqueado com nove (9) estacas em configuração de 3x3 distribuídas em toda a área do radier, com espaçamento de 9 diâmetros.

#### 5.3.4.1 - Etapa 1

Os resultados da Etapa 1 (adensamento pelo peso próprio) são apresentados na Figura 5.17, indicando-se os tempos chave de leitura com os quais é elaborada a Tabela 5.10. A razão entre leituras no tempo médio da etapa e o tempo final ( $t_{A1}/t_B$ ) permite observar a evolução do adensamento e da resposta do modelo.

Com tendência similar aos modelos anteriores, a Figura 5.17.a apresenta os deslocamentos do solo nesta etapa. Os deslocamentos na zona central do molde registrados pelo extensômetro Es1 foram maiores que os registrados pelos extensômetros Es 2 e Es 3, próximos das paredes do molde. Em média os deslocamentos do solo no tempo  $t_{A1}$  foram maiores que 69%, 3% menos que o grau de adensamento esperado, o que pode ter sido influenciado pela instabilidade da poropressão ao interior do solo.

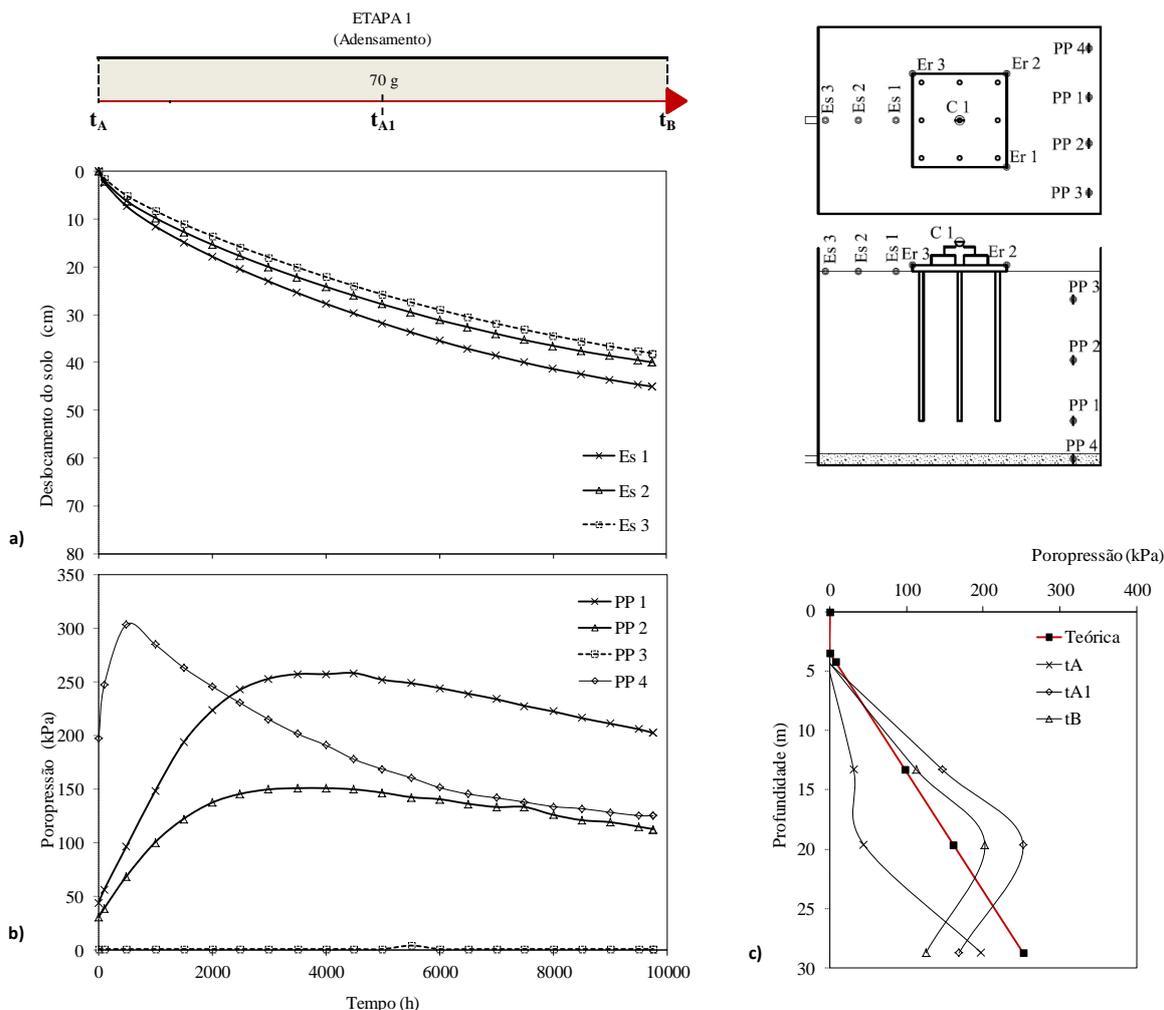


Figura 5.17. Resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 1

Tabela 5.10. Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 1.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento			Razão de leituras
		$t_A$ (0 h)	$t_{A1}$ (5000 h)	$t_B$ (10000 h)	$t_{A1}/t_B$
Es 1	(cm)	0,0	31,7	45,0	71%
Es 2	(cm)	0,0	27,8	40,0	70%
Es 3	(cm)	0,0	25,7	38,1	68%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>28,4</b>	<b>41,0</b>	<b>69%</b>
PP 1	(kPa)	44,2	251,9	202,2	
PP 2	(kPa)	30,9	146,7	112,7	
PP 3	(kPa)	1,0	1,0	1,0	
PP 4	(kPa)	197,3	168,6	125,3	

As poropressões registradas (Figura 5.17.b), exibem que o piezômetro PP4 teve uma queda de 197 para 125 kPa influenciando o deslocamento do solo. As poropressões medidas na zona média da camada de solo inicialmente reportaram valores maiores da poropressão, se comparados com a hidrostática teórica, como apresentado na Tabela 5.10 e Figura 5.17.c.

Estas leituras de poropressão ficaram ao final da etapa de voo ( $t_B$ ) em valores mais próximos da pressão hidrostática.

Na parte superior da camada de argila não apresentou poropressão, o qual, como comentado anteriormente, se deu em razão da perda de água e pressão da câmara de controle desta durante o voo.

#### **5.3.4.2 - Etapa 2**

Os resultados desta etapa são apresentados graficamente na Figura 5.18 e os registros de leitura dos instrumentos para os tempos chave indicados nela são sumarizados na Tabela 5.11, em que são indicadas as razões das leituras nos tempos intermediários comparados com a leitura final no tempo  $t_F$ , permitindo observar a taxa de evolução da resposta do modelo nesta etapa.

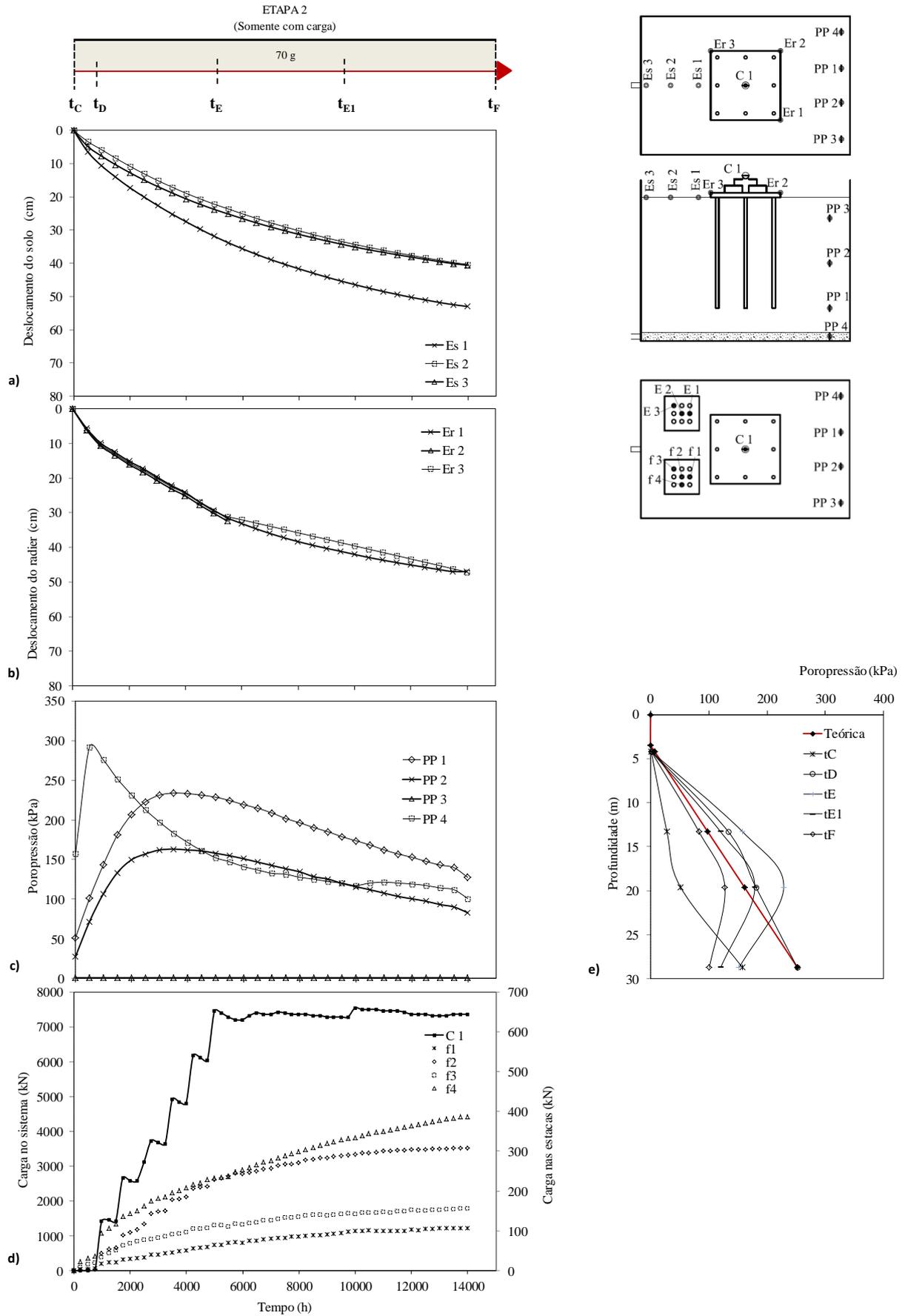
Para o Modelo M6 na Etapa 2 (Figura 5.18.a), os deslocamentos do solo também se mostraram maiores na área próxima do radier (Es 1), se comparados com os deslocamentos do solo próximo das bordas (Es 2 e Es 3). Para o tempo  $t_{E1}$ , que indica o tempo médio do intervalo em que é mantida a carga, a proporção do recalque foi 84% do final, sendo que ao final da colocação da carga já tinha-se apresentado 62% do recalque final.

Os valores de porcentagem de recalque resultaram maiores que o grau de adensamento esperado para este tempo ( $t_{E1}$ ). Este maior grau de adensamento relativo, corresponde com a perda de poropressão da água, como reportado pelos piezômetros na Figura 5.18. c.

Os valores de recalque do radier apresentados na Figura 5.18.b foram menores (47,12 cm) que o deslocamento do solo na área mais próxima (52,99 cm), indicando que as estacas ajudaram a controlar o possível recalque, mais apresentando-se a possibilidade de separação do radier e do solo.

Pode-se observar que os piezômetros não reportaram pressões constantes, sendo que a maior queda foi notada no piezômetro instalado no filtro inferior de areia da caixa (PP4), Figura 5.18.c. Esta situação foi observada ao final do voo como rebaixamento do nível de água no tanque de controle, toda vez que foi modificado o sistema de repasse de água do tanque de compensação (instalado na plataforma oposta à do modelo) para o tanque de controle de água do modelo.

A queda da poropressão durante o voo pode influir nos recalques finais desta etapa, tanto para o solo, quanto para o radier.



**Figura 5.18.** Resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 2

**Tabela 5.11.** Resumo dos resultados do modelo M6 na Etapa 2.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento					Razão de leituras		
		$t_C$ (0 h)	$t_D$ (1500 h)	$t_E$ (5000 h)	$t_{E1}$ (10000 h)	$t_F$ (15000 h)	$t_D/t_F$	$t_E/t_F$	$t_{E1}/t_F$
Es 1	(cm)	0,0	14,1	31,9	45,3	53,0	27%	60%	86%
Es 2	(cm)	0,0	8,3	22,2	33,4	40,3	21%	55%	83%
Es 3	(cm)	0,0	10,3	23,8	34,2	40,6	25%	59%	84%
<b>Média</b>	(cm)		<b>10,9</b>	<b>26,0</b>	<b>37,6</b>	<b>44,6</b>	<b>24%</b>	<b>58%</b>	<b>84%</b>
Er 1	(cm)	0,0	12,4	29,2	41,1	47,0	26%	62%	87%
Er 2	(cm)	0,0	13,3	30,1					
Er 3	(cm)	0,0	12,9	29,5	38,6	47,1	27%	63%	82%
<b>Média</b>	(cm)		<b>12,9</b>	<b>29,6</b>	<b>26,6</b>	<b>47,0</b>	<b>27%</b>	<b>63%</b>	<b>56%</b>
PP 1	(kPa)	51,4	180,7	228,5	178,8	127,4			
PP 2	(kPa)	27,9	133,3	157,8	120,0	82,9			
PP 3	(kPa)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
PP 4	(kPa)	157,5	251,7	152,1	120,3	100,8			
C 1	(kN)	0,0	1416,7	7457,2	7280,1	7358,8			
f 1	(kN)	0,0	21,1	63,8	94,4	106,7	20%	60%	88%
f 2	(kN)	0,0	58,1	228,2	287,5	307,5	19%	74%	94%
f 3	(kN)	0,0	50,7	113,6	141,3	155,4	33%	73%	91%
f 4	(kN)	0,0	116,7	231,8	328,0	387,0	30%	60%	85%

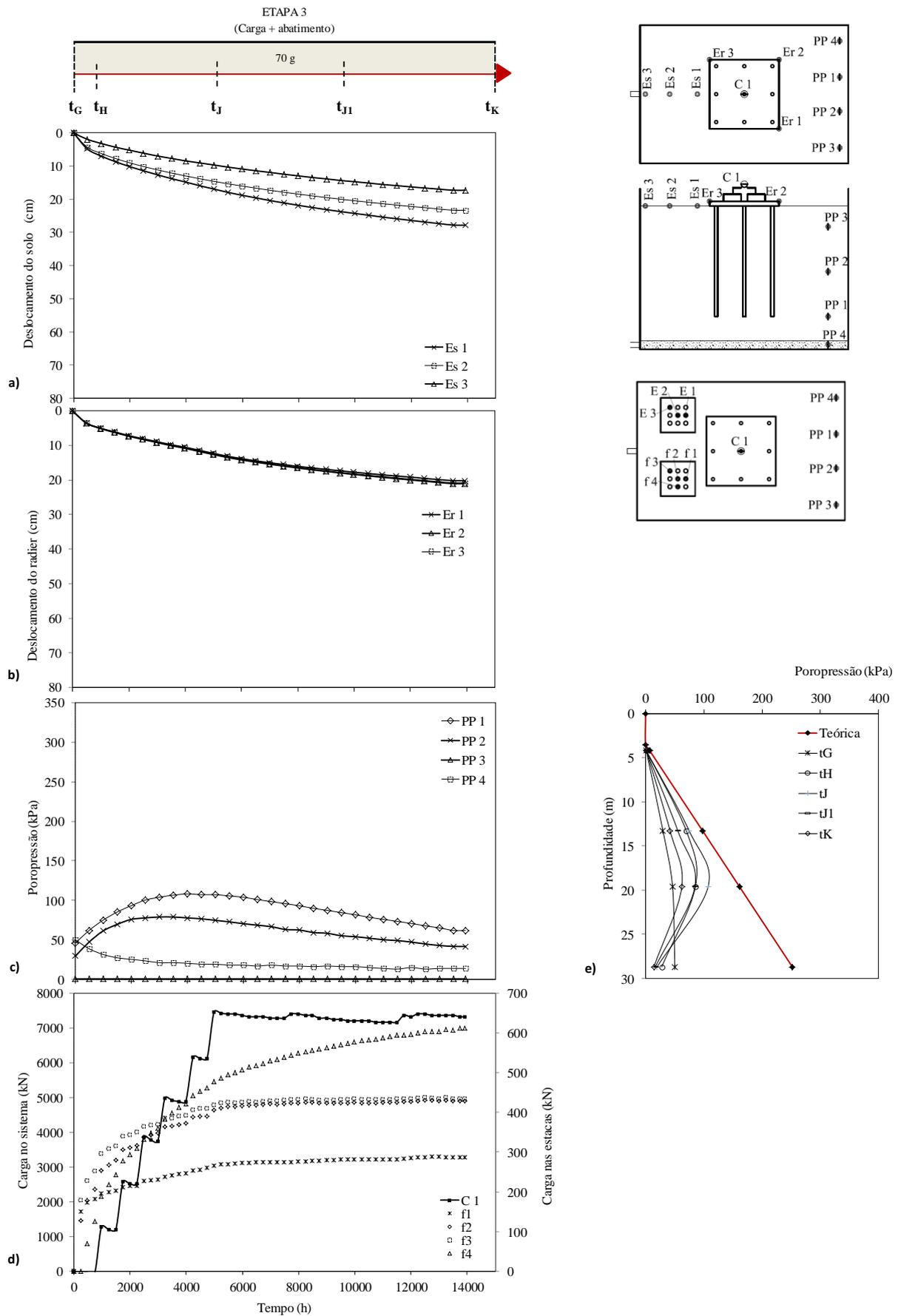
Ao início da etapa de carregamento ( $t_D$ ), Figura 5.18.e, já se apresentava uma distribuição da poropressão com valores maiores do que aqueles da pressão hidrostática, especialmente nos pontos médios do solo (PP1 e PP 2). Ao final da etapa de voo foi evidenciado que os três piezômetros superiores se encontram mais próximos da pressão hidrostática.

As células de carga nas estacas (Figura 5.18.d), registraram a transferência de carga do radier para as estacas. No tempo  $t_{E1}$ , a maioria das estacas registraram porcentagens de carga de 85% ou superiores. As maiores cargas foram reportadas pelas células f4 e f2, localizadas no ponto médio de uma das bordas do radier e no centro do radier, respectivamente. Com esta condição de carga, observou-se que o sistema carregou mais de um lado do que do outro.

### 5.3.4.3 - Etapa 3

Para a Etapa 3 deste modelo M6, os resultados são apresentados na Figura 5.19 e as leituras dos instrumentos nos tempos indicados nela são sumarizados na Tabela 5.12, estabelecendo-se a taxa de evolução da resposta do modelo, por médio da razão de leituras.

Da Figura 5.19.a pode-se observar que há tendência de maiores deslocamentos na área central do molde (Es 1) e, menores na área próxima das paredes (Es 2 e Es 3), como esperado. No tempo  $t_{J1}$  a porcentagem de deslocamento médio foi de 85%, superior ao grau de adensamento esperado para este tempo.



**Figura 5.19.** Resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 3

**Tabela 5.12.** Resumo dos resultados do protótipo equivalente ao modelo M6 na Etapa 3.

Instrumento	Unidade	Leitura do instrumento					Razão de leituras		
		$t_G$ (0 h)	$t_H$ (1500 h)	$t_J$ (5000 h)	$t_{J1}$ (10000 h)	$t_K$ (15000 h)	$t_H/t_K$	$t_J/t_K$	$t_{J1}/t_K$
Es 1	(cm)	0,0	8,7	16,9	23,7	27,8	31%	61%	85%
Es 2	(cm)	0,0	7,7	14,6	20,0	23,3	33%	63%	86%
Es 3	(cm)	0,0	4,3	9,7	14,4	17,3	25%	56%	83%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>6,9</b>	<b>13,8</b>	<b>19,4</b>	<b>22,8</b>	<b>30%</b>	<b>60%</b>	<b>85%</b>
Er 1	(cm)	0,0	6,1	12,2	17,3	20,2	30%	61%	86%
Er 2	(cm)	0,0	6,2	12,6	17,9	21,0	30%	60%	85%
Er 3	(cm)	0,0	6,1	12,4	17,7	20,8	29%	60%	85%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>6,1</b>	<b>12,4</b>	<b>17,7</b>	<b>20,6</b>	<b>30%</b>	<b>60%</b>	<b>85%</b>
PP 1	(kPa)	46,2	85,5	107,3	84,5	62,1			
PP 2	(kPa)	29,8	69,9	74,9	55,4	42,0			
PP 3	(kPa)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
PP 4	(kPa)	50,2	27,6	19,5	16,5	14,2			
C 1	(kN)	0,0	1200,2	7457,2	7240,8	7319,5			
f 1	(kN)	0,0	202,0	265,3	282,2	286,2	71%	93%	99%
f 2	(kN)	0,0	279,3	406,3	423,8	428,9	65%	95%	99%
f 3	(kN)	0,0	313,9	417,0	431,5	434,4	72%	96%	99%
f 4	(kN)	0,0	243,2	477,2	570,1	612,0	40%	78%	93%

Os recalques do radier apresentaram uma evolução muito similar desde o início da etapa de voo, como pode ser apreciado na Figura 5.19.b. A porcentagem de recalque no tempo  $t_{J1}$  é similar à apresentada pelo solo para o mesmo tempo mostrando uniformidade na tendência da resposta, ainda quando os valores de deslocamento sejam maiores para o solo do que para o radier.

De forma geral foi observado que os deslocamentos tanto do solo, quanto do radier, ao final da etapa de voo ( $t_K$ ) não apresentaram valores maiores, se comparados com os mesmos dados obtidos no tempo final da Etapa 2 ( $t_F$ ). Isto devido à perda de poropressão durante o voo na Etapa 2.

Os registros das poropressões são apresentados na Figura 5.19.c, e sua variação com a profundidade na Figura 5.19.e. Observou-se que a poropressão apresenta um pequeno incremento (tempo  $t_J$ ), ainda quando as válvulas de saída da água estivessem abertas, devido a aplicação da carga (tempo  $t_J$ ).

Quando a condição de carga permanece constante, o abatimento é uniforme até atingir valores similares a aqueles com os quais iniciou o voo. De fato, isto demonstra que pela carga são gerados excessos de poropressão e que o solo os dissipa com o tempo, sempre que não se apresente uma nova mudança nas condições de tensões internas do solo.

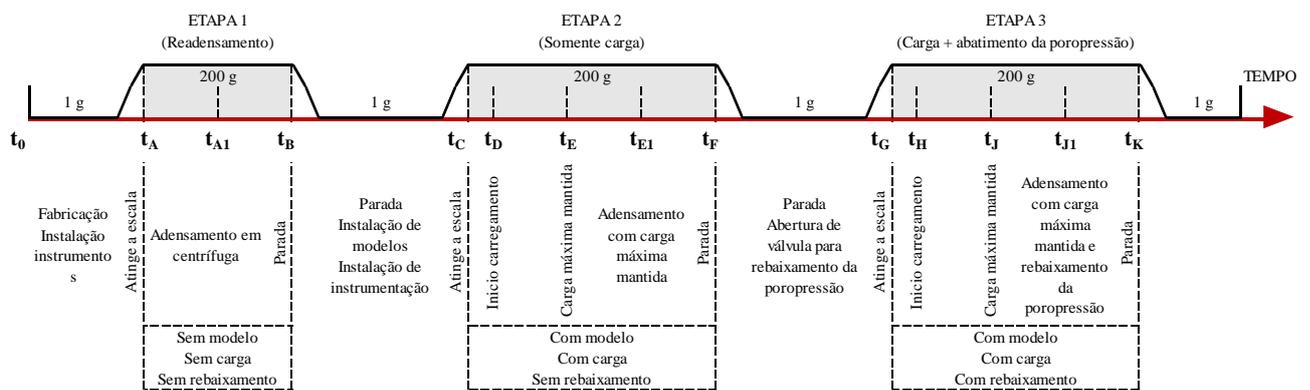
Cargas registradas pelas células dispostas na cabeça das estacas permitiram ver que no início da etapa de carregamento as cargas foram muito diferentes, como apresentado na

Figura 5.19.d. No entanto, uma vez finalizada a etapa de carga, no tempo  $t_J$ , a maioria das estacas adquiriram valores de carga maiores do que os 93% da carga final.

As estacas mais carregadas foram aquelas que possuem as células f4 e f3, localizadas no ponto médio de uma das bordas e na esquina oposta da anterior. Isto permite observar que a distribuição da carga pode não ter sido simétrica e, portanto, algumas das estacas receberam mais carga que outras.

#### 5.4 - RESULTADO DA MODELAGEM EM ESCALA 1/200

Neste item são apresentados os resultados de deslocamento de solo e do radier para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200, em referência à instrumentação instalada e apresentada na Figura 3.28, e para os tempos de voo indicados na Figura 5.20.



**Figura 5.20.** Linha de tempo para análise de resultados nos modelos em escala 1/200.

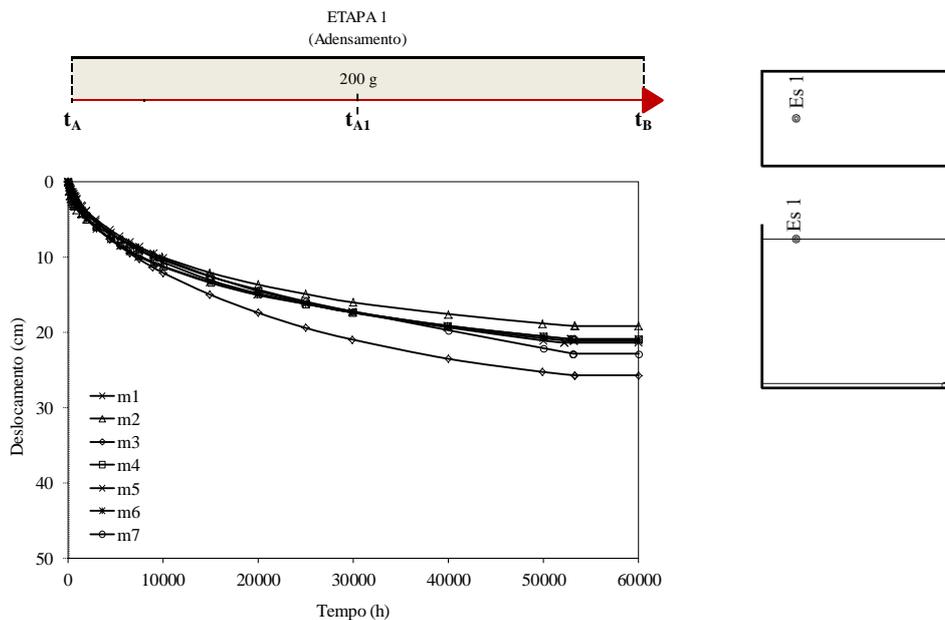
Para as diferentes etapas foram definidos tempos intermediários como se apresenta na Figura 5.20, que ajudam a realizar uma melhor análise da resposta dos modelos. Os tempos assim definidos, estão referidos ao tempo médio (50%) da Etapa de readensamento  $t_{A1}$  ou ao tempo médio da condição em que é mantida a carga durante o voo,  $t_{E1}$  para a Etapa 2 e tempo  $t_{J1}$  para a Etapa 3.

Para todas as etapas foram incluídos dados de deslocamento a partir do ponto em que foi atingido o campo de aceleração do modelo (200g). Quando atingido o valor de 200g foram zerados os extensômetros e se considerou esse valor de deslocamento como o ponto de partida dos deslocamentos do elemento (solo ou radier).

### 5.4.1 - Etapa 1

Na Figura 5.21 são apresentados os deslocamentos do solo na Etapa 1 de todos os modelos realizados em escala 1/200.

A Etapa 1 foi realizada para garantir a geração de um perfil linear de tensões na camada de solo fabricado para os ensaios. Na Tabela 5.13, são apresentadas as leituras de deslocamento do solo em tempos chave, indicados na Figura 5.21, para todos os modelos em escala 1/200, na Etapa 1.



**Figura 5.21.** Deslocamento do solo na Etapa 1, para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.

**Tabela 5.13.** Resumo dos resultados da Etapa 1 para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.

Instrumento	Unidade	Leitura do extensômetro			Razão de leituras
		$t_A$ (0 h)	$t_{A1}$ (5000 h)	$t_B$ (10000 h)	$t_{A1}/t_B$
m1	(cm)	0,0	17,2	21,2	81%
m2	(cm)	0,0	16,1	19,2	84%
m3	(cm)	0,0	21,0	25,7	82%
m4	(cm)	0,0	17,4	20,9	83%
m5	(cm)	0,0	17,4	21,4	81%
m6	(cm)	0,0	17,4	20,9	83%
m7	(cm)	0,0	17,3	22,9	76%
<b>Média</b>	<b>(cm)</b>		<b>17,7</b>	<b>21,6</b>	<b>82%</b>

Pode-se observar na Figura 5.21 que a maioria dos moldes apresentou uma tendência similar nesta etapa de voo. O deslocamento médio do solo foi de 21,6 cm em todos os modelos, no entanto, os modelos m2 e m3 apresentaram um deslocamento variável em até

20% se comparado com o deslocamento médio. A maioria dos modelos atingiram uma porcentagem de 80%, ou maior, do recalque final no tempo  $t_{A1}$ , somente o modelo m7 atingiu uma porcentagem menor, ainda quando o recalque final deste modelo foi superior à média.

Durante o voo foi observado o comportamento da água no tanque de controle externo, sendo possível observar que era estabelecida uma condição de equilíbrio deste nível durante toda a etapa de voo.

Considera-se que o processo de fabricação em geral foi realizado atendendo as condições do projeto proposto e que todos os modelos conseguiram uma condição similar de adensamento similar ao final da Etapa 1. Como mencionado, não foi possível estabelecer uma medida da resistência pelo tamanho dos modelos, porém, os resultados expostos na Figura 5.21 permitem observar uma uniformidade das condições de preparo dos moldes até esta etapa.

#### **5.4.2 - Etapa 2**

Os deslocamentos na Etapa 2 são apresentados na Figura 5.22, indicando alguns tempos chave de leitura dos extensômetros instalados, e que fazem referência ao tempo de início da etapa ( $t_C$ ), ao tempo de início do carregamento ( $t_D$ ), ao tempo em que foi concluído e mantido o carregamento ( $t_E$ ), o tempo do 50% do tempo de adensamento com carga mantida ( $t_{E1}$ ), e o tempo final da etapa ( $t_F$ ).

Assim, na Figura 5.22 são apresentados os gráficos dos deslocamentos do solo ( $ds$ ) e os recalques do radier ( $dr$ ) no intuito de estabelecer uma análise comparativa do comportamento com e sem a inclusão das estacas, e o efeito da presença destes elementos no comportamento do solo. Também é incluído o esquema que representa a localização dos instrumentos instalados no modelo.

Na Tabela 5.14 são apresentadas as leituras reportadas pelo extensômetro Es 1 para o deslocamento do solo ( $ds$ ), e do extensômetro Er 1 para o recalque do radier ( $dr$ ). Nesta tabela, a razão das leituras foi realizada comparativamente com a leitura no tempo final da etapa  $t_F$ .

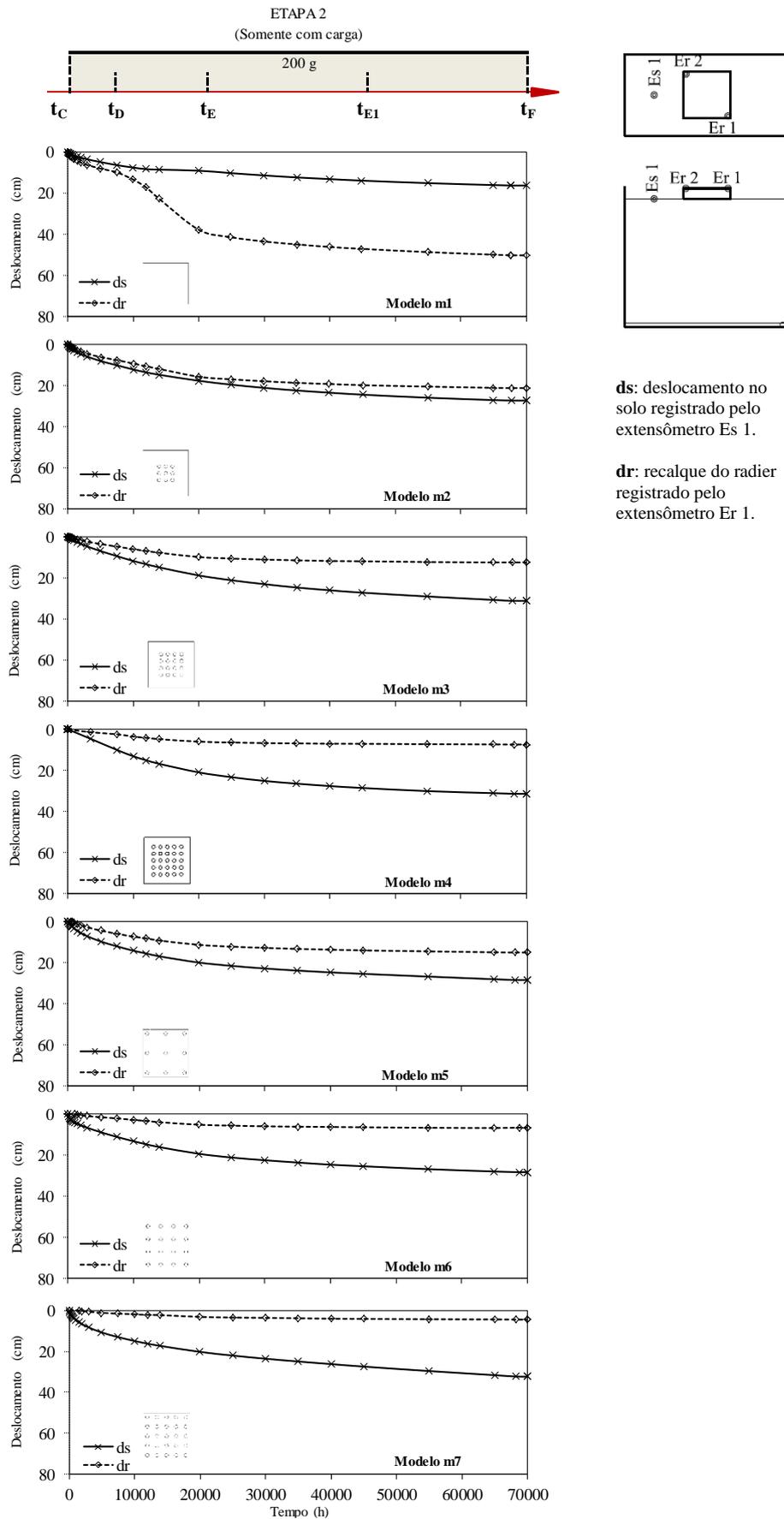


Figura 5.22. Deslocamentos na Etapa 2 dos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.

**Tabela 5.14.** Resultados dos deslocamentos na Etapa 2 para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.

Instrumento	Modelo	Und	Leitura do instrumento					Razão de leituras		
			t <sub>C</sub> (0 h)	t <sub>D</sub> (6666 h)	t <sub>E</sub> (16667 h)	t <sub>E1</sub> (43333 h)	t <sub>F</sub> (70000 h)	t <sub>D</sub> /t <sub>F</sub>	t <sub>E</sub> /t <sub>F</sub>	t <sub>E1</sub> /t <sub>F</sub>
Es (ds)	m1	(cm)	0	4,7	8,4	13,0	16,1	29%	52%	81%
	m2	(cm)	0	8,0	14,7	23,3	27,2	29%	54%	86%
	m3	(cm)	0	6,8	14,8	25,9	31,1	22%	48%	83%
	m4	(cm)	0	4,5	16,8	27,6	31,3	14%	54%	88%
	m5	(cm)	0	9,6	16,8	24,6	28,3	34%	59%	87%
	m6	(cm)	0	8,8	16,0	24,6	28,3	31%	57%	87%
	m7	(cm)	0	10,8	17,3	26,2	32,3	33%	54%	81%
	<b>Média</b>	<b>(cm)</b>			<b>7,1</b>	<b>14,6</b>	<b>23,2</b>	<b>27,1</b>	<b>26%</b>	<b>54%</b>
Er (dr)	m1	(cm)	0	7,9	22,5	46,1	50,1	16%	45%	92%
	m2	(cm)	0	6,0	11,8	19,1	21,1	29%	56%	91%
	m3	(cm)	0	3,4	7,6	11,6	12,3	27%	62%	94%
	m4	(cm)	0	1,3	4,7	7,0	7,3	18%	65%	95%
	m5	(cm)	0	4,3	9,1	13,6	14,9	29%	61%	91%
	m6	(cm)	0	1,5	3,9	6,2	6,5	23%	60%	95%
	m7	(cm)	0	1,2	2,3	4,1	4,5	26%	52%	91%
	<b>Média</b>	<b>(cm)</b>			<b>4,1</b>	<b>10,0</b>	<b>17,3</b>	<b>18,7</b>	<b>22%</b>	<b>53%</b>

Es: extensômetro no solo para medir o deslocamento do solo (ds);  
Er: extensômetro no radier para medir o recalque do radier (dr)

Dos resultados desta etapa pode-se observar que:

- No modelo m1, o recalque do radier (50 cm) foi muito maior do que o deslocamento do solo (16,1 cm) na Etapa 2, porém, o modelo não apresentou ruptura física;
- A porcentagem de deslocamento médio do solo no início da colocação da carga foi de 26% e do recalque médio do radier foi de 22%. Já para o final da carga os valores mudam para 54% e 53 % para solo e radier respectivamente. Para o tempo médio em que a condição de carga foi mantida, a tendência se inverte e os recalques do radier atingiram em média 92% do recalque final, enquanto os deslocamentos do solo atingiram 86%, indicando que a estrutura tende a estabilizar os deslocamentos enquanto o solo continua recalçando;
- Em geral, os recalques do radier se reduziram quando foi aumentado o número de estacas no sistema, no entanto, as condições de espaçamento delas influenciaram também a resposta.
- Salienta-se que os recalques do solo nesta etapa são maiores que os recalques do radier. Este fenômeno pode estar associado com o processo de instalação dos sistemas radier estaqueado e com a carga, os quais geram uma sobrecarga no solo; e a possibilidade de deslocamento somente da camada superior de argila em contato com

o radier. Além disso, pode-se apresentar um maior deslocamento do solo pelo fato de continuar adensando-se pelo peso próprio.

### 5.4.3 - Etapa 3

Os deslocamentos na Etapa 3 são apresentados na Figura 5.23, na qual são mostrados alguns tempos chave de leitura dos extensômetros instalados.

Os tempos chaves apresentados na Figura 5.23, fazem referência ao tempo de início da etapa ( $t_G$ ), ao tempo de início do carregamento ( $t_H$ ), ao tempo em que é concluído e mantido o carregamento ( $t_J$ ), o tempo do 50% do tempo de adensamento com carga mantida ( $t_{J1}$ ), e o tempo final da etapa ( $t_K$ ).

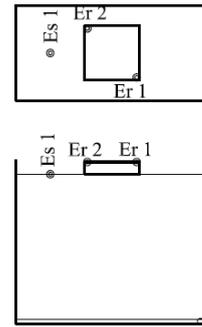
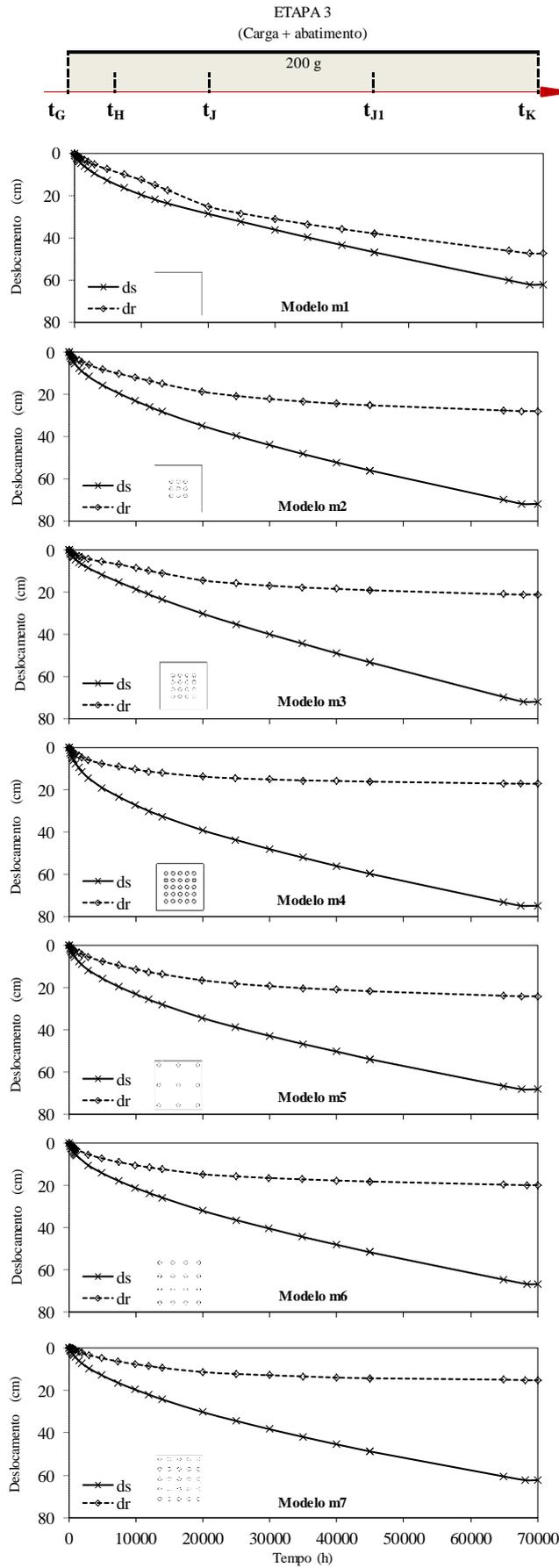
A Figura 5.23 contém os gráficos dos deslocamentos do solo ( $ds$ ) e os recalques do radier ( $dr$ ), visando estabelecer uma análise comparativa do comportamento com e sem a inclusão das estacas, e o efeito da presença destes elementos no comportamento do solo, além da influência do processo de abatimento da poropressão. Na figura, também é incluído um esquema que representa a localização dos instrumentos instalados no modelo.

Na Tabela 5.15 são apresentadas as leituras registradas pelo extensômetro Es 1 para o deslocamento do solo ( $ds$ ), e do extensômetro Er 1 para o recalque do radier ( $dr$ ). Nesta tabela, a razão das leituras é realizada comparativamente com a leitura no tempo final da etapa  $t_K$ .

**Tabela 5.15.** Resultados dos deslocamentos na Etapa 3 para os protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.

Instrumento	Modelo	Und	Leitura do instrumento					Razão de leituras		
			$t_G$ (0 h)	$t_H$ (6666 h)	$t_J$ (16667 h)	$t_{J1}$ (43333 h)	$t_K$ (70000 h)	$t_H/t_K$	$t_J/t_K$	$t_{J1}/t_K$
Es (ds)	m1	(cm)	0,0	12,6	23,5	43,2	61,9	20%	38%	70%
	m2	(cm)	0,0	15,5	28,2	52,1	71,8	22%	39%	73%
	m3	(cm)	0,0	11,6	23,4	48,9	71,9	16%	33%	68%
	m4	(cm)	0,0	18,8	32,4	55,9	74,8	25%	43%	75%
	m5	(cm)	0,0	15,6	27,9	50,2	68,1	23%	41%	74%
	m6	(cm)	0,0	14,1	25,7	48,0	66,7	21%	39%	72%
	m7	(cm)	0,0	12,9	24,3	45,4	62,3	21%	39%	73%
	<b>Média</b>	<b>(cm)</b>			<b>14,7</b>	<b>26,8</b>	<b>49,7</b>	<b>69,2</b>	<b>21%</b>	<b>39%</b>
Er (dr)	m1	(cm)	0,0	7,3	17,1	35,7	47,2	15%	36%	76%
	m2	(cm)	0,0	8,1	14,9	24,3	27,8	29%	54%	87%
	m3	(cm)	0,0	5,5	10,9	18,4	21,0	26%	52%	87%
	m4	(cm)	0,0	7,5	11,9	15,7	17,0	44%	70%	92%
	m5	(cm)	0,0	7,4	13,6	20,9	24,0	31%	57%	87%
	m6	(cm)	0,0	7,1	12,3	17,6	19,8	36%	62%	89%
	m7	(cm)	0,0	4,8	9,4	14,0	15,2	32%	62%	92%
	<b>Média</b>	<b>(cm)</b>			<b>8,2</b>	<b>14,5</b>	<b>23,2</b>	<b>27,2</b>	<b>30%</b>	<b>53%</b>

Es: extensômetro no solo para medir o deslocamento do solo (ds);  
Er: extensômetro no radier para medir o recalque do radier (dr)



**ds**: deslocamento no solo registrado pelo extensômetro Es 1.

**dr**: recalque do radier registrado pelo extensômetro Er 1.

**Figura 5.23.** Deslocamentos na Etapa 3 dos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.

Desta etapa pode-se evidenciar que:

- É apresentada uma tendência similar nos deslocamentos, conservando a tendência de maior recalque do solo, se comparado com o recalque do radier, ainda para o modelo m1 que tinha apresentado tendência diferente na Etapa 2;
- O deslocamento do solo no modelo m1 foi maior que o recalque do radier, no entanto, o recalque do radier sem estacas foi maior que o registrado pelos sistemas com estacas;
- A tendência das duas curvas de deslocamento foi similar para todos os modelos com estacas, contudo, pode-se apreciar a influência do abatimento do nível de água no comportamento do sistema;
- Em todos os modelos o deslocamento total do solo ao final da Etapa 3 apresenta um valor similar (69cm em média), mostrando a marcante influência do abatimento das porpressões na resposta dos modelos;
- Uma resposta similar à reportada na Etapa 2 aparece nesta etapa. Em todos os casos analisado o deslocamento do solo é maior que o recalque do radier. Assim, pode-se ver que ainda quando o solo continua se deslocando, o sistema radier estaqueado não acompanha este deslocamento. Assim, devido à presença deste deslocamento díspar, origina-se um processo de emersão aparente e, por isso, a possibilidade de geração do atrito negativo.

## **5.5 - ANÁLISE COMPARATIVA DAS RESPOSTAS DOS MODELOS**

Nos capítulos anteriores foi apresentada uma análise dos resultados obtidos nos protótipos equivalentes a cada tipo de modelo utilizado na pesquisa, quais foram nas escalas 1/70 e 1/200. Neste item é apresentada uma análise comparativa dos resultados obtidos, visando estabelecer a influência do carregamento e do abatimento do nível de água nas respostas dos modelos em geral.

A análise é realizada com os resultados das Etapas 2 e 3 dos modelos para condições em longo prazo. Nos modelos realizados pode se apresentar influência das condições de borda nos resultados obtidos, como reportado por Tran *et al.* (2012). No entanto, um modelo aproximado que apresenta a baixa influência das condições de borda em longo prazo para estes modelos, é apresentado no Apêndice G. Nele, pode-se observar que para os recalques medidos sobre o centro do radier, para diferentes condições de borda, a diferença é de 1%.

Um detalhamento melhor da influência das condições de borda poderá ser realizado em análises numéricas complementares às aqui apresentadas.

### 5.5.1 - Comparativo de deslocamentos

Para realizar um comparativo das respostas dos modelos foi utilizado o Fator de Forma ou Geometria (FF), como apresentado no item 2.2. Este fator permite incluir as variáveis que influenciam a resposta dos sistemas radier estaqueado.

Os Fatores de Forma foram determinados com base nas equações 2.2 e 2.3 para cada um dos modelos, e são apresentados na Tabela 5.16 seguindo uma ordem ascendente dos valores obtidos. Os maiores valores deste fator foram obtidos para os modelos tipo m (em escala 1/200), com maior número de estacas e maior espaçamento entre elas.

**Tabela 5.16.** Fatores de Forma (FF) para os modelos.

Modelo		m1	M1	M3	M4	m2	M6	m3	m5	m4	m6	m7
Parâmetro												
Diâmetro	d (cm)			63	63	60	63	60	60	60	60	60
Número de estacas	$N_p$			9	16	9	9	16	9	25	16	25
Espaçamento	s (cm)			126	126	120	567	120	340	120	226	170
Area do radier	$A_R (m^2)$	64	196	196	196	64	196	64	64	64	64	64
Area do grupo	$A_G (m^2)$			63,5	14,28	5,76	12,86	12,96	46,24	23,04	45,97	46,24
FF		0	0	0,016	0,036	0,045	0,073	0,101	0,128	0,180	0,191	0,255

Os comparativos de deslocamentos em longo prazo foram realizados com os dados finais dos deslocamentos do solo e do radier, nas Etapas 2 e 3, são apresentados na Tabela 5.17 para os modelos em escala 1/200, e na Tabela 5.18, para os modelos em escala 1/70.

**Tabela 5.17.** Deslocamentos finais nos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.

Modelo	m1		m2		m3		m4		m5		m6		m7	
Fator de Forma (FF)	0		0,045		0,101		0,180		0,128		0,191		0,255	
Instrumento	Es 1	Er 1	Es 1	Er 1	Es 1	Er 1	Es 1	Er 1	Es 1	Er 1	Es 1	Er 1	Es 1	Er 1
Etapa 2	16,1	50,1	27,2	21,1	31,1	12,3	31,3	7,3	28,3	14,9	28,3	6,5	32,3	4,5
Etapa 3	61,9	47,2	71,8	27,8	71,9	21,0	74,8	17,0	68,1	24,0	66,7	19,8	62,3	15,2

Deslocamentos em centímetros.

$e_R$  : espessura do radier : 100 cm para os modelos em escala 1/200.

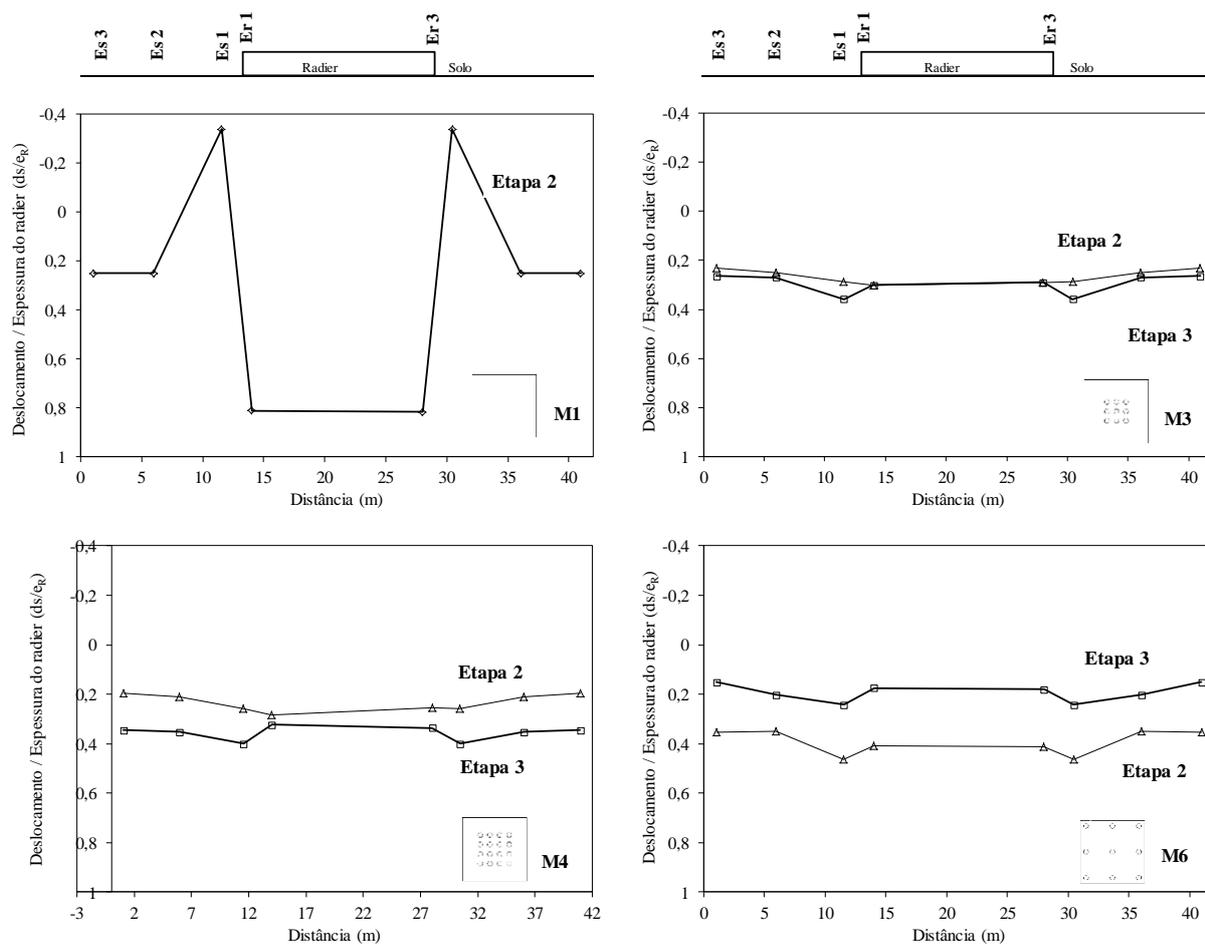
**Tabela 5.18.** Deslocamentos finais nos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/70.

Modelo	M1						M3					
Fator de Forma (FF)	0						0,016					
Instrumento	Es 1	Es 2	Es 3	Er 1	Er 2	Er 3	Es 1	Es 2	Es 3	Er 1	Er 2	Er 3
Etapa 2	-39,0	28,5	28,6	91,6	95,8	93,0	32,9	28,8	26,4	34,7		33,5
Média					93,5			29,4			34,1	
Etapa 3							41,0	30,9	30,3	34,5	32,8	33,2
Média								34,1			33,5	
Modelo	M6						M4					
Fator de Forma (FF)	0,073						0,036					
Instrumento	Es 1	Es 2	Es 3	Er 1	Er 2	Er 3	Es 1	Es 2	Es 3	Er 1	Er 2	Er 3
Etapa 2	53,0	40,3	40,6	47,0		47,1	29,7	24,1	22,4	26,3	32,4	29,1
Média		44,6			47,0			25,4			29,3	
Etapa 3	27,8	23,3	17,3	20,2	21,0	20,8	45,9	40,5	39,6	37,2	38,1	38,5
Média		22,8			20,6			42,0			37,9	
Deslocamentos em centímetros.												
$e_R$ : espessura do radier : 114,7 cm para os modelos em escala 1/70												

Para cada um dos modelos em escala 1/70 foram estabelecidos perfis de deslocamento ao longo do eixo central da maior dimensão do molde de modelagem. Estes perfis são apresentados na Figura 5.24, onde também é apresentado o esquema de localização dos instrumentos de leitura.

O perfil de deslocamento permite apreciar a ruptura do radier para o modelo M1, com o correspondente levantamento na área próxima desta. Para os modelos M3 e M4 foi observado que o abatimento gerou um maior deslocamento do solo. No entanto, os recalques do radier parecem ser controlados com a presença das estacas. Para o modelo M6, evidenciou-se, como mencionado anteriormente, que ao ter ocorrido uma queda da poropressão na Etapa 2 de voo, esta aumentou os deslocamentos gerais do modelo na etapa e, por tanto, na Etapa 3 os deslocamentos do solo e os recalques do radier são menores.

É importante salientar que em todos os casos o solo na área próxima do radier tem um maior deslocamento que este, portanto, pode-se apresentar desprendimento ou separação entre o radier e o solo com a respectiva perda de capacidade de carga.

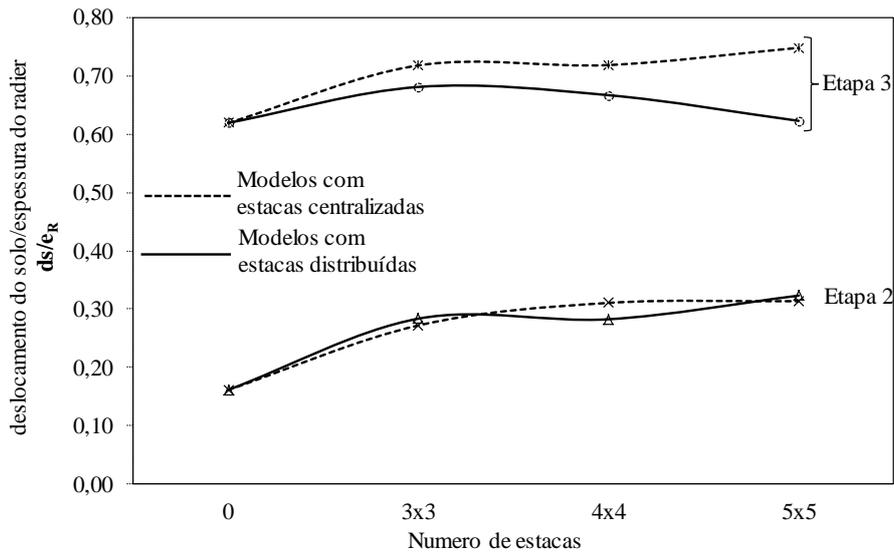


**Figura 5.24.** Perfis de deslocamentos nos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/70.

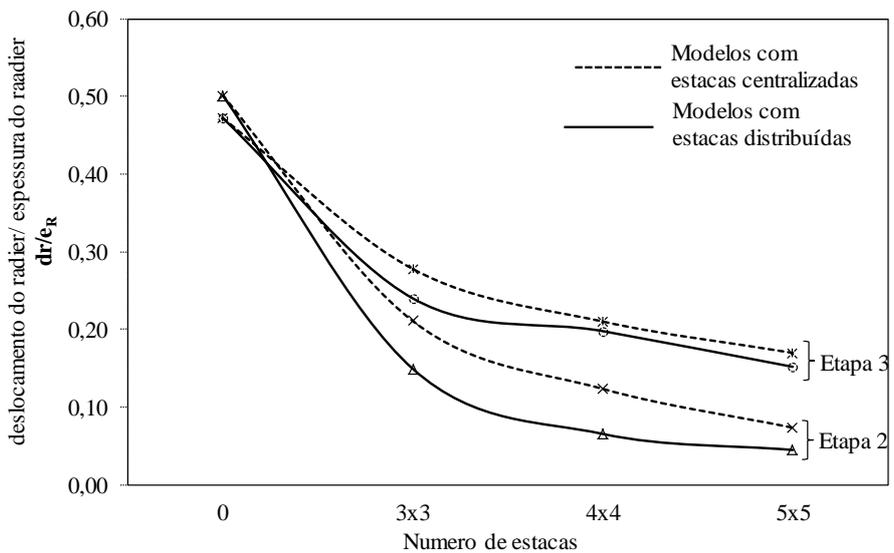
Na Figura 5.25 são apresentados os deslocamentos finais do solo ( $ds$ ), padronizados com a espessura do radier ( $e_R$ ) para as etapas 2 e 3 de voo dos modelos em escala 1/200.

Os deslocamentos do solo na Etapa 3 de carga com abatimento da proressão, foram maiores que os apresentados na Etapa 2, onde somente foi aplicada carga. Nota-se que parece existir alguma influência da presença das estacas nos deslocamentos do solo, devido ao fato de que o radier sem estacas apresentou uma proporção de deslocamento menor, se comparado com aquelas condições com estacas. Estes maiores deslocamentos podem estar associados ao peso próprio gerado pela estrutura no solo.

A tendência geral de comportamento dos recalques no radier ( $dr$ ), normalizada com a espessura do radier ( $e_R$ ), que representa a rigidez deste, é apresentada na Figura 5.26. Neste caso, os recalques foram maiores na condição de abatimento da proressão (Etapa 3).



**Figura 5.25.** Comparativo de recalques do solo nos protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.



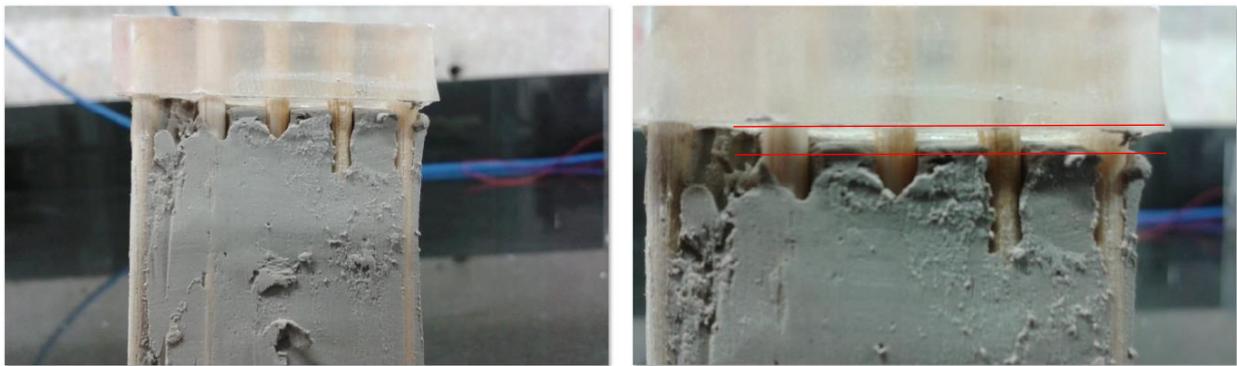
**Figura 5.26.** Comparativo de recalques no sistema radier estaqueado, protótipos equivalentes aos modelos em escala 1/200.

Da Figura 5.26 é importante ressaltar que os sistemas que têm as estacas agrupadas no centro do radier (centralizadas) apresentam um recalque maior, se comparados com aqueles que têm estacas distribuídas em toda a área do radier. Balakumar (2008), Chow *et al.* (2001) e, Chung *et al.* (2013) confirmaram que somente se apresenta uma redução de recalques diferenciais quando as estacas são dispostas na área central e, que os efeitos nos recalques são influenciados pelo espaçamento e pelo número de estacas.

Cunha *et al.* (2000) confirmaram que os recalques diminuem com a inclusão de estacas

nos radieres, especialmente quando colocados no centro. No entanto, Bisht & Singh (2012) indicaram que com espaçamentos menores que  $3d$ , as tensões se superpõem e podem incrementar os recalques, como parece acontecer nos modelos em escala 1/200.

Quando comparadas as respostas mostradas nas duas figuras anteriores, pode-se observar que o deslocamento do solo é maior do que o recalque do radier. Portanto, como mencionado, poderá se apresentar desprendimento do radier e do solo, na Etapa 3. Este fenômeno foi observado nos modelos em escala 1/200, como apresentado na Figura 5.27.

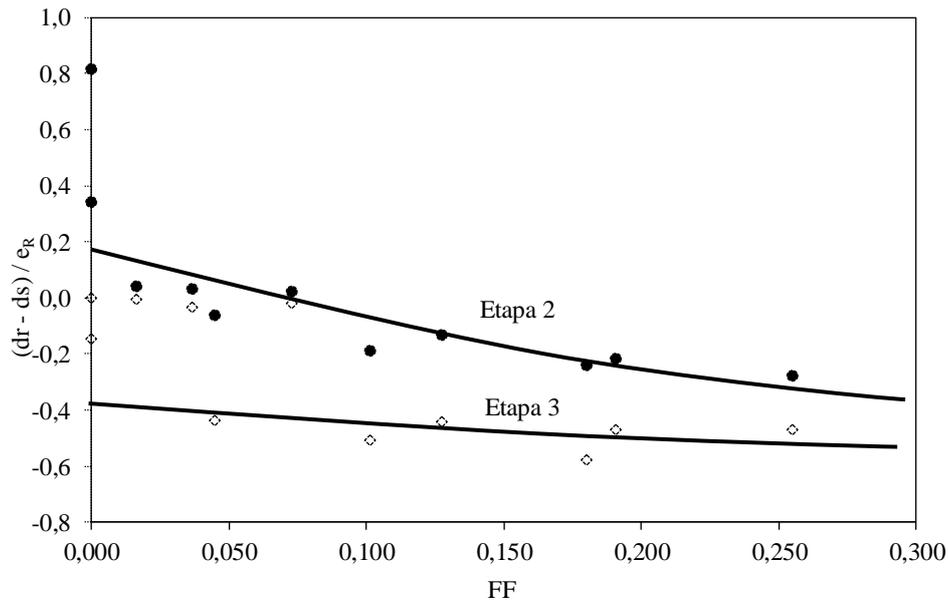


**Figura 5.27.** Fenômeno de separação do radier e o solo em sistemas radier-estaqueado.

A diferença entre o recalque do radier ( $dr$ ) e o deslocamento do solo ( $ds$ ), permite estabelecer os deslocamentos efetivos do sistema radier estaqueado. Quando a diferença é positiva, pode-se dizer que o sistema efetivamente recalca, em caso contrario, o sistema apresenta emersão. A Figura 5.28, apresenta o deslocamento efetivo avaliado para os modelos estudados.

Da figura pode-se observar que o radier sem estacas e os modelos em escala 1/70, com valores do Fator de Forma (FF) menores que 0,07, apresentaram recalque nas duas etapas. Já para os modelos em escala 1/200 (a exceção do modelo m2), todos eles apresentaram emersões.

Estas emersões foram maiores (e de similar valor) na Etapa 3, influenciadas pelos processos de abatimento da poropressão. As menores emersões da Etapa 2, para os modelos em escala 1/200, podem estar associadas com processos de adensamento pelo peso próprio do solo e pela instalação dos modelos.



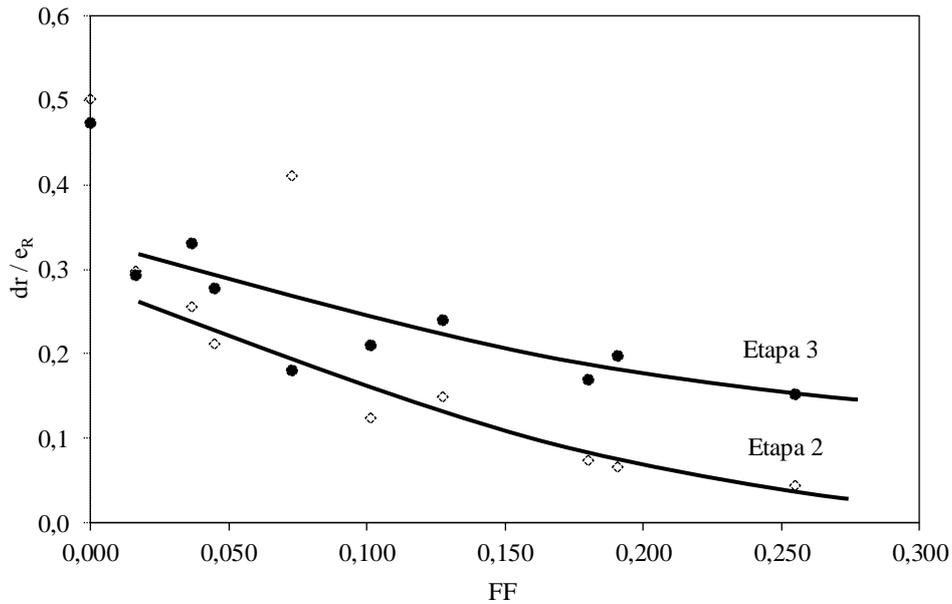
**Figura 5.28.** Deslocamento efetivo dos sistemas radier estaqueado.

A Figura 5.29 relaciona os valores de recalque obtidos no final de cada etapa ( $dr$ ), normalizados com a espessura do radier ( $e_R$ ) e os Fatores de Forma dos modelos. Para os valores de recalque dos modelos em escala 1/70 foram utilizados os valores médios dos três extensômetros de leitura (Er 1, Er 2 e Er 3). Esta figura permitiu estabelecer a tendência de comportamento dos recalques, segundo a distribuição geométrica dos elementos no sistema e a variação entre as respostas em condição sem e com abatimento das poropressões.

Bajad & Sahu (2008) indicam que quando o número de estacas é incrementado, a redução nos recalques é maior. De fato, se o número de estacas é maior que um determinado valor, o incremento na eficiência do sistema radier estaqueado na redução de recalques é marginal.

Nessa linha, Cho *et al.* (2012) encontraram que o recalque médio decresce quando se incrementa o comprimento das estacas e o espaçamento. Isto se deve a que para espaçamentos menores a capacidade do grupo de estacas em um sistema radier estaqueado decresce pelo efeito de grupo.

Assim, pode-se apreciar na Figura 5.29, que os recalques decresceram quando o Fator de Forma (FF) se incrementou, apresentando tendência à estabilização, e em geral, os recalques resultam maiores na etapa de carga com abatimento.



**Figura 5.29.** Recalques nos sistemas radier estaqueado.

A Figura 5.29 sugere que a eficiência na diminuição dos recalques é menor para valores altos do Fator de Forma (FF). A tendência das duas linhas permitiu observar que a porcentagem de diferença nos recalques entre situações, sem e com abatimento do nível de água, pode ser até de 200%.

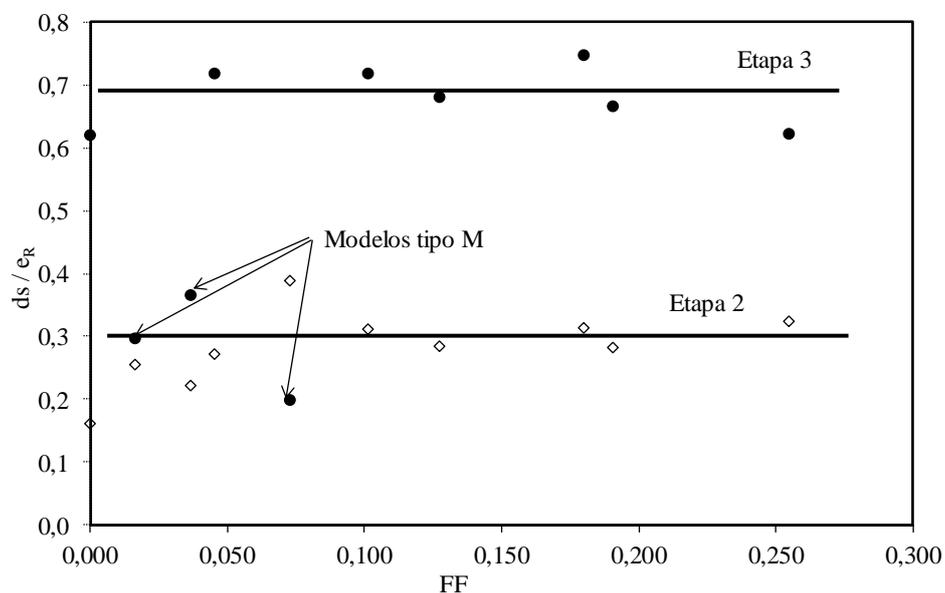
O anterior poderia se explicar com base no incremento do espaçamento das estacas, quando este se incrementa, a condição de trabalho é mais próxima ao comportamento de um radier sem estacas que possui maior susceptibilidade às mudanças nas condições de abatimento da poropressão do solo, com a possibilidade de desenvolver maiores recalques.

Cho *et al.* (2012), indicaram que o recalque médio do radier estaqueado pode ser reduzido efetivamente aumentando o espaçamento para igual número de estacas, já que o recalque depende em maior medida da geometria do sistema que de outros parâmetros, como o tipo de carregamento.

Na Figura 5.30 são apresentados os deslocamentos do solo ( $ds$ ), padronizados com a espessura do radier ( $e_R$ ) e os Fatores de Forma dos modelos. Para os valores de deslocamento do solo dos modelos em escala 1/70 foram utilizados os valores médios dos três extensômetros de leitura (Es 1, Es 2 e Es 3). Nesta figura não foram incluídos resultados do modelo M1, devido à falha ocorrida neste.

O deslocamento do solo apresenta uma tendência de comportamento linear nas duas etapas, sem e com abatimento. Pode-se observar que os modelos em escala 1/70 (M), não se

encontram dentro da linha de tendência para o caso em que são aplicados carga e abatimento das poropressões (Etapa 3).



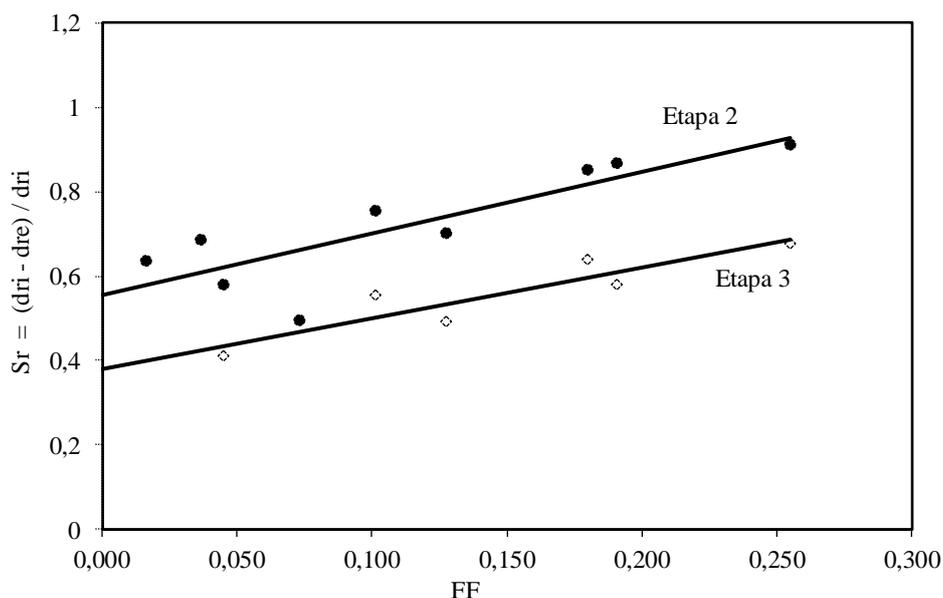
**Figura 5.30.** Deslocamentos do solo nos modelos.

A resposta do solo dos modelos na Etapa 3 pode estar influenciada pelo volume da massa de solo, pelas condições de borda e condições de drenagem ou saída de água, as quais influenciam o deslocamento final que depende ainda das condições da poropressão no solo. Como observado nos gráficos de poropressão de cada modelo, a taxa de dissipação da poropressão da camada média de argila foi menor, influenciando no deslocamento final.

Outro parâmetro apresentado no item 2.2, que permite realizar análise da influência da inclusão de estacas nos sistemas radier estaqueado, é o fator de redução de recalques ( $S_r$ ). Na Tabela 5.19 são exibidos os valores calculados da relação de redução de recalques, os quais são apresentados graficamente na Figura 5.31 para os modelos estudados.

**Tabela 5.19.** Relação de redução de recalques.

Modelo	M3	M4	m2	M6	m3	m5	m4	m6	m7	
Fator de Forma (FF)	0,02	0,04	0,05	0,07	0,10	0,13	0,18	0,19	0,26	
$S_r$	Etapa 2	0,63	0,69	0,58	0,50	0,75	0,70	0,85	0,87	0,91
	Etapa 3			0,41		0,55	0,49	0,64	0,58	0,68
Diferença (%)			29		26	30	25	33	26	



**Figura 5.31.** Relação de redução de recalques.

A redução dos recalques resultou ser maior para os modelos com Fatores de Forma (FF) altos, os quais, normalmente correspondem com maior número de estacas e maiores espaçamentos. Da Figura 5.31 pode-se notar que ainda quando a presença de estacas reduza os recalques do sistema radier estaqueado, a eficiência na redução de recalques é menor quando o solo é submetido a processos de abatimento da poropressão, como aqueles associados a processos de subsidência. A eficiência das estacas pode ser até 29% menor neste caso, se comparada com as condições de um radier exposto somente a processos de carregamento.

Para Fatores de Forma maiores, as estacas oferecem maior resistência ao recalque pela presença da carga. No entanto, quando se apresenta o abatimento adicional ao processo de carregamento, os maiores recalques são influenciados pelo deslocamento geral do solo e, assim, o sistema radier estaqueado subside em conjunto com ele. Neste caso, a eficiência do grupo como redutor de recalques é diminuída.

## 5.6 - CARGA NO SISTEMA RADIER ESTAQUEADO

A análise dos resultados das curvas de carga tem por objetivo estabelecer a mudança que se pode apresentar na carga suportada pelas estacas, quando acontecem processos de abatimento da poropressão no solo.

Com os resultados da distribuição da carga foi possível estabelecer a proporção de carga total que é assumida pelas estacas. Na Tabela 5.20 são resumidas as proporções de carga e a variação das mesmas nos modelos em escala 1/70.

**Tabela 5.20.** Distribuição de carga nas estacas

Modelo	Distribuição de células de carga no modelo	Localização por simetria das células	Célula	Quantidade de estacas em igual posição	Etapa 2		Etapa 3																	
					Leitura de Carga (kN)	Carga no grupo (kN)	Leitura de Carga (kN)	Carga no grupo (kN)																
M3		<table border="1"> <tr><td>f2</td><td>f1</td><td>f2</td></tr> <tr><td>f4</td><td>f3</td><td>f4</td></tr> <tr><td>f2</td><td>f1</td><td>f2</td></tr> </table>	f2	f1	f2	f4	f3	f4	f2	f1	f2	f1	2	196,21	392,43	346,94	693,89							
			f2	f1	f2																			
			f4	f3	f4																			
			f2	f1	f2																			
			f2	4	215,06	860,25	352,38	1409,53																
			f3	1	173,24	173,24	393,22	393,22																
			f4	2	163,97	327,94	463,23	926,46																
Total estacas	<b>9</b>																							
Somatória de carga nas estacas (kN)		1753,86		3423,10																				
Leitura de carga no sistema (kN)		7496,56		7417,85																				
Porcentagem de carga nas estacas		23%		46%																				
Porcentagem de carga no radier		77%		54%																				
M6		<table border="1"> <tr><td>f3</td><td>f4</td><td>f3</td></tr> <tr><td>f1</td><td>f2</td><td>f1</td></tr> <tr><td>f3</td><td>f4</td><td>f3</td></tr> </table>	f3	f4	f3	f1	f2	f1	f3	f4	f3	f1	2	106,72	213,44	286,21	572,42							
			f3	f4	f3																			
			f1	f2	f1																			
			f3	f4	f3																			
			f2	1	307,48	307,48	428,85	428,85																
			f3	4	155,42	621,67	434,37	1737,50																
			f4	2	387,05	774,10	612,01	1224,03																
Total estacas	<b>9</b>																							
Somatória de carga nas estacas (kN)		1916,69		3962,80																				
Leitura de carga no sistema (kN)		7358,82		7319,47																				
Porcentagem de carga nas estacas		26%		54%																				
Porcentagem de carga no radier		74%		46%																				
M4		<table border="1"> <tr><td>f3</td><td>f2</td><td>f2</td><td>f3</td></tr> <tr><td>f2</td><td>f1</td><td>f1</td><td>f2</td></tr> <tr><td>f2</td><td>f1</td><td>f1</td><td>f2</td></tr> <tr><td>f4</td><td>f2</td><td>f2</td><td>f4</td></tr> </table>	f3	f2	f2	f3	f2	f1	f1	f2	f2	f1	f1	f2	f4	f2	f2	f4	f1	4	113,51	454,04	225,05	900,19
			f3	f2	f2	f3																		
			f2	f1	f1	f2																		
			f2	f1	f1	f2																		
			f4	f2	f2	f4																		
			f2	8	131,70	1053,64	221,53	1772,26																
			f3	2	35,75	71,50	102,00	204,00																
f4	2	141,71	283,43	313,97	627,94																			
Total estacas	<b>16</b>																							
Somatória de carga nas estacas (kN)		1862,61		3504,39																				
Leitura de carga no sistema (kN)		7417,85		7398,18																				
Porcentagem de carga nas estacas		25%		47%																				
Porcentagem de carga no radier		75%		53%																				

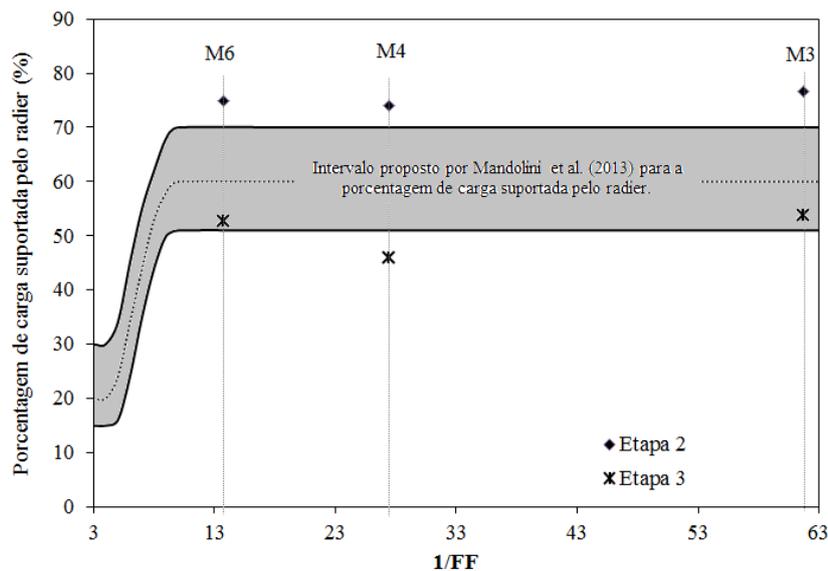
Na tabela são indicados os nomes dos modelos em escala 1/70 em que foram medidas as cargas nas estacas. Para cada um dos modelos é indicada a distribuição das células de carga nas estacas (f). São apresentadas localizações de estacas com respostas similares, com base na pesquisa de Lee (1993). Para cada posição foi determinada a quantidade de estacas em igual posição no sistema radier estaqueado.

Tendo o número de estacas na mesma posição, é obtida a carga no grupo como o produto da leitura da célula de carga e a quantidade de estacas em igual posição. Assim, foi determinada a somatória de carga nas estacas e comparada com a leitura de carga no sistema, obtida com a célula de carga C1, para estabelecer a porcentagem de carga suportada pelas estacas. É possível obter a porcentagem carga no radier, como a diferença entre a carga no

sistema e a carga nas estacas.

Pode-se observar que a proporção de carga na Etapa 2, inicialmente assumida pelo radier, encontrasse entre 74% e 77 %, no entanto, a proporção caiu quando aconteceu o abatimento da poropressão (Etapa 3) para o intervalo entre 46% a 54%, demonstrando-se que se apresentou migração da carga do radier para as estacas, pelo rebaixamento.

Como mencionado na literatura (item 2.2), alguns autores estabeleceram proporções de carga assumidas pelas estacas em até 20% sendo que o radier assume 80% da carga total em condições de carga sem mudanças nas condições de poropressão do solo. Sobre o gráfico proposto por Mandolini *et al.* (2013), são apresentados os resultados da porcentagem de carga suportada pelo radier, obtidos dos modelos em escala 1/70 realizados na presente pesquisa (Figura 5.32).



**Figura 5.32.** Proporção da carga assumida pelo radier em um sistema radier estaqueado.

Os valores iniciais de carga, assumidos pelo radier em todos os modelos (Etapa 2), encontram-se acima da linha superior do intervalo proposto por Mandolini *et al.* (2013) e são inferiores a 80%. Quando aplicado o abatimento da poropressão, os valores de carga assumidos pelo radier caem para a linha inferior do intervalo proposto no gráfico.

A transferência de carga do radier para as estacas, se relacionada com os recalques dos sistemas, parece estar associada com a perda de contato entre o radier e o solo que se adensa, ocasionada pelo maior deslocamento do solo comparado com o radier na etapa de abatimento.

O incremento de carga nos grupos de estacas dispostas no sistema radier estaqueado varia entre 22% e 28%. Este incremento pode representar um risco no comportamento da fundação se o projeto é realizado com estacas trabalhando muito próximas da capacidade de carga última delas.

Considerando-se a capacidade de carga teórica última, foi possível estabelecer a porcentagem de carga tomada pelas estacas nos modelos radier estaqueado em condições finais, como apresentado na Tabela 5.21.

**Tabela 5.21.** Porcentagem de carga atingido pelas estacas nos modelos

Modelo	Célula	Etapa 2		Etapa 3	
		Leitura de Carga (kN)	Porcentagem de carga teórica na estaca	Leitura de Carga (kN)	Porcentagem de carga teórica na estaca
M3	f1	196,21	18%	346,94	32%
	f2	215,06	20%	352,38	32%
	f3	173,24	16%	393,22	36%
	f4	163,97	15%	463,23	43%
M6	f1	106,72	10%	286,21	26%
	f2	307,48	28%	428,85	39%
	f3	155,42	14%	434,37	40%
	f4	387,05	36%	612,01	56%
M4	f1	113,51	10%	225,05	21%
	f2	131,70	12%	221,53	20%
	f3	35,75	3%	102,00	9%
	f4	141,71	13%	313,97	29%

Carga de trabalho teórica da estaca:  $P_u = 1089$  kN.

Como demonstrado nos ensaios de carga, para que seja apresentado um recalque igual ou superior aos 10% do diâmetro das estacas será necessário ultrapassar um valor de carga de até 2,5 vezes a carga teórica última. Na Etapa 2 as estacas atingiram no máximo 36% da carga teórica, e na Etapa 3 atingiram 56%, sendo o incremento médio entre as duas etapas de 16%.

Em nenhuma das etapas foi atingido um valor superior aos 90% da capacidade de carga teórica da estaca, portanto as estacas não se encontram em condições de trabalho próximas à ruptura.

Na Figura 5.33 se apresenta a proporção de carga que é assumida pelo grupo de estacas e os recalques médios do sistema na Etapa 2, para os diferentes tempos já anotados. O fator de

distribuição da carga (proporção de carga suportada pelas estacas) na Etapa 3, é apresentada na Figura 5.34.

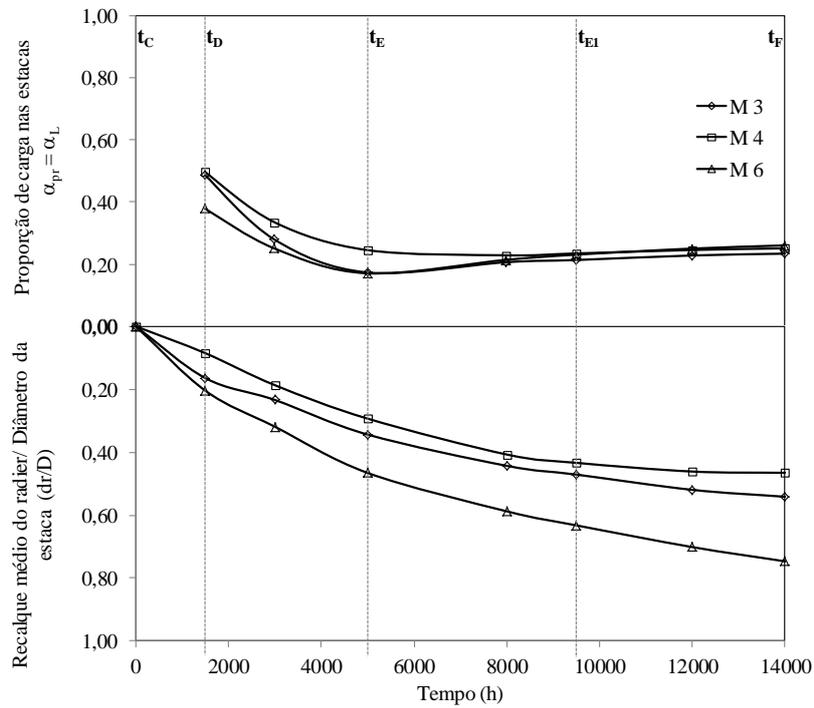


Figura 5.33. Proporção da carga assumida pelo radier e relação com o recalque médio, na Etapa 2.

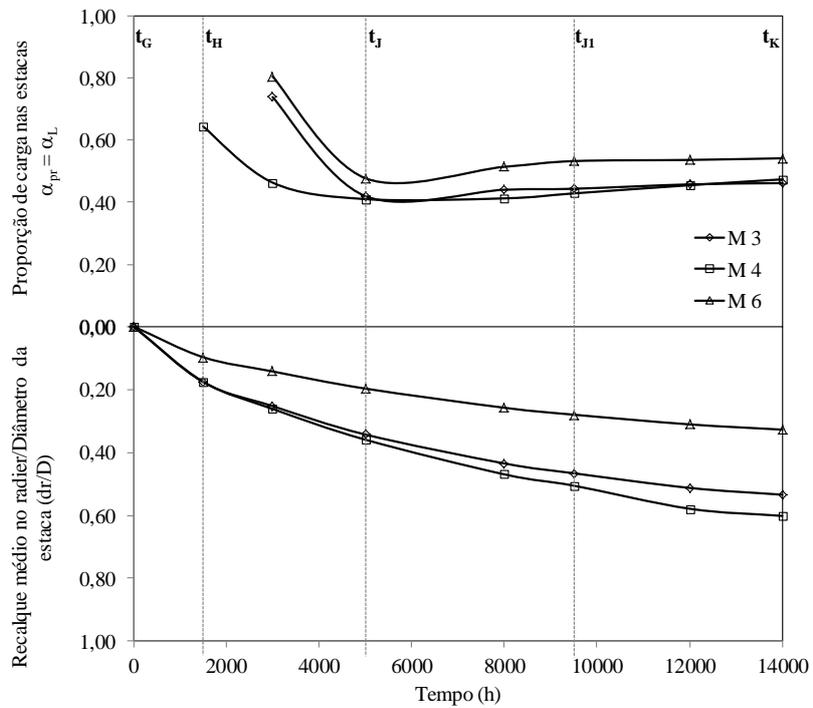


Figura 5.34. Proporção da carga assumida pelo radier e relação com o recalque médio, na Etapa 3.

A relação entre o valor de carga tomado pelas estacas e o valor total da carga no sistema radier estaqueado, em cada um dos tempos marcados, permite estabelecer o parâmetro  $\alpha_{pr}$  ou  $\alpha_L$ , denominado fator de distribuição de carga.

A proporção de carga nos tempos iniciais da etapa é maior e decresce com o recalque até atingir um valor mais ou menos constante. No tempo  $t_E$  que corresponde ao tempo final de incremento de carga, e a partir do qual esta permanece constante, é apresentado um ponto mínimo do valor de proporção de carga. No trecho final ( $t_E - t_F$ ) se apresenta um pequeno incremento da proporção de carga suportada pelas estacas, sendo que a partir do tempo  $t_{E1}$  se torna quase constante para todos os modelos.

Nos modelos M6 e M3 a proporção de carga assumida pelas estacas nos tempos iniciais é maior e decresce rapidamente. Não se apresenta nesta etapa o ponto mínimo que se apresentou na etapa anterior, sendo que o valor final de carga assumido pelas estacas é maior na Etapa 3 se comparado com a Etapa 2.

Nas duas condições, tanto de carga sem rebaixamento, quanto de carga com abatimento, a condição de carga final suportada pelas estacas é atingida no final da fase de carregamento ( $t_E$ , para a Etapa 2, e tempo  $t_j$  para a Etapa 3), e permanece constante, com um deslocamento do radier estaqueado de entre 30 até 40% do diâmetro das estacas.

Com um comportamento similar ao apresentado na Figura 5.33 e Figura 5.34, Balakumar & Anirudah (2011) concluem que as estacas adicionam capacidade de carga aos radieres, permitindo que os sistemas radier estaqueado suportem uma carga maior, se comparados com um radier sem estacas.

A Figura 5.33 e a Figura 5.34, demonstram que a proporção de carga tomada pelas estacas permanece constante para altos valores de recalque, e que o fator de distribuição de carga permanece constante a partir do tempo em que a carga é mantida.

Não se apresentam diferenças significativas para condições de maior número de estacas ou de espaçamento para altos valores de recalque nas condições da Etapa 2, só com carga. Para condições com abatimento, modelos com maior espaçamento (M6) apresentam maiores valores do fator de distribuição de carga.

Observações similares às aqui apresentadas, foram feitas por Horikoshi & Randolph (1996), Bajad & Sahu (2008), Reul (2002), Balakumar (2008) e Balakumar & Anirudah (2011).

Bajad & Sahu (2008) indicaram que a rápida queda nos valores de  $\alpha_{pr}$  para recalques

baixos, indica que as estacas não oferecem resistência adicional efetiva contra o aumento da carga no sistema radier estaqueado. As conclusões apresentadas por Bajad & Sahu (2008) estiveram baseadas em modelos em escala 1g de sistemas radier estaqueados em solos argilosos, submetidos somente a carregamento vertical.

O fator de distribuição de carga ou coeficiente de radier-estaqueado ( $\alpha_{pr}$ ) não depende somente da geometria do sistema, mas depende também do nível de carga (Lee *et al.*, 2010). De fato, este coeficiente, que expressa a proporção de carga assumida pelas estacas, também depende da condição da água no solo, pois se pode observar que os valores são maiores para condições com abatimento das poropressões do solo (Etapa 3), que para condições somente com presença de carga (Etapa 2).

Tran *et al.* (2012a), explicam a relação entre os recalques e a carga no sistema radier estaqueado assentes em solos moles em processos de adensamento: quando a condição de abatimento é aplicada ao modelo, a carga suportada pelas estacas se incrementa. O solo por baixo do radier se desloca, resultando na diminuição da pressão de contato entre estes elementos, assim, a proporção de carga assumida pelo radier decresce. Como a carga total permanece constante, a carga que não é assumida pelo radier é transferida às estacas ocasionando o incremento de carga nelas.

Quando o espaçamento das estacas se incrementa, a carga assumida pelas estacas também se incrementa. Estes fenômenos ocorrem em razão de que o solo ao redor das estacas é mobilizado para resistir à carga aplicada. Quando o espaçamento é suficiente, maior de 3 diâmetros segundo Bisht & Singh (2012), as tensões não se superpõem e por isso a capacidade de carregamento das estacas é maior.

### **5.6.1 - Carga ao longo do fuste das estacas**

Como supracitado no subitem 3.11, as leituras dos *strain gauges* foram calibradas para que correspondessem com os valores de carga ao longo do fuste das estacas. Foram utilizados pares de *strain gauges* para compensar fenômenos como a possível excentricidade da carga e a geração de momentos nas estacas.

Segundo a convenção de uso dos *strain gauges*, leituras negativas indicam forças de compressão e leituras positivas indicam forças de tração, nos elementos em que se encontram aderidos os instrumentos.

Nos ensaios de calibração dos *strain gauges*, todos os instrumentos registraram leituras

quando solicitados em compressão ou tração. Não aconteceu dessa forma nos ensaios no campo gravitacional da centrífuga geotécnica. Quando processadas as leituras, foi possível observar que vários instrumentos não mediram variações nos valores de leitura, e em outros casos a leitura foi errática.

Assim, diante deste comportamento, optou-se por não incluir uma análise das respostas dos instrumentos, porém, as leituras registradas são apresentadas no Apêndice E.

## **5.7 - RESUMO DO CAPÍTULO**

Neste capítulo são apresentados os resultados dos modelos realizados, tanto em escala 1/70, quanto em escala 1/200. Os resultados são analisados e discutidos para interpretar a influência dos processos de carregamento e de subsidência, aqui representados pelo abatimento das poropressões na camada inferior de areia das caixas de modelagem, sobre variáveis tais como os recalques, a poropressão, a carga nas estacas e a carga ao longo do fuste das estacas.

É apresentado o modelo geotécnico do solo utilizado na pesquisa e são discutidos os resultados das medições de parâmetros como a resistência não drenada do solo, a relação de pré-adensamento e a relação entre as tensões efetivas e a resistência do solo. O processo de fabricação do solo permitiu obter um perfil de resistência variável com a profundidade, com uma diferença entre o valor teórico e o medido de 22%. O perfil apresentou uma camada superior sobreadensada.

Os ensaios de carga em estacas individuais permitiram obter as curvas carga-recalque e concluir que as estacas exibem uma capacidade de carga maior que a teórica. Segundo o critério de ruptura usual para que as estacas apresentem falha, deve gerar-se um deslocamento superior a 10 % do diâmetro da estaca. Neste caso, as duas estacas testadas suportaram cargas de até 2,5 vezes a de projeto, sem superar esse valor de recalque.

Os modelos em escala 1/70 registraram dados de deslocamento do solo, recalque do radier isolado e estaqueado, poropressão e carga na cabeça das estacas. Para os modelos em escala 1/200 foram registrados dados de recalque no radier e no radier estaqueado, e deslocamentos no solo do modelo.

Com esses dados foi estabelecida a correlação entre estes parâmetros para diferentes tempos de leitura, sendo possível observar que nas etapas de abatimento da poropressão, em geral os recalques do radier são maiores que os apresentados por sistemas radier estaqueado.

As poropressões são influenciadas pelos processos de carga e o tipo de solo, e as cargas sobre as estacas mudam com o tempo.

Foi apresentada uma análise e discussão sobre a influência da geometria na resposta dos sistemas radier estaqueado ante condições de carga, e carga com abatimento do nível da água. Estas análises foram realizadas com parâmetros como o recalque médio do sistema radier estaqueado ( $dr$ ), o Fator de Forma do sistema ( $FF$ ), a relação de redução de recalques ( $Sr$ ) e o fator de distribuição de carga ( $\alpha_{pr}$ ).

Em geral as respostas do modelo permitem observar que:

- Quando o Fator de Forma se incrementa, a eficiência das estacas para controlar o recalque decresce, e é menor quando se apresentam processos de abatimento das poropressões no solo, com diferenças de até 200% entre a condição sem abatimento e a condição com abatimento;
- A relação de redução de recalques é menor para condições com abatimento, comprovando que as estacas resultam menos eficientes para controlar recalques quando se apresentam processos de subsidência. No entanto, os recalques tendem a ser menores se é aumentado o espaçamento e o número de estacas;
- Quando a condição de abatimento da poropressão é aplicada ao modelo, a carga suportada pelas estacas se incrementa em até 28%;
- A proporção de carga assumida pelas estacas ao início dos processos de carregamento é maior, se comparada com condições em longo prazo, sendo que permanece estável quando a carga é mantida constante;
- Em processos de subsidência, representados neste caso pelo abatimento das poropressões do solo nos modelos, se nota uma separação parcial entre o radier e o solo, como consequência dos maiores recalques por adensamento do segundo. Com esta separação parcial, o radier suporta uma carga menor e ela é transferida para as estacas.

Não foi realizada uma análise da distribuição da carga ao longo do fuste e sua variação com o tempo, devido ao registro incompleto dos *strain gauges* instalados nestes elementos.

## 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 - CONCLUSÕES

A presente pesquisa objetivou a avaliação do comportamento de sistemas radier estaqueado assentes em solos moles com processos de adensamento, por meio de modelos em escala reduzida visando que os resultados obtidos servissem de ponto de partida para validar modelos e metodologias para a análise deste tipo de problemas. Os resultados obtidos foram utilizados para examinar alguns parâmetros relacionados com o solo de suporte, a redução de recalques e, o comportamento da distribuição de carga nas estacas.

Com base nesta pesquisa pode-se concluir:

- O projeto da modelagem em centrífuga geotécnica está baseado na determinação de algumas variáveis que permitem obter uma resposta adequada dos fenômenos estudados. O material utilizado para os elementos radier e estacas, a geometria do modelo, o fator de escala, o tipo de solo a utilizar e os tempos de voo, entre outros, são os elementos que devem ser definidos para a modelagem, e que influenciam a resposta dos modelos.
- O uso de diferentes equipamentos, portanto, de diferentes escalas de ensaio, permite complementar a informação obtida em cada modelo e estabelecer tendências de comportamento, com base em variáveis similares. Também permite observar que modelos menores têm ainda limitações no que refere ao número de instrumentos que podem ser instalados para leitura. No entanto, apresentam a vantagem de serem fabricados em menor tempo e com maior facilidade, com menores tempos de voo e permitindo observar o fenômeno geral de comportamento de forma mais rápida, estabelecendo as condições a melhorar para modelos maiores.
- No que se refere ao processo de fabricação do solo para os modelos, demonstrou-se que processos de fabricação fora do campo gravitacional da centrífuga permitem obter perfis de solos próximos dos valores teóricos definidos para os parâmetros de controle durante a fabricação. Nesta pesquisa, obteve-se uma resistência não drenada do solo, aumentando linearmente com a profundidade, com uma variação de até 22%, se comparada com a resistência teórica projetada.
- O processo de fabricação de solo, fora do campo gravitacional da centrífuga geotécnica, conduz à obtenção de perfis de solos readensados com crostas superiores de alto valor de OCR, quando utilizados estes processos em solos finos. A fabricação

externa do solo deve ser complementada com um voo inicial de equilíbrio, para compensar a distribuição de tensões ao interior da massa de solo e garantir uniformidade nas poropressões internas.

- Com os dados obtidos na pesquisa foram estabelecidas correlações entre parâmetros para diferentes tempos de leitura, sendo possível observar que nas etapas de abatimento da poropressão, em geral os recalques do radier isolado são maiores que os apresentados por sistemas radier estaqueado; as poropressões são influenciadas pelos processos de carga; e as cargas sobre as estacas variam com o tempo.
- Com o uso de modelos reduzidos em centrifuga geotécnica, mostrou-se que sistemas radier estaqueados que possuem estacas agrupadas no centro do radier apresentam um recalque maior, se comparados com aqueles que têm estacas distribuídas em toda a área do radier, já que os recalques são influenciados pelo espaçamento e pelo número de estacas.
- A análise e discussão sobre a influência da geometria na resposta dos sistemas radier estaqueado submetida a condições de carga e carga com abatimento, foi realizada com parâmetros como o recalque médio do sistema radier estaqueado ( $dr$ ), o Fator de Forma do sistema ( $FF$ ), a relação de redução de recalques ( $Sr$ ) e o fator de distribuição de carga ( $\alpha_{pr}$ ).

Quando o Fator de Forma ( $FF$ ) se incrementa, a redução nos recalques do radier é maior, no entanto, a porcentagem em que as estacas reduzem o recalque decresce devido ao fato que deve existir um número ótimo de estacas acima do qual a inclusão de novas estacas não influencia significativamente os recalques. A redução de recalques é menor quando se apresentam processos de abatimento da poropressão no solo, com diferenças de até 200% entre a condição sem abatimento e a condição com abatimento. Salienta-se que uma condição de carga com abatimento produz os maiores valores de recalque no sistema.

- A relação de redução de recalques ( $Sr$ ) é maior para os modelos com Fator de Forma alto, os quais, normalmente correspondem a um maior número de estacas e espaçamento. Esta redução é menor para condições com abatimento da poropressão, comprovando que as estacas resultam menos eficientes para controlar recalques quando se apresentam processos de subsidência.
- No que se refere à distribuição da carga no sistema, foi possível observar que a carga inicialmente assumida pelo radier, quando o sistema é submetido somente a processo

de carregamento varia entre 74% até 77%, no entanto, a proporção de carga decresce para valores de entre 46% até 54%, quando adicional à carga no sistema é aplicado um processo de abatimento da poropressão no solo. Este fenômeno está associado à perda parcial de contato entre parte do radier e o solo, o qual gera uma transferência de carga adicional do radier às estacas.

- A proporção de carga assumida pelas estacas ao início dos processos de carregamento é maior (tanto no processo sem abatimento, quanto no processo com abatimento), se comparada com condições em longo prazo. A porcentagem de carga suportada pelas estacas permanece constante quando a carga é mantida, mostrando-se que as estacas atingem o nível de carregamento final em etapas iniciais do processo, e não mudam se não se apresenta um novo processo de carregamento.
- Quando o espaçamento das estacas se incrementa, a carga assumida pelas estacas também se incrementa. Este fenômeno ocorre em razão de que o solo ao redor das estacas é mobilizado para resistir à carga aplicada. Quando o espaçamento é alto (maior que três diâmetros), as tensões não se superpõem e por isso a capacidade de carregamento das estacas aumenta.
- Nos processos de subsidência, representados nesta pesquisa pelo abatimento da poropressão na camada inferior de areia, sob o solo, os recalques no sistema radier estaqueado são maiores, devido principalmente ao fato deste permanecer submerso em um duplo processo de carregamento e adensamento. Neste processo de abatimento, os maiores deslocamentos do solo, se comparados com os do radier, ocasionam uma perda gradativa do contato solo-radier em algumas zonas abaixo do radier e, portanto, uma redução na capacidade deste último de suportar carga.

Na medida em que o radier perde a capacidade de suportar carga pelo efeito da separação com o solo, as estacas devem assumir uma maior proporção da carga, o que pode trazer como consequência a ruptura destas, se o projeto foi realizado como de costume, com cargas de utilização muito próximas das condições de carga teórica máxima.

Com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, podem também ser sugeridas algumas considerações a serem tidas em conta nas metodologias de análise ou no projeto em geral de sistemas radier estaqueado em solos moles com adensamento, que incluem:

- Espaçamento entre estacas superior a três diâmetros. Como foi observado na pesquisa, espaçamentos menores do que o recomendado, aumentam a possibilidade de que as

estacas adquiram comportamento de grupo, superpondo a distribuição de tensões de umas sobre as outras.

- Análise da relação de rigidez relativa do radier e as estacas, controlando a razão entre a espessura do radier e o diâmetro das estacas. Esta relação influencia as condições de distribuição da carga na cabeça das estacas e à proporção que é assumida por estas.
- Carga última teórica das estacas reduzida em pelo menos 1,5 vezes para obter a carga de projeto. Como demonstrado nesta pesquisa, em função do nível de carga no sistema, se a carga de projeto nas estacas fica muito próxima da carga teórica delas, em condições de adensamento ou abatimento da poropressão ao interior do solo, as estacas poderão atingir a condição de rotura.
- Instrumentação geotécnica para controle da resposta do sistema radier estaqueado. Nas sugestões de projeto deverá constar o uso de instrumentação geotécnica com foco especial no controle da tensão sob o radier, como medida e controle da perda de contato entre este e o solo; medida da poropressão sob o radier, como medida da evolução do processo de adensamento e de possíveis mudanças na transferência de carga; e medida da distribuição da carga na cabeça das estacas e ao longo destas, como controle da condição de trabalho destes elementos.

## 6.2 - LIMITAÇÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa não incluíram a resposta da carga ao longo do fuste das estacas, devido principalmente ao registro incompleto dos *strain gauges* instalados nestes elementos. Segundo a análise final realizada, algumas das conexões destes instrumentos se soltaram durante o voo, e em outros casos, simplesmente foi evidenciado que os *strain gauges* sofreram algum dano no processo de instalação. Pode-se concluir que o processo de instalação (cola e recobrimento) dos *strain gauges*, e o processo de instalação das estacas, não resultou ser o mais adequado para a obtenção de registro de dados contínuos.

Com base nas dimensões das caixas dos modelos, pode-se apresentar a influência das condições de borda nas respostas registradas, especialmente nos recalques. Tem que se considerar que a maioria das respostas foi analisada para condições em longo prazo, portanto, a influência das condições de borda é relativamente baixa. Um posterior estudo de calibração das respostas obtidas nesta pesquisa com uso de modelos numéricos permitirá obviamente estabelecer o grau de influência das condições de borda e realizar as correções (respectivas).

### 6.3 - RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa estudou o comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles com processos de adensamento, tentando cobrir um razoável número de parâmetros. Porém, futuras pesquisas poderão concentrar-se nos seguintes aspectos:

- Complementar a pesquisa atual, realizando os ensaios dos três modelos em escala 1/70 que não foram realizados na centrífuga, cobrindo assim um maior intervalo do Fator de Forma para complementar a Figura 5.32, na qual não foram estabelecidas variações na proporção de carga para valores baixos do inverso do Fator de Forma.
- Modelar o comportamento de estacas individuais instrumentadas de maneira apropriada em processos de adensamento em centrífuga geotécnica, para assim poder contar com dados próprios de ensaios físicos, com especial cuidado na técnica de instalação dos *strain gauges* para obter registros contínuos, a fim de estabelecer a distribuição de cargas ao longo do fuste das estacas.
- Realizar modelagem física em centrífuga para sistemas radier estaqueado, com registro da poropressão na zona inferior do radier entre as estacas, medida da pressão de contato radier-solo e distribuição de carga ao longo do fuste das mesmas.
- Validar as respostas obtidas nesta pesquisa por meio de modelos numéricos, com os que poderão ser analisadas outras variáveis como comprimento das estacas, diferentes diâmetros e outras configurações geométricas, etc., aqui não estudados. A partir de estes resultados será possível estabelecer uma metodologia de análise simplificada que permita prever o nível de carga que será atingido pelas estacas na condição crítica de rebaixamento, e os recalques induzidos por este processo.
- Realizar uma análise da sensibilidade da resposta de sistemas radier estaqueado em solos moles com adensamento, em função do fator de segurança, ou seja, trabalhar configurações similares com diferentes níveis de carga de projeto para observar o comportamento em longo prazo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDRABBO, F. M., & ALI, N. A. (2015). *Behavior of single pile in consolidating soil*. Alexandria Engineering Journal, 54(3): 481-495.
- ABNT, NBR 6122 (2010). *Projeto e execução de fundações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 33 p.
- ALMEIDA, M. S. S., ALMEIDA, M. C. F., TREJO, P. C., RAMMAH, K. I., LUKIANTCHUKI, J. A., GUIMARÃES, M. P. P., & OLIVEIRA, J. R. M. S. (2013). *The geotechnical beam centrifuge at COPPE centrifuge laboratory*. Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2014 (ICPMG2014), Perth, Australia: 271-276.
- ASAOKA, A. (1978). *Observational Procedure of Settlement Prediction*. Soils and Foundations, 18(4): 87 – 100.
- AUVINET, G. & RODRIGUEZ, J. F. (2002). *Modelling of friction piles in consolidating soils*. International Deep Foundations Congress 2002, ASCE, Orlando, Florida: 224 – 235.
- AYALA, D. J. (2013). *Uso da Técnica de Radier Estaqueado para Pequenos Edifícios Assentes Sobre Solo Colapsível*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Brasil. 181 p.
- BAJAD, S. P., & SAHU, R. B. (2008). *An experimental study on the behavior of vertically loaded piled raft on soft clay*. The 12th international conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India: 84-90.
- BAJAD, S. & SAHU, R. (2009). *Time dependent settlement of piled raft foundation*. Darmstadt Geotechnics No. 18: 187-199.
- BALAKUMAR, V. (2008). *Experimental Studies of Model Pile Rafts on Sand and Field Study of Prototype Behavior*. Doctoral Dissertation, Anna University, Chennai, India. 358 p.
- BALAKUMAR, V. & ILAMPARUTHI, K. (2009). *Observational study on the behavior of piled raft*. Darmstadt Geotechnics No. 13: 21-40.
- BALAKUMAR, V., & ANIRUDHAN, I. V. (2011). *Piled raft behaviour-model studies and field performance*. Proceedings of Indian Geotechnical Conference. December 15-17, Kochi, India: 947-950.
- BANERJEE, S. (2009). *Centrifuge and Numerical Modelling of Soft Clay-Pile-Raft Foundations Subjected to Seismic Shaking*. Doctoral Dissertation, University of Singapore, Singapore. 349 p.
- BARATA, F. E., & DANZIGER, B. R. (1986). *Compressibilidade de Argilas Sedimentares Marinhas Moles Brasileiras*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Porto Alegre, Brasil: 99-112.
- BAREÑO, E. & RODRÍGUEZ, E. (1999). *Clays Shrinkage (In Spanish)*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, Colombia, 155 p.
- BAZIAR, M. H., GHORBANI, A., & KATZENBACH, R. (2009). *Small-scale model test and three-dimensional analysis of pile-raft foundation on medium-dense sand*. International Journal of Civil Engineering, 7(3): 170-175.
- BISHT, R. S., & SINGH, B. (2012). *Study on behaviour of piled raft foundation by numerical modelling*. Research Symposium on Engineering Advancements, SAIM-RSEA 2012, Colombo, Vol 1: 23 – 26.
- BOZOZUK, M. (1972). *Downdrag measurements on a 160-ft floating pipe test pile in marine clay*. Canadian Geotechnical Journal, 9(2): 127-136.
- BOWLES, J. E. (1998). *Foundation design and analysis*. McGraw-Hill, New York, 1023 p.
- BROWN, P.T. (1972). *The Analysis of Rafts on Clay*. Doctoral Dissertation. University of Sidney, Australia, 235 p.
- CAICEDO, B., VELÁSQUEZ, R., MONROY, J. (2003). *Physical modelling in geotechnical*

- centrifuge (In Spanish)*. Memorias III Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras, Bogotá, Colombia: 1-31.
- CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY. (2012). *Canadian Foundation Engineering Manual*. Canadian Geotechnical Society. Foundations Committee.
- CARTER, J.P., DESAI, C.S., POTTS, D.M., SCHWEIGER, H.F. AND SLOAN, S.W. (2000). *Computing and computer modeling in geotechnical engineering*. Proceedings, GeoEng 2000, Melbourne, Australia, Vol. 1: 1157-1252.
- CHAN, R. K. S. (2006). *Foundation design and construction*. Geo Publication, N 1. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Hong Kong, 376 p.
- CHAN, S. H. (2006). *Negative Skin Friction on Piles in Consolidating Ground*. Master Thesis. Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 319 p.
- CHEN, R. P., ZHOU, W. H., & CHEN, Y. M. (2009). *Influences of soil consolidation and pile load on the development of negative skin friction of a pile*. Computers and Geotechnics, 36(8): 1265-1271.
- CHO, J., LEE, J. H., JEONG, S., & LEE, J. (2012). *The settlement behavior of piled raft in clay soils*. Ocean Engineering, 53(2012): 153-163.
- CHOW, H. S. (2007). *Analysis of Piled Raft Foundations with Piles of Different Lengths and Diameters*. Doctoral Dissertation, School of Civil Engineering. University of Sidney, Sidney, Australia, 358 p.
- CHOW, Y. K., YONG, K. Y., & SHEN, W. Y. (2001). *Analysis of piled raft foundations using a variational approach*. International Journal of Geomechanics, 1(2): 129-147.
- CHUNG NGUYEN, D. D., KIM, D. S., & JO, S. B. (2013). *Settlement of piled rafts with different pile arrangement schemes via centrifuge tests*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(10): 1690-1698.
- CORDEIRO, A. F. (2007). *Avaliação Numérica de Reforço de Grupo de Estacas pela Introdução de Estacas Adicionais*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 134 p.
- CUI, C., LUAN, M. & LI, M. (2010). *A study on time-effects of pile draft system by using computational methods*. GeoShanghai 2010 International Conference. Geotechnical Special Publication. Shanghai, China: 42-51.
- CUI, C. Y., LUAN, M. T., & ZHAO, Y. H. (2005). *Time-dependent behavior of piled-raft on soil foundation with reference to creep and consolidation*. EJGE,14: 1-14.
- CUNHA, R. P., BEZERRA, J. E., ZHANG, H. H., & SMALL, J. C. (2004). *Back analyzed parameters from piled foundations founded on tropical porous clay*. GeoSupport 2004: Innovation and Cooperation in the Geo-Industry: 1-12.
- CUNHA, R.P., POULOS, H.G. E SMALL, J.C. (2001). *Investigation of design alternatives for a piled raft case history*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Agosto, Vol. 127, No. 8: 635-641.
- CUNHA, R. P., SOARES, J. M., & MOTA, N. M. B. (2000). *Otimização de um projeto de fundações, através do uso de radier estaqueado*. Simp. Int. Estrutura-Solo em Edifícios, São Carlos, Brasil, CD-ROM.
- DA SILVA, G. (2015). *Parâmetros Cam-Clay do caulim usado em modelos centrífugos na COPPE-UFRJ*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 112 p.
- DALLOS, V. F. (2007). *Centrifuge Modeling in Settlements Pipeline Aqueduct to Water Extraction due to Adjacent Excavations (In Spanish)*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 86 p.
- DAS, B.M. (2001). *Principles of Engineering Foundations. (In Spanish)*. 4a Ed. Ed. Thompson.

México. 880 p.

- DURÁN, J. E. (2003). *Optimizing a piled raft foundation system in the lake Bogotá deposit. (In Spanish)*. Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” III Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras. Bogotá, Colombia: 2-65.
- EL-MOSSALLAMY, Y. (2002). *Innovative Application of Piled Raft Foundation in stiff and soft subsoil*. Deep Foundations 2002, ASCE, Orlando, Florida: 426-440.
- EL-MOSSALLAMY, Y. (2011). *Modelling the behaviour of piled raft applying Plaxis 3D Foundation Version 2*. PLAXIS Practice: 10-13.
- EL-SAKHAWY, N., & NASSAR, A. (2013). *Consolidating soil-pile interaction*. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France: 2719-2722.
- ERGUN, M. U., & SÖNMEZ, D. (1995). *Negative skin friction from surface settlement measurements in model group tests*. Canadian Geotechnical Journal, 32(6): 1075-1079.
- ESLAMI, A., VEISKARAMI, M., & ESLAMI, M. M. (2012). *Study on optimized piled-raft foundations (PRF) performance with connected and non-connected piles-three case histories*. International Journal of Civil Engineering, 10(2): 100-111.
- FELLENIOUS, B. H. (1984). *Negative skin friction and settlement of piles*. Proceedings of the Second International Seminar, Pile Foundations, Nanyang Technological Institute, Singapore, 18 p.
- FELLENIOUS, B. H. (2006). *Results from long-term measurement in piles of drag load and downdrag*. Canadian Geotechnical Journal, 43(4): 409-430.
- FIORAVANTE, V., GIRETTI, D., & JAMIOLKOWSKI, M. (2008). *Physical modelling of raft on settlement reducing piles*. From Research to Practice in Geotechnical Engineering Congress, Reston: 206-239.
- FREITAS NETO, O. D. (2015). *Avaliação Experimental e Numérica de Radieres Estaqueados com Estacas Defeituosas em Solo Tropical do Brasil*. Dissertação de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasil, 293 p.
- GARCIA, J. R. (2015). *Análise Experimental e Numérica de Radieres Estaqueados Executados em Solo da Região de Campinas/SP*. Dissertação de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 359 p.
- GARZÓN, L. X. (2010). *Centrifuge Modeling in Shallow Tunnels with Soil Spatial Variation (In Spanish)*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 82 p.
- GUIMARÃES, G. S. (2003). *Fundações em Presença de Solos Moles—Análise de Caso*. TCC, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, Brasil, 50 p.
- HACHICH, W.; FALCONI, F.; SAES, J.; FROTA, R.; CARVALHO, C. E NIYAMA, S. (1996). *Fundações, teoria e prática*. Editora PINI, 2a Edição, São Paulo, Brasil, 762 p.
- HARTMANN, D. A. (2012). *Modelagem Centrífuga de Aterros Estruturados com Reforço de Geossintéticos*. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 153 p.
- HEMSLEY, J. A. (2000). *Design applications of raft foundations*. Thomas Telford. London. 638 p.
- HEWITT, V.M. (2011). *Possible Effects of the Negative Friction over Piles Induced by the Bogota Soils Subsidence Phenome. (In Spanish)*. Tesis de Maestría en Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C., Colombia, 159 p.
- HÖLSCHER, P., VAN TOL, A. F., & HUY, N. Q. (2012). *Rapid pile load tests in the geotechnical centrifuge*. Soils and Foundations, 52(6): 1102-1117.
- HORIKOSHI E RANDOLPH (1996). *Centrifuge modelling of piled raft foundations on clay*. Géotechnique 46. (4): 741-752.

- INDRARATNA, B., BALASUBRAMANIAM, A. S., PHAMVAN, P., & WONG, Y. K. (1992). *Development of negative skin friction on driven piles in soft Bangkok clay*. Canadian Geotechnical Journal, 29(3): 393-404.
- INOUE, Y. (1980). *Behaviour of negative skin friction on steel pipe pile driven in alluvial deposits*. Recent developments in the design and construction of piles. ICE, London: 237-224.
- JAIME, M.C. (2004). *Beam centrifuge design to educational use in Geotechnical Engineering*. (In Spanish). Tesis de Maestria. Facultad de Ingenieria. Universidad de Los Andes. Bogotá, 144 p.
- JANDA, T., CUNHA, R. D., KUKLK, P., & ANJOS, G. D. (2009). *Three dimensional finite element analysis and back-analysis of CFA standard pile groups and piled rafts founded on tropical soil*. Soils and Rocks, 32(1): 3-18.
- KALPAKCI, V., & OZKAN, M. Y. (2012). *A simplified approach to the settlement estimation of piled rafts*. Acta Geotechnica Slovenica, 9(1): 77-85.
- KATZENBACH, R., ARSLAN, U., MOORMANN, C., & REUL, O. (1998). *Piled raft foundation–interaction between piles and raft*. Darmstadt Geotechnics, 4(2): 279-296.
- KIM, K. N., LEE, S. H., KIM, K. S., CHUNG, C. K., KIM, M. M., & LEE, H. S. (2001). *Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations*. Computers and Geotechnics, 28(4): 235-253.
- KRABBENHOFT, S., DAMKILDE, L., & CLAUSEN, J. (2010). *1g model tests with foundations in sand*. Advances and Trends in Structural Engineering, Mechanics and Computation, Zingoni (Ed.), Taylor & Francis Group, London, pp. 1355-1358.
- KRISHNAMOORTHY, A. & KUMAR, S. (2014). *Analysis of pile foundation on soft consolidating soil*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering: 74-77.
- KUWABARA, F., & POULOS, H. G. (1989). *Downdrag forces in group of piles*. Journal of Geotechnical Engineering, 115(6): 806-818.
- LAM, S. Y. (2006). *Effects of Axial Load, Shielding and Shape on Negative Skin Friction on Piles*. Master Thesis, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 437 p.
- LAM, S. Y., NG, C. W., LEUNG, C. F., & CHAN, S. H. (2009). *Centrifuge and numerical modeling of axial load effects on piles in consolidating ground*. Canadian Geotechnical Journal, 46(1): 10-24.
- LAM, S. Y., NG, C. W. W., & POULOS, H. G. (2012). *Shielding piles from downdrag in consolidating ground*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(6): 956-968.
- LEE, C. J., BOLTON, M. D., & AL-TABBAA, A. (2002). *Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations*. Geotechnique, 52(5): 325-335.
- LEE, C. J., & NG, C. W. (2004). *Development of downdrag on piles and pile groups in consolidating soil*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(9): 905-914.
- LEE, C. Y. (1993). *Pile groups under negative skin friction*. Journal of Geotechnical Engineering, 119(10): 1587-1600.
- LEE, J., KIM, Y., & JEONG, S. (2010). *Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay*. Computers and Geotechnics, 37(1): 103-114.
- LEUNG, C., LIAO, B., CHOW, Y., SHEN, R. & KOG, Y. (2004). *Behavior of pile subject to negative skin friction and axial load*. Soils and Foundations. 44(6):17-26.
- LEUNG, C. F. (2009). *Negative skin friction on piles*. IGC, Guntur. INDIA Geotechnical Society: 827-836.
- LEUNG, Y. F., KLAR, A., & SOGA, K. (2009). *Theoretical study on pile length optimization of pile groups and piled rafts*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(2): 319-330.

- LIMA, P.E. (1988). Behaviour of Footings for Offshore Structures under combined loads. Doctoral Dissertation. University of Oxford. Oxford, 260 p.
- LOBO-GUERRERO, A. (1992). *Geology and Hidrogeology of the Bogotá City (In Spanish)*. Sociedad Colombiana de Ingenieros, Sociedad Colombiana de Geotecnia, VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, Bogotá D.C, Colombia: 1-20.
- LOZADA, C. (2011). *Physical and Numerical Modeling of Clay Mixtures with Rigid Inclusions. (In Spanish)*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colombia, 91 p.
- FOPAE (2010). *Microzonificación Sísmica de Bogotá*. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias. FOPAE. Bogotá D.C, Colombia, 21 p.
- MANDOLINI, A., RUSSO, G., & VIGGIANI, C. (2005). *Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design*. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan 16 (1): 177-213.
- MANDOLINI, A., DI LAORA, R., & MASCARUCCI, Y. (2013). *Rational Design of Piled Raft*. Procedia Engineering, 57: 45-52.
- MEXICO D.F. (2004). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones*. Gaceta Oficial del Distrito Federal, México D.F., México, 29 p.
- MOKWA, R. L. (1999). *Investigation of the Resistance of Pile Caps to Lateral Loading*. Doctoral Dissertation. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia, United States, 383 p.
- MURILLO, C. (2006). *Geotechnical Characterization with Centrifuge of Unsaturated Soils Multilayers Embankments via Superficial Waves. (In Spanish)*. Tesis de Doctorado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Bogotá, 223 p.
- NOAO. (2002). *Understanding Subsidence*. The Hartford Loss Control Department. Technical Information Paper Series, United States, 6p.
- NOVAK, L. J., REESE, L. C., & WANG, S. T. (2005). *Analysis of Pile-Raft Foundations with 3D Finite-Element*. Proc., 2005 Structures and Congress and 2005 Forensic Engineering Symp., ASCE, Reston, VA: 1-12.
- NG, H. K., KARASUDHI, P., & LEE, S. L. (1976). *Prediction of negative skin friction and settlement in piles due to fill surcharge*. Geotechnical Engineering, 7(1): 25-45.
- OKABE, T. (1977). *Large negative friction and friction-free pile methods*. Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan: 679-682.
- OLIVEIRA, J. R. M. S. (2005). *Modelagem Centrífuga de um Problema de Interação Solo-estrutura*. Dissertação de Doutorado, COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 368 p.
- PALMEIRA, E. (2012). *Resistência ao cisalhamento dos solos*. Curso de Pós-graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília, Apostilha.
- PATIL, J. D., VASANVALA, S. A., & SOLANKI, C. H. (2013). *A Study on Piled Raft Foundation: State of Art*. International Journal of Engineering Research and Technology IJERT, 2 (8): 1464-1470.
- POOROOSHASB, H. B., ALAMGIR, M., & MIURA, N. (1996). *Negative skin friction on rigid and deformable piles*. Computers and Geotechnics, 18(2), 109-126.
- POULOS, H.G. (1993). *Piled raft in swelling or consolidating soils*. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 2, 374-380.
- POULOS, H.G. (2001). *Piled raft foundations: design and applications*. Géotechnique, 51(2), 95-113.
- POULOS, H. G. (2002). *Simplified design procedure for piled raft foundations*. International Deep

- Foundations Congress 2002, ASCE, Orlando, Florida: 441-458.
- POULOS, H. G. (2005). *Piled raft and compensated piled raft foundations for soft soil sites*. Advances in Designing and Testing Deep Foundations, ASCE, 214-235.
- POULOS, H.G. E DAVIS, E.H. (1980). *Pile Foundations Analysis and Design*. John Wiley and Sons, New York. United States, 40 p.
- POULOS, H. G., SMALL, J. C., & CHOW, H. (2011). *Piled raft foundations for tall buildings*. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS and AGSSEA,42(2), 78-84.
- POULOS, H. G., & MATTES, N. S. (1971). *Settlement and load distribution analysis of pile groups*. Geomechanics Journal: Golden Jubilee of the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Commemorative Volume, 155: 18-28.
- PRAKASH, S., & SHARMA, H. D. (1990). *Pile foundations in engineering practice*. John Wiley & Sons, New York, USA,736 p.
- RABIEI, M. (2009). *Parametric Study for Piled Raft Foundations*. Electronic journal of Geotechnical Engineering EJGE, 14: 1-11.
- REUL, O., & RANDOLPH, M. F. (2003). *Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 130: 1-13.
- REUL, O. (2002). *Study of the influence of the consolidation process on the calculated bearing behaviour of a piled raft*. Proc. 5th Eur. Conf. on Num. Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2002), Paris, France, 383-388.
- RINCÓN, C.L. E RODRÍGUEZ, E. (2001). *Centrifuge Physical Modeling of a Wall without Anchors in a Soft Clay (In Spanish)*. Tesis de Maestría en Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Bogotá D. C. Colombia, 129 p.
- RODRIGUEZ, J.F. (2001). *Use of Rigid Inclusions to Settlement Soft Soil Control (In Spanish)*. Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México – UNAM, México D. F., México, 154 p.
- RODRIGUEZ, J. F. & AUVINET, G., (2006). *Rigid inclusions in Mexico City soft soils: history and perspectives*. International Symposium “Rigid inclusions in difficult soft soil conditions”, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F, México, 10 p.
- RODRIGUEZ, J. F. (2010). *Modeling Behavior of Piles and Inclusions Under Regional Consolidation in the Lake Area of Mexico City. (In Spanish)*. Tesis de Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México – UNAM, México D.F., México, 244 p.
- RODRÍGUEZ, J. F., AUVINET, G. Y., & MARTÍNEZ, H. E. (2015). *Settlement analysis of friction piles in consolidating soft soils*. DYNA,82(192), 211-220.
- ROMÃO DE OLIVEIRA, J. T., & GUSMÃO, A. D. (2002). *Comportamento tensão-deformação das fundações de três edifícios monitorados*. XII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, São Paulo, Brasil, 8 p.
- ROY, S., CHATTOPADHYAY, B. C., & SAHU, R. B. (2011). *Piled-Raft foundation behavior on consolidating soft soil*. Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Kochi, India: 879-882.
- SALES, M. M. (2000). *Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas*. Dissertação de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 257 p..
- SALES M.M., CUNHA R.P., CARVALHO J.C. DE & SILVA C.M. (2002). *Previsões de Comportamento de um radier estaqueado no Distrito Federal*. XII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, São Paulo, Brasil, 8p.
- SANCTIS, L., MANDOLINI, A., RUSSO, G., & VIGGIANI, C. (2002). *Some remarks on the optimum design of piled raft*. International Deep Foundations Congress 2002, ASCE, Orlando, Florida: 405-425.
- SANCTIS, L., & MANDOLINI, A. (2006). *Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils*. Journal

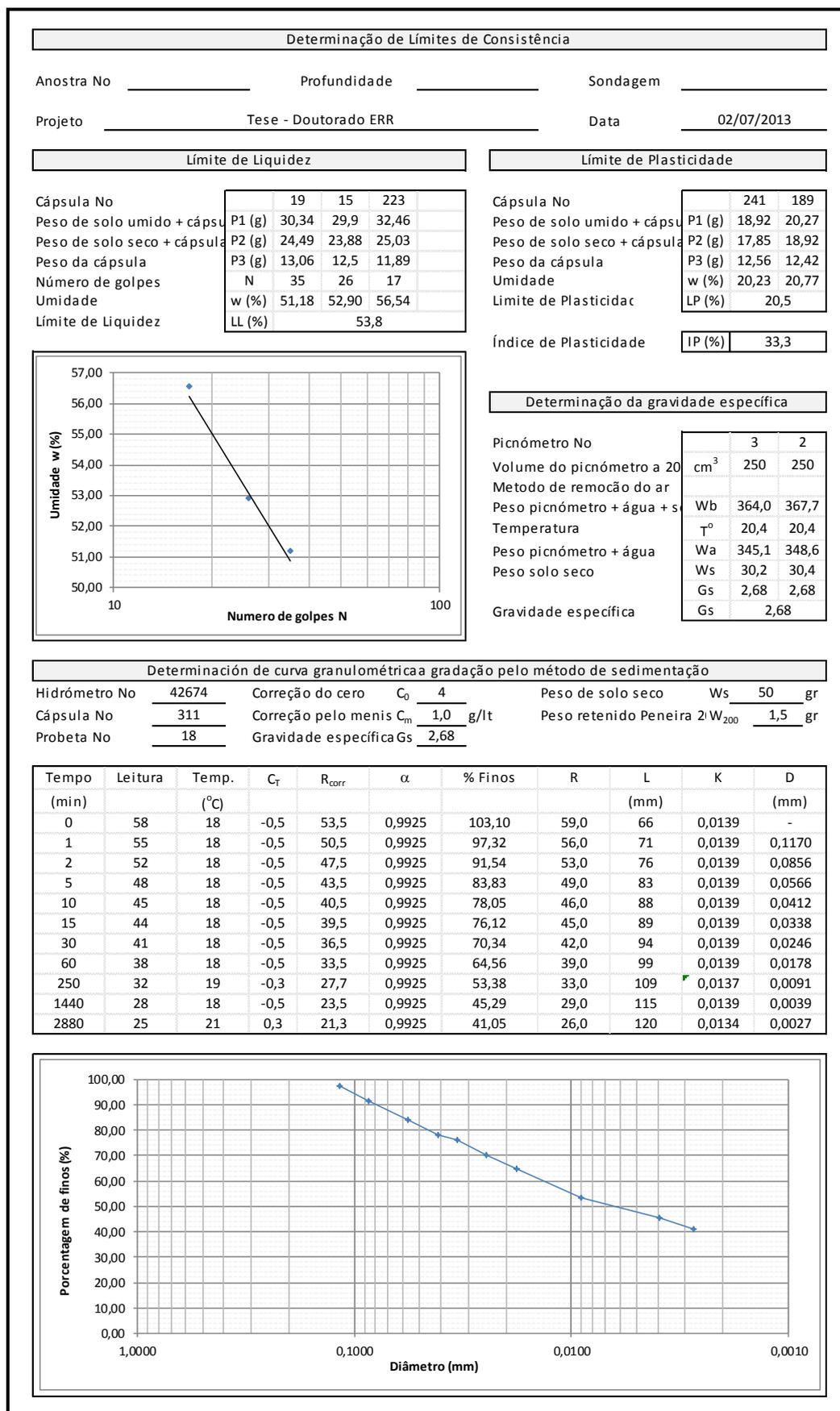
- of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132: 1600-1610.
- SCHOFIELD, A. N. (1998). *Geotechnical centrifuge development can correct a soil mechanics error*. University of Cambridge, Department of Engineering, USA, 9 p.
- SEO, Y. K., CHOI, K. S., & JEONG, S. G. (2003). *Design charts of piled raft foundations on soft clay*. Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Honolulu, USA: 753-755.
- SHEN, R. F., LEUNG, C. F. & CHOW, Y. K. (2006). *Negative skin friction on end-bearing piles*. Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, ICPMG, Taylor & Francis, London, UK. pp. 875–880.
- SHIBATA, T., SEKIGUCHI, H., & YUKITOMO, H. (1982). *Model test and analysis of negative friction acting on piles*. Soils and Foundations, 22(2). 29-39.
- SMALL, J. C., & POULOS, H. G. (2007). *Nonlinear analysis of piled raft foundations*. Geotechnical Special Publication GSP158, ASCE, CD Volume, 9 p.
- SMALL, J. C., & LIU, H. L. (2008). *Time-settlement behaviour of piled raft foundations using infinite elements*. Computers and Geotechnics, 35(2), 187-195.
- SMALL, J. C., & ZHANG, H. H. (2002). *Behavior of piled raft foundations under lateral and vertical loading*. International Journal of Geomechanics, 2(1), 29-45.
- TAN, Y. C., & CHOW, C. M. (2004). *Design of piled raft foundation on soft ground*. GSM-IEM Forum: The roles of engineering geology & geotechnical engineering in construction works, University of Mayala, Kuala Lumpur, 20 p.
- TAN, Y. C., CHEAH, S. W., & TAHA, M. R. (2006). *Methodology for design of piled raft for 5-storey buildings on very soft clay*. Foundation Analysis and Design: Innovative Methods, Geotechnical Special Publication 153: 226-233.
- TAVARES, M. V. C. F. (2012). *Avaliação experimental de fundações estacadas em modelos 1g*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 155 p.
- TAYLOR, R. N. (1995). *Centrifuges in modelling: principles and scale effects*. Geotechnical centrifuge technology, R.N. Taylor (Ed), Blackie Academic & Professional, London, UK, pp 19-33.
- TEH, C. I., & WONG, K. S. (1995). *Analysis of downdrag on pile groups*. Geotechnique, 45(2), 191-207.
- THE, K.L., LEUNG, C.F., CHOW, Y.K. & CASSIDY, M.J. (2010). *Centrifuge model study of spudcan penetration in sand overlying clay*. Géotechnique 60 (11), 825-842.
- THAHER, M. JESSBERGER, H. L., (1991). *The behavior of pile-raft foundations, investigated in centrifuge model tests*. Centrifuge 91, ISMFE, Rotterdam, Germany: 225-234.
- TRAN, T. V., KIMURA, M., & BOONYATEE, T. (2012a). *3D FE Analysis of effect of ground subsidence and piled spacing on ultimate bearing capacity of piled raft and axial force of piles in piled raft*. Open Journal of Civil Engineering, 2:206–213.
- TRAN, T. V., TERAMOTO, S., KIMURA, M., BOONYATEE, T., & VINH, L. B. (2012b). *Effect of ground subsidence on load sharing and settlement of raft and piled raft foundations*. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 6(2), 120-127.
- VAN IMPE, W. F. (2001). *Methods of analysis of piled raft foundations*. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, Technical Committee TC18 on Piled Foundations, 46 p.
- WEI, Q. (2006). *Land Subsidence and Water Management in Shanghai*. Master Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 79 p.
- WIESNER, T.J. E BROWN, P.T. (1978). *Laboratory tests on model piled raft foundations*. Research

Report 318, Journal of The Geotechnical Engineering Division, Sydney University, Australia, 767-783.

- WU, W. J., CHAI, J. C. AND HUANG, J. Z. (2002). *Interaction between pile and raft in piled raft foundation*. Proceedings of the International Conference on Advances in Building Technology. Volume I, Hong Kong: 603-610.
- WU, X. (2011). *Load Transfer Mechanism of Pier-Supported-Raft Foundation Subjected to Vertical Load*. Doctoral Dissertation, The Pennsylvania State University, USA, 147 p.
- XIA, R., DOLEZEL, V., RAK, L., QIAN, H., & RAO, B. (2009). *Geotechnical Design of a Partially Piled Raft Foundation*. Contemporary Topics in Deep Foundations, ASCE: 223-231.
- ZEEVAERT, A (1957). *Behaviour of the Latinamerican Tower in Mexico City*. Geotéchnique, 8(3): 115-113.

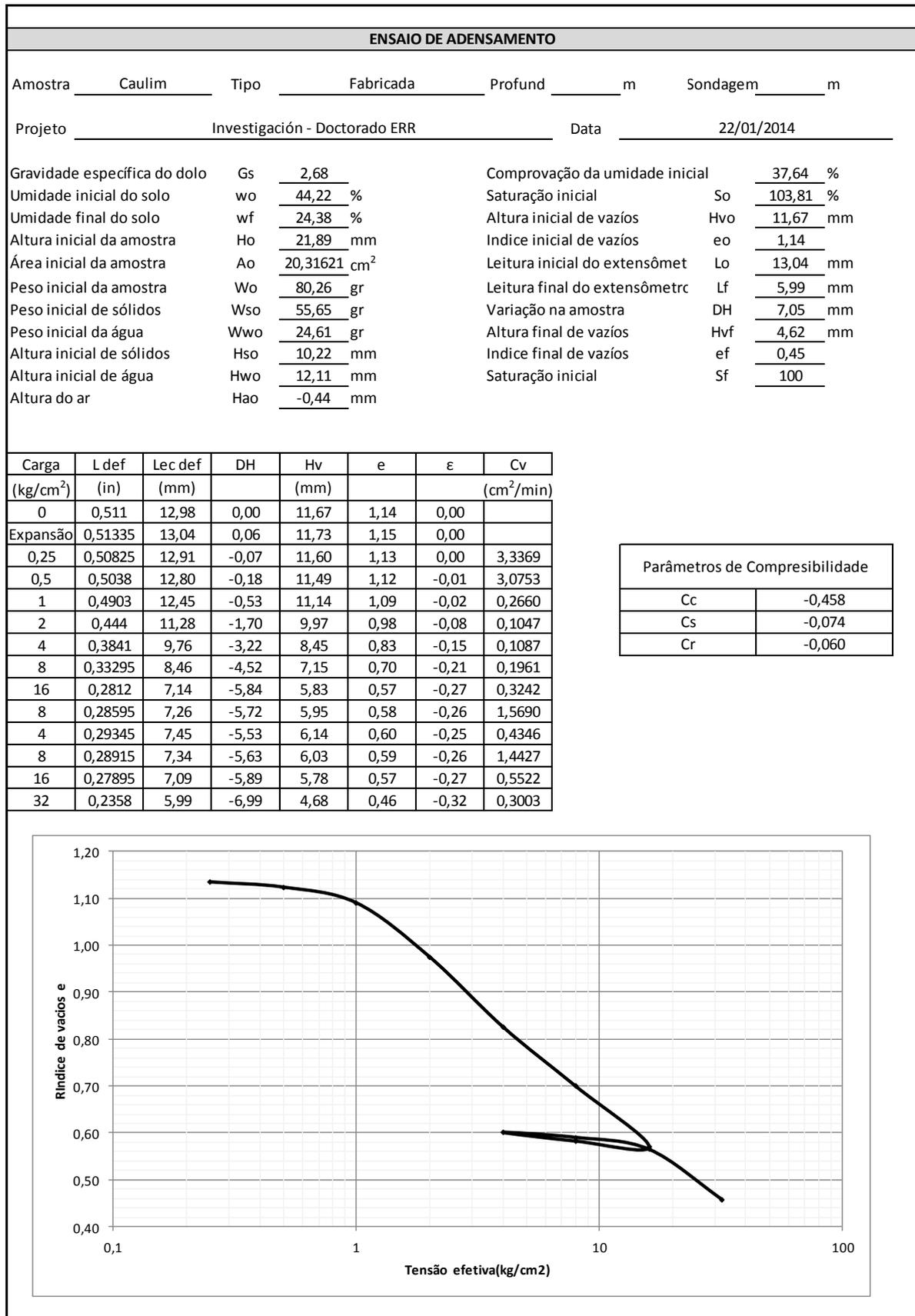
## **APÊNDICES**

## **Apêndice A. Ensaaios sobre caulim**



**Figura A. 1.** Ensaios de classificação para caulim - 1





**Figura A. 3.** Ensaio de adensamento para caulim - 1

**ENSAYO DE ADENSAMENTO**

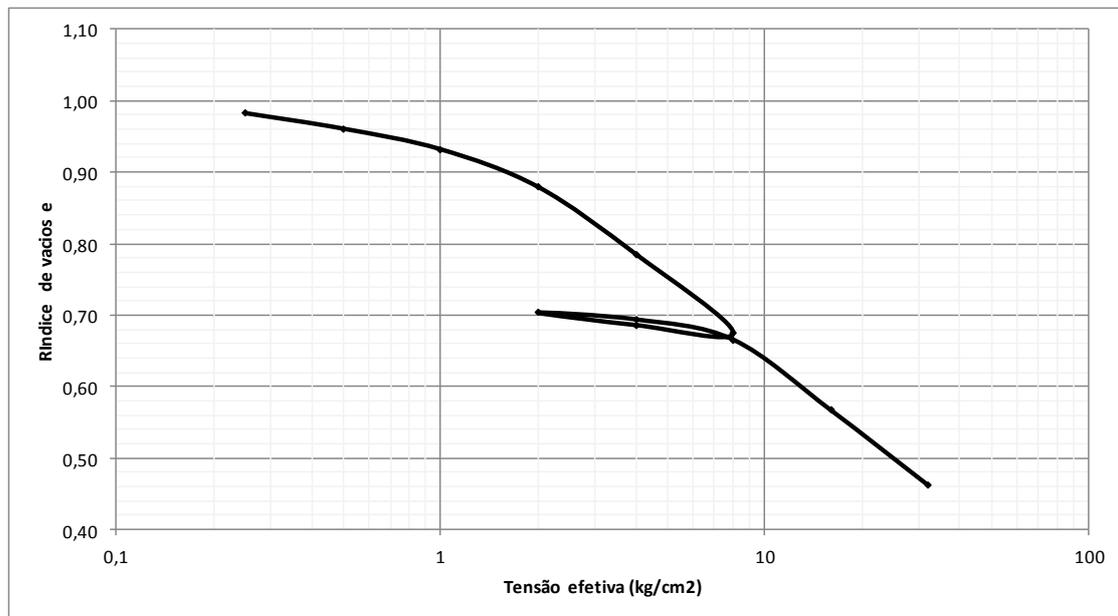
Amostra Caulim Tipo Fabricada Profund          m Sondagem          m

Projeto Investigación - Doctorado ERR Data 15/02/2014

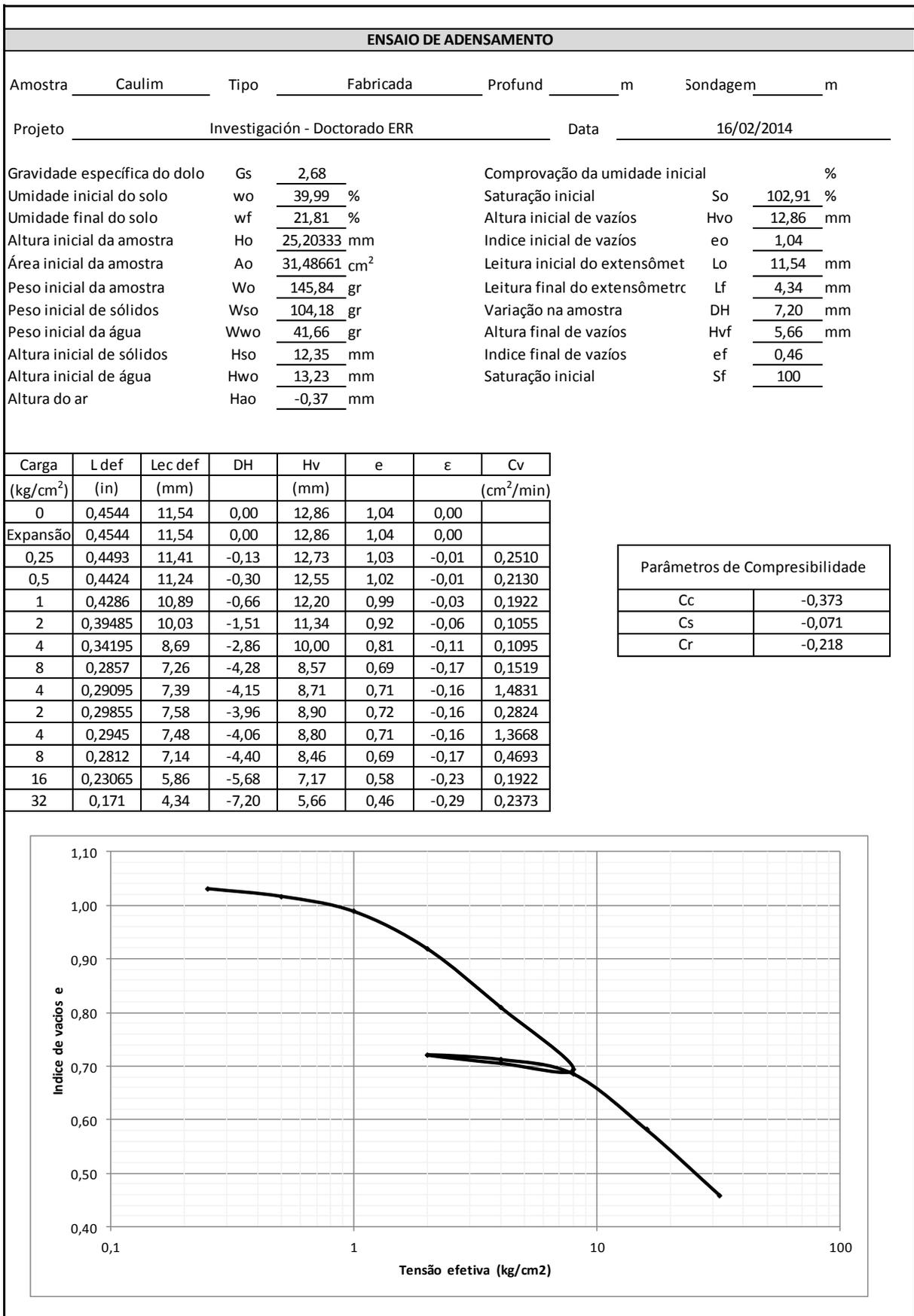
Gravidade específica do dolo	Gs	<u>2,68</u>	Comprovação da umidade inicial		<u>        </u> %
Umidade inicial do solo	wo	<u>37,15</u> %	Saturação inicial	So	<u>103,96</u> %
Umidade final do solo	wf	<u>22,08</u> %	Altura inicial de vazios	Hvo	<u>12,26</u> mm
Altura inicial da amostra	Ho	<u>25,05333</u> mm	Índice inicial de vazios	eo	<u>0,96</u>
Área inicial da amostra	Ao	<u>31,57619</u> cm <sup>2</sup>	Leitura inicial do extensômet	Lo	<u>11,76</u> mm
Peso inicial da amostra	Wo	<u>148,3</u> gr	Leitura final do extensômetrc	Lf	<u>4,77</u> mm
Peso inicial de sólidos	Wso	<u>108,3</u> gr	Varição na amostra	DH	<u>6,99</u> mm
Peso inicial da água	Wwo	<u>40,23</u> gr	Altura final de vazios	Hvf	<u>5,27</u> mm
Altura inicial de sólidos	Hso	<u>12,80</u> mm	Índice final de vazios	ef	<u>0,41</u>
Altura inicial de água	Hwo	<u>12,74</u> mm	Saturação inicial	Sf	<u>100</u>
Altura do ar	Hao	<u>-0,49</u> mm			

Carga (kg/cm <sup>2</sup> )	L def (in)	Lec def (mm)	DH	Hv (mm)	e	ε	Cv (cm <sup>2</sup> /min)
0	0,4377	11,12	0,00	12,26	0,96	0,00	
Expansão	0,46295	11,76	0,64	12,90	1,01	0,03	
0,25	0,45025	11,44	0,32	12,57	0,98	0,01	0,0947
0,5	0,43935	11,16	0,04	12,30	0,96	0,00	0,0800
1	0,4248	10,79	-0,33	11,93	0,93	-0,01	0,1137
2	0,39825	10,12	-1,00	11,25	0,88	-0,04	0,1095
4	0,35095	8,91	-2,20	10,05	0,79	-0,09	0,0933
8	0,29535	7,50	-3,62	8,64	0,68	-0,14	0,1017
4	0,3009	7,64	-3,47	8,78	0,69	-0,14	0,5339
2	0,3096	7,86	-3,25	9,00	0,70	-0,13	0,2022
4	0,3049	7,74	-3,37	8,88	0,69	-0,13	0,5251
8	0,2906	7,38	-3,74	8,52	0,67	-0,15	0,4346
16	0,24095	6,12	-5,00	7,26	0,57	-0,20	0,1250
32	0,18785	4,77	-6,35	5,91	0,46	-0,25	0,1922

Parâmetros de Compresibilidade	
Cc	-0,339
Cs	-0,084
Cr	-0,211



**Figura A. 4.** Ensaio de adensamento para caulim - 2



**Figura A. 5.** Ensaio de adensamento para caulim - 3

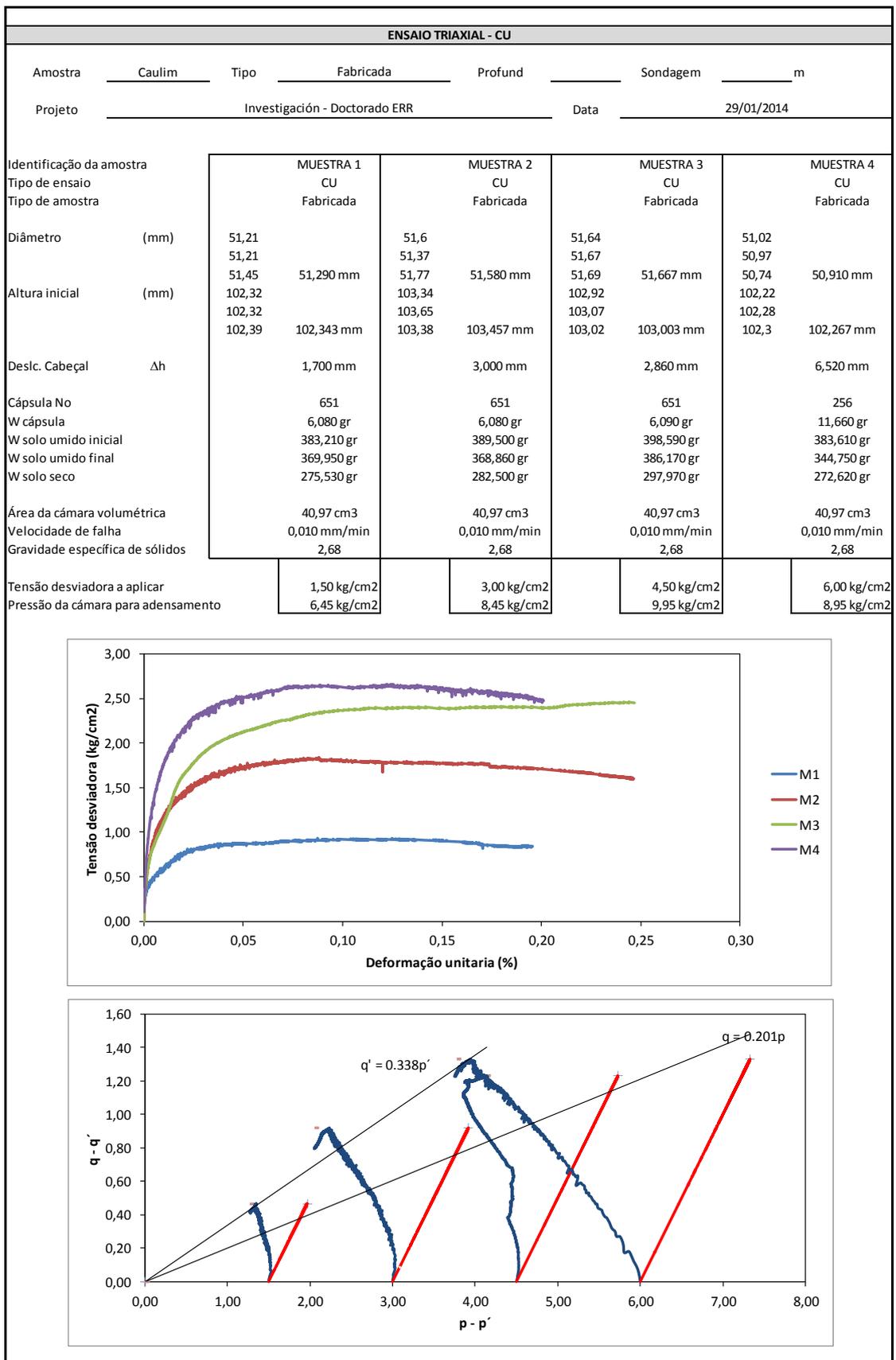
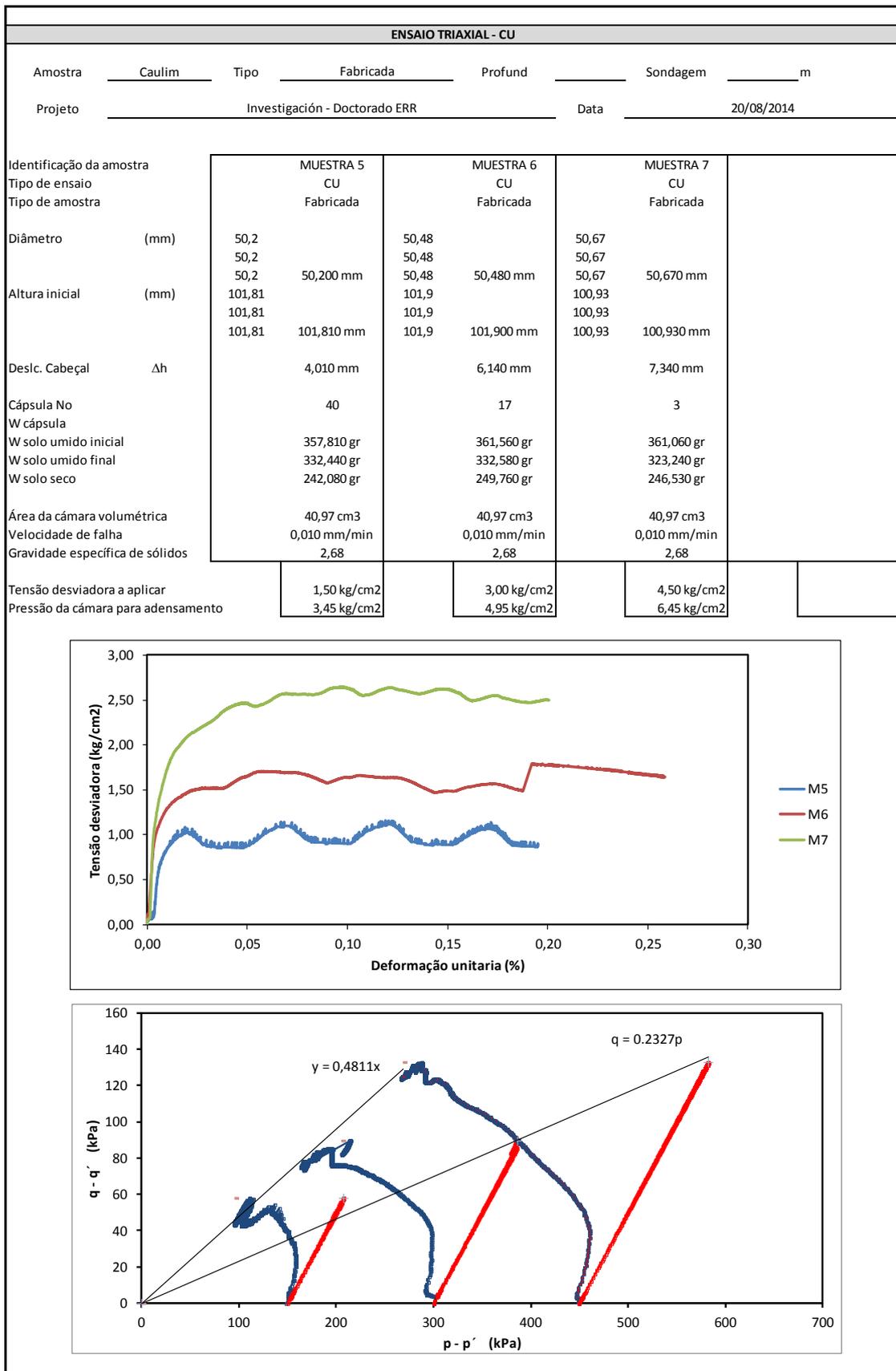


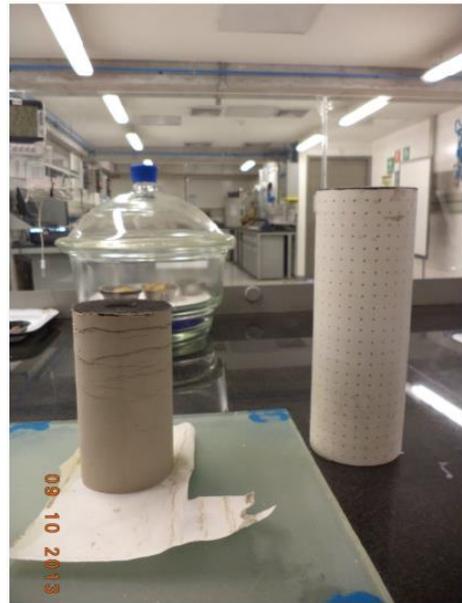
Figura A. 6. Ensaio triaxial para caulim - 1



**Figura A. 7.** Ensaio triaxial para caulim - 2



**Figura A. 8.** Processo de fabricação de amostras para os ensaios de adensamento e triaxial.



**Figura A. 9.** Amostra extraída do tubo de PVC



**Figura A. 10.** Ensaio triaxial em amostras fabricadas com caulim

## **Apêndice B.** Calibração da instrumentação

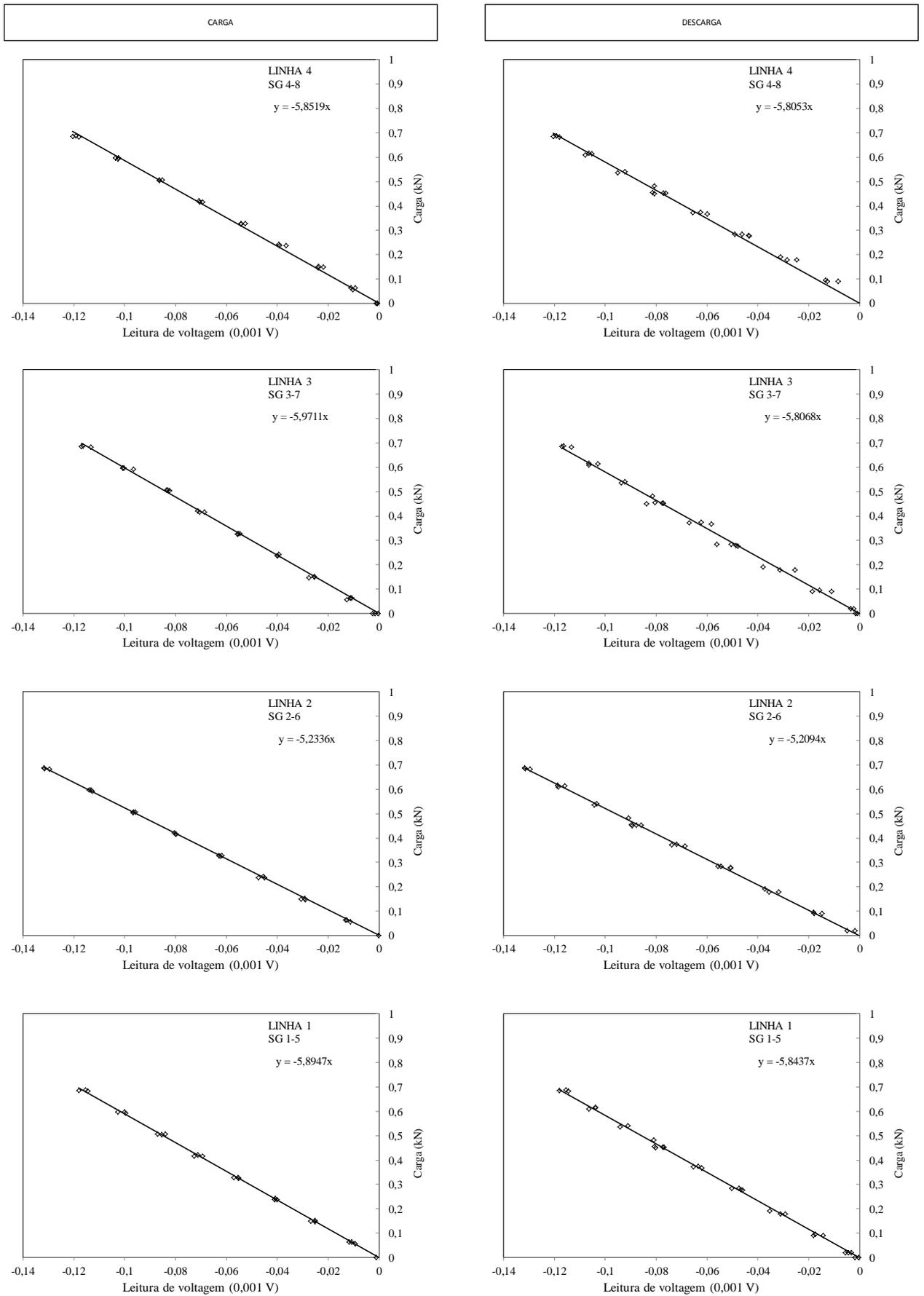


Figura B. 1. Calibração de *strain gauges* para a Estaca 1

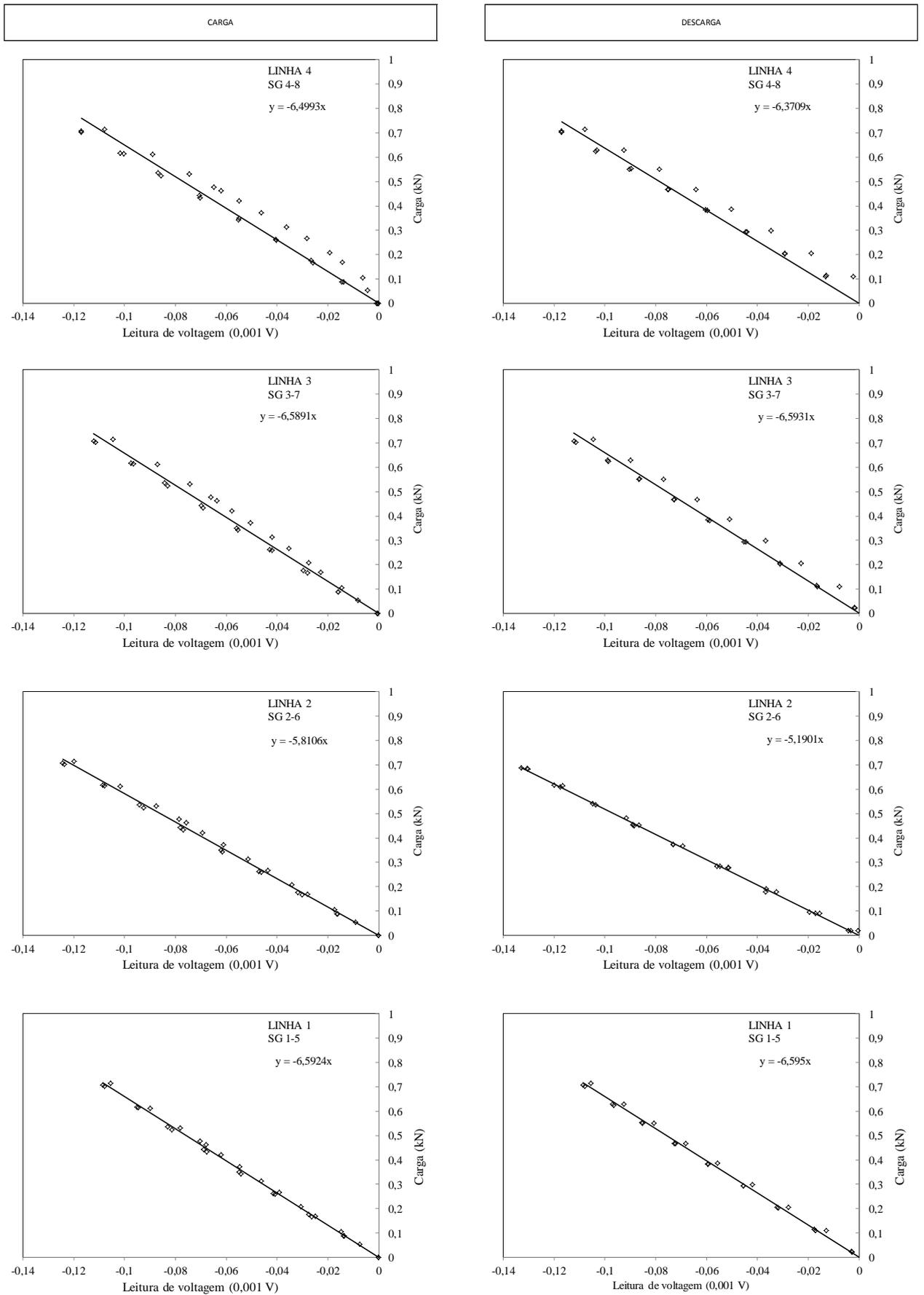
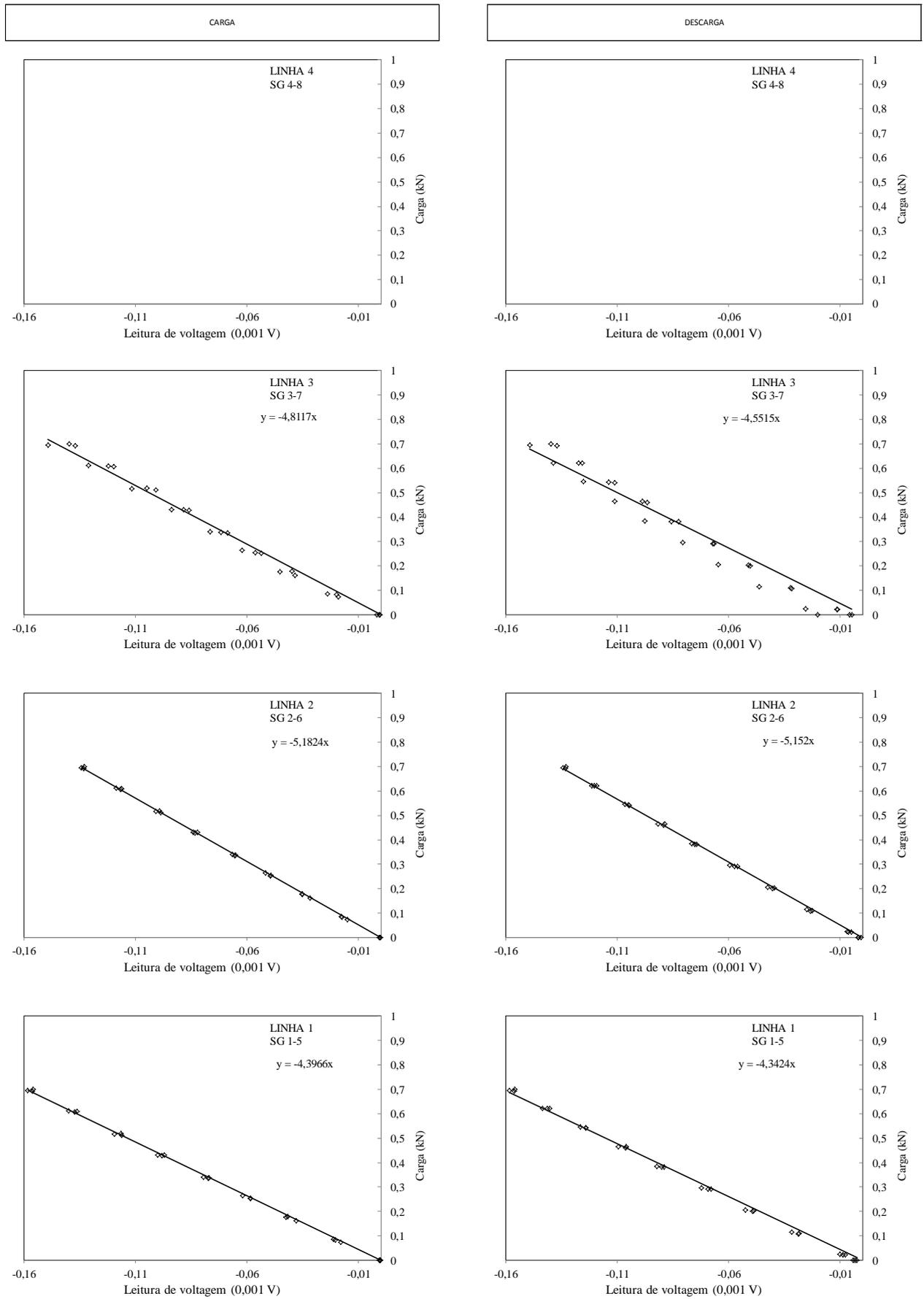
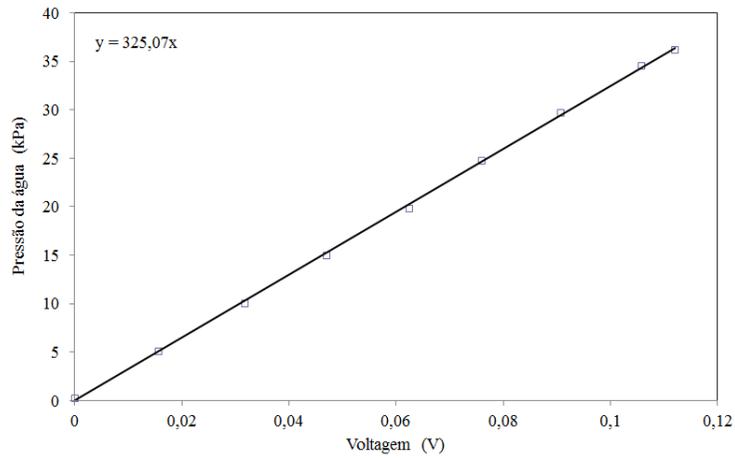


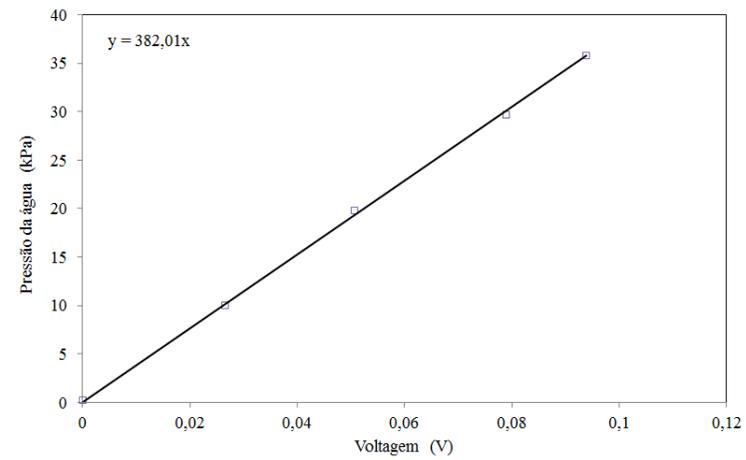
Figura B. 2. Calibração de *strain gauges* para a Estaca 2



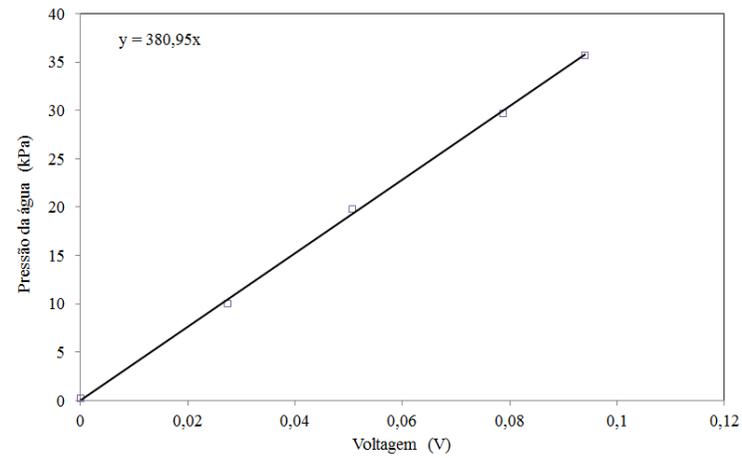
**Figura B. 3.** Calibração de strain gauges para a Estaca 3



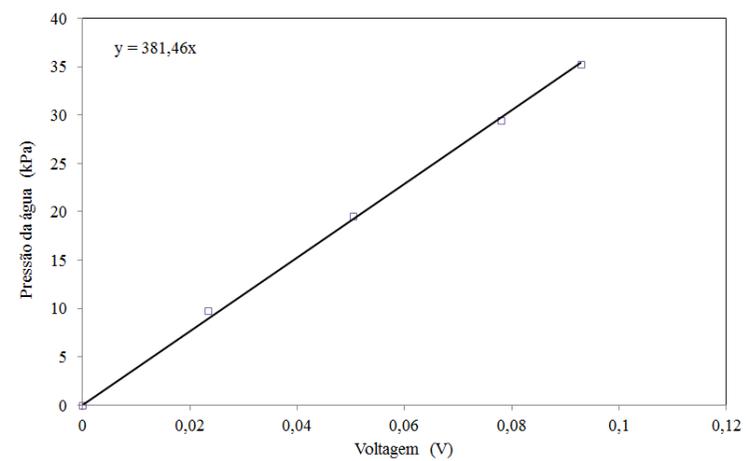
Piezômetro 1



Piezômetro 2

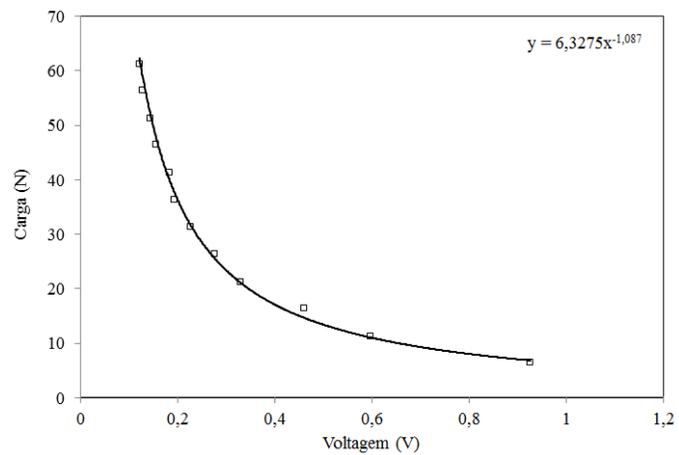


Piezômetro 3

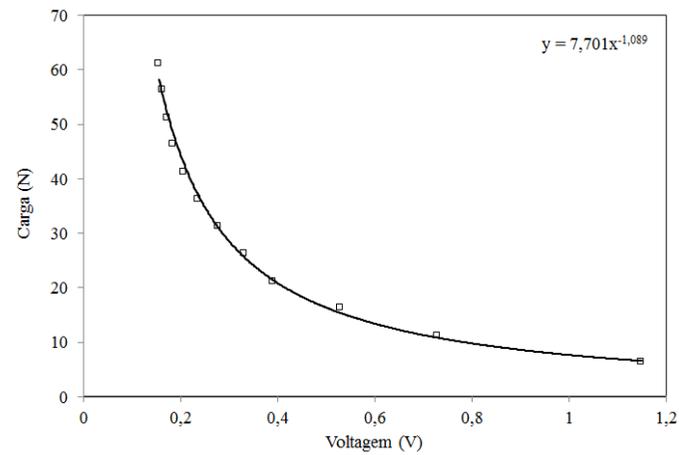


Piezômetro 4

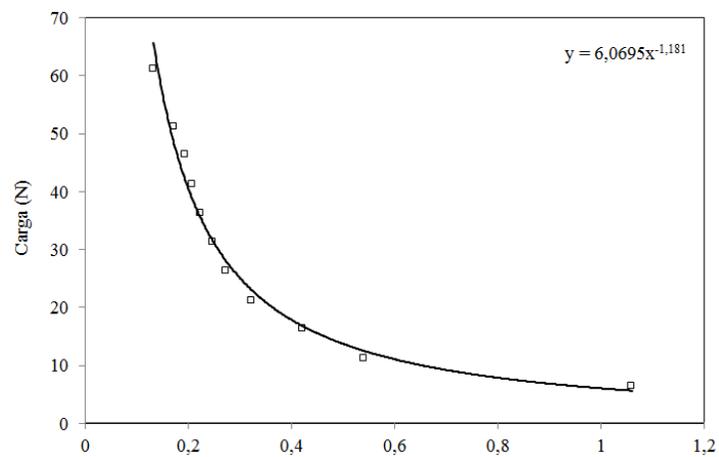
**Figura B. 4.** Calibração de piezômetros tipo Haneywell



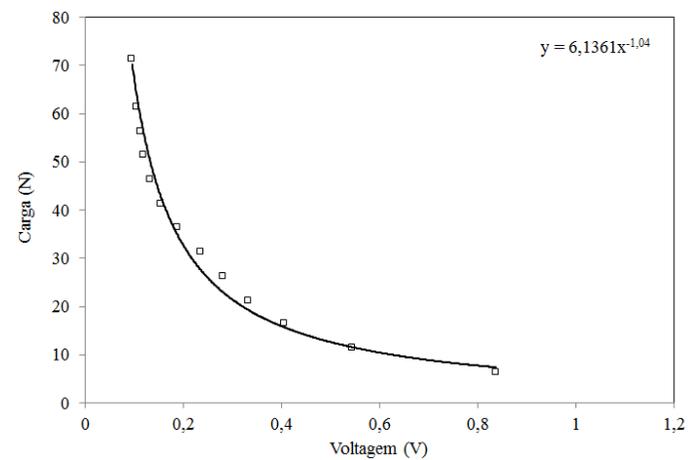
Célula f1



Célula f2



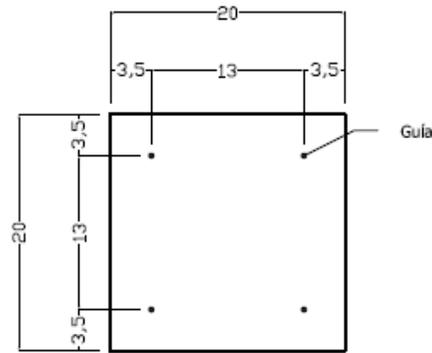
Célula f3



Célula f4

Figura B. 5. Calibração de células de carga tipo Flexiforce

## **Apêndice C. Projeto de sistemas radier estaqueado**

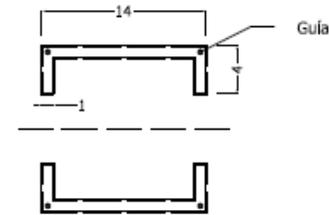


**M1. Somente radler**

Radler em alumínio ou duralumínio de 1cm de espessura.

Todas as placas )radler= devem ser niveladas para garantir horizontalidade.

Os elementos indicados como guias, encontram-se na mesma localização em todas as placas e correspondem as guias para colocação da peça de carga P2.



Peça de carga P2. ( São dois elementos separados).

Seção C de alumínio ou duralumínio de 3xm de altura.

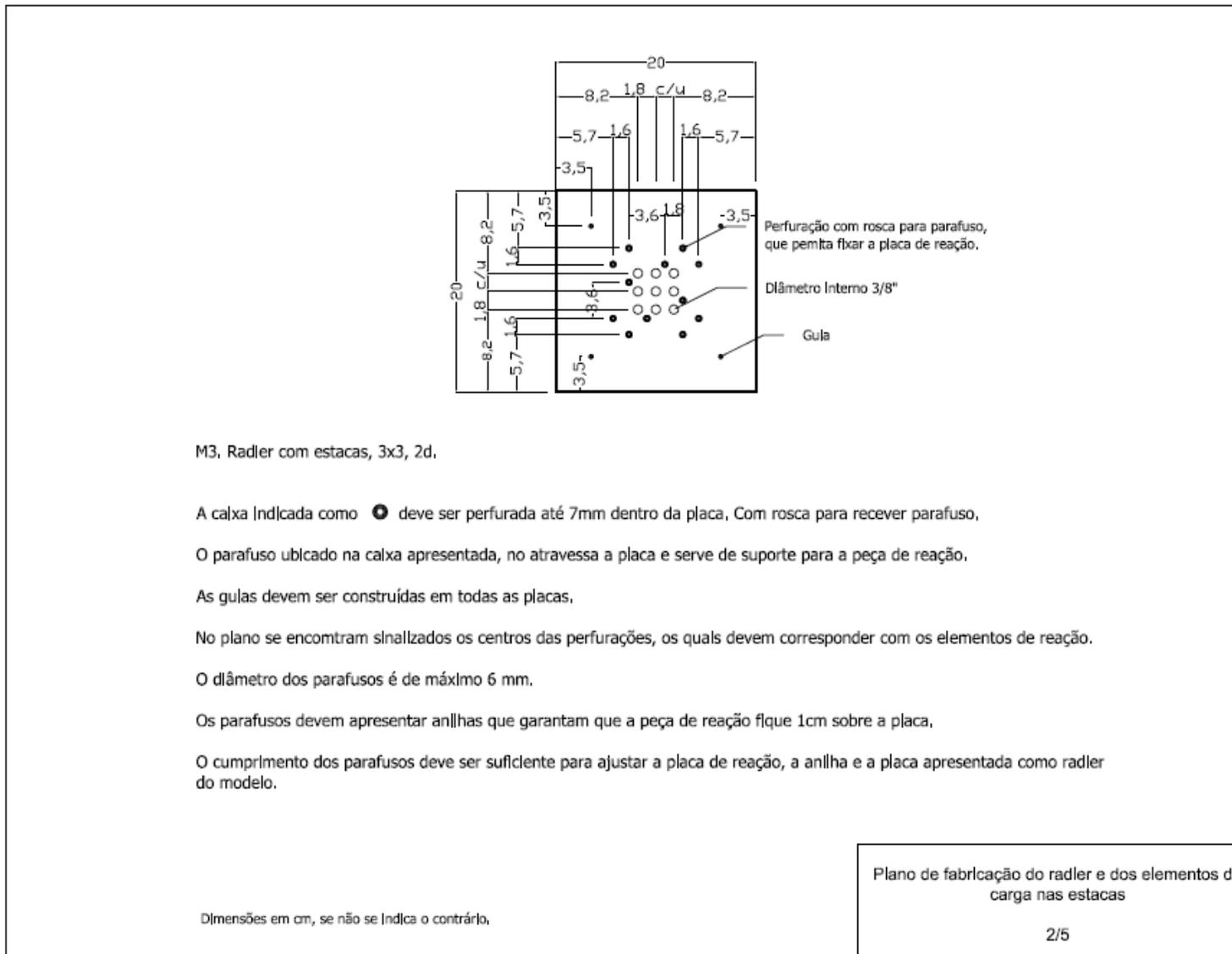
Deve conter perfurações na mesma localização as guias das placas.

Dimensões em cm, se não se indica o contrário.

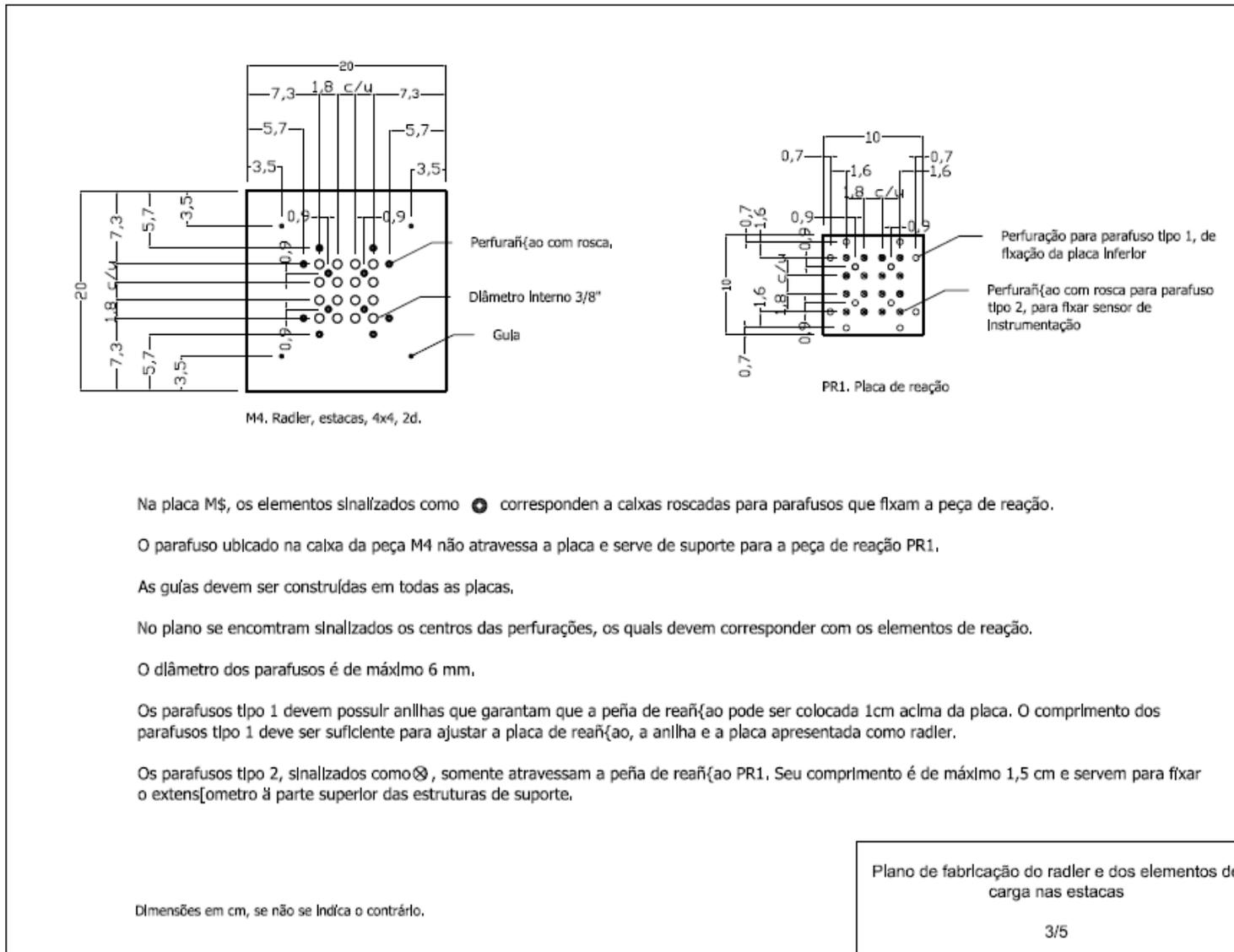
Plano de fabricação do radler e dos elementos de carga nas estacas

1/5

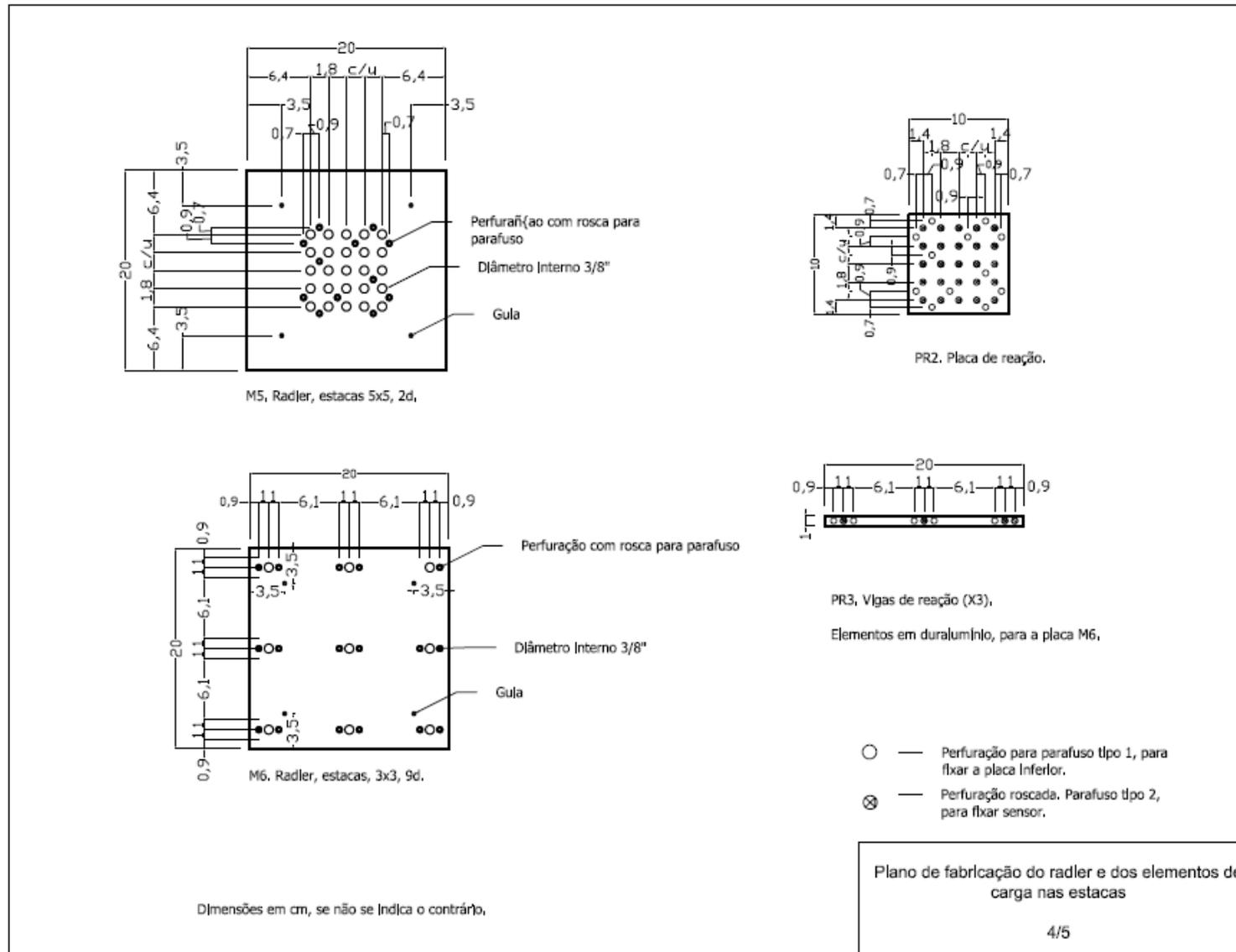
**Figura C. 1.** Plano No 1 de fabricação do radler e dos elementos de carga nas estacas.



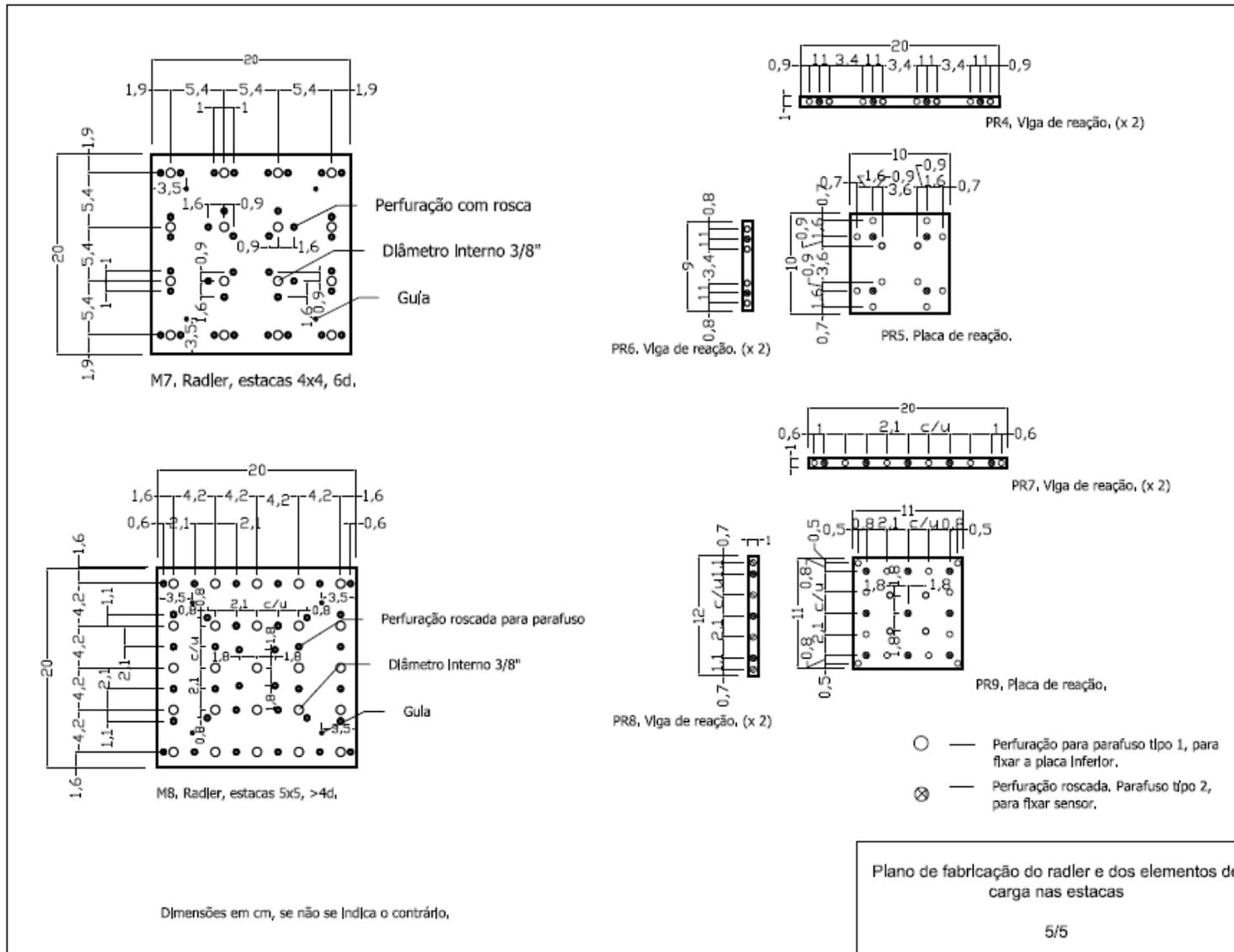
**Figura C. 2.** Plano No 2 de fabricação do radler e dos elementos de carga nas estacas.



**Figura C. 3.** Plano No 3 de fabricação do radier e dos elementos de carga nas estacas.

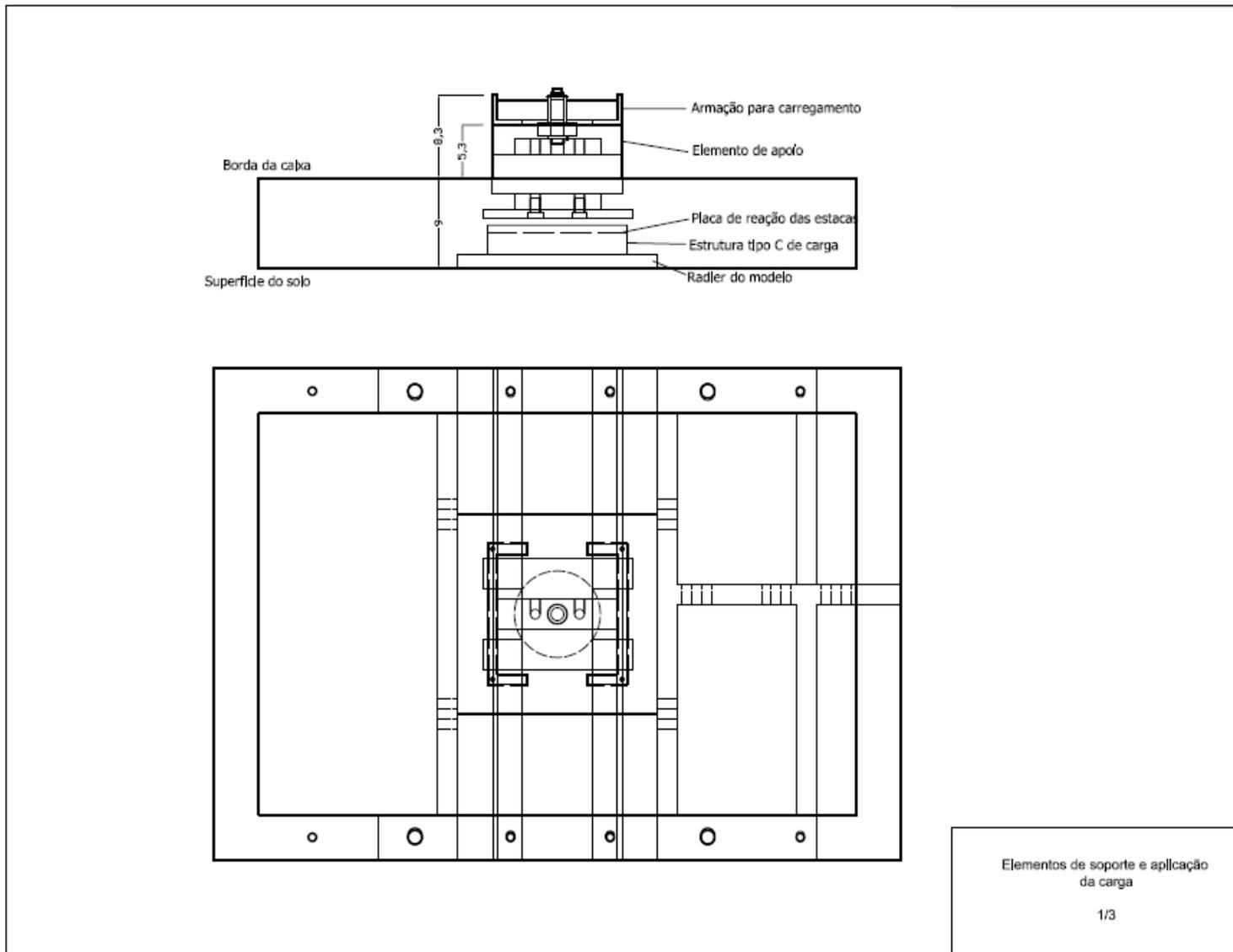


**Figura C. 4.** Plano No 4 de fabricação do radier e dos elementos de carga nas estacas.



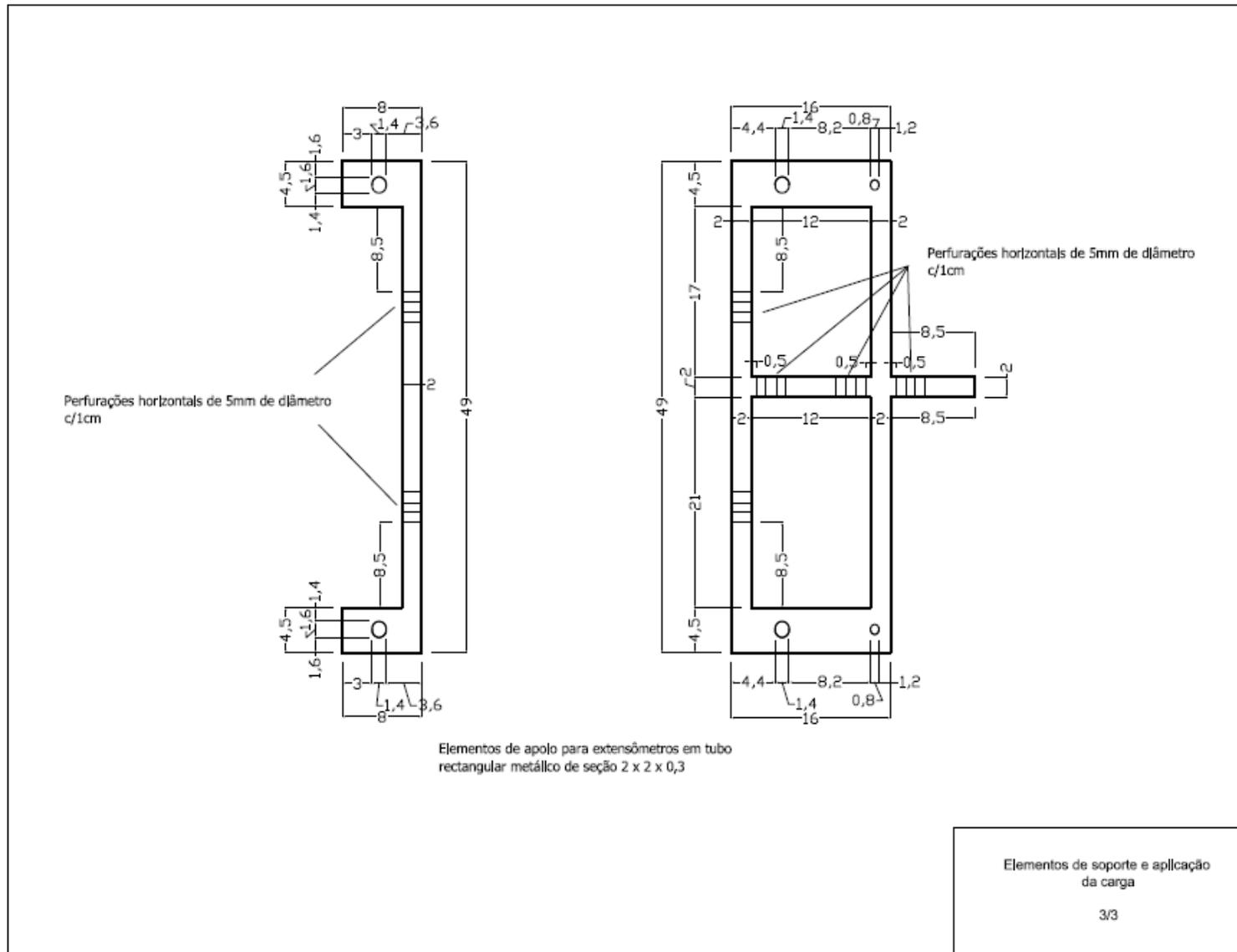
**Figura C. 5.** Plano No 5 de fabricação do radier e dos elementos de carga nas estacas.

**Apêndice D.** Projeto de elementos de suporte e aplicação da carga



**Figura D. 1.** Plano No. 1 de elementos de suporte e aplicação da carga.





**Figura D. 3.** Plano No. 3 de elementos de suporte e aplicação da carga.

**Apêndice E.** Resultados das leituras dos *strain gauges* nos modelos em escala 1/70

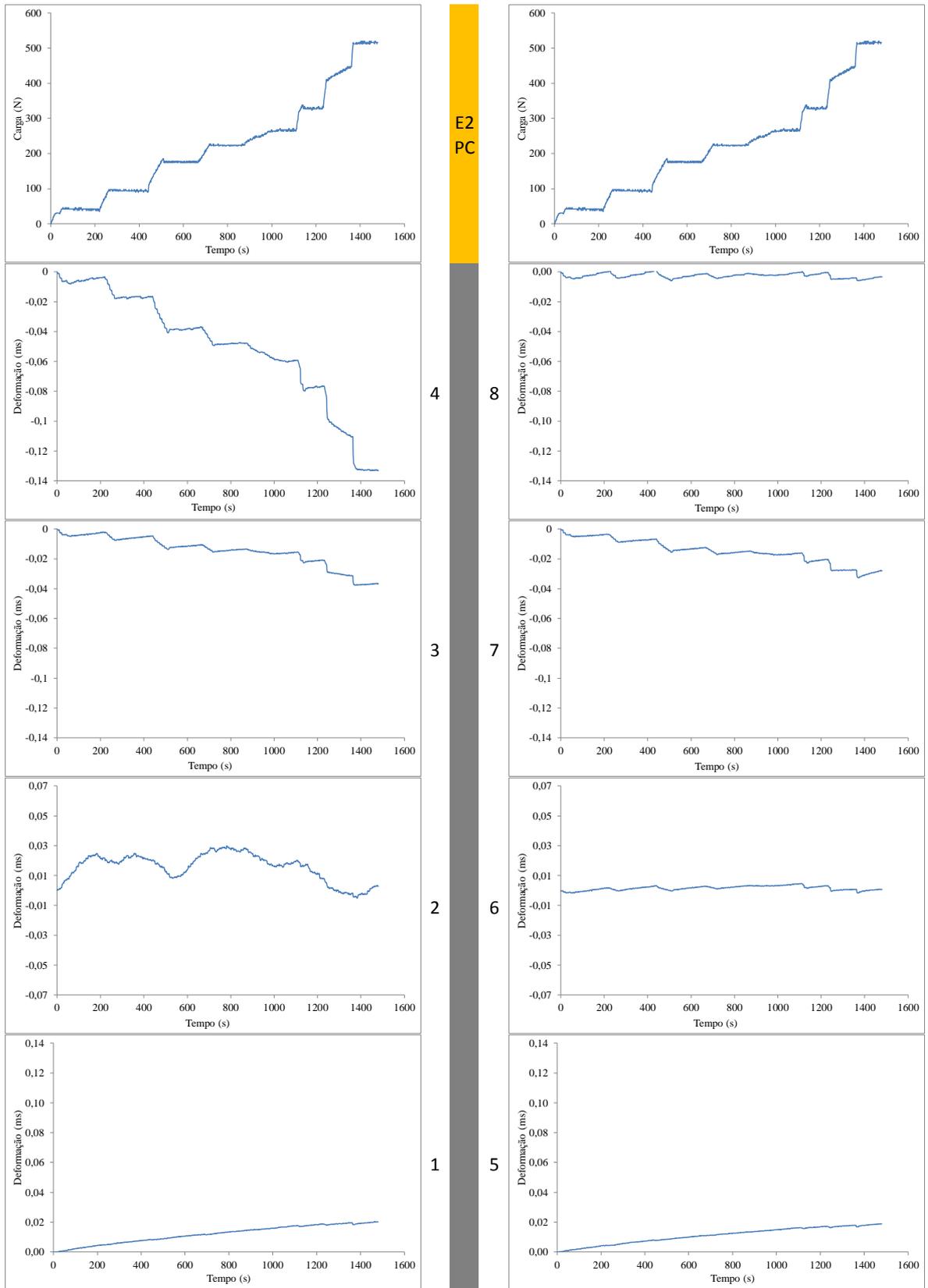


Figura E. 1. Strain gauges Estaca E2 – Modelo M2

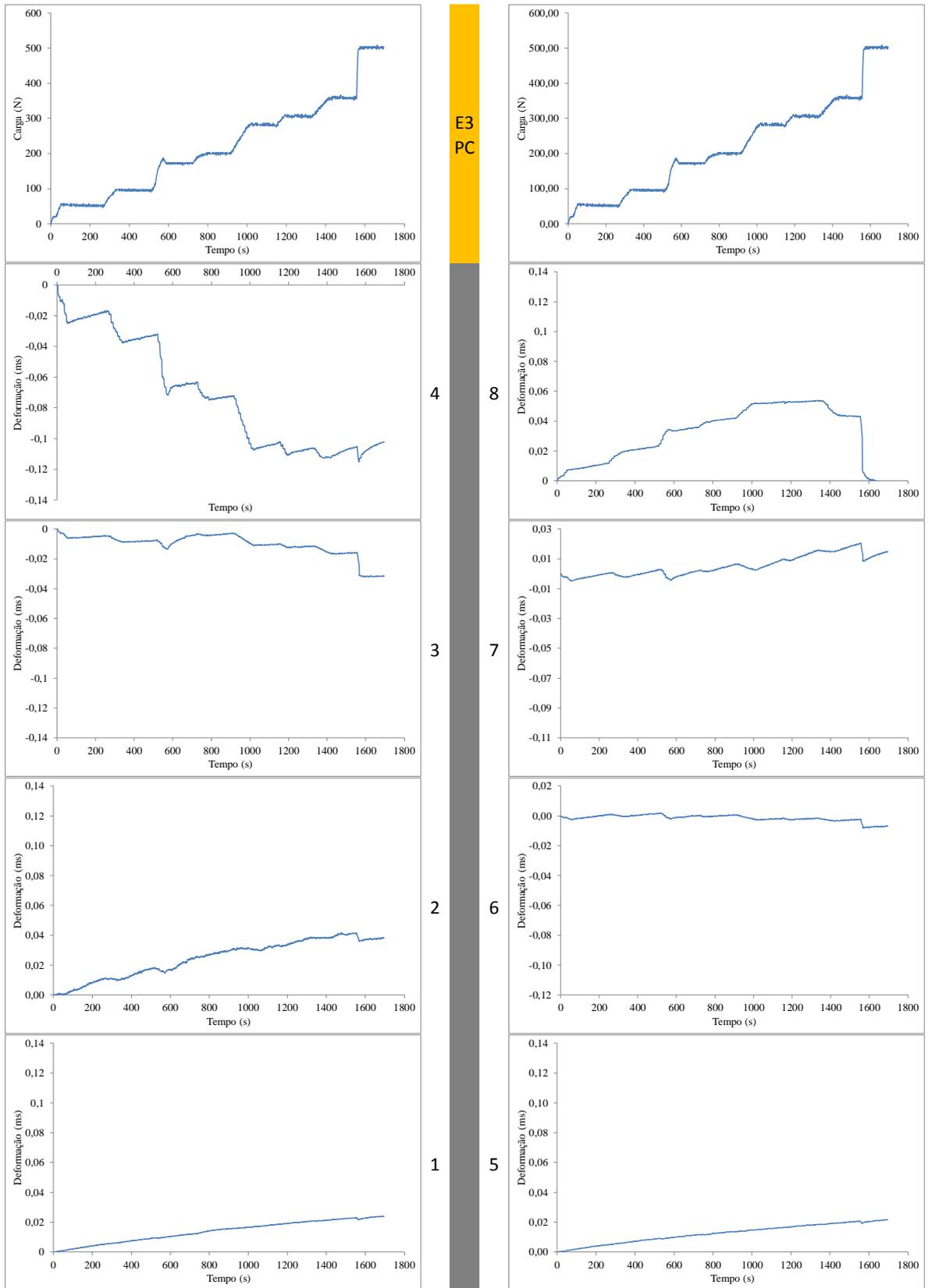


Figura E. 2. Strain gauges Estaca E3 – Modelo M2

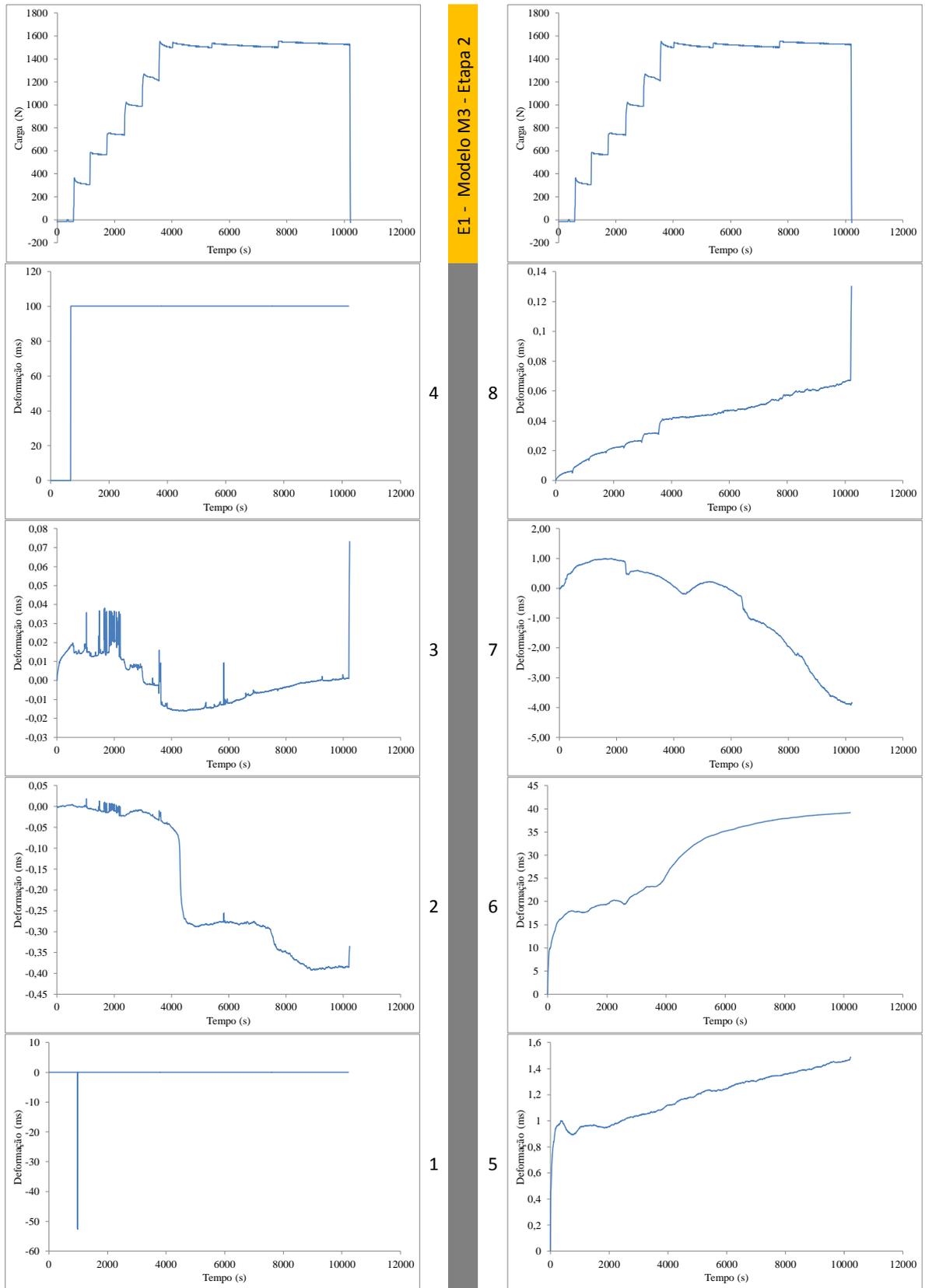
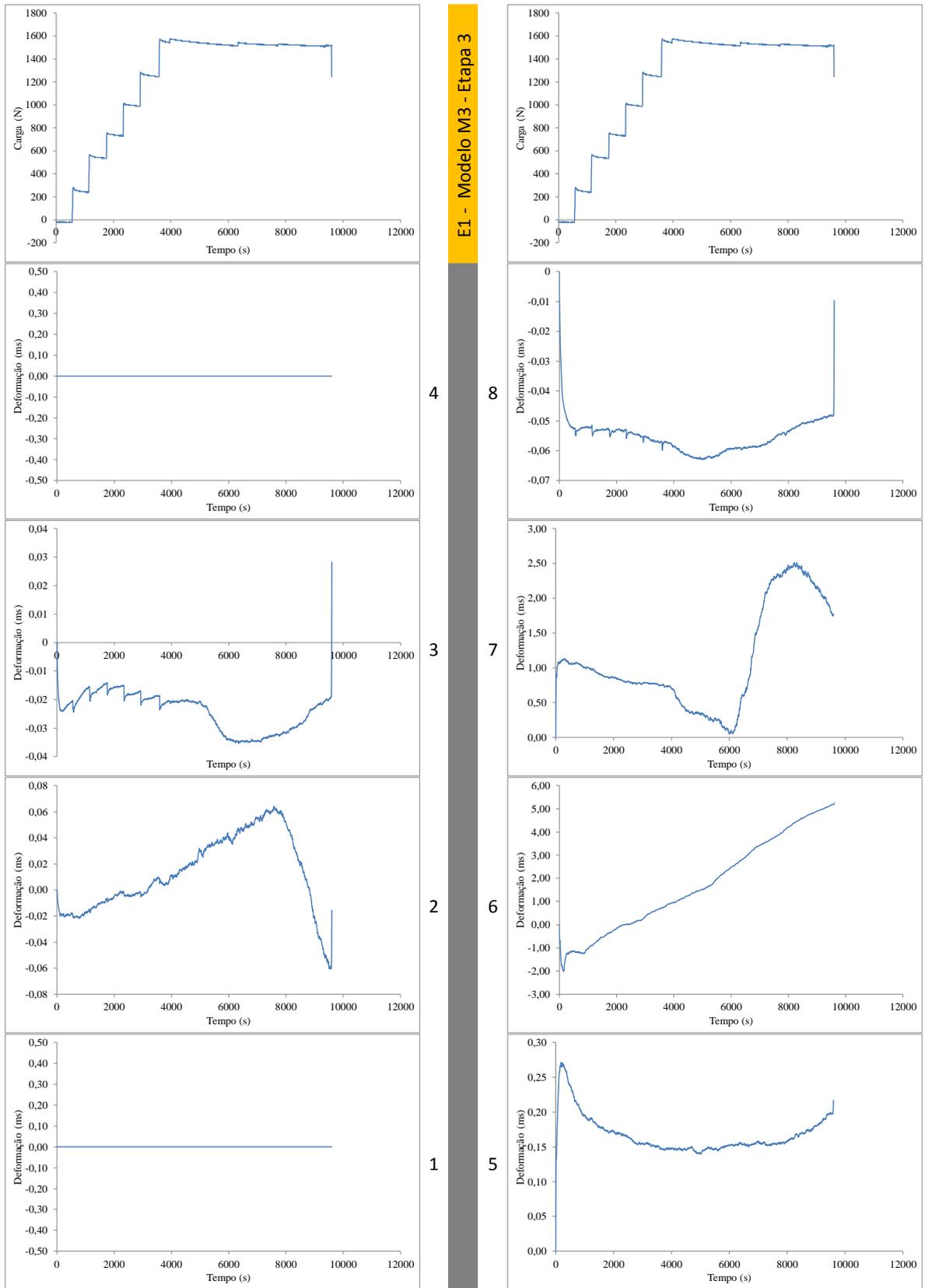


Figura E. 3. Strain gauges Estaca E1 – Modelo M3 – Etapa 2



**Figura E. 4.** Strain gauges Estaca E1 – Modelo M3 – Etapa 3

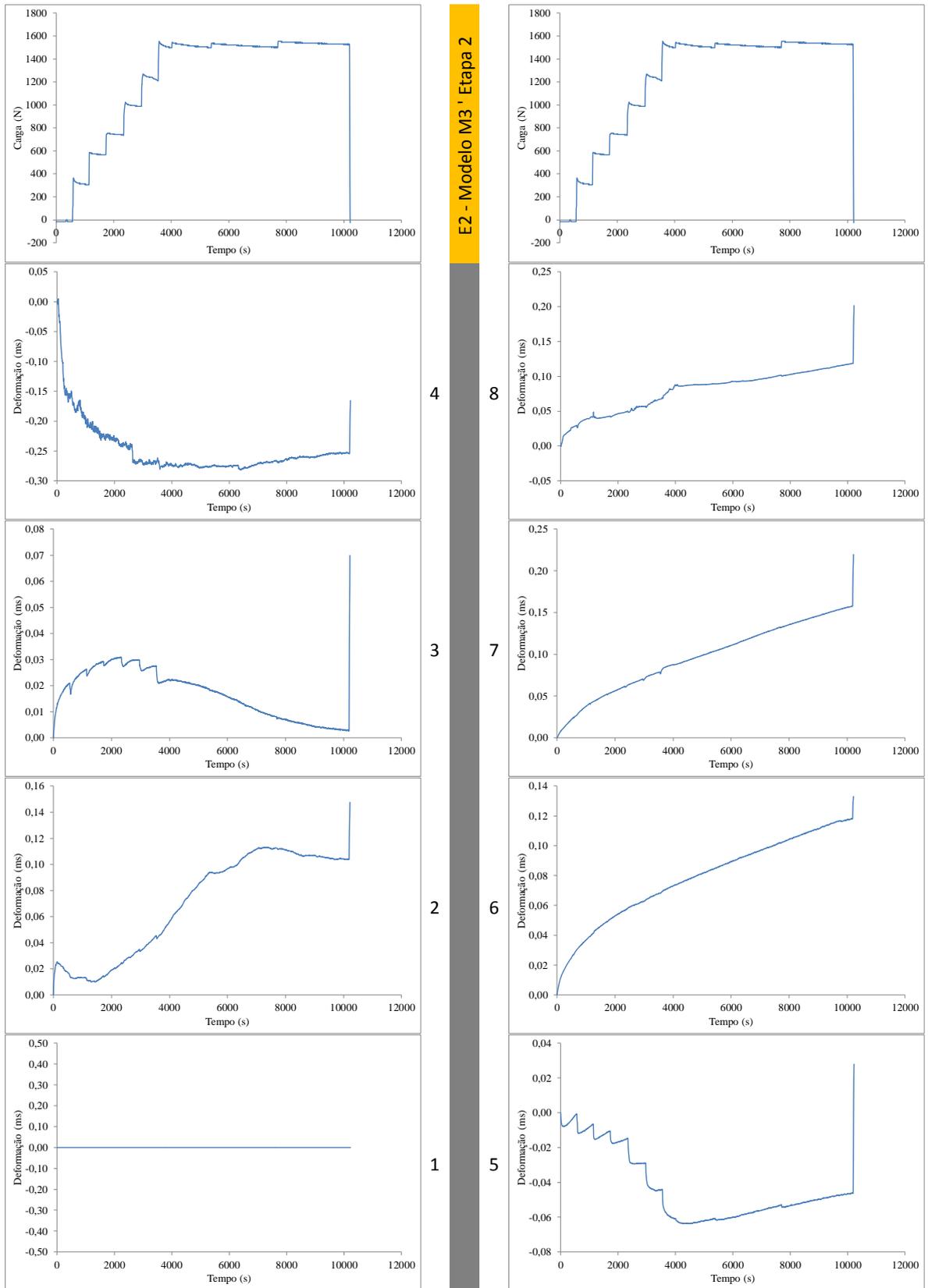


Figura E. 5. Strain gauges Estaca E2 – Modelo M3 – Etapa 2

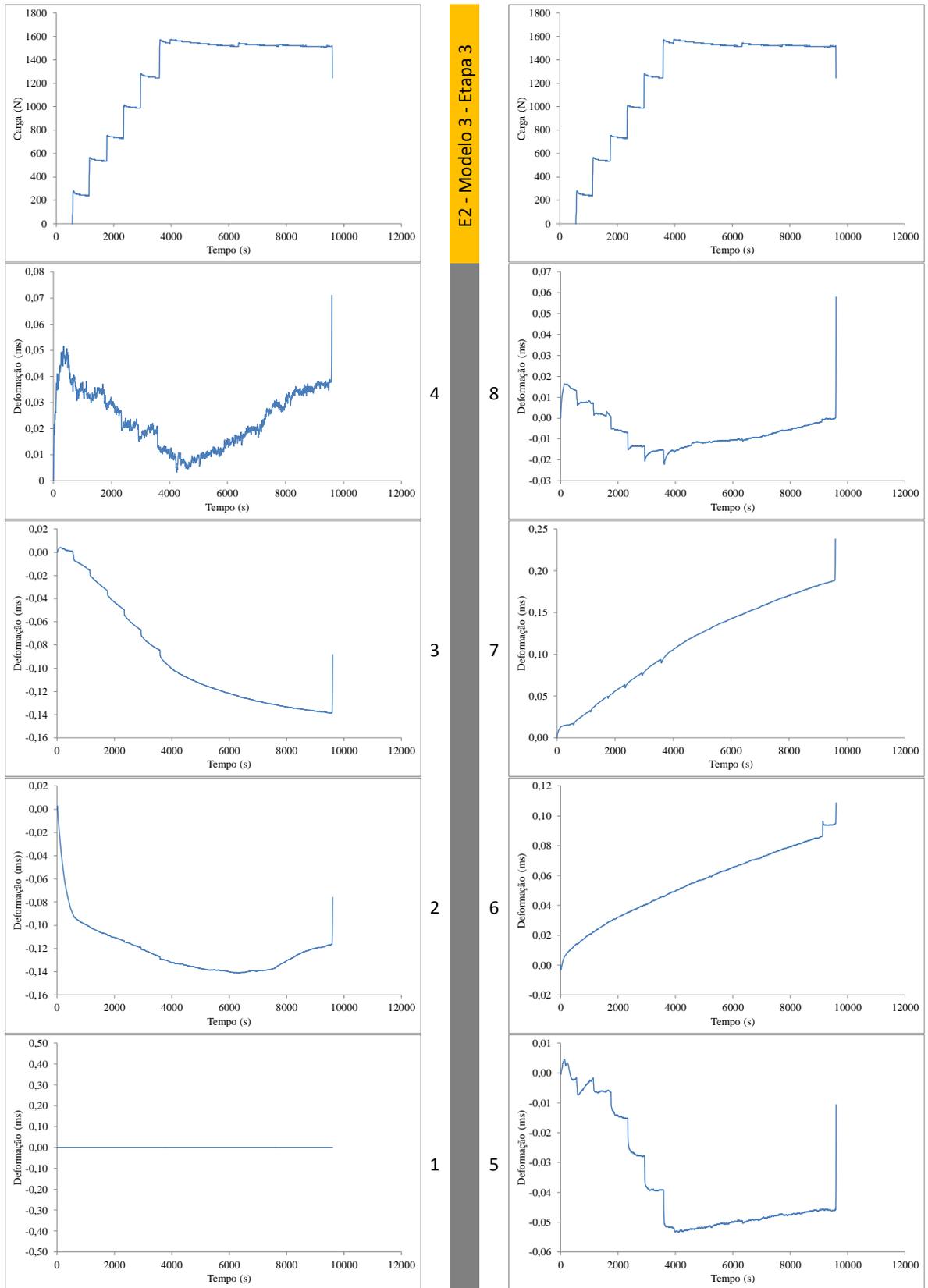


Figura E. 6. Strain gauges Estaca E2 – Modelo M3 – Etapa 3

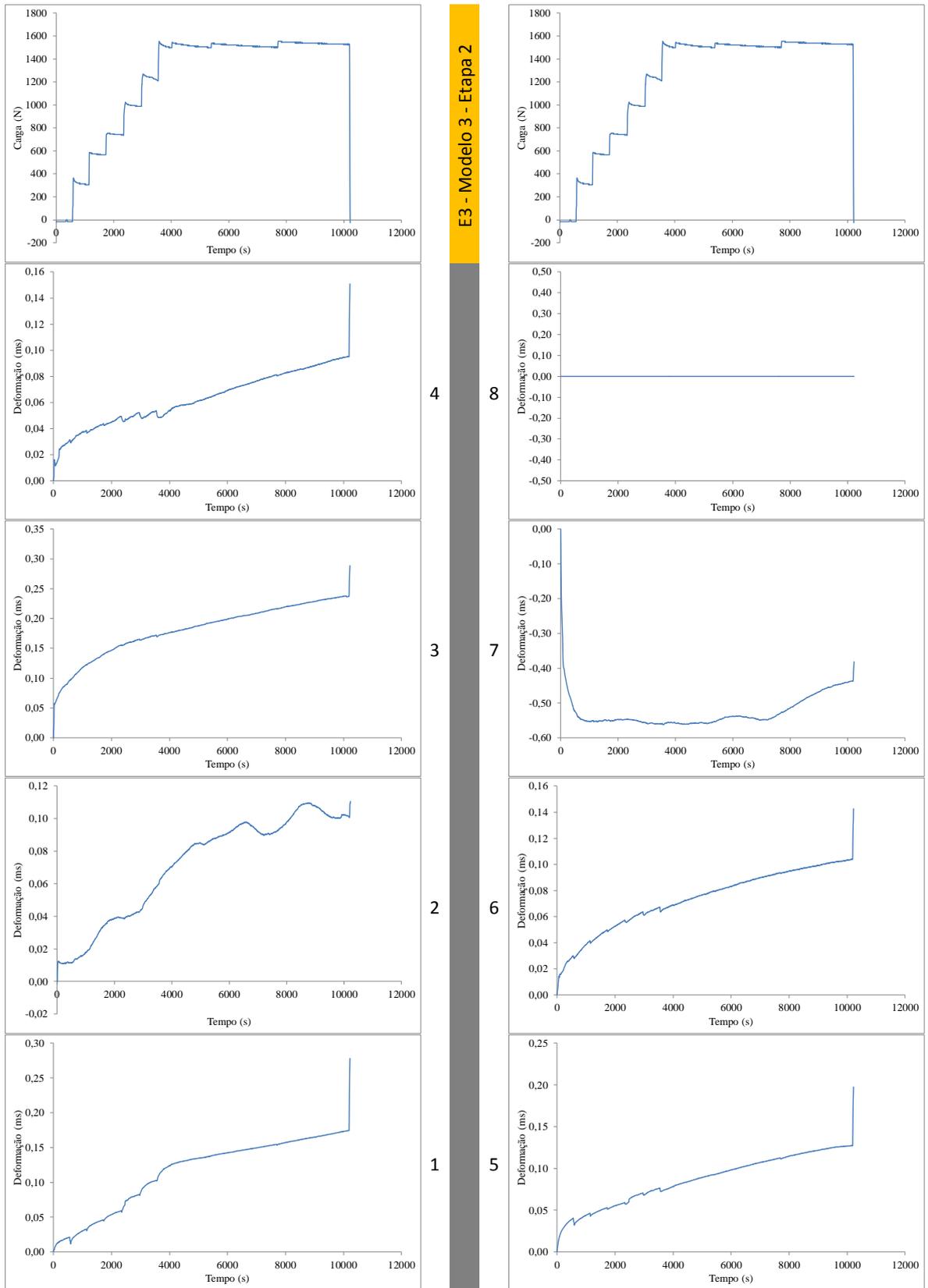
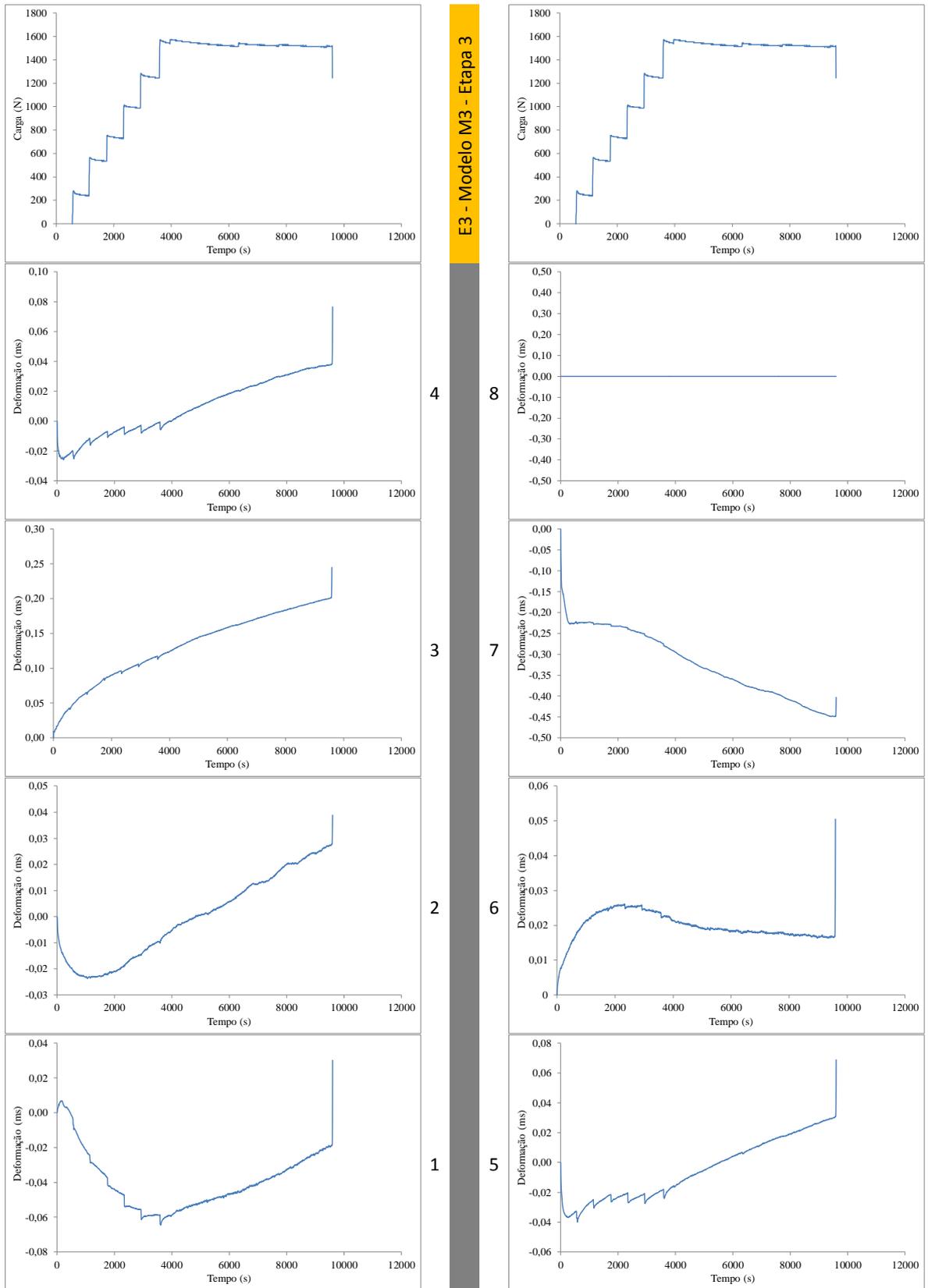


Figura E. 7. Strain gauges Estaca E3 – Modelo M3 – Etapa 2



**Figura E. 8.** Strain gauges Estaca E3 – Modelo M3 – Etapa 3

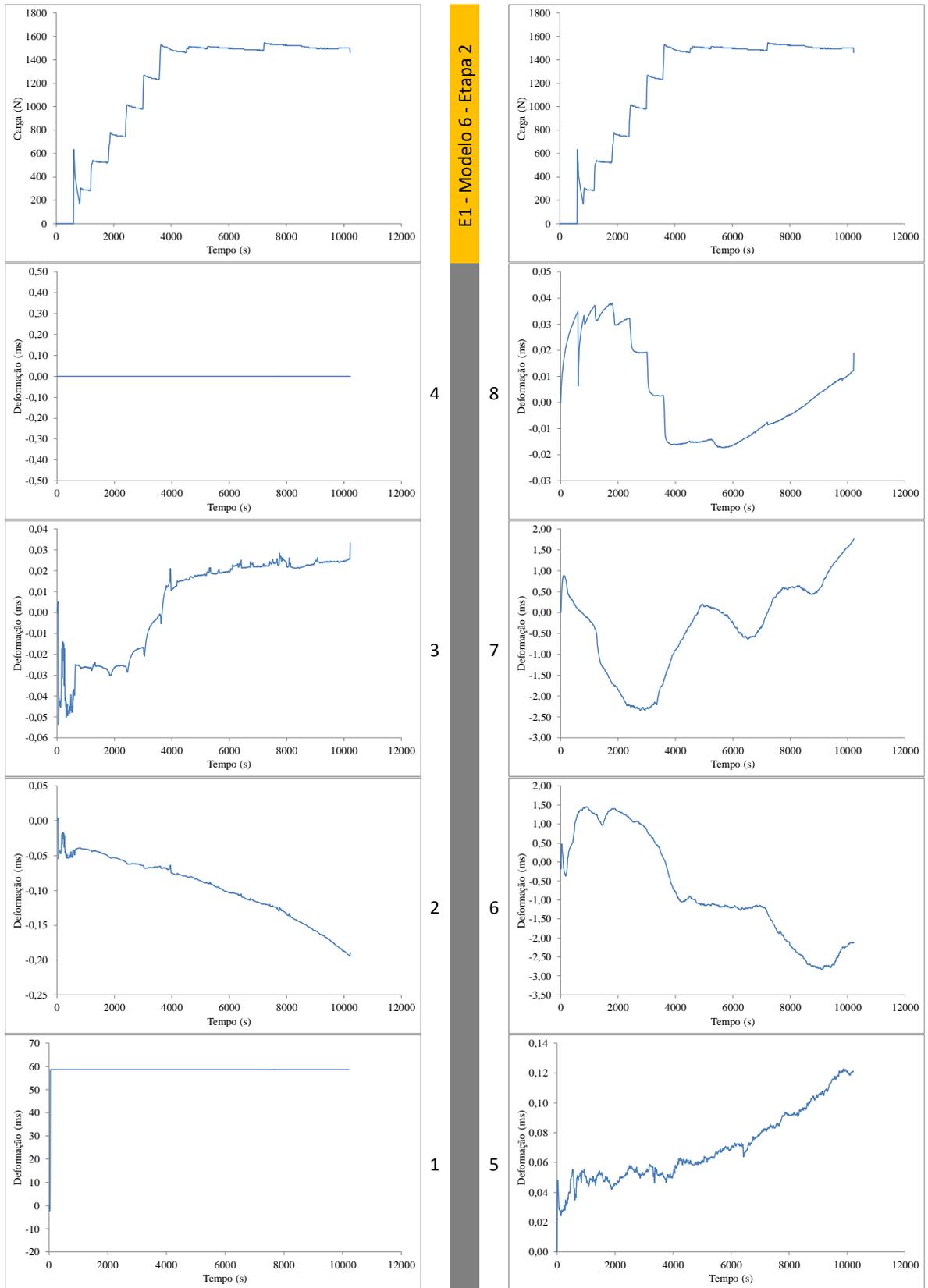
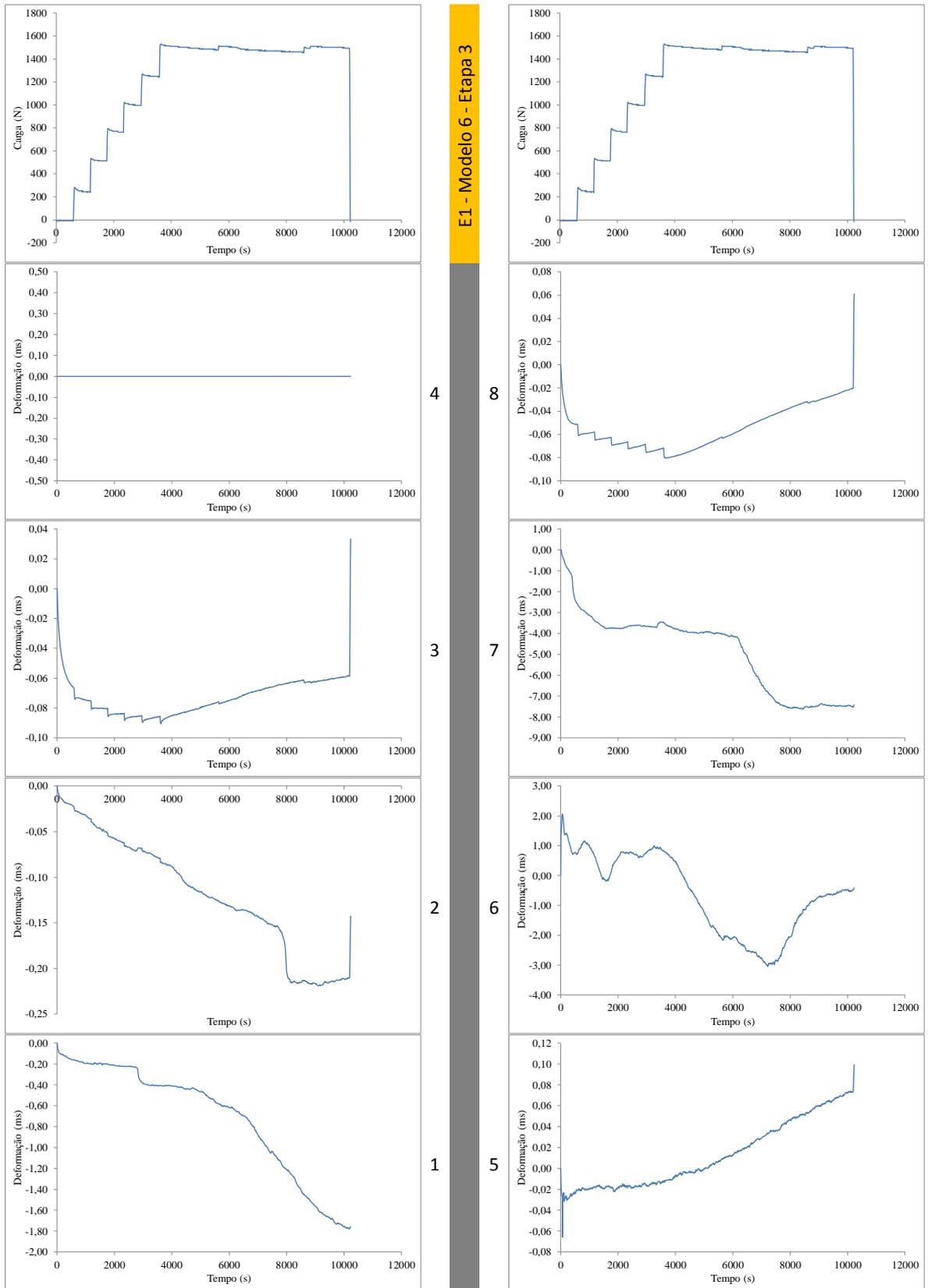


Figura E. 9. Strain gauges Estaca E1 – Modelo M6 – Etapa 2



**Figura E. 10.** Strain gauges Estaca E1 – Modelo M6 – Etapa 3

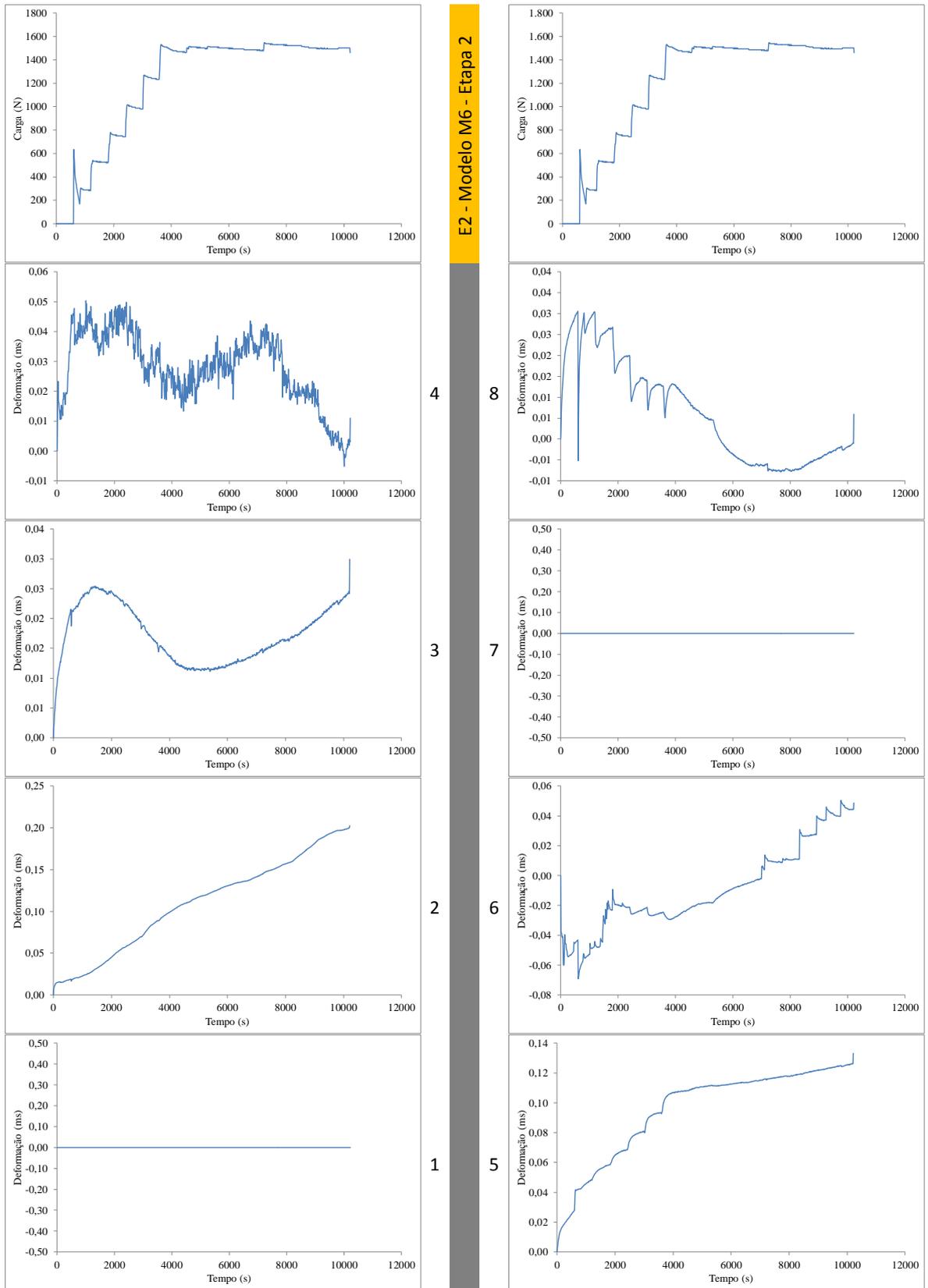
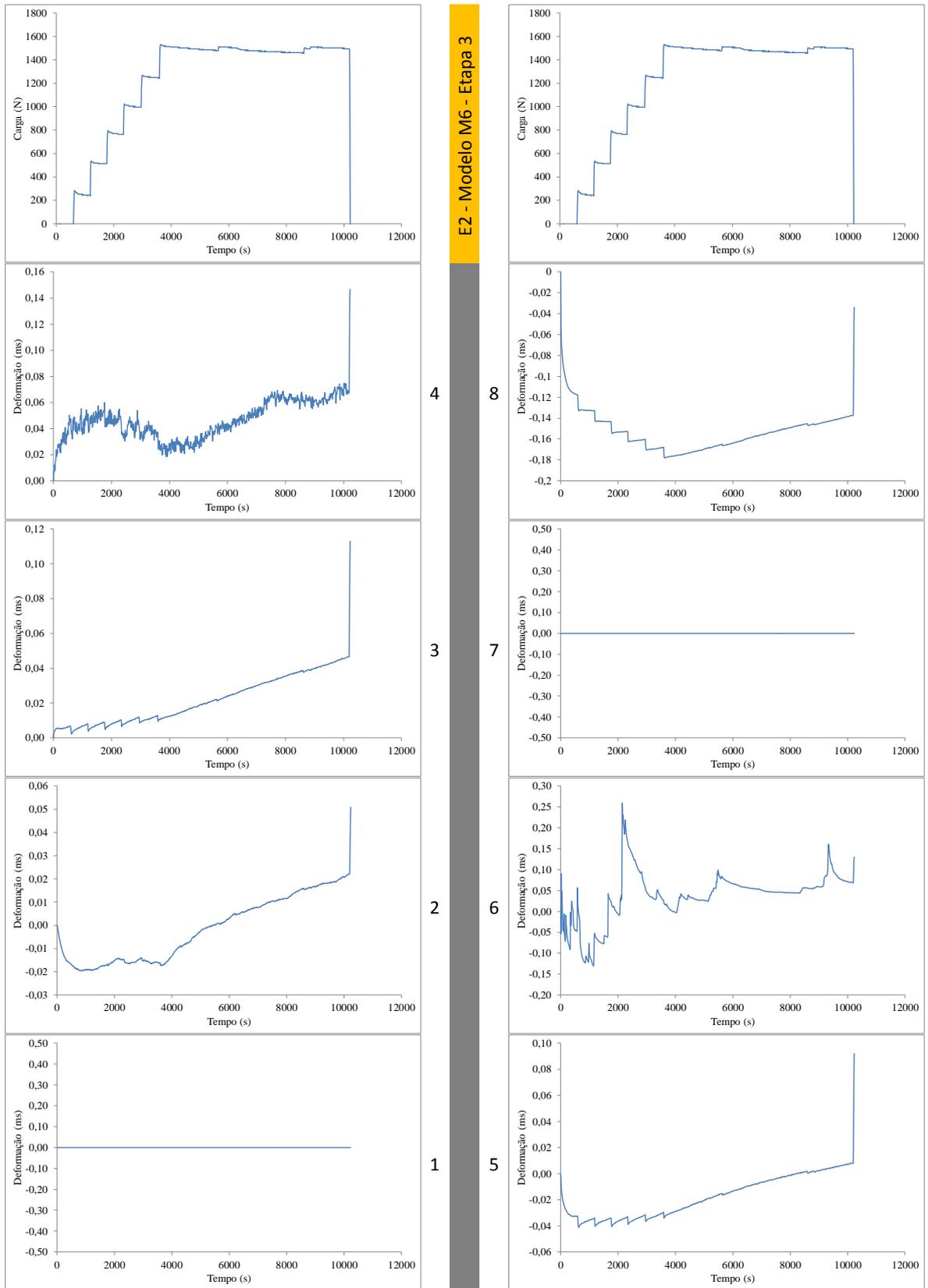
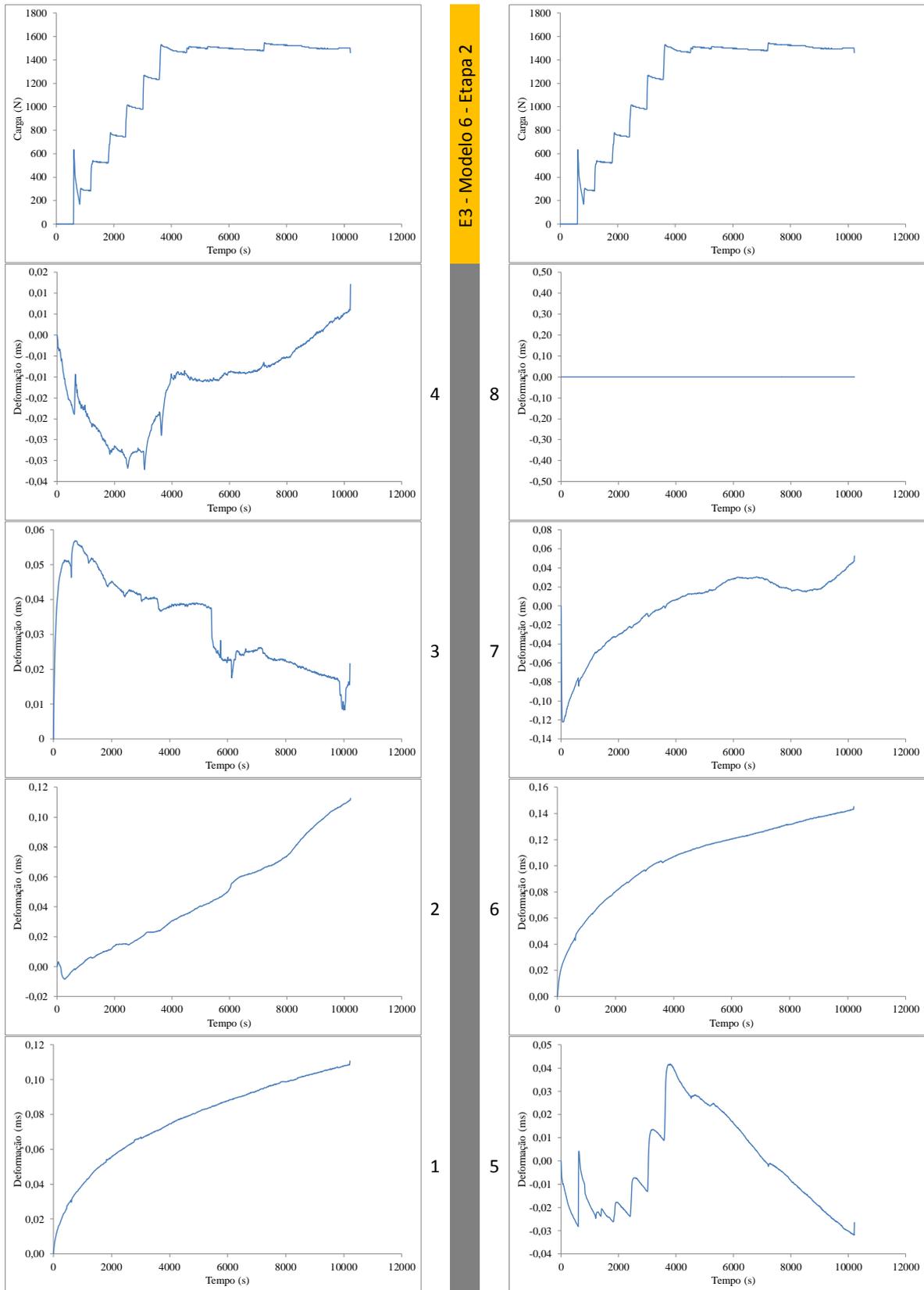


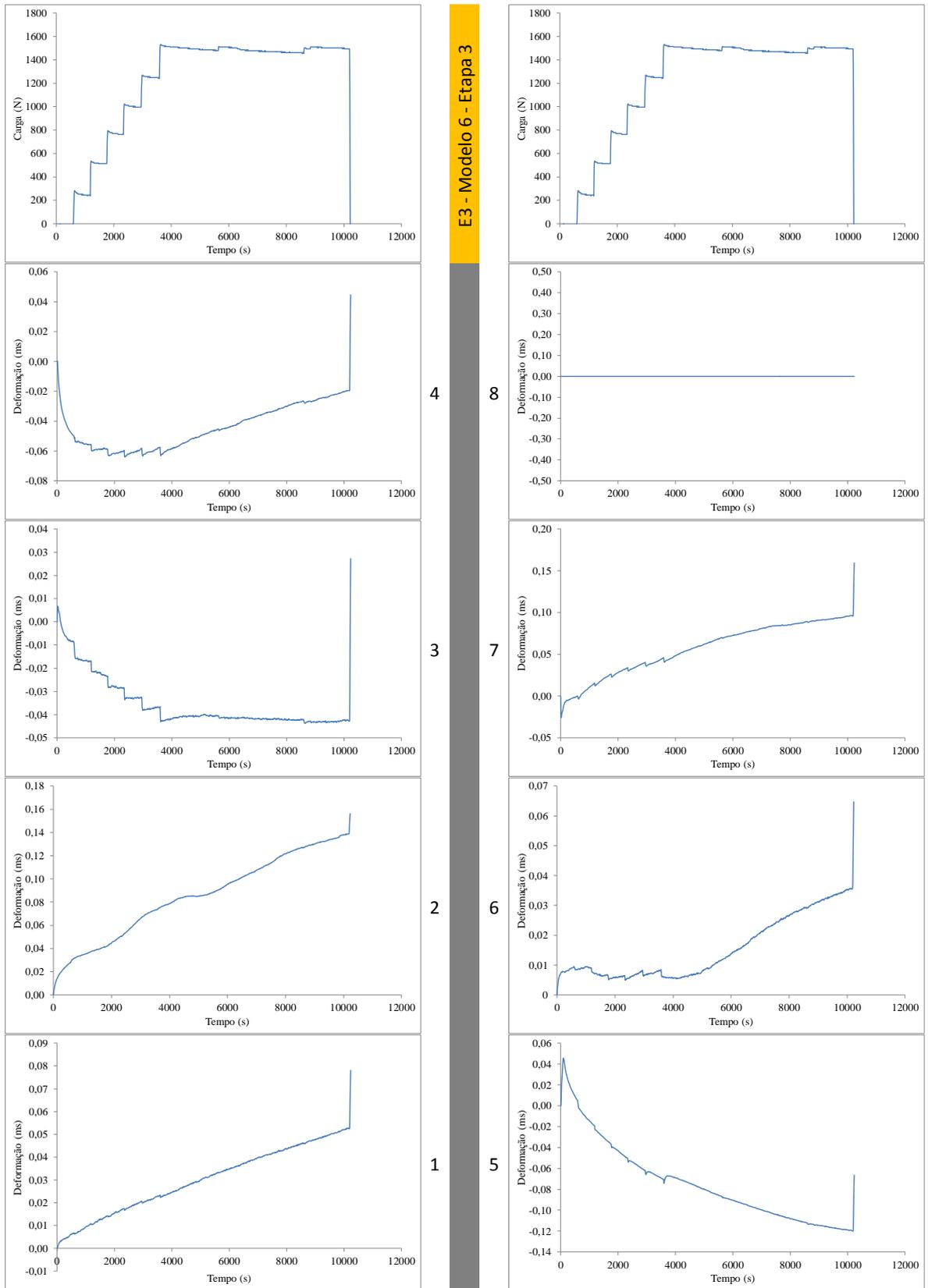
Figura E. 11. Strain gauges Estaca E2 – Modelo M6 – Etapa 2



**Figura E. 12.** Strain gauges Estaca E2 – Modelo M6 – Etapa 3



**Figura E. 13.** Strain gauges Estaca E3 – Modelo M6 – Etapa 2



**Figura E. 14.** Strain gauges Estaca E3 – Modelo M6 – Etapa 3

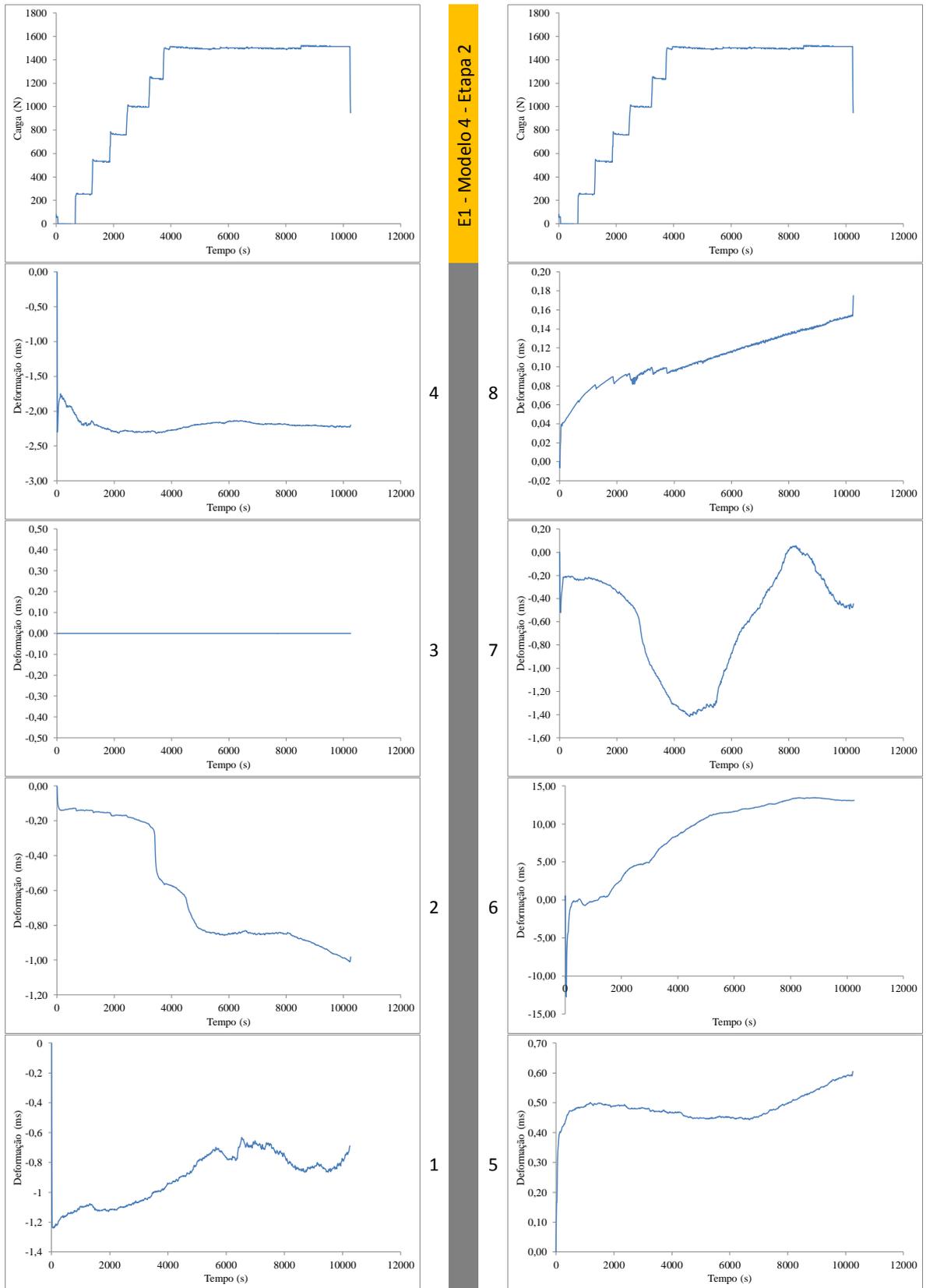
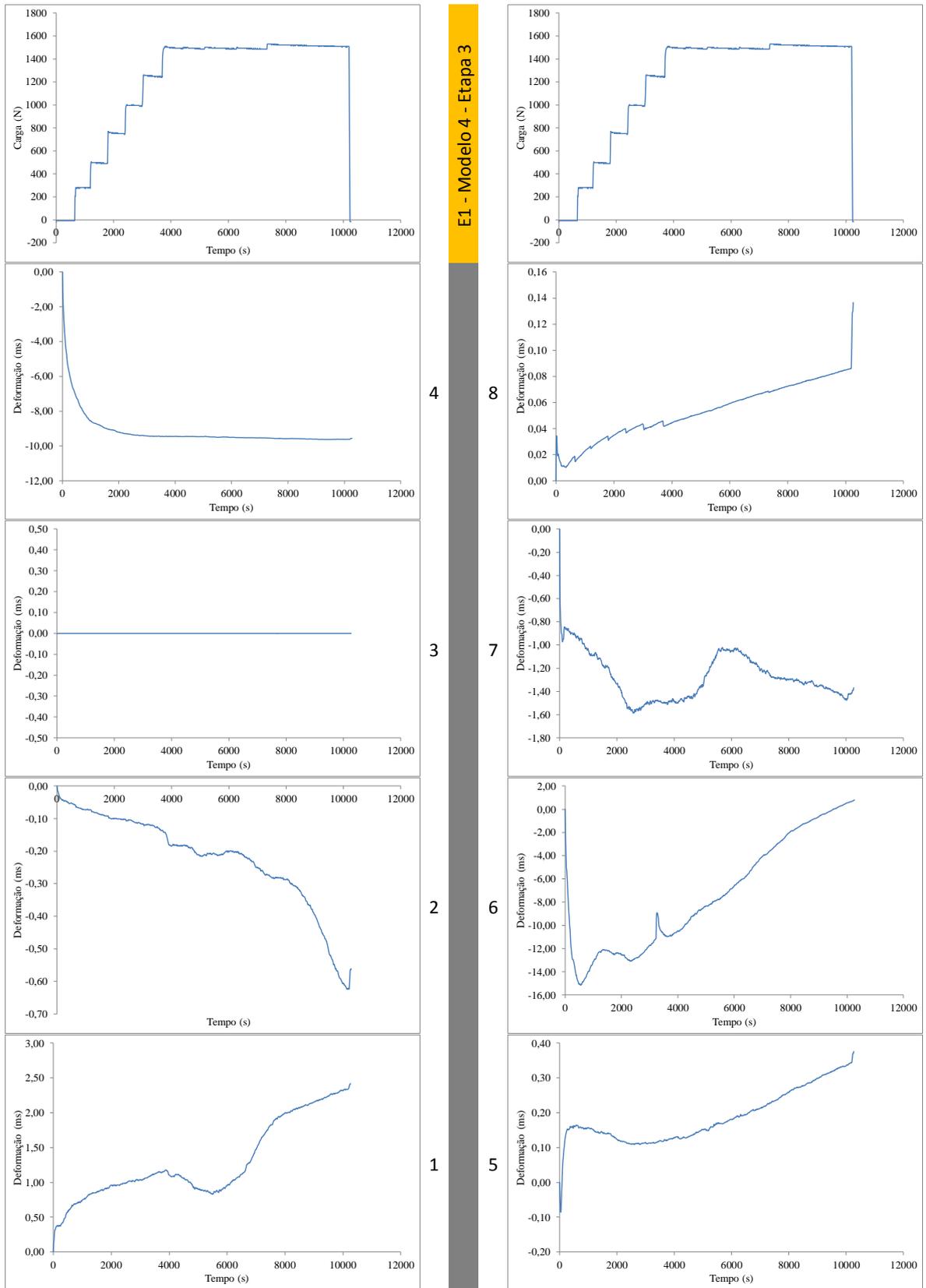
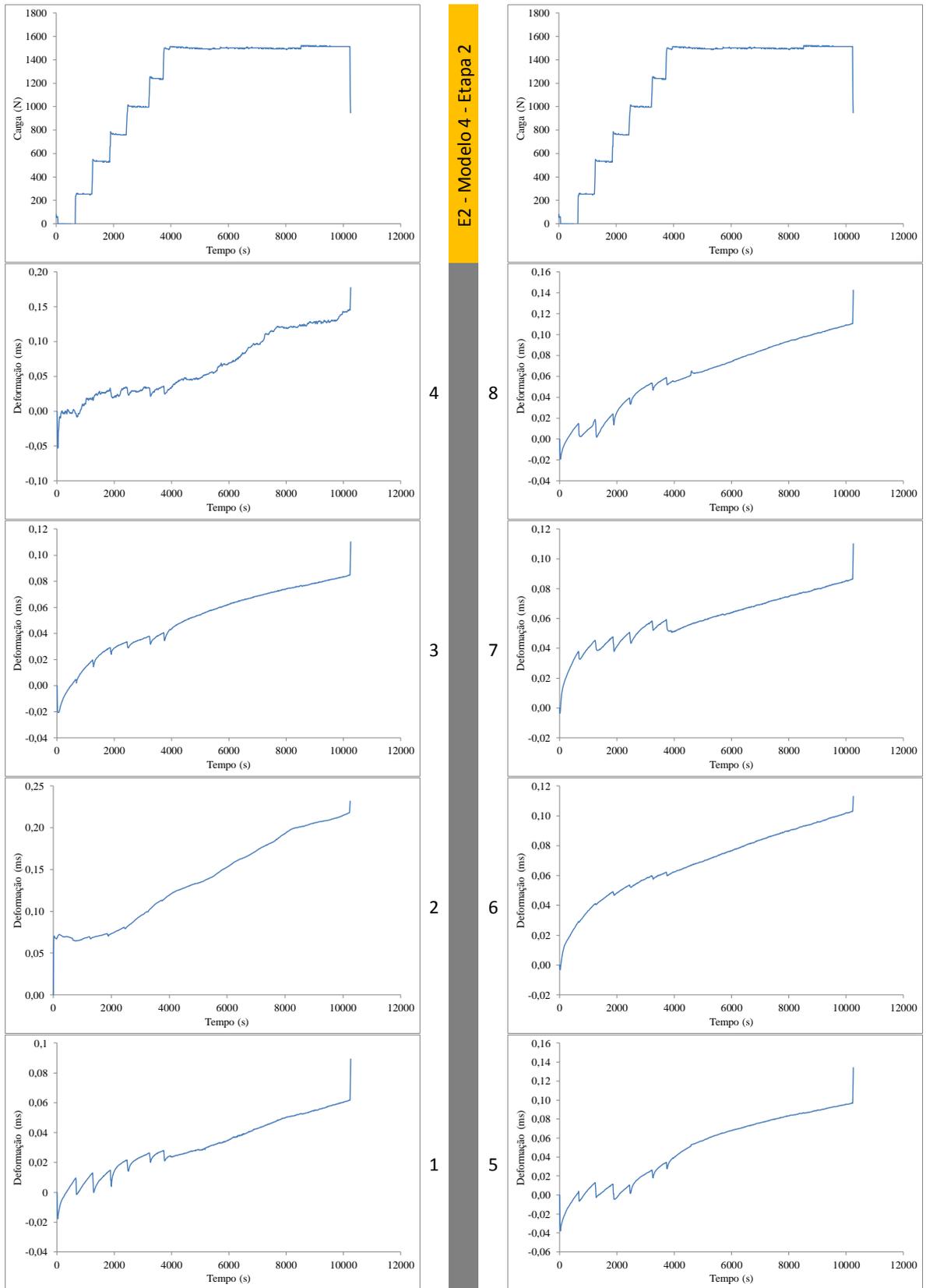


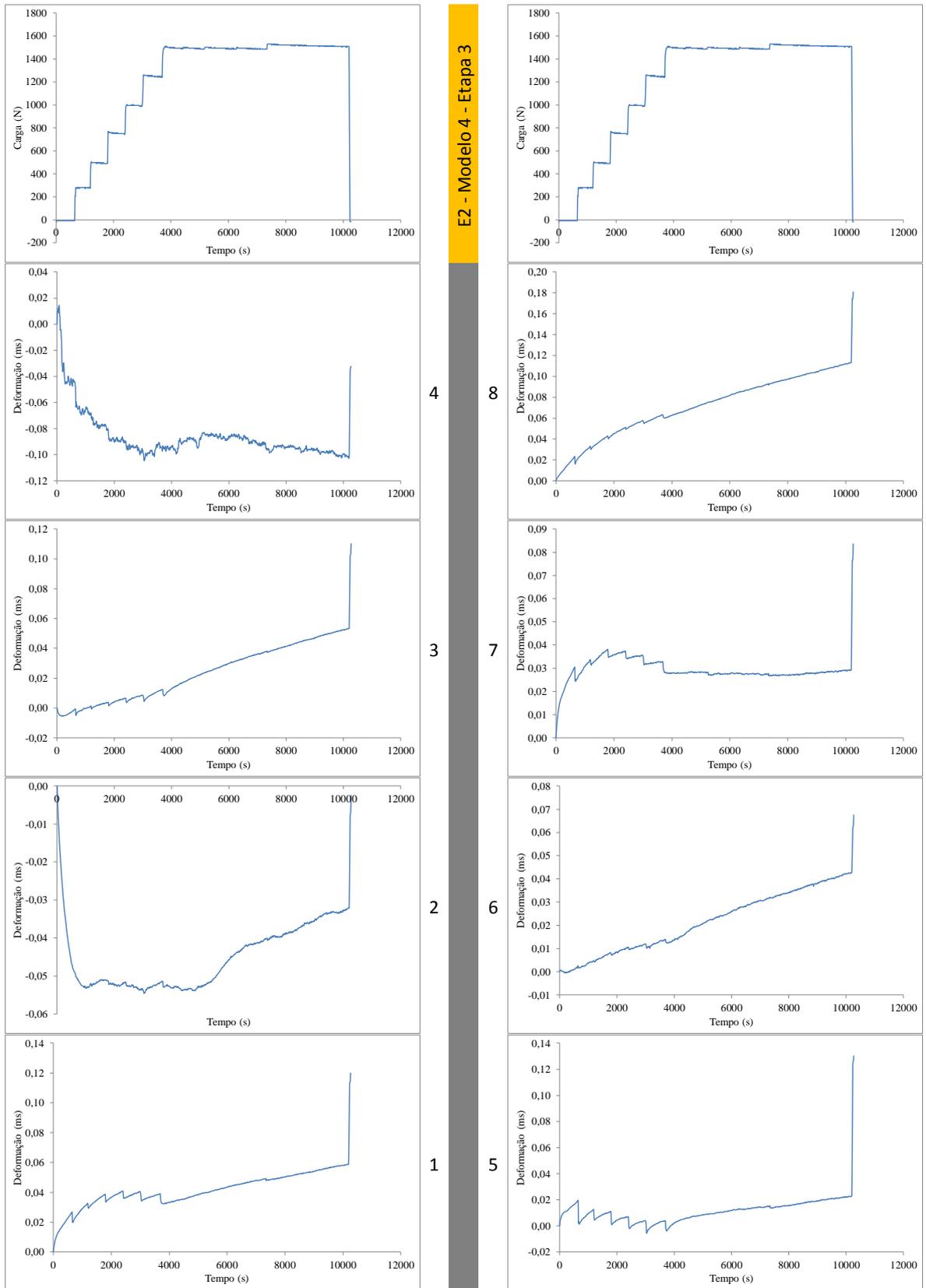
Figura E. 15. Strain gauges Estaca E1 – Modelo M4 – Etapa 2



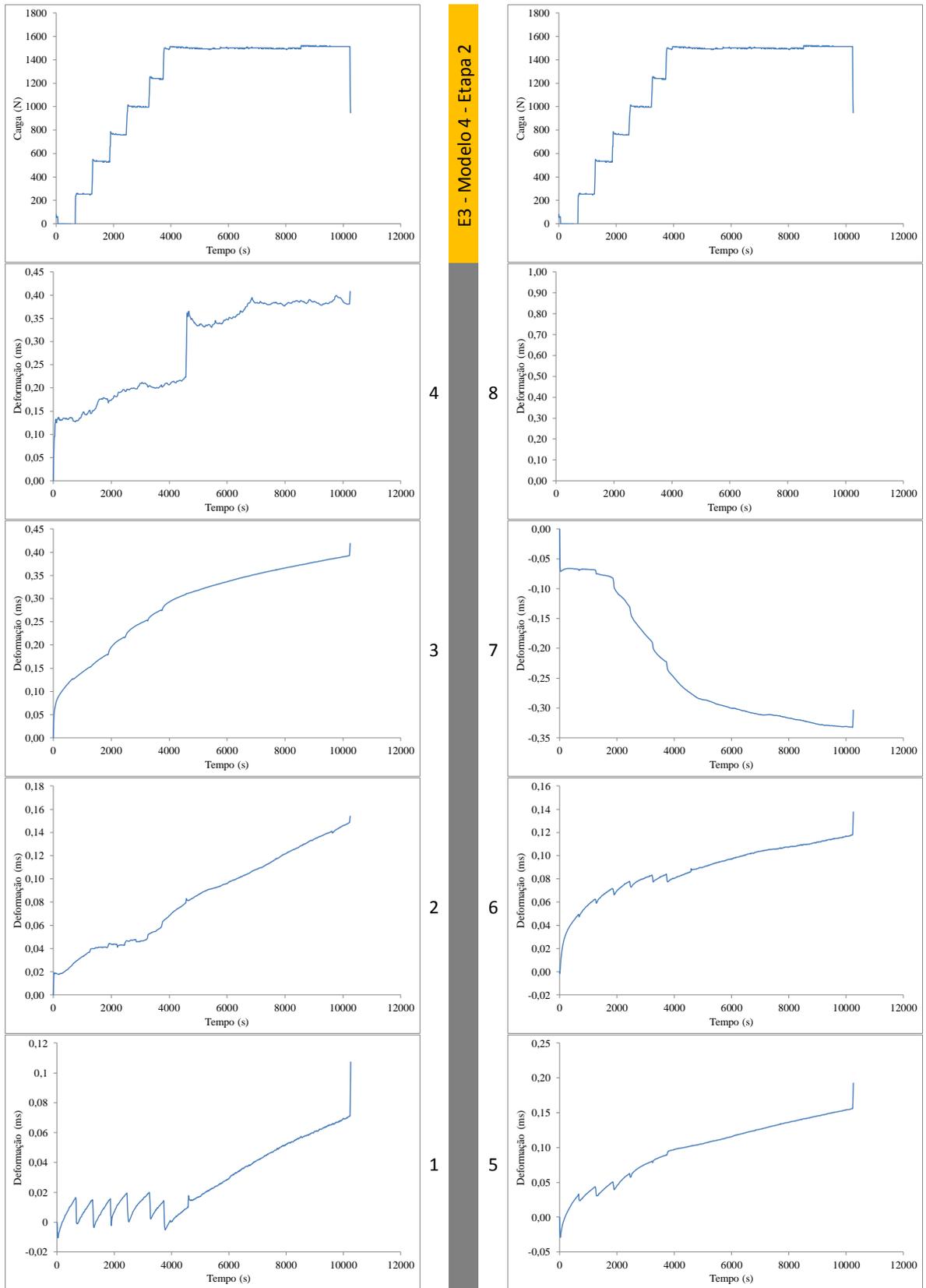
**Figura E. 16.** Strain gauges Estaca E1 – Modelo M4 – Etapa 3



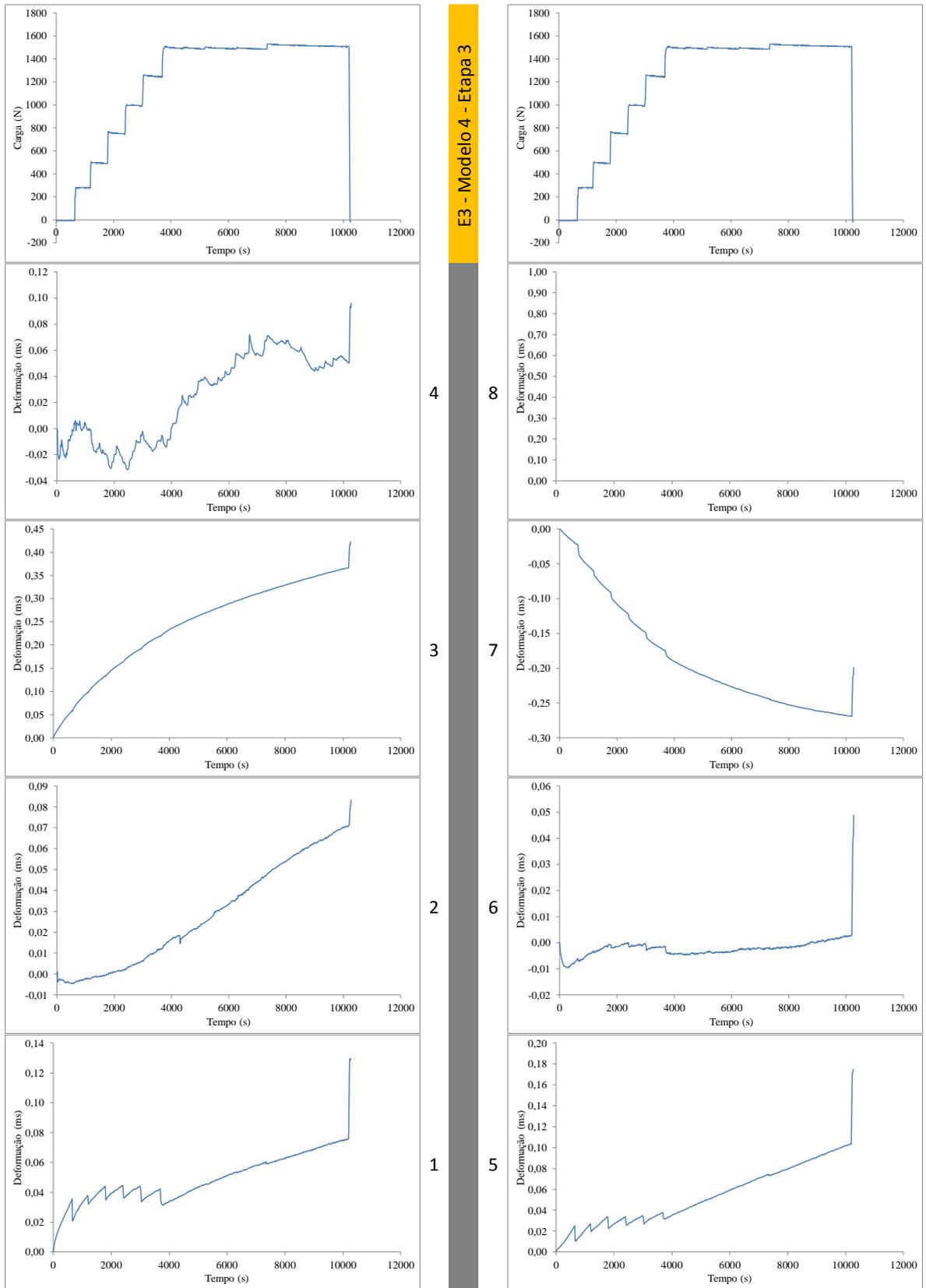
**Figura E. 17.** Strain gauges Estaca E2 – Modelo M4 – Etapa 2



**Figura E. 18.** Strain gauges Estaca E2 – Modelo M4 – Etapa 3

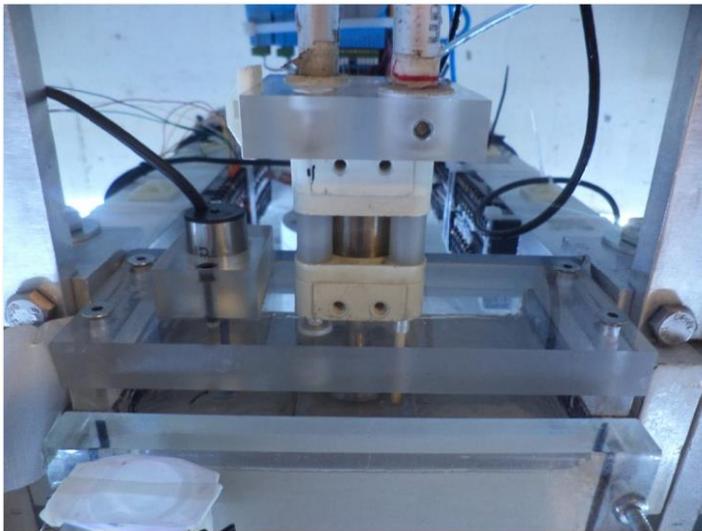


**Figura E. 19.** Strain gauges Estaca E3 – Modelo M4 – Etapa 2

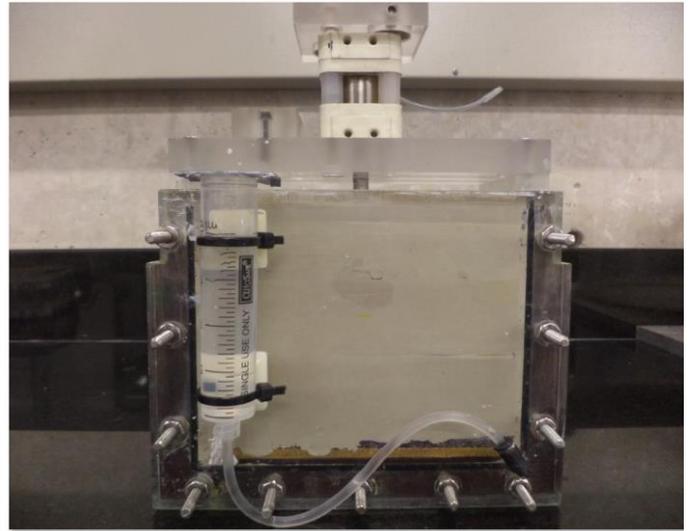


**Figura E. 20.** Strain gauges Estaca E3 – Modelo M4 – Etapa 3

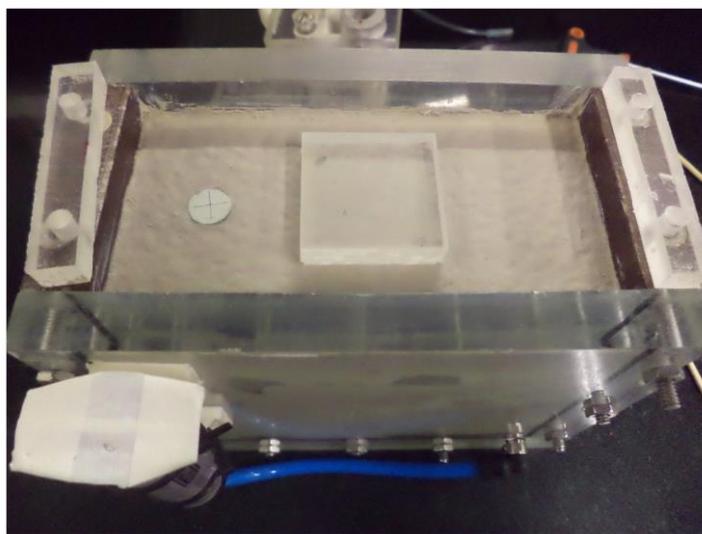
**Apêndice F.** Registro fotográfico das montagens dos modelos



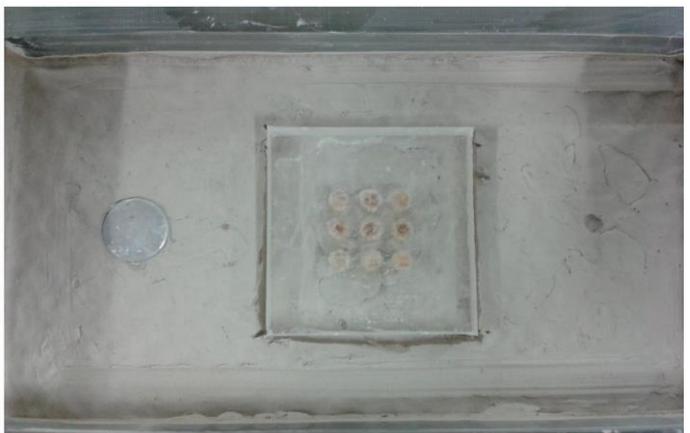
**Figura F. 1.** Montagem para instrumentação e aplicação de carga nos modelos em escala 1/200



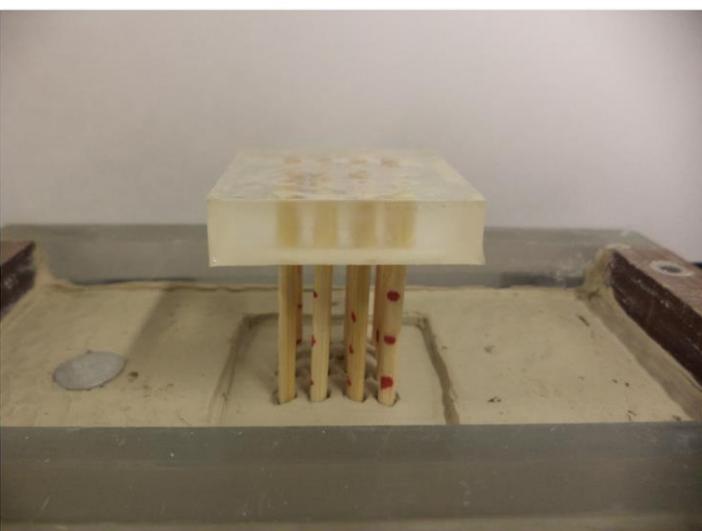
**Figura F. 2.** Detalhe da montagem do tanque de controle de água e da caixa do molde para os modelos em escala 1/200



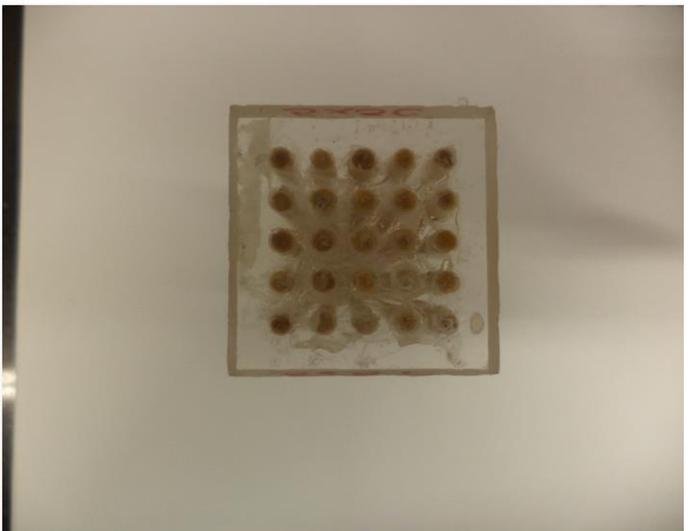
**Figura F. 3.** Modelo m1 – Só radier



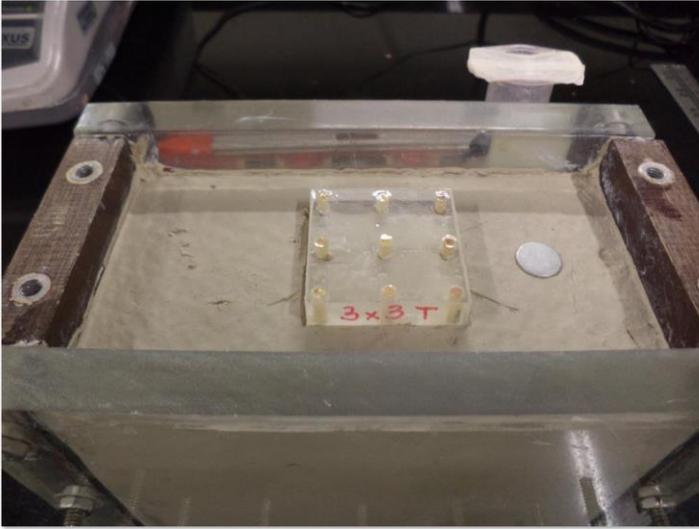
**Figura F. 4.** Modelo m2



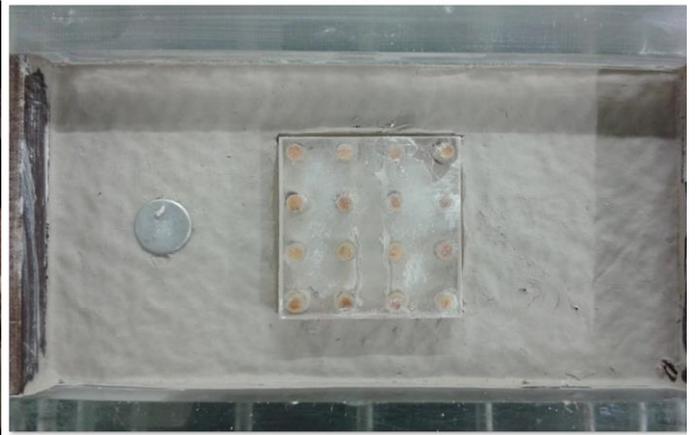
**Figura F. 5.** Modelo m3



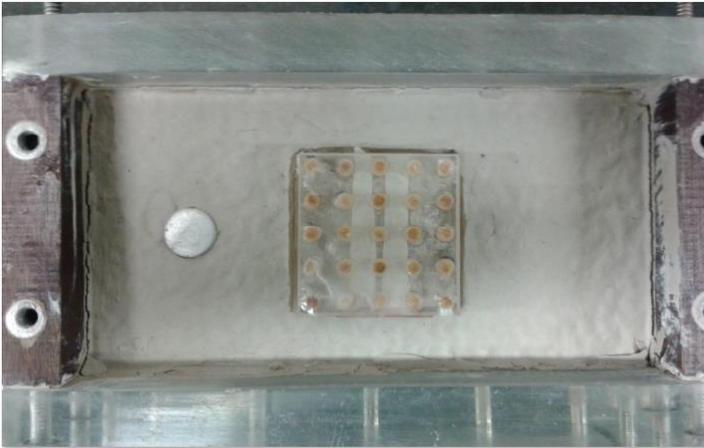
**Figura F. 6.** Modelo m4



**Figura F. 7.** Modelo m5



**Figura F. 8.** Modelo m6



**Figura F. 9.** Modelo m7



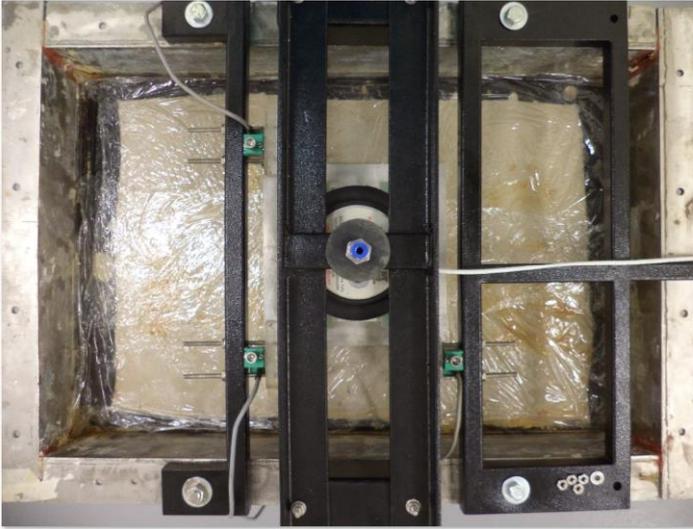
**Figura F. 10.** Detalle do nível da água durante o voo



**Figura F. 11.** Instalação das estacas no modelo M2



**Figura F. 12.** Montagem para leitura de carga e deslocamentos no modelo M2



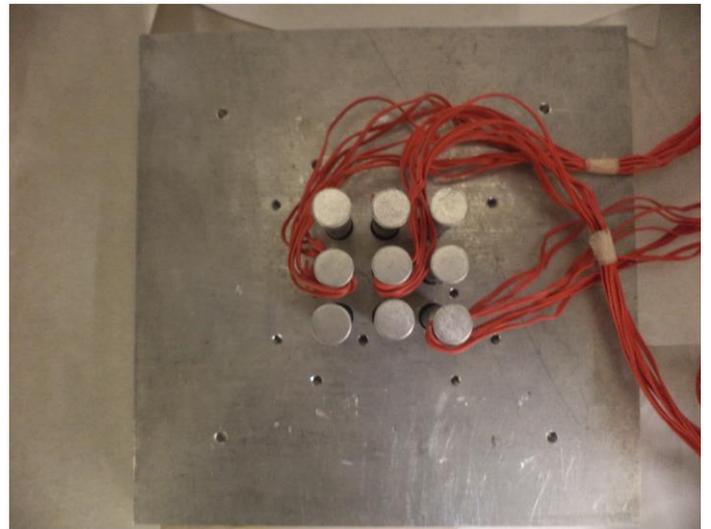
**Figura F. 13.** Montagem do modelo M1



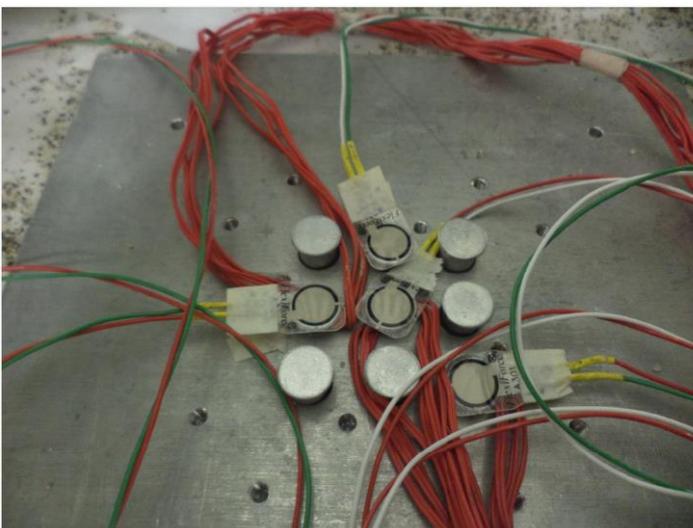
**Figura F. 14.** Ruptura do solo no modelo M1



**Figura F. 15.** Montagem para instalação das estacas nos modelos de radier estaqueado



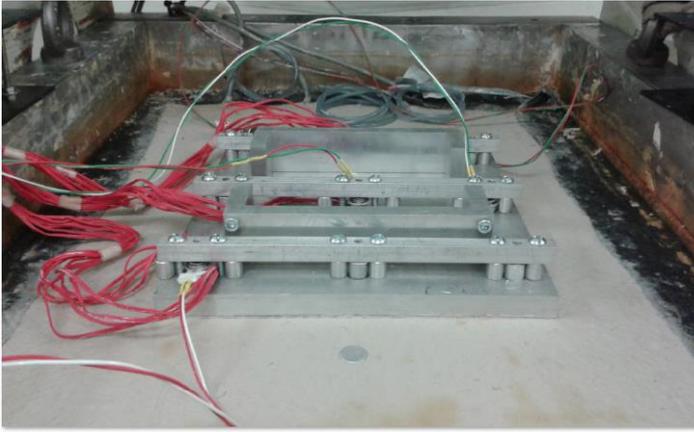
**Figura F. 16.** Estacas instaladas no modelo M3



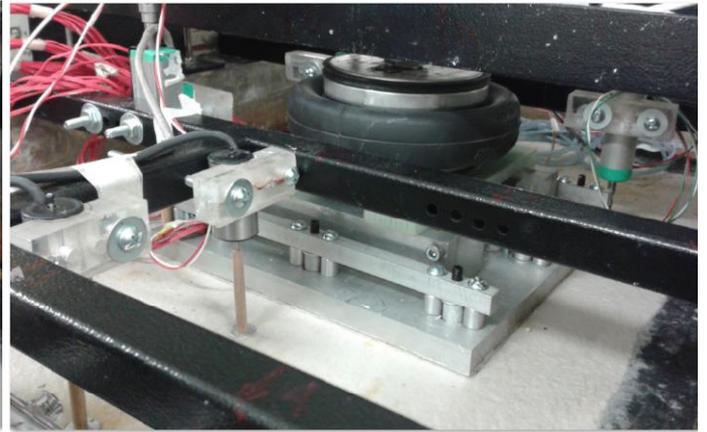
**Figura F. 17.** Células de carga na cabeça das estacas do modelo M3



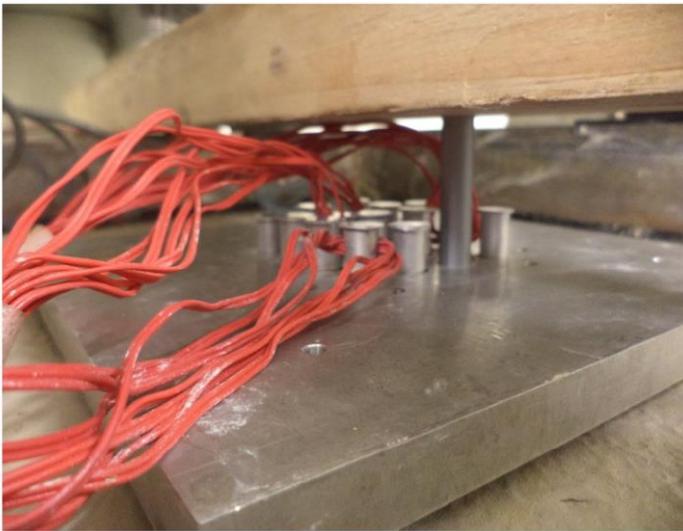
**Figura F. 18.** Modelo m3 pronto para voo



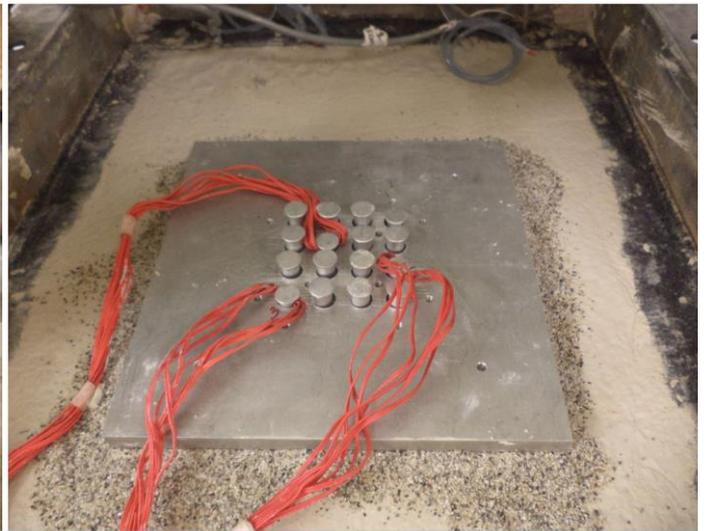
**Figura F. 19.** Modelo M6



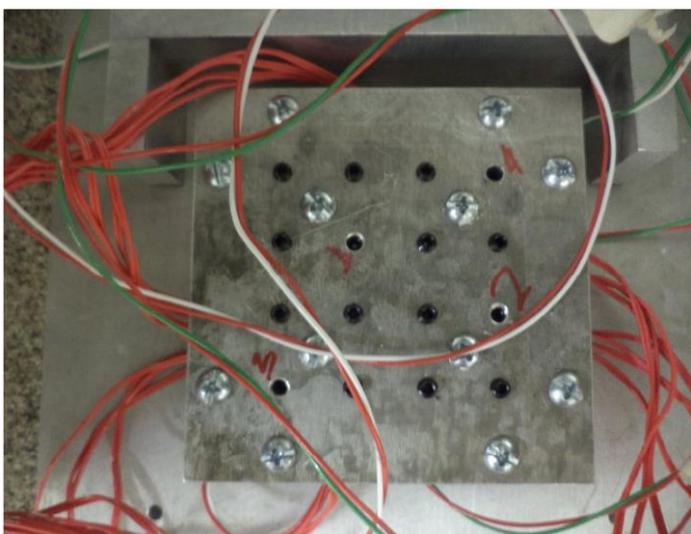
**Figura F. 20.** Montagem do modelo M6



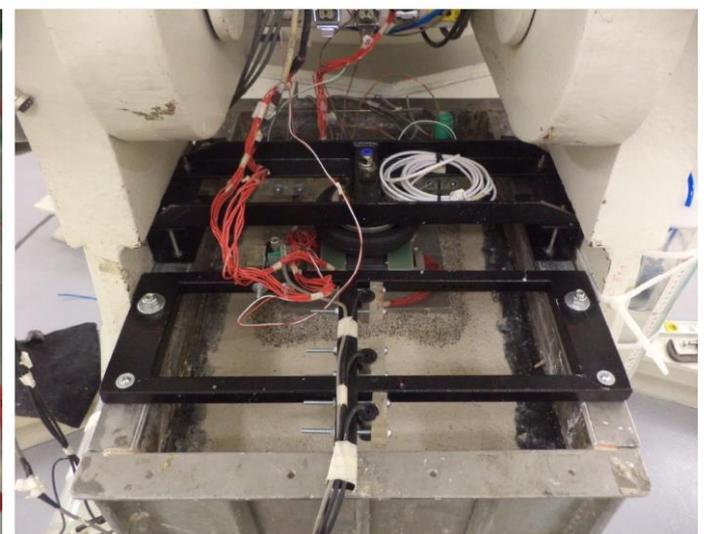
**Figura F. 21.** Processo de instalação das estacas do modelo M4



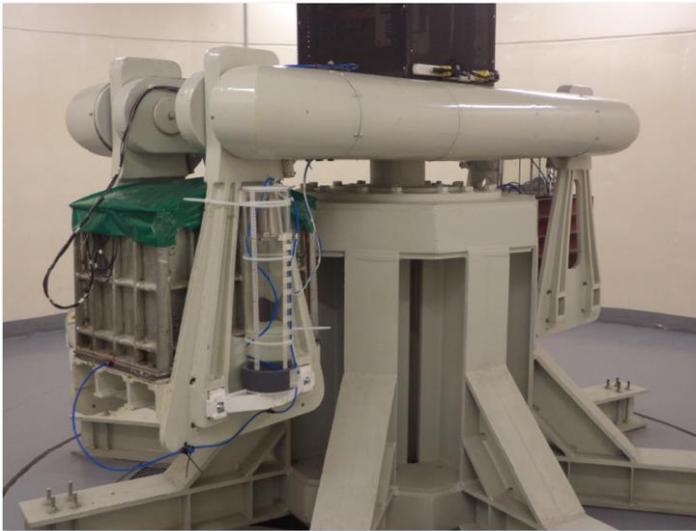
**Figura F. 22.** Estacas do modelo M4



**Figura F. 23.** Placa de reação superior do modelo M4



**Figura F. 24.** Modelo M4 pronto para voo



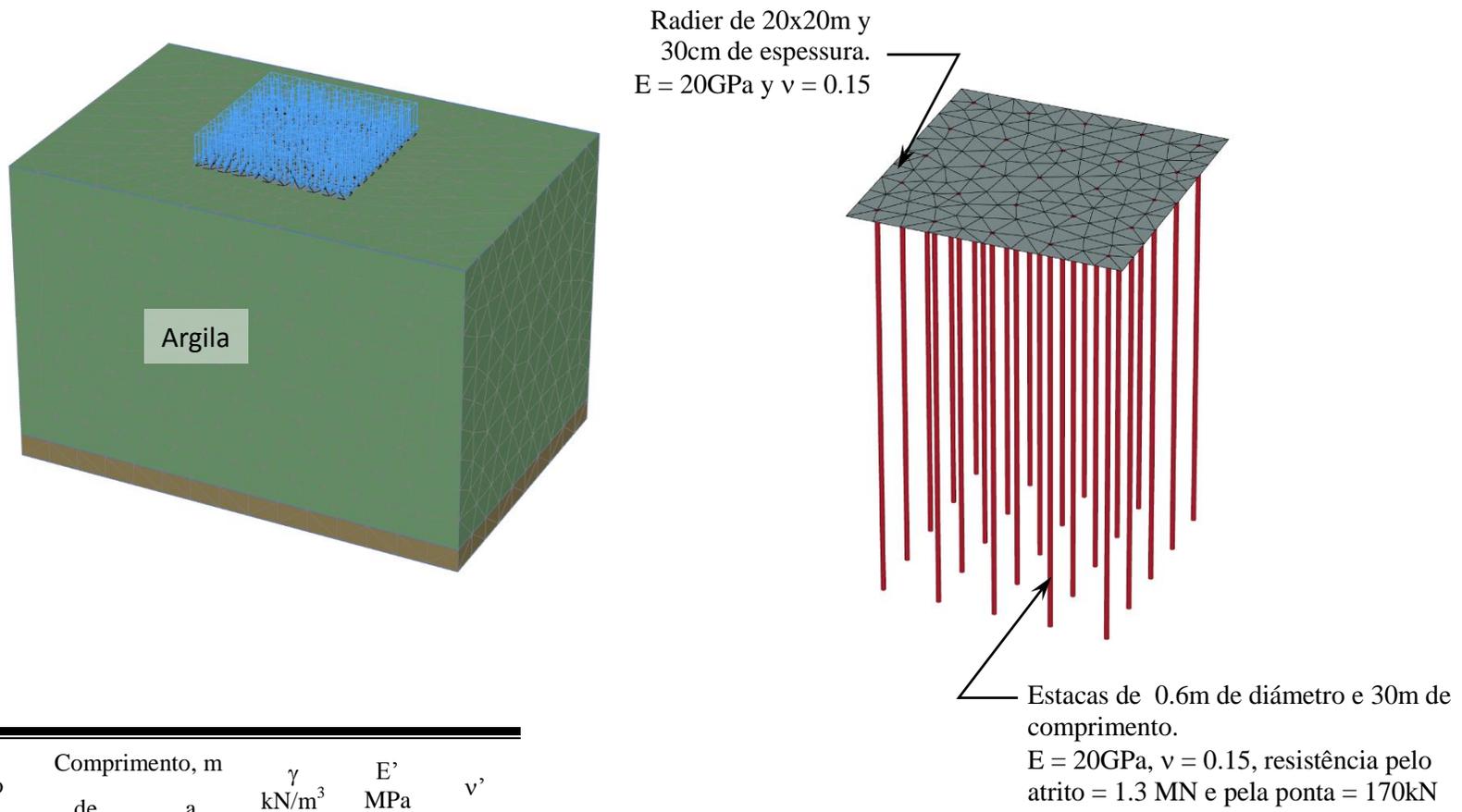
**Figura F. 25.** Disposição do molde na centrífuga geotécnica



**Figura F. 26.** Centrífuga geotécnica em voo

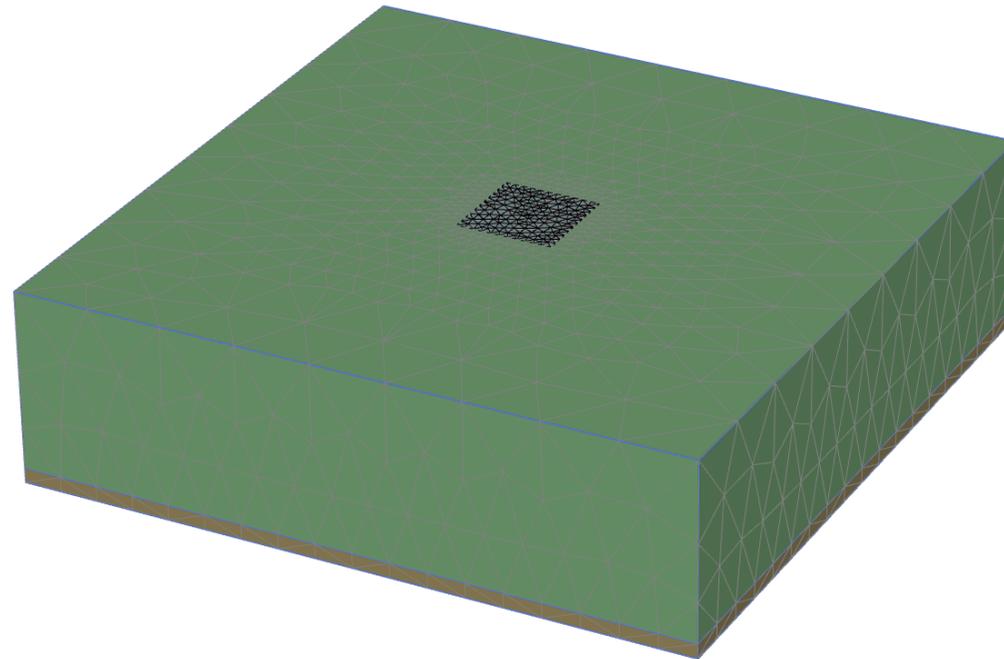
**Apêndice G.** Análise da influência das condições de borda na resposta dos modelos

(Rodríguez, J. F., 2013)



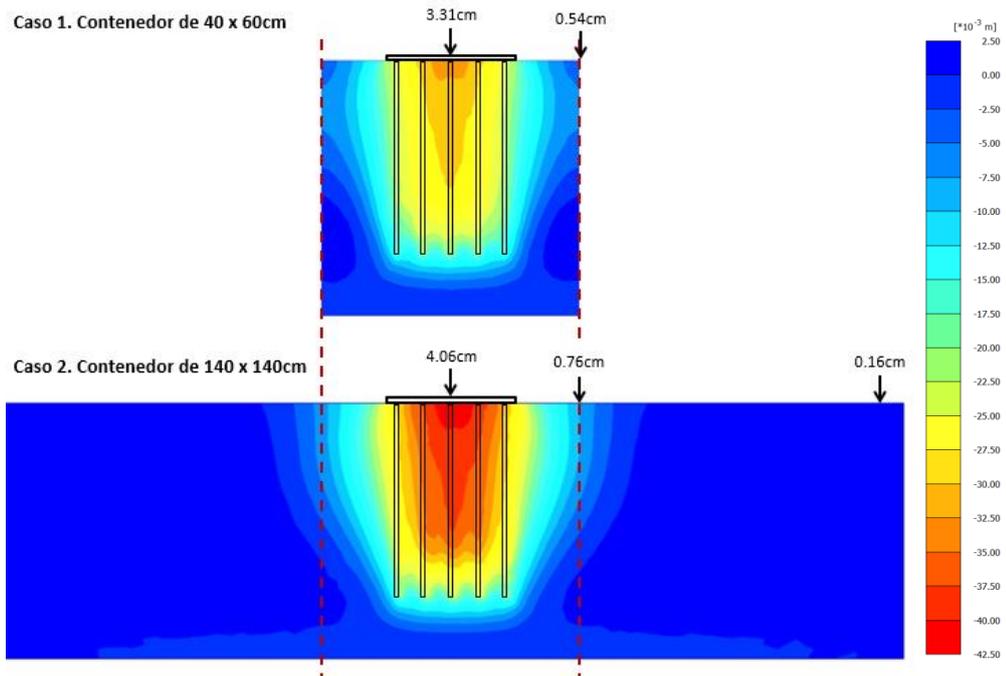
Solo	Comprimento, m		$\gamma$	$E'$	$\nu'$
	de	a	$\text{kN/m}^3$	MPa	
Argila	0	37	14	5	0.30
Areia	37	40	18	50	0.33

**Figura G. 1.** Caso 1. Condições de modelagem para caixa de 40x60 cm.

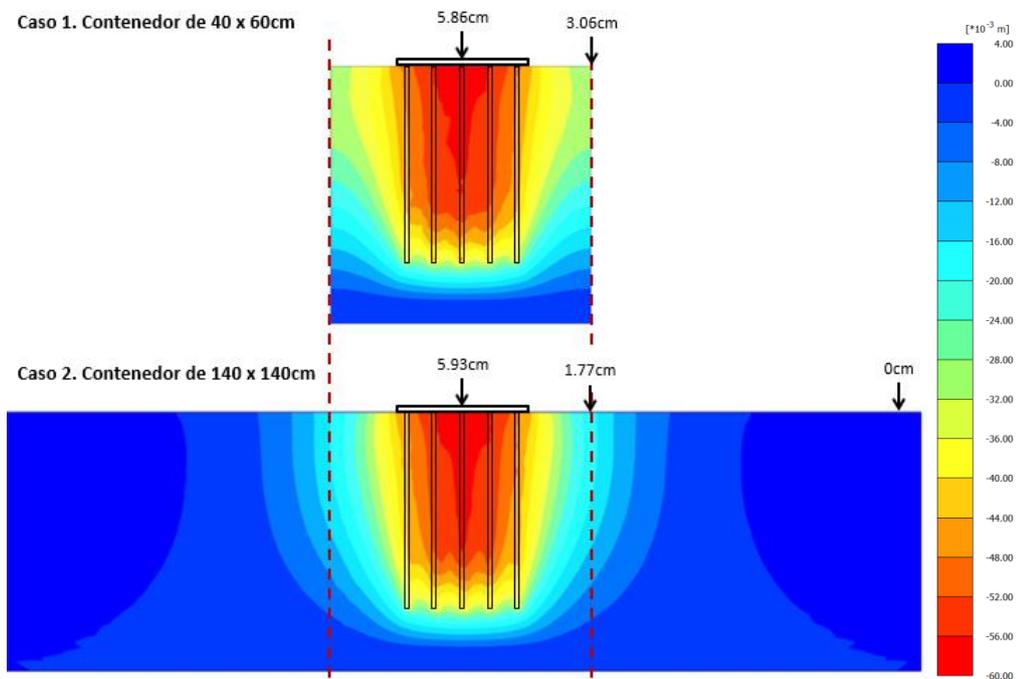


As características do solo e distribuição geométrica do sistema radier estaqueado, são iguais as do Caso 1

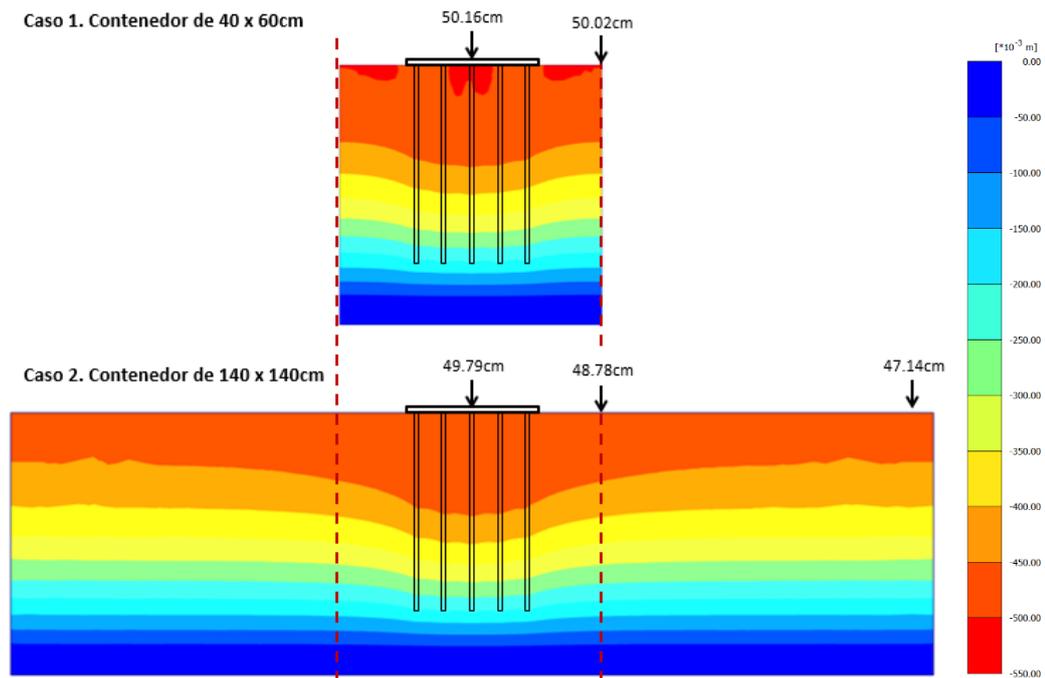
**Figura G. 2.** Caso 2. Condições de modelagem para Caixa de 140 x 140cm.



**Figura G. 3.** Condição 1. Aplicação de carga externa de 50 kPa em condições sem drenagem.



**Figura G. 4.** Condição 2. Aplicação de carga externa de 50 kPa em condições drenadas – Adensamento ao 100%



**Figura G. 5.** Condição 3. Aplicação de carga externa de 50 kPa e subsidência regional em condições drenadas – Adensamento ao 100%

**Tabela G. 1.** Comparativo de recalques para os diferentes Casos acima.

Condição	Recalque no centro do radier (cm)			Recalque na borda da caixa (cm)		
	Caso 1	Caso 2	Diferença	Caso 1	Caso 2	Diferença
1	3,31	4,06	-23%	0,54	0,76	-41%
2	5,86	5,93	-1%	3,06	1,77	42%
3	50,16	49,79	1%	50,02	48,78	2%