



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

MARINA DIDIER PEDROSA DE AMORIM

**PROPOSTA DE MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA DE
FUNDAÇÃO SUPERFICIAL EM TERRENO MELHORADO COM
ESTACAS DE COMPACTAÇÃO**

Recife, PE

2019



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

MARINA DIDIER PEDROSA DE AMORIM

**PROPOSTA DE MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA DE
FUNDAÇÃO SUPERFICIAL EM TERRENO MELHORADO COM
ESTACAS DE COMPACTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão

Recife, PE

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Universidade de Pernambuco – Recife

A524p Amorim, Marina Didier Pedrosa de
Proposta de modelo de transferência de carga de
fundação superficial em terreno melhorado com estacas de
compactação./ Marina Didier Pedrosa de Amorim. – Recife:
UPE, Escola Politécnica, 2019.

167 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade
de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. Estacas de Compactação. 2. Melhoramento de Solo.

MARINA DIDIER PEDROSA DE AMORIM

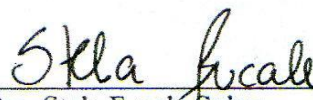
**PROPOSTA DE MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA DE
FUNDAÇÃO SUPERFICIAL EM TERRENO MELHORADO COM
ESTACAS DE COMPACTAÇÃO**

BANCA EXAMINADORA:

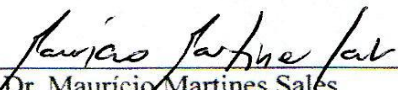
Orientador(a)


Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco

Examinadores


Profª. Dra. Stela Fucalé Sukar
Universidade de Pernambuco


Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
Universidade Católica de Pernambuco


Prof. Dr. Maurício Martines Sales
Universidade Federal de Goiás

Recife, PE
2019

DEDICATÓRIA

A Laurinha.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor DSc. Alexandre Duarte Gusmão meu agradecimento maior. Pelo grande incentivo, disponibilidade, confiança e amizade, sempre dando oportunidades únicas para meu desenvolvimento profissional e acadêmico, nunca mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

À minha filha, Laura, fonte de amor, inspiração maior e que me faz querer ser uma pessoa melhor cada dia.

À minha mãe, Lorena, pelo seu amor e por ser meu porto seguro.

Ao meu pai, Walmir, por me ensinar a não temer desafios da vida.

Aos meus irmãos, André e Júlia, por estarem sempre presentes.

A César pelo incentivo e companheirismo no “Gran Finale” desta pesquisa.

Ao engenheiro e amigo Gilmar Maia por sempre me incentivar a seguir em frente, pela confiança depositada e pelo exemplo profissional essencial na minha formação.

Ao engenheiro, amigo, colega de trabalho e de mestrado, Pedro Eugênio Oliveira, por sempre me ajudar a refletir e amadurecer os temas da minha pesquisa. Por ter me dado tanta força em todos os dias dessa jornada. E, principalmente, pela amizade construída.

Aos amigos da Gusmão Engenheiros Associados pelo carinho, incentivo e amizade diária, em especial, Fernanda e Victor que se dedicaram no desenvolvimento de vários gráficos e figuras desta pesquisa.

Aos professores DSc. Stela Fucale e DSc. Joaquim Oliveira pelas contribuições e carinho repassados.

Aos docentes do PEC por demonstrarem entusiasmo em cada aula lecionada, depositarem confiança e carinho em cada aluno e se orgulharem da profissão que têm. Grandes inspiradores.

RESUMO

A valorização dos espaços urbanos tem verticalizado as construções nas cidades do nordeste brasileiro, onde várias destas cidades são assentes sobre sedimentos recentes não consolidados. O subsolo do Recife, em particular, é reconhecidamente um desafio para engenheiros geotécnicos, pois sua formação geológica, permitiu o surgimento de diversificadas conformações no terreno. A presença de camadas arenosas superficiais, na maior parte da planície no Recife, permite a implantação da solução de melhoramento da camada superficial através de estacas de compactação viabilizando o uso de fundações superficiais, e reduzindo de forma significativa os custos da fundação. Apesar desta solução de fundação ser bastante difundida no Nordeste brasileiro, é uma solução ainda não normatizada, o que verifica a necessidade de aprofundamentos de estudos deste tema. Diante deste cenário, o objetivo da pesquisa é propor um modelo de transferência de carga em terrenos melhorados com estacas de compactação. Para isso, foram analisados os dados de um conjunto de 31 provas de carga estática realizadas tanto diretamente no solo, diretamente em estacas de compactação e sobre o conjunto estaca e solo melhorado, além de 10 testes de enchimentos de tanques de combustíveis. A partir destes dados, foram estudados parâmetros do elemento vertical (estaca) e do elemento horizontal (sapata). Para a estaca isolada, foi possível obter uma “curva padrão” para determinar a “curva carga x recalque”, assim como calcular os coeficientes de minoração e majoração de α e β do Método de Décourt - 1996 para estacas de compactação, encontrando-se os valores de $\alpha=0,2$ e $\beta=0,6$. Já para o solo isolado, com base na Teoria da Elasticidade, foi calculada uma correlação entre o módulo de elasticidade e o N_{SPT} do solo compactado, sendo $E_s = 1,5 \times N_{SPT}$ (MPa), assim como também foi encontrado um valor para o ângulo de atrito de um solo compactado como sendo 40° . Ainda para o solo isolado, foi determinada uma “curva padrão” para previsão da curva pressão x recalque. E por fim, utilizando os parâmetros da estaca e do solo isolados, é apresentado tanto uma proposta de modelo de simulação para previsão do comportamento do solo melhorado, como um método de partição de carga entre os elementos horizontal e vertical de uma fundação mista. As simulações das curvas carga-recalque demonstraram que a metodologia aplicada previu de modo satisfatório o comportamento das provas de carga realizadas nos terrenos melhorados. Foi possível demonstrar a rigidez de um solo melhorado através do somatório das rigidezes dos elementos isolados (solo e estaca).

Palavras-chave: Estacas de Compactação, Melhoramento de Solo, Prova de Carga, Partição de Carga.

ABSTRACT

The valorization of urban spaces has verticalized the constructions in the cities of the Brazilian northeast, several of these cities are based on recent sediments not consolidated. The subsoil of Recife, in particular, is recognized as a challenge for geotechnical engineers, since its geological formation has allowed the emergence of diverse conformations in the terrain. The presence of superficial sandy layers, in most of the lowland in Recife, allows the implantation of the improvement of the superficial soil layer through compaction piles, allowing the use of shallow foundations, and significantly reducing the costs of the foundation. Although this foundation solution is very widespread in the Brazilian Northeast, it is not yet standardized, which verifies a need for further study of this theme. In this scenario, the objective of the research is to propose a model of load transfer in improved ground with compaction piles. For this, the data of a set of 31 static load tests performed directly in the soil, directly on compaction piles and on the pile and improved soil set, in addition to 10 tests of fuel tank fillings were analyzed. For the isolated pile, it was possible to obtain a "standard curve" to determine the "load x settlement curve", as well as to calculate the coefficients α and β of the Décourt Method - 1996 for compaction piles, being the values of $\alpha = 0.2$ and $\beta = 0.6$. For the isolated soil, based on Elasticity Theory, a correlation between the modulus of elasticity and the N_{SPT} of the compacted soil was calculated, with $E_s = 1490 \times N_{SPT}$ (kN / m²), as well as a value for the friction angle of a compacted soil being 40°. Also for the isolated soil, a "standard curve" for the prediction of the pressure x settlement curve was determined. Finally, using the isolated soil and pile parameters, a simulation model proposal for improved soil behavior prediction and a load partitioning method between the horizontal and vertical elements of a mixed foundation are presented. The simulations of the load-settlement curves demonstrated that the applied methodology satisfactorily predicted the behavior of the load tests performed on the improved soil. It was possible to demonstrate the stiffness of an improved soil through the sum of the rigidities of the elements by themselves (soil and pile).

Keywords: Compaction Piles, Soil Improvement, Plate Load Tests, Load Partitioning

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distorções angulares e danos associados.....	27
Figura 2 - Modelo de Poulos e Davis (1974): (a) o problema analisado; (b) o elemento de estaca; (c) a ação da estaca sobre o solo; (d) a ação do solo sobre a estaca	31
Figura 3 - Camadas de solo superior e inferior	32
Figura 4 - Curva de rigidez de uma estaca	33
Figura 5 - Curva carga x recalque	36
Figura 6 - Curva carga x recalque	37
Figura 7 - Curva carga x recalque	41
Figura 8 - Curva carga x recalque para sapata de 1,0 m.....	42
Figura 9 - Curva carga x recalque para sapata de 1,5 m.....	42
Figura 10 - Curva carga x recalque para sapata de 2,5 m.....	42
Figura 11 - Curva carga x recalque para sapata de 3,0 m.....	42
Figura 12 - Curva carga x recalque para sapata B de 3,0 m	43
Figura 13 - Curva recalque/largura para todas as sapatas	43
Figura 14 - Melhoramento versus granulometria	44
Figura 15 - Efeito da compacidade inicial do solo no melhoramento – Método Convencional	45
Figura 16 - Efeito da compacidade inicial do solo no melhoramento – Método Terra-Probe ..	46
Figura 17 - Grupo de elementos de fundação profunda	49
Figura 18 - Ruptura por estaca isolada e por bloco	51
Figura 19 - O esquema de fundação equivalente.....	52
Figura 20 - Sistemas de fundação.....	55
Figura 21 - Mecanismos de interação em radiers estaqueados.....	57
Figura 22 - Curva padrão carga x recalque da estaca isolada.....	61
Figura 23 - Curva padrão pressão x recalque do solo isolado	63
Figura 24 - Curva do solo melhorado através do somatório das curvas da estaca isolada e do solo isolado	64
Figura 25 - Cargas aplicadas ao conjunto.....	64
Figura 26 - Superposição do acréscimo de recalque em função da interação estaca-estaca	65
Figura 27 - (a) Recalque em função da carga V_0 ; (b) Recalque em função da carga V_0 mais o acréscimo de recalque devido a interação estaca-estaca e; (c) Recalque em função da carga P_0 mais o acréscimo de recalque devido a interação placa-estaca	66
Figura 28 - Valores de α_V e α_H para diversos casos de sistemas de fundação.....	67
Figura 29 - Curva carga-recalque de uma estaca isolada no Modelo Hiperbólico.....	68
Figura 30 - Curva carga-recalque do solo isolado no Modelo Hiperbólico	68
Figura 31 - Sapata rígida	69
Figura 32 - Cálculo da área do solo isolado	69
Figura 33 - Obtenção da curva carga-recalque de “n” estacas	70
Figura 34 - Obtenção da curva carga-recalque do solo isolado.....	70
Figura 35 - Contribuição da curva carga-recalque do terreno com melhoramento	70
Figura 36 – Ajuste da curva com valores de $\square_H$ e $\square_V$	71
Figura 37 - Curva carga x recalque: PCE-101 (estaca isolada).....	72
Figura 38 - Curva carga x recalque: PCE-201 (solo isolado).....	73
Figura 39 - Curva carga x recalque: PCE-301 (4 estacas + solo compactado)	73
Figura 40 - Curva carga x recalque: PCE-302 (1 estaca + solo compactado).....	73

Figura 41 - Curva carga x recalque: PCE-102 (estaca isolada).....	74
Figura 42 - Curva pressão x recalque: PCE-202 (solo isolado)	75
Figura 43 - Curva carga x recalque: PCE-103 (estaca isolada).....	76
Figura 44 - Locação das provas de carga estáticas	77
Figura 45 - Curvas carga x recalque: PCE-104 a 106 (estaca isolada).....	78
Figura 46 - Curva pressão x recalque: PCE-203 a 210 (solo isolado).....	78
Figura 47 - Curva carga x recalque: PCE-303 a 306 (1 estaca + solo compactado)	79
Figura 48 - Curvas carga x recalque: PCE-107 (estaca isolada)	80
Figura 49 - Curvas pressão x recalque: PCE-307 a 309 (4 estacas + solo compactado).....	81
Figura 50 - Curva pressão x recalque: PCE-211 (solo isolado)	81
Figura 51 - Curva carga x recalque PCE-109 (estaca isolada)	82
Figura 52 - Curva carga x recalque PCE-310 (1 estaca + solo compactado)	82
Figura 53 - Curva carga x recalque PCE-311 a 314 (4 estacas + solo compactado).....	83
Figura 54 - Curva padrão carga x recalque: PCE-101 (estaca isolada)	88
Figura 55 - Curva padrão carga x recalque: PCE-102 (estaca isolada)	88
Figura 56 - Curva padrão carga x recalque: PCE-103 (estaca isolada)	88
Figura 57 - Curva padrão carga x recalque: PCE-104 (estaca isolada)	89
Figura 58 - Curva padrão carga x recalque: PCE-105 (estaca isolada)	89
Figura 59 - Curva padrão carga x recalque: PCE-106 (estaca isolada)	89
Figura 60 - Curva padrão carga x recalque: PCE-107 (estaca isolada).....	90
Figura 61 - Curva padrão carga x recalque: PCE-108 (estaca isolada)	90
Figura 62 - Curva padrão carga x recalque: PCE-109 (estaca isolada).....	90
Figura 63 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-201 (solo isolado)	93
Figura 64 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-202 (solo isolado)	93
Figura 65 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-205 (solo isolado)	93
Figura 66 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-206 (solo isolado)	94
Figura 67 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-207 (solo isolado)	94
Figura 68 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-208 (solo isolado)	94
Figura 69 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-209 (solo isolado)	95
Figura 70 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-210 (solo isolado)	95
Figura 71 - Gráfico carga x recalque para a estaca isolada (Obra A).....	96
Figura 72 - Gráfico carga x recalque para a estaca isolada (Obra A).....	97
Figura 73 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-302 versus simulação (Obra A)	99
Figura 74 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-302 versus simulação (Obra A).....	99
Figura 75 - Partição das cargas PCE-302 (Obra A).....	100
Figura 76 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-301 versus simulação (Obra A)	101
Figura 77 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-301 versus simulação (Obra A)	101
Figura 78 - Partição das cargas PCE-302 (Obra A).....	102
Figura 79 - Gráfico carga x recalque para a estaca isolada - RCC (Obra D)	103
Figura 80 - Gráfico carga x recalque para o solo isolado - RCC (Obra D)	103
Figura 81 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-303 versus simulação (Obra D)	106
Figura 82 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-303 versus simulação (Obra D).....	106
Figura 83 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-304 versus simulação (Obra D)	106
Figura 84 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-304 versus simulação (Obra D).....	107
Figura 85 - Partição das cargas PCE-303 (Obra D).....	108
Figura 86 - Partição das cargas PCE-304 (Obra D).....	108
Figura 87 - Gráfico carga x recalque para a estaca isolada – pó-de-pedra e brita (Obra D) ..	109

Figura 88 - Gráfico carga x recalque para o solo isolada – pó-de-pedra e brita (Obra D)	110
Figura 89 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-305 <i>versus</i> simulação (Obra D)	110
Figura 90 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-305 <i>versus</i> simulação (Obra D)	111
Figura 91 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-306 <i>versus</i> simulação (Obra D)	111
Figura 92 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-306 <i>versus</i> simulação (Obra D)	111
Figura 93 - Partição das cargas simulação PCE-305 e 6 (Obra D)	112
Figura 94 - Ensaio de enchimento dos tanques (Obra E)	113
Figura 95 - Gráfico carga x recalque para a PCE-108 (Obra E)	114
Figura 96 - Gráfico carga x recalque para a PCE-211 (Obra E)	115
Figura 97 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-03 <i>versus</i> simulação (Obra E)	116
Figura 98 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-03 <i>versus</i> simulação (Obra E)	117
Figura 99 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-04 <i>versus</i> simulação (Obra E)	117
Figura 100 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-04 <i>versus</i> simulação (Obra E)	117
Figura 101 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-05 <i>versus</i> simulação (Obra E)	118
Figura 102 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-05 <i>versus</i> simulação (Obra E)	118
Figura 103 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-07 <i>versus</i> simulação (Obra E)	118
Figura 104 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-07 <i>versus</i> simulação (Obra E)	119
Figura 105 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-10 <i>versus</i> simulação (Obra E)	119
Figura 106 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-10 <i>versus</i> simulação (Obra E)	119
Figura 107- Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-11 <i>versus</i> simulação (Obra E)	120
Figura 108- Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-11 <i>versus</i> simulação (Obra E)	120
Figura 109 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-12 <i>versus</i> simulação (Obra E)	120
Figura 110 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-12 <i>versus</i> simulação (Obra E)	121
Figura 111 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-13 <i>versus</i> simulação (Obra E)	121
Figura 112 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-13 <i>versus</i> simulação (Obra E)	121
Figura 113 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-14 <i>versus</i> simulação (Obra E)	122
Figura 114 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-14 <i>versus</i> simulação (Obra E)	122
Figura 115 - Partição das cargas da simulação do TQ-03 (Obra E)	124
Figura 116 - Partição das cargas da simulação do TQ-04 (Obra E)	124

Figura 117 - Partição das cargas da simulação do TQ-05 (Obra E)	124
Figura 118 - Partição das cargas da simulação do TQ-07 (Obra E)	125
Figura 119 - Partição das cargas da simulação do TQ-10 (Obra E)	125
Figura 120 - Partição das cargas da simulação do TQ-11(Obra E)	125
Figura 121 - Partição das cargas da simulação do TQ-12 (Obra E)	126
Figura 122 - Partição das cargas da simulação do TQ-13 (Obra E)	126
Figura 123 - Partição das cargas da simulação do TQ-14 (Obra E)	126
Figura 124 - Gráfico carga x recalque para estaca isolada (Obra F)	128
Figura 125 - Gráfico carga x recalque para o solo isolado (Obra F)	129
Figura 126 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-314 versus simulação (Obra F)	129
Figura 127 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-314 versus simulação (Obra F).....	130
Figura 128 – Partição das cargas da PCE-314 (Obra F).....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de K.....	28
Tabela 2 - Valores do coeficiente α em função do tipo de estaca e de solo	29
Tabela 3 - Valores do coeficiente β em função do tipo de estaca e de solo	30
Tabela 4 -Resumo do banco de dados	84
Tabela 5 -Dados da PCE 1.....	86
Tabela 6 - Dados da PCE 2.....	86
Tabela 7 - Valores de α e β para estacas de melhoramento.....	87
Tabela 8 - Dados para determinação do fator “ $\square$ ”	91
Tabela 9 - Dados para obtenção do ângulo de atrito ($\square$).....	92
Tabela 10 - Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada (Obra A).....	96
Tabela 11 - Parâmetros do modelo hiperbólico – solo isolado (Obra A).....	97
Tabela 12 -Simulação PCE 302 (Obra A)	98
Tabela 13 - Partição da carga PCE-302 (Obra A)	100
Tabela 14 -Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada RCC (Obra D)	104
Tabela 15 - Parâmetros do modelo hiperbólico –solo isolado RCC (Obra D).....	104
Tabela 16 - Simulação PCE 303 (Obra D)	105
Tabela 17 - Partição da carga PCE-303 (Obra D)	107
Tabela 18 - Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada pó-de-pedra e brita (Obra D)	109
Tabela 19 -Parâmetros do modelo hiperbólico –solo isolado pó-de-pedra e brita (Obra D)..	109
Tabela 20 - Dados dos tanques utilizados nos testes de enchimento (Obra E)	113
Tabela 21 -Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada (Obra E).....	114
Tabela 22 - Parâmetros do modelo hiperbólico –solo isolado (Obra E)	114
Tabela 23 -- Simulação teste de enchimento Tanque 03 (Obra E).....	116
Tabela 24 - Valores de $\square_v$ (Obra E).....	123
Tabela 25 - Partição da carga Tanque 03 (Obra E)	123
Tabela 26 - Partição de cargas (Obra E).....	127
Tabela 27 -Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada (Obra F).....	128
Tabela 28 -Parâmetros do modelo hiperbólico –solo isolado (Obra F).....	128
Tabela 29 -Simulação PCE-310 (Obra F).....	130
Tabela 30 -Partição da carga PCE-314 (Obra F).....	131
Tabela 31 -Valores encontrados para $\square_H$ e $\square_v$ e partição de carga.....	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
SP	Sondagem SPT
SPT	Standard Penetration Test
PCE	Prova de Carga Estática

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal da estaca
a	Coeficiente que define a forma da curva
A_L	Área lateral do fuste
A_P	Área ponta do fuste
α	Coeficiente lateral em função do tipo de estaca e de solo
α'	Coeficiente de majoração ou minoração em função do tipo do solo e estaca
α_H	Coeficiente de acréscimo de carga devido a interação placa-estaca
α_{ij}	Fator de interação para espaçamento s_{ij}
α_{PG}	Eficiência do grupo de estacas
α_{pr}	Coeficiente que caracteriza o radier estaqueado
α_R	Eficiência do radier
α_V	Coeficiente de acréscimo de carga devido a interação estaca-estaca
B	Largura da fundação/ Menor dimensão da sapata
β	Coeficiente lateral em função do tipo de estaca e de solo
β'	Coeficiente de majoração ou minoração em função do tipo do solo e estaca
β_p	Fator interação estaca-radier
β_s	Fator interação radier-estaca
c	Coesão do solo
c_u	Coesão não drenada da argila
D	Diâmetro do círculo circunscrito à estaca ou diâmetro do círculo de área equivalente ao da seção transversal da estaca
E_s	Módulo de Young do solo

E_c	Módulo de Young do material da placa
E	Módulo de Elasticidade
F_1 e F_2	Coefficientes de comportamento entre a estaca e o cone
ϕ	Ângulo de atrito
FS	Fator de Segurança
γ	Peso específico do solo
γ_{sub}	Peso específico do solo submerso
I	Momento de inércia da seção transversal da placa, por unidade de largura
I_d	Fator de embutimento
I_h	Fator de espessura da camada compressível
I_o	Fator de influência
I_s	Fator de forma e rigidez da sapata
K_p	Rigidez de uma estaca
K	Resistência do solo
L	Comprimento da estaca
μ	Relação entre o Módulo de Elasticidade e o N_{SPT}
ν	Coefficiente de Poisson
n	Número de estacas do grupo
N	Número de golpes no ensaio SPT
N'_c, N'_q e N'_γ	Fatores de capacidade de carga (ruptura local)
N_c, N_q e N_γ	Fatores de capacidade de carga (ruptura geral)
N_L	Valores médios lateral do N_{SPT}
N_P	Valores médios de ponta do N_{SPT}

N_{SPT}	Número de golpes no ensaio SPT
η	Fator de eficiência do grupo de estacas
P_G	Carga total aplicada ao grupo de estacas
P_j	Carga na estaca j
P_r	Carga de ruptura convencional
P_{rup}	Pressão de ruptura
q	Sobrecarga
q	Pressão média
Q	Carga aplicada no topo da estaca
Q_{adm}	Capacidade de carga do solo
Q_p	Capacidade de carga de uma única estaca
Q_{pic}	Carga máxima mobilizada
Q_{PG}	Capacidade de carga do grupo de estacas
Q_{PR}	Capacidade de carga do radier estaqueado
Q_R	Capacidade de carga do radier
Q_r	Carga de ruptura
Q_{rup}	Carga de ruptura
Q_u	Carga última
Q_{ult}	Carga de ruptura
R_b	Coeficiente de Poisson para a base ou ponta em solo mais rígido
R_h	Espessura do solo compressível
R_k	Fator de correção para a compressibilidade da estaca
R_L	Resistência lateral por atrito
R_p	Resistência de ponta

R_v	Coeficiente de Poisson do solo
ρ_L	Resistência unitária lateral por atrito
ρ_P	Resistência unitária de ponta
s	Recalque no topo da estaca para carga “Q”
s	Recalque correspondente medido no topo da estaca
S_c, S_q e S_γ	Fatores de forma da sapata
S_{grupo}	Recalque grupo
S_{pic}	Recalque devido à carga máxima
S_{placa}	Recalque da placa
S_{estacas}	Recalque das estacas
S_o	Recalque devido a carga V_o
S_{op}	Acréscimo de recalque em função da interação placa-estaca
S_{ov}	Acréscimo de recalque em função da interação estaca-estaca
σ_{adm}	Tensão que produz $s=1'$
V_{grupo}	Carga aplicada no grupo
V_{placa}	Carga aplicada na placa
V_{estacas}	Carga aplicada nas estacas
V_o	Carga aplicada à fundação
V_{op}	Acréscimo de carga em função da interação placa-estaca
V_{ov}	Acréscimo de carga em função da interação estaca-estaca
ζ_{PR}	Coeficiente de aumento da capacidade de carga da fundação devido ao contato do radier com o solo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	19
1.1.	Considerações iniciais	19
1.1.1	Importância do melhoramento como solução regional.....	19
1.1.2	Elementos de um projeto de fundação.....	21
1.2.	Objetivos	21
1.3.	Estrutura da Pesquisa.....	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Fundações.....	23
2.1.1	Fundação superficial	23
2.1.2	Fundação profunda	27
2.1.3	Rigidez de uma estaca	33
2.2	Prova de Carga Estática.....	34
2.2.1	Prova de carga estática em placa	34
2.2.2	Prova de carga estática em estacas	34
2.2.3	Interpretação de provas de carga estática	35
2.3	Comportamento tensão-deformação dos solos – Método Hiperbólico	40
2.4	Curva Normalizada.....	41
2.5	Melhoramento do solo	43
2.5.1	Melhoramento com estacas de areia e brita	46
2.5.2	Melhoramento com estacas de argamassa	47
2.6	Grupo de estacas.....	48
2.6.1	Efeito de grupo	48
2.6.2	Capacidade de carga de grupo de estacas	49
2.6.3	Recalque de um grupo de estacas	51
2.7	Fundações mistas.....	53
3.	METODOLOGIA.....	59
3.1	Estaca isolada	59
3.1.1	Capacidade de Carga	59
3.1.2	Curva padrão carga x recalque	60
3.2	Solo isolado	61
3.2.1	Recalque	61
3.2.2	Capacidade de Carga	62
3.2.3	Curva padrão pressão x recalque do solo isolado	62

3.3 Solo melhorado.....	63
4. BANCO DE DADOS – CARACTERIZAÇÃO DAS OBRAS	72
4.1 Obra A	72
4.2 Obra B	74
4.3 Obra C	75
4.4 Obra D	76
4.5 Obra E.....	79
4.6 Obra F.....	81
4.7 Resumo do banco de dados	84
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
5.1 Estaca isolada	85
5.1.1 Capacidade de Carga	85
5.1.2 Curva padrão carga x recalque	87
5.2 Solo isolado	91
5.2.1 Recalque	91
5.2.2 Capacidade de Carga	92
5.2.3 Curva padrão pressão x recalque do solo isolado.....	92
5.3 Simulação do solo melhorado	95
5.3.1 Obra A	95
5.3.2 Obra D	102
5.3.3 Obra E	112
5.3.4 Obra F	127
5.4 Resultados Gerais	132
6. CONCLUSÕES	134
7. REFERÊNCIAS	137
APÊNDICE	142

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo refere-se às considerações iniciais, onde é explicada a importância do melhoramento de solo como solução regional, assim como os elementos compostos desse tipo de fundação. Em seguida, são apresentados os objetivos e a estrutura da pesquisa.

1.1. Considerações iniciais

1.1.1 Importância do melhoramento como solução regional

As cidades do nordeste do Brasil, especialmente as capitais, têm experimentado um expressivo crescimento no setor imobiliário nos últimos 45 anos. A valorização dos espaços urbanos e a pressão imobiliária têm verticalizado as construções nestas cidades, que são geralmente assentes sobre sedimentos recentes não consolidados. Além disso, algumas cidades possuem subsolos reconhecidamente complexos do ponto de vista geotécnico, como é o caso do Recife (GUSMÃO FILHO, 1998). O solo do Recife é reconhecidamente um desafio para os engenheiros geotécnicos. A formação geológica dessa cidade há milhares de anos, permitiu o surgimento de diversificadas conformações do terreno.

A planície do Recife é de origem flúvio-marinha, possuindo dois níveis de terraço marinho arenosos oriundos da penúltima e última transgressão marinha (ALHEIROS et al., 1990). Além disso, prossegue o referido autor, existem depósitos de mangues, sedimentos flúvio-lagunares e aluviões recentes. Logicamente, a consequência imediata deste fato para a engenharia de fundações é uma gama de soluções disponíveis, ficando a cargo do engenheiro geotécnico optar, de acordo com sua experiência, pela solução que viabilizará o empreendimento técnica e economicamente. A prática de fundações no Recife é fortemente direcionada pelas características geológico-geotécnicas do subsolo, ainda que outros fatores influenciem na escolha e sejam, assim, encontrados diversos tipos de fundação na cidade.

A presença de depósitos de argila mole, presente em cerca de 50% da área de planície do Recife, favorece também o uso de estacas pré-moldadas de concreto e de aço, as quais, embora dispendiosas, são soluções de fundações largamente utilizadas na referida cidade (GUSMÃO et al., 2005).

Já a presença de camadas arenosas superficiais, na maior parte dominada pela planície no Recife, permite a adoção de fundações diretas, em terreno natural, em prédios de até seis pavimentos. A implantação da solução de melhoramento da camada superficial com a utilização de estacas de compactação pode viabilizar o uso de fundações superficiais, e reduzir de forma significativa os custos da fundação. O melhoramento possibilita uma elevação da tensão admissível do terreno, permitindo uma substancial diminuição nos volumes de escavação e de concreto das fundações projetadas (GUSMÃO FILHO, 1998). O objetivo de melhorar a camada arenosa superficial é assegurar estabilidade à fundação e evitar recalques excessivos que possam trazer danos à obra (AMORIM et al., 2015).

Existem várias técnicas para o melhoramento de terrenos arenosos, entre as quais as estacas de compactação são as mais usadas no nordeste brasileiro. Para se ter uma ideia da evolução dessa técnica no Recife, a partir da década de 70, os primeiros prédios eram projetados com pressões de trabalho no terreno melhorado de 250kPa, enquanto já há prédios construídos com mais de 30 pavimentos com pressões de até 650 kPa (GUSMÃO et al., 2005).

A técnica deste melhoramento consiste na execução de uma malha, em cujos os nós são executadas as estacas. Com este procedimento, a compactação é atingida em decorrência de três efeitos: deslocamento de material no terreno igual ao volume da estaca; introdução de material adicional compactado; e efeito da vibração devido ao processo executivo. Consequentemente há um ganho de resistência ao cisalhamento do terreno e uma redução no nível de deformações (GUSMÃO FILHO, 1998).

Em virtude da diversidade dos perfis de subsolo da planície do Recife, indicados pelas unidades geológicas, verifica-se a importância da prospecção geotécnica para projetos de fundações, bem como ensaios de laboratório em amostras de solo, ensaios de campo e provas de carga. Além destas medidas, incorporou-se também a prática de monitoramento de prédios para o acompanhamento de recalques (GUSMÃO FILHO, 1998).

De uma forma geral, pela escassez de dados de provas de carga em placas em terrenos melhorados, o controle para saber a eficiência do melhoramento com estacas de compactação tem sido feito normalmente apenas com sondagens antes e após o melhoramento (AMORIM et al., 2013).

1.1.2 Elementos de um projeto de fundação

A transferência de carga no solo em projetos de fundação é tradicionalmente dada utilizando elementos de fundação direta ou de fundação profunda, pois esses elementos normalmente não são envolvidos numa mesma fundação.

Associar elementos de fundação direta com profunda unindo as vantagens de cada parte tem sido um novo conceito abordado em projetos de fundações, dos quais têm apresentado economias nas situações em que seu uso é indicado. O desenvolvimento das técnicas executivas e de projeto progrediu para o uso de estacas de compactação. A abordagem é utilizada nas situações favoráveis em que o solo superficial tem boa resistência permitindo que a transferência de carga ao solo seja dividida entre as estacas e sapatas.

Apesar da técnica de melhoramento de solo com estacas de compactação ser um tipo de fundação tradicionalmente utilizada no Nordeste brasileiro, é uma solução de fundação não normatizada. Desta maneira, verifica-se a necessidade de um maior aprofundamento deste tema.

1.2. Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é propor um modelo de transferência de carga em terrenos melhorados com estacas de compactação.

E os específicos são:

- Determinar tipos de parâmetros e correlações geotécnicas mais adequadas ao uso da técnica estudada;
- Demonstrar uma metodologia para previsão da capacidade de carga de estacas de compactação;
- Apresentar fatores para estimativa do recalque e capacidade de carga do solo isolado;

1.3. Estrutura da Pesquisa

A dissertação é estruturada em seis capítulos, sendo cinco capítulos que desenvolvem o tema abordado e um capítulo de conclusões. O Capítulo 1 apresenta a introdução sobre o assunto, assim como os objetivos da pesquisa, e a maneira que o tema será apresentado na estrutura da pesquisa.

O Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica sobre as fundações superficiais, profundas (estaca isolada e grupo de estacas) e radiers estaqueados. Conceitua os sistemas de fundação e seus fundamentos teóricos, abordando o radier estaqueado citando os trabalhos pioneiros, as metodologias de análise indicações de uso. Descreve o procedimento de ensaio da prova de carga estática, sua normatização e o uso de instrumentação.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia e procedimentos adotados para previsão da capacidade de carga de estacas de compactação, assim como apresentação de fatores para estimativa do recalque e da capacidade de carga do solo isolado. É demonstrado um modelo para previsão de curva padrão carga x recalque para as estacas e pressão x recalque para o solo. E por fim, irá expor um modelo de transferência de carga utilizando uma curva padrão carga x recalque para o terreno melhorado, baseado no somatório das curvas dos elementos isolados: estaca e solo.

O banco de dados utilizados nesta pesquisa é apresentado no Capítulo 4, através da caracterização das obras em que os ensaios foram realizados, assim como também os resultados desses ensaios.

O Capítulo 5 contém os resultados das análises do Capítulo 3 tanto para os elementos isolados, como para a combinação de ambos através da simulação do solo melhorado. E por fim, serão apresentadas as conclusões, referências bibliográficas e apêndice da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contém os sistemas de fundação adotados nesta pesquisa. Os temas abordados são capacidade de carga e recalques de fundações profundas e superficiais, rigidez de uma estaca, estacas de compactação, grupos de estacas, radier estaqueado e ensaios de placa.

2.1 Fundações

Há sempre dois critérios básicos que o projeto de uma fundação deve obedecer: (i) deve haver segurança adequada à ruptura do solo de fundação, à ruptura da peça estrutural transmissora da carga ao solo, ao tombamento e deslizamento do conjunto da obra; (ii) o recalque resultante do carregamento do solo deve ser admissível para a obra, quer do ponto de vista de sua segurança estrutural, como de sua funcionalidade e uso, e eventualmente de sua aparência (GUSMÃO FILHO, 1998).

Em geral, nos projetos convencionais de fundações são utilizados dois tipos de fundações: superficiais e profundas. Atualmente, a associação desses dois tipos de fundação surge como uma nova abordagem de projeto, o radier estaqueado. Na nova abordagem, o bloco (radier) pode ser dimensionado, tanto para aumentar o suporte de carga da fundação, como para reduzir o número de estacas necessárias no controle de recalques (SOARES, 2011).

2.1.1 Fundação superficial

Fundação superficial segundo a NBR 6122 (ABNT, 2010) é todo elemento de fundação em que a carga é transmitida ao terreno pelas tensões distribuídas sob a base da fundação, e a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente à fundação é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação.

2.1.1.1 Capacidade de carga

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2010), a tensão admissível é a carga que, aplicada à sapata, provoca recalques que não produzem danos à estrutura e, simultaneamente, oferece segurança à ruptura ou escoamento da fundação.

As fórmulas de capacidade de carga são um instrumento bastante eficaz na previsão da tensão admissível do elemento de fundação e do solo subjacente. Terzaghi (1943) desenvolveu estudo sobre o equilíbrio de forças que agem nas superfícies de ruptura. Ao combinar conhecimentos da Teoria da Plasticidade com o cálculo de empuxos passivos, Terzaghi cria sua teoria para capacidade de carga dos solos (CAPUTO, 1976; VARGAS, 1977).

Sua teoria para o cálculo da capacidade de carga, admitiu algumas hipóteses:

- Resistência ao cisalhamento do solo definida em termos da coesão c e do ângulo de atrito φ ;
- Peso específico γ constante;
- Material com comportamento elasto-plástico perfeito;
- Material homogêneo e isotrópico;
- Estado plano de deformação.

A capacidade de carga para uma sapata corrida, segundo Terzaghi (1943) é dada pela equação (1), onde os três componentes da equação representam a influência da coesão, atrito e sobrecarga:

$$Q_u = c N_c + q N_q + \gamma \frac{B}{2} N_\gamma \quad (1)$$

onde: Q_u - Carga última

c - Coesão do solo

N_c, N_q, N_γ - Fatores de capacidade de carga

q - Sobrecarga

γ - Peso específico do solo (γ_{sub} se o solo estiver submerso)

B - Largura da fundação

Segundo a forma da fundação, a equação de Terzaghi (1943) para a capacidade de carga é:

$$Q_u = c N_c S_c + q N_q S_q + \gamma \frac{B}{2} N_\gamma S_\gamma \quad (2)$$

onde: S_c, S_q e S_γ - Fatores de forma da sapata

Para solos de ruptura local, tem-se:

$$Q_u' = c' N_c' S_c + q N_q' S_q + \gamma \frac{B}{2} N_\gamma' S_\gamma \quad (3)$$

O método de Skempton (1951) considera o caso de argilas saturadas na condição não drenada. Nesse caso a expressão de Terzaghi simplifica-se para:

$$Q_u = c N_c S_c + q \quad (4)$$

onde: $c = s_u$ - Coesão não drenada da argila.

2.1.1.2 Recalque

Uma fundação ao ser carregada sofre recalques, que acontecem em duas parcelas: a primeira, imediatamente após o carregamento; a outra, ao decorrer do tempo. O recalque final é a soma do recalque imediato com o recalque que ocorre com o tempo. O recalque por deformação elástica é o que se processa imediatamente após o carregamento. A parcela que se processa ao decorrer com o tempo se deve ao adensamento (o fenômeno pelo qual os recalques ocorrem com expulsão da água do interior dos vazios do solo) e ao “creep” – adensamento secundário.

Recalques admissíveis envolvem recalques totais e diferenciais de todas as fundações sob a estrutura planejada. Os recalques diferenciais devem ser limitados de modo a não causar desconforto estrutural ou inclinação excessiva da superestrutura e são também muitas vezes limitados pelos requisitos de utilização da superestrutura, por exemplo, faixas de guindaste e muitas máquinas têm limites de inclinação tolerável. O total de recalque deve ser limitado porque pode induzir recalques diferenciais, mesmo em solos aparentemente homogêneos. Eles também são muitas vezes limitados por considerações de fatores tais como o acesso aos edifícios adjacentes, água e ligações de esgoto, etc. (VESIC, 1975 apud GUSMÃO FILHO, 2003).

Velloso e Lopes (2004) separam os métodos para previsão de recalques em três categorias: racionais, semi-empíricos e empíricos.

Nos métodos racionais, são combinados parâmetros de deformabilidade, em laboratório e *in situ*. O recalque de uma sapata sob carga centrada, assumindo o solo como um corpo elástico, pode ser previsto conforme Equação 5:

$$s = q \times B \times \frac{(1-\nu^2)}{E_s} \times I_s \times I_d \times I_h \quad (5)$$

onde: q - Pressão média

B - Menor dimensão da sapata

ν - Coeficiente de Poisson

E_s - Módulo de Elasticidade

I_s - Fator de forma e rigidez da sapata

I_d - Fator de embutimento

I_h - Fator de espessura da camada compressível

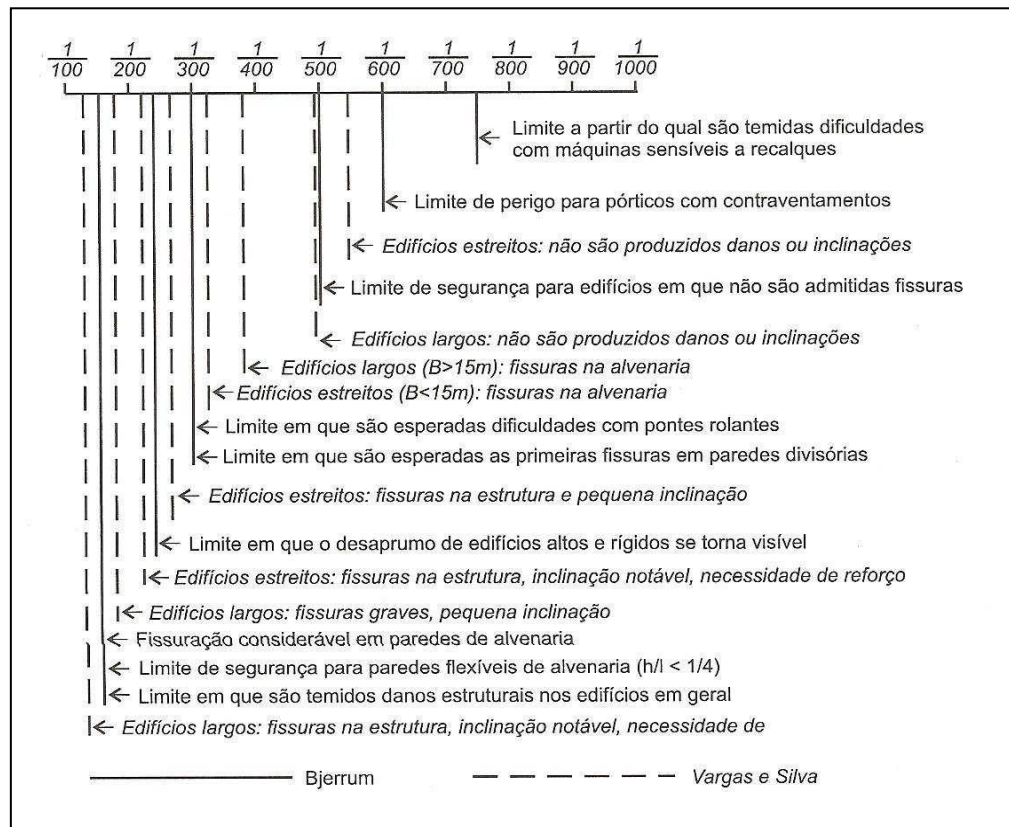
Nos métodos semi-empíricos, os parâmetros de deformabilidade são obtidos por correlação com ensaios *in situ* de penetração (estática, CPT ou dinâmica, SPT).

Os métodos empíricos chegam a uma previsão do recalque com base nas investigações de campo e laboratório. Esses métodos são usualmente aceitos em estruturas convencionais. Apresentam-se geralmente em forma de tabelas de tensões admissíveis, e não de recalques.

Toda fundação sofre deslocamentos verticais, horizontais ou rotacionais, conforme a solicitação a que está submetida. Estes deslocamentos dependem do solo e da estrutura a que está submetida. Quando os valores desses deslocamentos ultrapassam certos limites, pode-se chegar a um colapso da estrutura suportada pelo surgimento de esforços para os quais ela não está dimensionada. Pode-se dizer que os deslocamentos, conforme sua magnitude, terão influência sobre a estrutura, que vai desde uma simples redistribuição de cargas até o colapso (VELLOSO; LOPES, 2010).

Teoricamente, uma estrutura que sofresse recalques uniformes não sofreria danos, mesmo para valores exagerados do recalque total. Na prática, a ocorrência de recalque uniforme não acontece, havendo sempre recalques diferenciais decorrentes de algum tipo de excentricidade de cargas, ou heterogeneidade do solo. A limitação do recalque total é uma das maneiras de limitar o recalque diferencial. Bjerrum (1963) procurou estabelecer limites para a distorção angular em função de vários tipos de danos (Figura 1).

Figura 1 - Distorções angulares e danos associados



Fonte: Velloso e Lopes (2004).

2.1.2 Fundação profunda

O elemento de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, devendo sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0m. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas e os tubulões (ABNT, 2010).

2.1.2.1 Capacidade de Carga

Capacidade de carga é o valor da carga aplicada a uma estaca que atinge a máxima resistência disponível do conjunto solo-estaca. Portanto, é necessário que seja feita a estimativa da capacidade de carga das estacas em um projeto de fundação, pois a carga de trabalho admitida para as estacas deve ser menor que a sua capacidade de carga (GUSMÃO FILHO, 1998). A capacidade de carga de fundações profundas pode ser obtida por métodos estáticos, provas de carga e métodos dinâmicos.

Nos métodos estáticos de avaliação da capacidade de carga, a mesma é calculada por fórmulas que estudam a estaca mobilizando toda a resistência ao cisalhamento estática do solo (resistência obtida em ensaios de laboratório ou *in situ*). A capacidade de carga na ruptura é dada pela soma das parcelas de capacidade de carga da ponta mais do fuste. A investigação geotécnica mais difundida no Brasil é a sondagem à percussão com determinação da resistência à penetração do amostrador. Por isso, os profissionais de fundações têm tido a preocupação de estabelecer métodos de cálculo da capacidade de carga de estacas utilizando os resultados das sondagens à percussão. A NBR 6122 (ABNT, 2010) denomina de métodos semi-empíricos aqueles em que as propriedades dos materiais são estimadas, com base em correlações, para aplicação em fórmulas teóricas adaptadas.

O método semi-empírico Décourt - 1996 será utilizado como referência nesta pesquisa. Este método avalia a capacidade de carga das estacas por meio de correlações entre a carga de ruptura e o N_{SPT} . O valor do N_{SPT} utilizado para obtenção da resistência de ponta é a média aritmética entre o valor correspondente à ponta da estaca, o valor imediatamente anterior e o imediatamente posterior, como observado na Equação 6:

$$N = \frac{(N_{ponta} + N_{anterior} + N_{posterior})}{3} \quad (6)$$

Calculado o N_{SPT} médio de ponta, calcula-se a resistência de ponta em kN – Equação 7:

$$R_p = A_p (K \times N) \quad (7)$$

Onde os valores de K estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1 -Valores de K

Tipo de Solo	K (kPa)
Argilas	120
Siltes argilosos	200
Siltes arenosos	250
Areias	400

Fonte: Décourt, Albiero e Cintra (1998).

Já para obtenção da resistência por atrito lateral, considera-se o valor do N_{SPT} como sendo o valor médio ao longo do fuste da estaca. Não é feita nenhuma distinção em relação ao tipo de solo. O valor da resistência lateral em kN, é dado pela Equação 8:

$$R_L = A_L \left[\left(\frac{N}{3} \right) + 1 \right] \times 10 \quad (8)$$

Quando o $N_{SPT} \geq 50$, deve ser considerado o $N=50$, e quando $N_{SPT} \leq 3$, deve ser considerado 3. Tendo calculado os valores da resistência lateral e de ponta, tem-se a carga de ruptura para uma estaca padrão dado pela Equação (9) e capacidade de carga pela Equação 10.

$$Q_{rup} = R_L + R_P \quad (9)$$

$$Q_{adm} = \frac{R_L + R_P}{FS} \quad (10)$$

Para estacas escavadas, a ruptura física jamais ocorre. A ruptura considerada é a convencional, ou seja, a carga correspondente a um deslocamento do topo da estaca de 10% de seu diâmetro para argilas e de 30% de seu diâmetro para solos granulares. Para outros tipos de estacas, sugere-se que sejam considerados coeficientes α e β .

Os coeficientes α e β são coeficientes de majoração ou de minoração, respectivamente, para a reação de ponta (q_p) e para o atrito lateral unitário (q_L), que permitem estender os cálculos efetuados da estaca padrão para outros tipos de estaca. Para o método Décourt, Albiero e Cintra (1998), a carga de ruptura é dada pela Equação 11:

$$Q_{rup} = (\beta \times \rho_L \times A_L) + (\alpha \times \rho_P \times A_P) \quad (11)$$

Os valores de α e β sugeridos para os diversos tipos de estacas estão nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 -Valores do coeficiente α em função do tipo de estaca e de solo

Tipo de solo	Tipo de estaca				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,85	0,85	0,30	0,85	1,0
Solos intermediários	0,60	0,60	0,30	0,60	1,0
Areias	0,50	0,50	0,30	0,50	1,0

Fonte: Décourt, Albiero e Cintra (1998).

Tabela 3 -Valores do coeficiente β em função do tipo de estaca e de solo

Tipo de solo	Tipo de estaca				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,80	0,90	1,0	1,50	3,0
Solos intermediários	0,65	0,75	1,0	1,50	3,0
Areias	0,50	0,60	1,0	1,50	3,0

Fonte: Décourt, Albiero e Cintra (1998).

2.1.2.2 Recalque

Os métodos de previsão de recalques podem ser classificados de diferentes maneiras: (i) métodos baseados na Teoria da Elasticidade; (ii) métodos numéricos (inclusive baseados em funções de transferência de carga e; (iii) métodos semi-empíricos.

A mobilização do atrito lateral exige deslocamentos muito menores do que a mobilização da resistência de base. Assim, somente quando boa parte do atrito lateral está esgotada é que a resistência de ponta começa a ser mobilizada.

2.1.2.2.1 Métodos baseados na teoria da elasticidade

a) Uso de soluções para acréscimo de tensões

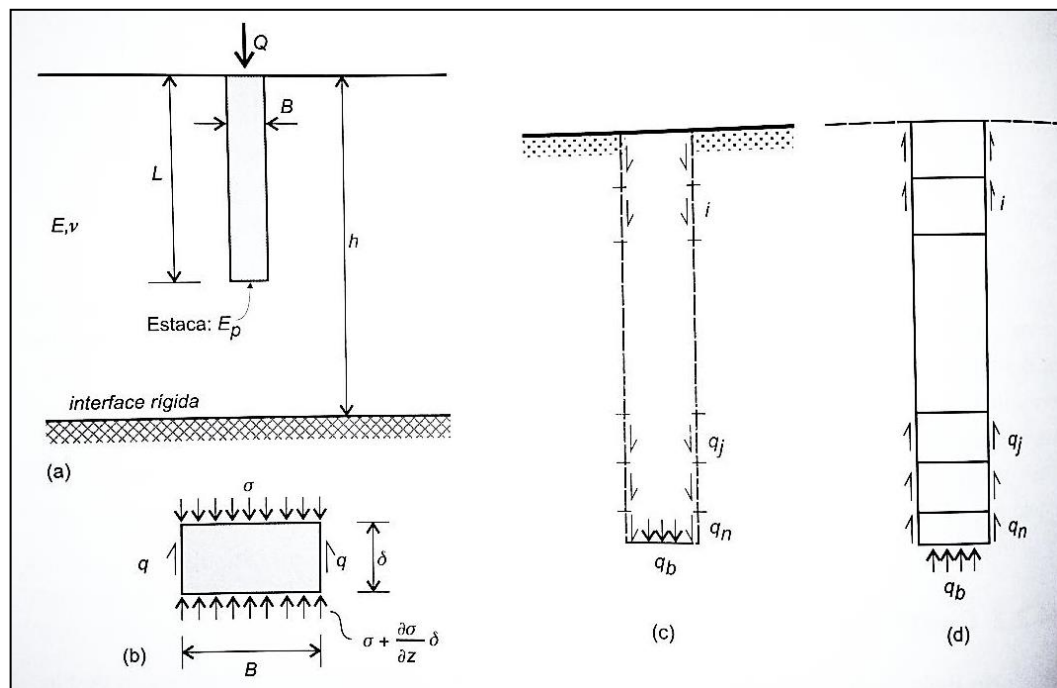
Essas soluções fornecem os acréscimos de tensão em qualquer ponto da vizinhança da estaca devidos à carga de fuste e à de ponta. Os acréscimos de tensão, obtidos em pontos abaixo da ponta da estaca podem ser combinados com as propriedades de deformação dos solos (abaixo da estaca), num cálculo indireto do recalque da ponta da estaca. A esse recalque, precisa ser somado o encurtamento elástico do fuste para se obter o recalque da cabeça da estaca.

Tanto para o uso na solução para o acréscimo de tensão como para o cálculo do encurtamento elástico do fuste, é necessário estimar as cargas transferidas pelo fuste e pela ponta no nível da carga de serviço (VELLOSO; LOPES, 2010).

b) Contribuição de Poulos & Davis - 1980

Os autores Poulos e Davis (1980) utilizam um processo numérico que emprega a solução de Mindlin para calcular a ação da estaca sobre o solo. A estaca é dividida em um número de elementos uniformemente carregados e a solução é obtida impondo uma compatibilidade entre os deslocamentos da estaca e os deslocamentos do solo adjacente para cada elemento da estaca (Figura 2). Os deslocamentos da estaca são obtidos considerando-se a compressibilidade da estaca sob a carga axial e os deslocamentos do solo são obtidos através da equação de Mindlin.

Figura 2 - Modelo de Poulos e Davis (1974): (a) o problema analisado; (b) o elemento de estaca; (c) a ação da estaca sobre o solo; (d) a ação do solo sobre a estaca



Fonte: Poulos e Davis (1974 apud VELLOSO; LOPES, 2010).

Foram obtidas soluções para estacas compressíveis, em solo de espessura finita e com ponta em material resistente, além de considerar diferentes valores para o coeficiente de Poisson.

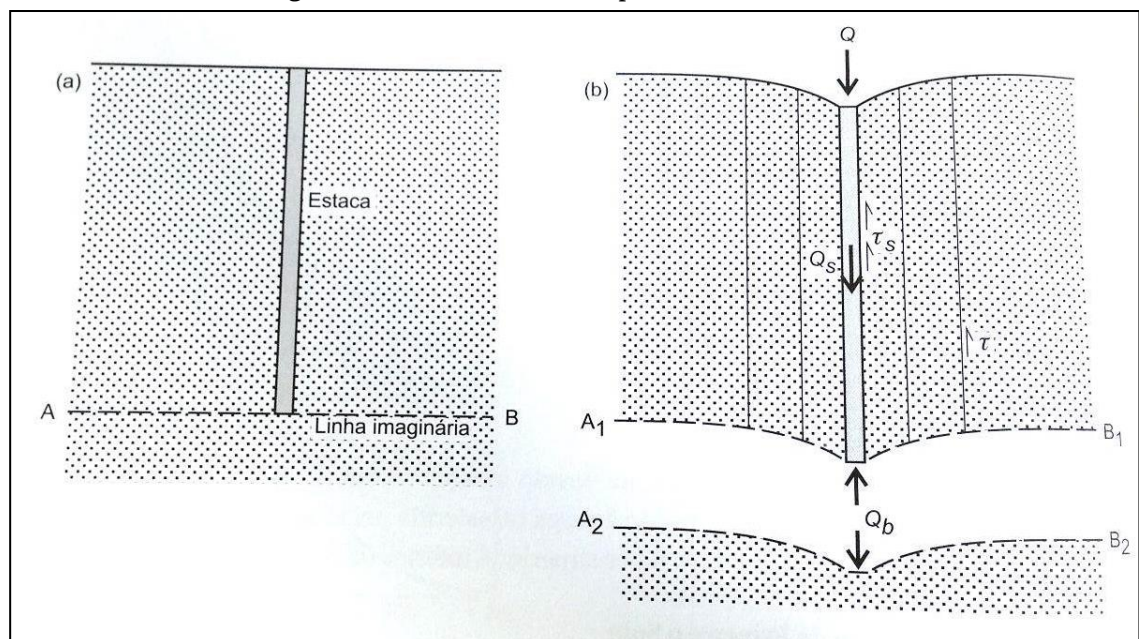
O trabalho de Poulos e Davis (1980) aborda também a questão do deslizamento na interface estaca-solo, a questão do meio heterogêneo e ainda a influência do bloco de coroamento.

c) Método de Randolph

Randolph e Wroth (1978) estudaram o recalque de uma estaca isolada carregada verticalmente, inicialmente com as cargas transferidas pela base e pelo fuste separadamente e em seguida juntando os dois efeitos para representar uma solução aproximada.

No modelo utilizado na sua análise, o solo afetado pela estaca é dividido em duas camadas por um plano horizontal que passa pela base da estaca. É admitido que a camada superior se deforma exclusivamente devido à carga transferida pelo fuste e a camada inferior, exclusivamente devido à carga transmitida pela base, como indicado na Figura 3.

Figura 3 - Camadas de solo superior e inferior



Fonte: Poulos e Davis (1980).

2.1.2.2.2 Métodos numéricos

a) Método de Aoki e Lopes - 1975

Este método fornece em qualquer ponto no interior de um meio elástico, o recalque e as tensões causados por uma estaca ou um conjunto de estacas. É feita a substituição das tensões transmitidas pela estaca ao terreno, tanto por fuste como por base, por um conjunto de cargas concentradas, cujos efeitos são sobrepostos no ponto de estudo. O recalque é a soma dos

recalques induzidos pelas forças concentradas devidas à carga na base e pelas forças equivalentes ao atrito lateral.

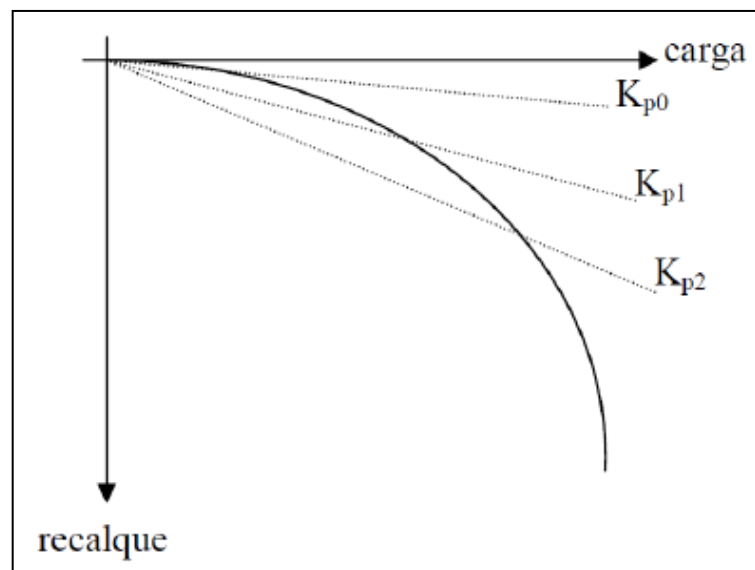
A capacidade de carga do fuste é utilizada primeiro, e uma aproximação, feita na definição do modo de transferência de carga para o método, consiste em supor que, sob a carga de serviço, toda a capacidade de carga do fuste é utilizada e apenas a parcela que falta para a carga de trabalho vai para a ponta. Assim, pode-se calcular a capacidade de carga por um método qualquer e tomar a capacidade de carga lateral como carga transferida pelo fuste, aproveitando a distribuição do atrito lateral com a profundidade, então se supõe que a carga restante é transferida pela base.

Para a estimativa do recalque do topo de uma estaca, deve-se utilizar o método para prever o recalque da ponta da estaca e a ele somar o encurtamento elástico do fuste.

2.1.3 Rigidez de uma estaca

A relação entre a carga aplicada (Q) a uma estaca e seu recalque (s) é definida como a rigidez de uma estaca (K_p). A curva carga-recalque é a representação gráfica da rigidez da estaca, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Curva de rigidez de uma estaca



Fonte: Sales (2000 apud SOARES, 2011).

2.2 Prova de Carga Estática

2.2.1 Prova de carga estática em placa

A prova de carga em placa é um ensaio de campo, realizado na superfície ou em profundidade, cujo objetivo é a verificação do comportamento do sistema formado pela placa e o solo, sob um determinado carregamento, para obter informações acerca da resistência e da deformabilidade. O ensaio é regido pela NBR 6489 – Provas de Carga Direta Sobre Terreno de Fundação (ABNT, 1984).

Os objetivos do ensaio mais comuns são obter parâmetros de deformação (por fórmulas da Teoria da Elasticidade), parâmetros de resistência (por fórmulas de capacidade de carga), coeficiente de reação vertical (supõe-se linear a relação pressão-recalque) e prever o recalque de uma fundação real por extrapolação direta.

Há diversos tipos de montagem de provas de carga. Um sistema de reação adequado à direção, ao sentido e à intensidade das cargas de ensaio é necessário para permitir o apoio do macaco hidráulico ao aplicar o carregamento. Para execução de uma prova de carga estática à compressão, existem três tipos de sistemas de reação: os tirantes, as cargueiras e as estacas de apoio.

2.2.2 Prova de carga estática em estacas

A prova de carga estática permite estabelecer a capacidade de carga de um elemento isolado de fundação. O ensaio consiste em obter a curva carga-recalque, a fim de analisar o comportamento da fundação. O método de ensaio é regido pela NBR 12131 - Estacas - Prova de carga estática (ABNT, 2006).

Milititsky (1991) diz que é fundamental que a execução dos ensaios siga rigorosamente as orientações da norma para permitir análises comparativas entre os resultados.

Segundo Aoki (1997), a prova de carga estática busca reproduzir a história do carregamento real de uma construção, que se realiza em estágios de carga quase sempre crescentes, ao longo do tempo, visando a avaliação da segurança que a fundação apresenta em relação ao estado último ou de ruptura.

A forma de aplicação de uma carga “Q” é dita estática, quando se leva um tempo longo para se atingir o valor “Q” em pequenos incrementos de carga dQ . A aplicação da carga “Q” é dita instantânea, quando ela é atingida em um único estágio de carregamento, e o tempo “t” de aplicação da carga em um pequeno intervalo de tempo.

A carga admissível, em função da ruptura física, é obtida em função do menor dos dois valores: carga de ruptura dividida por 2 ou carga correspondente ao recalque admissível dividida por 1,5.

Ao não se atingir a ruptura física, ou quando a ruptura não fica bem caracterizada, a capacidade de carga deve ser obtida pela extrapolação da curva “Carga x Recalque” ou critérios baseados num recalque limite, como o método da NBR 6122 (ABNT, 2010).

2.2.3 Interpretação de provas de carga estática

2.2.3.1 Análise da curva carga-recalque

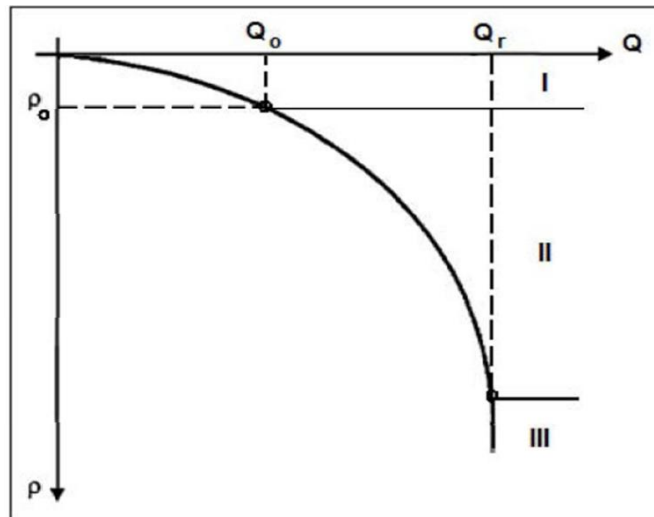
A curva carga-recalque precisa ser interpretada para se definir a carga admissível no elemento de fundação. Um item a ser interpretado é a carga de ruptura ou capacidade de carga da estaca. Décourt, Albiero e Cintra (1998) conceituam como carga última ou física a resistência máxima que o sistema solo-fundação pode oferecer; capacidade de carga e carga de ruptura como qualquer critério de ruptura, incluindo-se a ruptura física (critério de Van Der Veen, por exemplo) e a ruptura convencional (imposição de um recalque arbitrário para caracterização de ruptura – critério da NBR 6122 (ABNT, 2010), por exemplo; e carga mobilizada, que é a resistência máxima oferecida pelo sistema estaca-solo para um nível de energia aplicada, geralmente não representando a carga de ruptura física.

Aoki (1997) afirma que a determinação da carga estática última exige um sistema de reação adequado, para levar o sistema à ruptura. A curva carga x recalque obtida em prova de carga em estacas isoladas é dividida em três regiões, representadas na Figura 5.

- a) A primeira região (I) é de quase proporcionalidade entre as cargas e os recalques, sendo denominada de região de deformação elástica e é utilizada para determinar o coeficiente de recalque;

- b) A segunda (II) é a de deformação viscoplástica. Nesta região, a velocidade de carregamento influi muito sobre os recalques;
- c) A terceira (III) corresponde à região de ruptura; é a parte da curva que define a carga de ruptura (Q_r), quando o recalque aumenta indefinidamente com pequenos ou nenhum acréscimo de carga.

Figura 5 - Curva carga x recalque



Fonte: Reinert (2011).

2.2.3.2 Métodos de extrapolação

I. Extrapolação do ensaio em placa para sapatas

Como o bulbo de tensões mobilizado pela placa é bem menos profundo que o bulbo de tensões de uma sapata instalada no mesmo local, submetida ao mesmo carregamento, só é aplicável extrapolar os dados obtidos no ensaio em placa para uma sapata, se o solo for razoavelmente uniforme em profundidade.

Em solo puramente coesivo, a capacidade de carga independe da dimensão e será a mesma para placa ou sapata. Para argilas sobre-adensadas é razoável supor que, para uma mesma tensão aplicada, os recalques imediatos cresçam linearmente com a dimensão da sapata, pois o módulo de deformabilidade é constante com a profundidade e os bulbos são proporcionais à largura da placa e da sapata.

Para areias, a capacidade de carga é proporcional à dimensão. Mas os recalques não aumentam em proporção direta com a dimensão, pois em solos não coesivos há aumento do módulo de

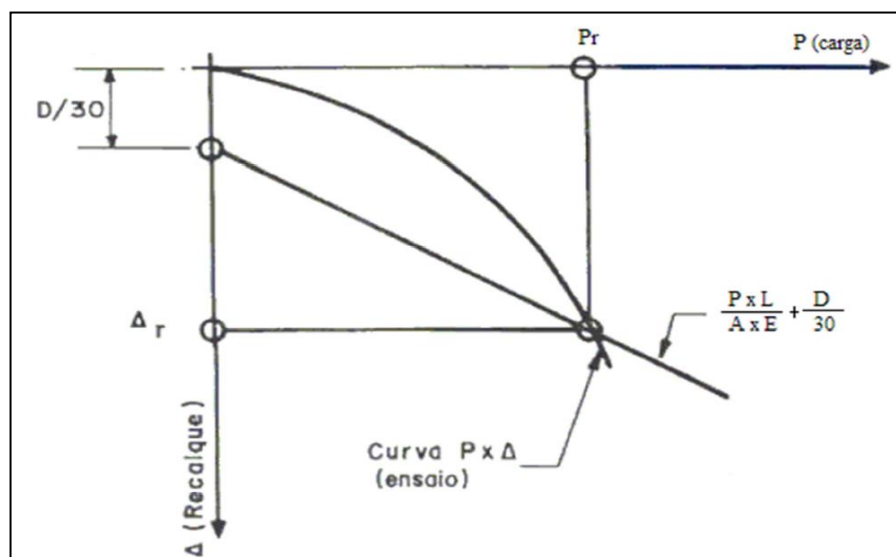
deformabilidade com a profundidade. Com o aumento da dimensão da sapata, o bulbo de tensões passa a atingir profundidades maiores, com solos menos deformáveis.

No caso particular de o módulo de deformabilidade aumentar diretamente com a profundidade, os recalques da placa e da sapata serão iguais, para uma mesma tensão aplicada, pois o aumento do bulbo é compensado pelo aumento do módulo. O módulo de deformabilidade da areia varia entre este extremo (aumentando diretamente com o aumento da profundidade) e o outro extremo, que é o caso das argilas sobre-adensadas (módulo constante com a profundidade). Assim, os recalques da sapata em areia serão maiores que os da placa, mas menores que os valores obtidos com a proporção direta do aumento da dimensão (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2003).

II. Método ABNT NBR 6122/2010

A norma NBR 6122 (ABNT, 2010) determina que a carga de ruptura pode ser convencionada como aquela que corresponde, na curva carga x deslocamento, ao encurtamento elástico da estaca somando ao deslocamento da estaca com corpo rígido (deformações elástica e plástica do solo), Figura 6.

Figura 6 - Curva carga x recalque



Fonte: ABNT (2010).

De acordo com De Beer (1988 apud DÉCOURT; ALBIERO; CINTRA 1998), a ruptura convencional é definida como sendo a carga correspondente a uma deformação da ponta (ou do

topo) da estaca de 10% de seu diâmetro, para estacas cravadas, e de 30% para estacas escavadas em solos granulares.

Há também a definição de ruptura física, pelo mesmo autor, como sendo o limite do acréscimo de recalque da ponta da estaca pelo acréscimo de carga, tendendo a infinito.

III. Método Van der Veen - 1953

A expressão proposta por Van der Veen (1953) para representar a curva carga-recalque tem sido amplamente utilizada no Brasil para extrapolação de curvas obtidas em provas de carga que não foram levadas à ruptura.

O método proposto por Van der Veen (1953) é uma representação matemática exponencial da curva carga x recalque, dada pela Equação (12):

$$Q = Q_{ult} \cdot (1 - e^{-a \cdot s}) \quad (12)$$

onde: Q - Carga aplicada no topo da estaca

Q_{ult} - Carga de ruptura

a - Coeficiente que define a forma da curva

s - Recalque correspondente medido no topo da estaca

Neste método, a carga de ruptura é definida, por tentativas, através de uma equação matemática ajustada como função do trecho que se dispões da curva carga-recalque.

Segundo Van der Veen (1953), partindo de um valor arbitrado de carga " Q_{ult} " (carga de ajuste), calculam-se os valores correspondentes de " $\ln \left(1 - \frac{Q}{Q_{ult}} \right)$ " que são plotados em um gráfico em função do recalque "s". Novas tentativas são realizadas com outros valores de " Q_{ult} " até que o gráfico resulte, aproximadamente, em uma linha reta. Então, adota-se este valor de " Q_{ult} " como a carga de ruptura do elemento. Utilizando a equação da reta, obtém-se o valor do coeficiente "a".

De acordo com Velloso e Lopes (2010), a extrapolação de curvas carga-recalque pelo método de Van der Veen pode ser razoável se o recalque máximo atingido na prova de carga for de, pelo menos 1% do diâmetro da estaca.

A aplicabilidade do método se restringe a estacas cravadas e a ensaios que tenha atingido, no mínimo, 70 % da carga de ruptura. Atualmente vários autores têm utilizado a extrapolação de Van der Veen (1953) também para estacas escavadas.

i. Modificação de Aoki - 1976

Na aplicação do método de Van der Veen e Aoki (1976 apud VELLOSO; LOPES, 2010) observou que a reta obtida não passava pela origem do gráfico. Assim, Aoki propôs a inclusão do intercepto daquela reta, ficando a expressão da curva carga-recalque de acordo com a Equação 13.

$$Q = Q_{ult} \cdot (1 - e^{-(a \cdot s + b)}) \quad (13)$$

Velloso e Lopes (2010) comentam que a existência desse intercepto é aceitável, ao se reconhecer que o solo é um material viscoso e que apresenta uma resistência viscosa a cada velocidade de carregamento e ao lembrar que a prova de carga estática é, na realidade, quase estática. Portanto, haveria um salto viscoso na prova de carga assim como ocorre nos ensaios de laboratório.

ii. Modificação de Massad - 1986

Em 1986, Massad propôs uma forma alternativa de se obter a carga de ruptura de Van der Veen. Na curva carga-recalque, considera-se uma série de n valores de recalques igualmente espaçados, conforme Equação 14.

$$s_n = n \cdot \Delta s \quad (14)$$

Onde Δs é um recalque constante adotado arbitrariamente e, em seguida, encontram-se os valores de Q_n , associados aos valores de s_n , com valores encontrados, plota-se um gráfico $Q_n \times Q_{n+1}$, ajusta-se uma reta e o ponto de interseção com uma reta a 45° define a carga de ruptura, já que na ruptura tem-se Q_n tendendo a Q_{n+1} . Portanto, na ruptura, a Equação 15 pode ser aplicada:

$$Q_n = Q_{n+1} = Q_{ult} \quad (15)$$

IV. Método de Décourt - 1996

Este método é baseado na hipótese de que a rigidez K da fundação pode ser calculada pela relação entre a carga a ela aplicada Q e o recalque s que ela provoca (DÉCOURT; ALBIERO; CINTRA, 1998).

Aumentando-se gradualmente os carregamentos na estaca, a rigidez da fundação tenderia então a zero no limite que $s \rightarrow \infty$ e $Q \rightarrow Q_{ult}$. Considerando, por hipótese, uma variação linear da rigidez K com o carregamento Q , expressa pela Equação 16:

$$K = \alpha + \beta Q \quad (16)$$

Os valores de α e β podem ser determinados por regressão linear dos dados de campo e a carga última Q_{ult} estimada considerando-se na Equação 17 a condição $K=0$, no que resulta em:

$$Q_{ult} = -\frac{\alpha}{\beta} \quad (17)$$

A aplicação de Décourt - 1996 é indicada para os casos de provas de carga onde o ensaio é efetuado até a ocorrência de recalques elevados. Este método não é aconselhado para estacas escavadas, já que a curva $K \times Q$ deste tipo de fundação apresenta em geral uma assíntota sub-horizontal com pequeno coeficiente angular (DÉCOURT; ALBIERO; CINTRA, 1998).

2.3 Comportamento tensão-deformação dos solos – Método Hiperbólico

Para análise das deformações dos solos, pode-se caracterizar o solo por sua relação tensão-deformação, utilizando a teoria da elasticidade. Quando um solo é carregado axialmente não há proporcionalidade entre a tensão (σ) e a deformação (ε), portanto, entende-se que não se aplica a elasticidade linear. A curva tensão-deformação dos solos, num carregamento uniaxial, apresenta comportamento próximo a uma hipérbole. Com base nesta constatação, Kondner (1963) apresentou o método hiperbólico para relacionar o módulo de elasticidade (E) com a deformação.

A figura 7 mostra a relação de ε/σ de um carregamento em função de ε . Os pontos se alinham aproximadamente segundo uma reta, determinada pela Equação 18, e conseqüentemente pela Equação 19.

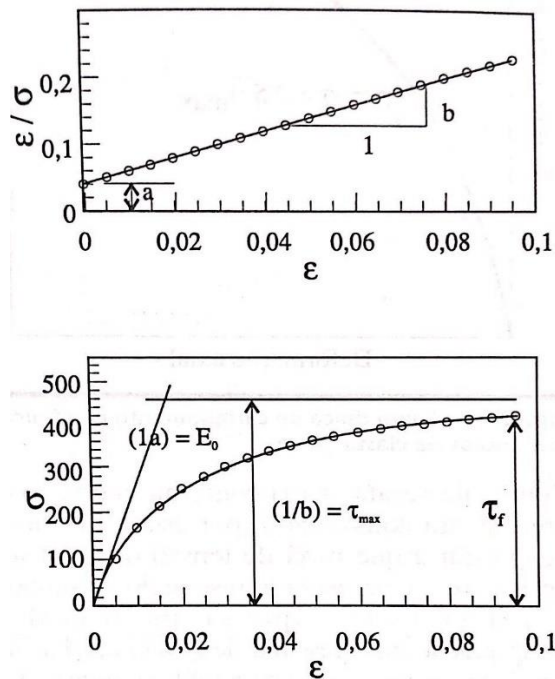
$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = a + b \cdot \varepsilon \quad (18)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{a + b \cdot \varepsilon} \quad (19)$$

Ducan e Chang (1968) apud Pinto (1998) desenvolveram um procedimento para obter parâmetros para cálculos numéricos, colocando ε em função de σ na Equação 18 e substituindo na Equação 19, obtém-se uma expressão de E em função da tensão atuante:

$$E = \frac{1 - b \cdot \sigma}{a} \quad (20)$$

Figura 7 - Curva carga x recalque



Fonte: Pinto (1998).

2.4 Curva Normalizada

Briaud e Gibbens (1999) mostram que a partir da curva normalizada pressão versus S/B , sendo S os recalques e B a largura da fundação, pode-se obter a curva carga x recalque de uma outra fundação para qualquer B .

Este conceito foi demonstrado a partir de análises dos resultados de ensaios de placa realizados em 5 sapatas com larguras entre 1 e 3 m (Figuras 8 a 12). Para cada ensaio carga versus recalque,

foi extraída a pressão média embaixo da sapata e o recalque que essa pressão estava ocasionando, em seguida foi extraída a relação S/B para cada ensaio. A partir desses dados, foi plotada uma curva pressão versus S/B para as sapatas de diferentes dimensões, obtendo-se resultados bastante coincidentes (Figura 13), dos quais mostram que é possível obter uma previsão da curva carga versus recalque para uma sapata de qualquer dimensão a partir da curva normalizada. Este conceito é utilizado no Capítulo 5 desta pesquisa.

Figura 8 - Curva carga x recalque para sapata de 1,0 m

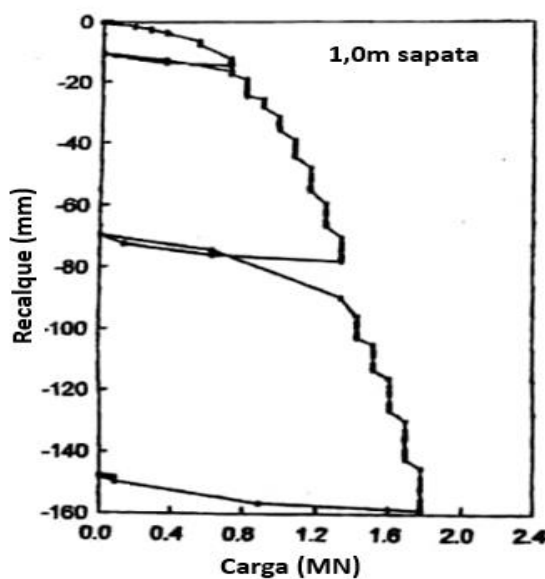
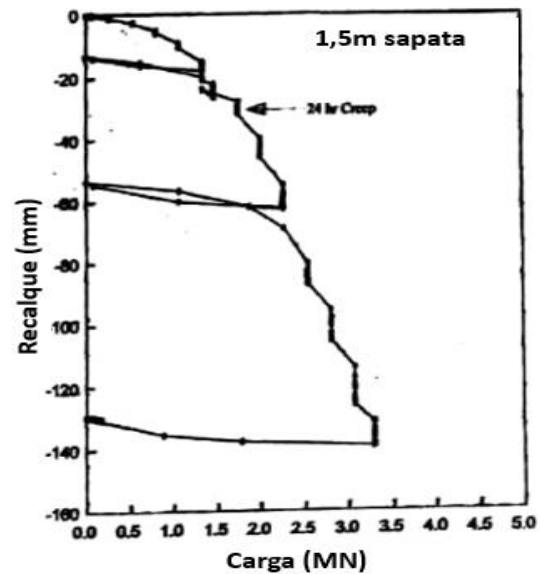


Figura 9 - Curva carga x recalque para sapata de 1,5 m



Fonte: Briaud e Gibbens (1999).

Figura 10 - Curva carga x recalque para sapata de 2,5 m

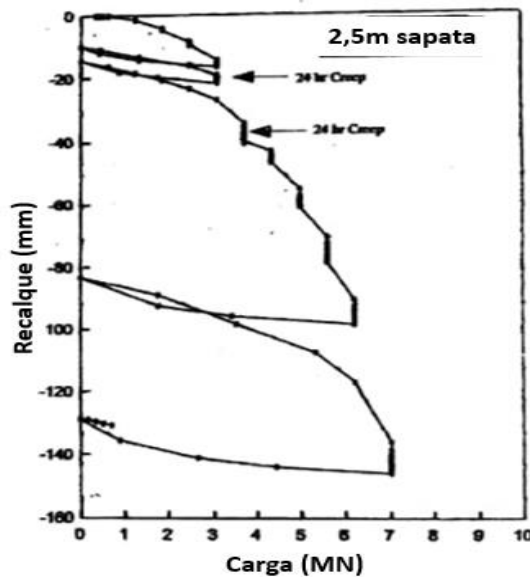
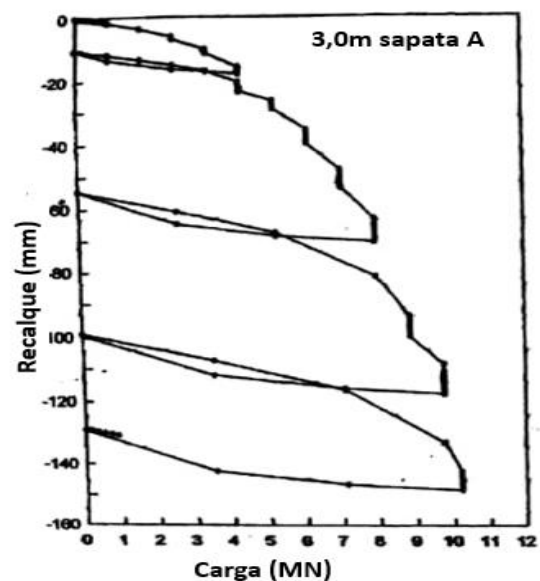


Figura 11 - Curva carga x recalque para sapata de 3,0 m



Fonte: Briaud e Gibbens (1999).

Figura 12 - Curva carga x recalque para sapata B de 3,0 m

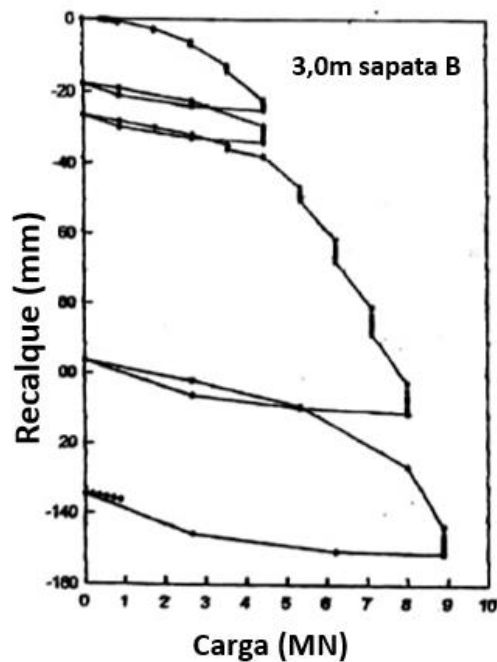
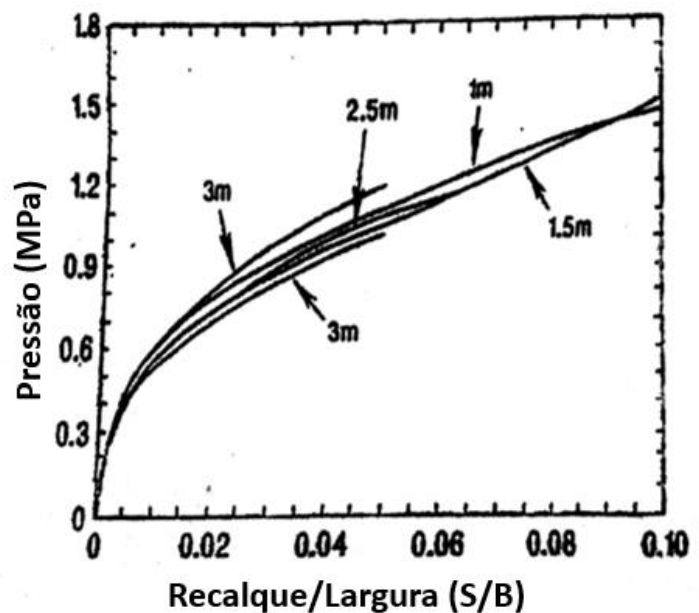


Figura 13 - Curva recalque/largura para todas as sapatas



Fonte: Briaud e Gibbens (1999).

2.5 Melhoramento do solo

A implantação da solução de melhoramento da camada superficial com de estacas de compactação pode viabilizar o uso de fundações superficiais, e reduzir de forma significativa os custos da fundação. O melhoramento possibilita uma elevação da tensão admissível do terreno, permitindo uma substancial diminuição nos volumes de escavação e de das fundações projetadas (GUSMÃO FILHO, 1998). O objetivo de melhorar a camada arenosa superficial é assegurar estabilidade à fundação e evitar recalques excessivos que possam trazer danos à obra (GUSMÃO et al., 2005).

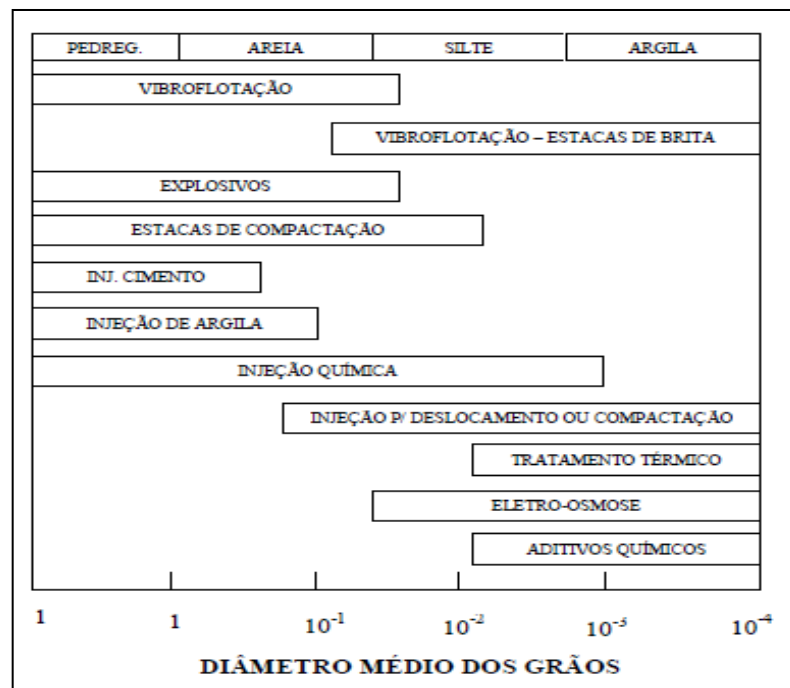
Existem várias técnicas para o melhoramento de terrenos arenosos, entre as quais as estacas de compactação. Essa técnica tem sido bastante utilizada em várias cidades nordestinas, tais como Recife, João Pessoa, Aracaju, Natal. Em João Pessoa, 90% das obras de fundações têm sido projetadas em sapatas com melhoramento prévio do solo, através da técnica de compactação com estacas de areia e brita (PASSOS, 2001 apud GUSMÃO et al., 2005).

Mitchell (1968 apud GUSMÃO et al. 2005) apresentou um resumo da aplicabilidade de diversas técnicas de melhoramento, em função da granulometria dos solos (Figura 14). Observa-se que

as estacas de compactação têm aplicação restrita aos solos granulares. Dentre os fatores influentes na eficiência do melhoramento com estacas de compactação, destacam-se: compactidade inicial do solo, energia de compactação e espaçamento entre as estacas (GUSMÃO et al., 2005).

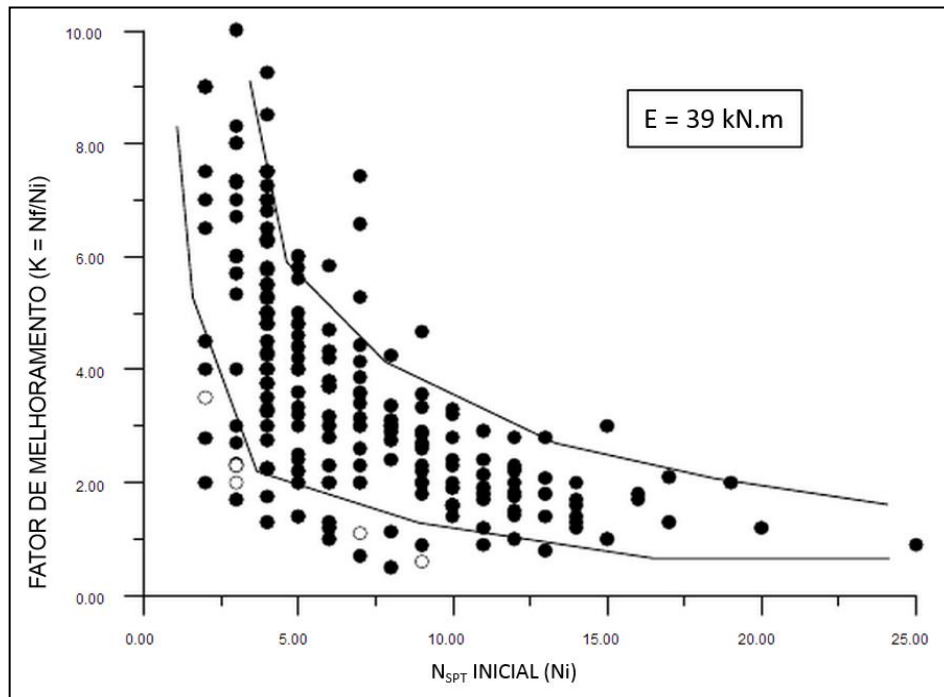
Gusmão Filho e Gusmão (2000) relacionaram o N_{SPT} antes (N_i) e após (N_f) o melhoramento, obtendo um fator de melhoramento (K) (Figura 15). Foram plotados pontos de mais de 20 obras diferentes da cidade do Recife. Percebe-se que o fator K diminui à medida que a compactidade inicial do solo aumenta, e que a maior parte dos pontos se situa em uma faixa bem definida. O gráfico que consta na Figura 16 foi baseado em resultados provenientes de obras das quais o método executivo foi o convencional, do qual utiliza-se um tripé com um pilão, ou um bate estaca tipo Franki. O processo da técnica executiva de uma estaca consiste em primeiramente colocar o tubo em prumo sobre o piquete. Em seguida é feita a cravação dinâmica de um tubo metálico de ponta fechada, utilizando uma bucha seca, até a profundidade especificada. Posteriormente a bucha é então expulsa e são introduzidas a areia e brita no tubo. E por fim, o tubo é levantado, e é feita a compactação de um novo trecho, até ser atingida a superfície do terreno.

Figura 14 - Melhoramento versus granulometria



Fonte: Mitchell (1968 apud GUSMÃO et al. 2005).

Figura 15 - Efeito da compactidade inicial do solo no melhoramento – Método Convencional



Fonte: Gusmão Filho e Gusmão (2000).

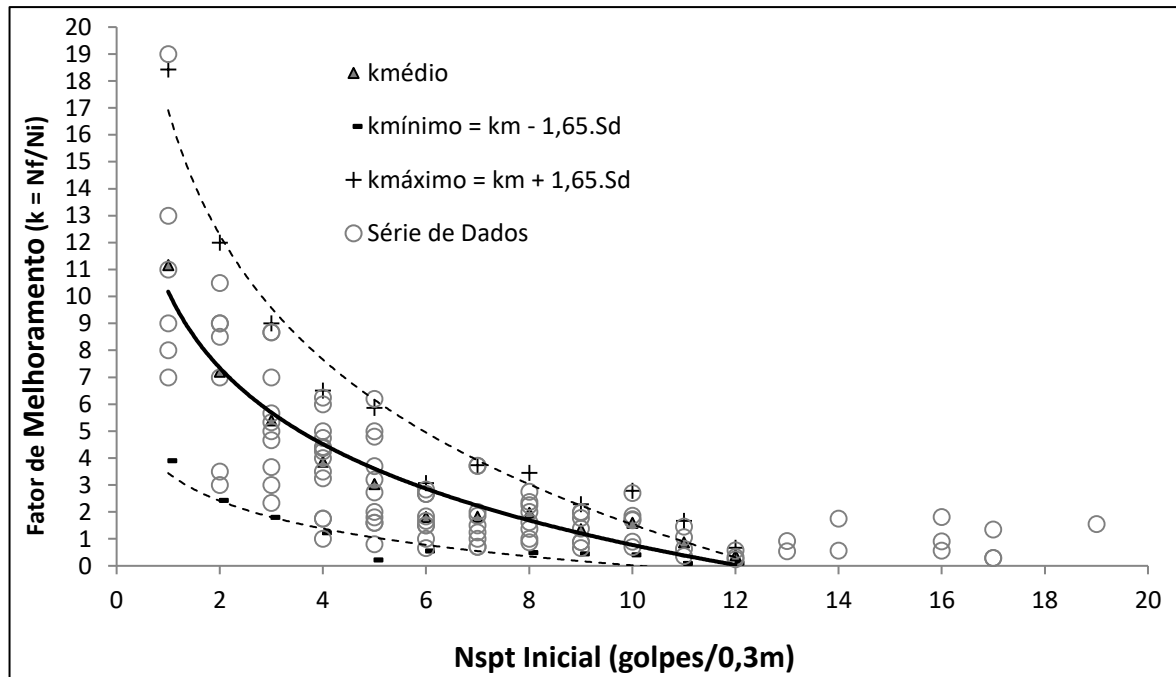
Diversos pesquisadores têm mostrado que a presença de finos reduz sensivelmente a eficiência do melhoramento (GUSMÃO FILHO; GUSMÃO, 1990). A presença de solo coesivo, ou de uma fração de finos no solo a compactar, cria reação às vibrações impostas ao terreno. Há um maior efeito de amortecimento nos solos finos sobre as vibrações horizontais induzidas, reduzindo bastante a eficiência do melhoramento.

Um fator importante na eficiência do melhoramento é a energia de compactação do equipamento. O aumento da energia conduz a uma maior eficiência do melhoramento. Contudo, equipamentos mais pesados produzem excessivas vibrações durante a cravação das estacas, o que pode causar danos às obras vizinhas (PACHECO, 2002).

Na década de 70, nos Estados Unidos, foi introduzido um método de execução de estacas de compactação, chamado Terra-Probe. Na Região Metropolitana do Recife, este método foi introduzido nos últimos 10 anos. O método construtivo consiste em cravar um tubo metálico ao solo utilizando vibrador hidráulico acoplado ao braço da escavadeira hidráulica. Em seguida, é feito o carregamento e transporte do material melhorado, utilizando a retroescavadeira. Enche-se o tubo metálico com material, utilizando a retroescavadeira. E por fim, retira-se pela vibração do tubo metálico com tampa basculante na ponta, deixando o material compactado no terreno. Com o objetivo de aferir a eficiência desta técnica, Gusmão, Oliveira e Amorim (2012)

desenvolveram um novo gráfico (Figura 16) apresentando o fator de melhoramento K para o método Terra-Probe. Apesar de ser um método com maior produtividade, a eficiência da compactação diminui à medida que o valor do N_{SPT} inicial aumenta.

Figura 16 - Efeito da compactidade inicial do solo no melhoramento – Método Terra-Probe



Fonte: Gusmão, Oliveira e Amorim (2012).

2.5.1 Melhoramento com estacas de areia e brita

Dentre as técnicas mais utilizadas para o melhoramento de solos preponderantemente arenosos, a compactação, tem sido muito difundida, com estacas de areia e brita, na prática de fundações para edifícios altos no Recife (GUSMÃO FILHO, 1998).

O objetivo desta técnica é densificar o solo por de três efeitos: (i) introdução do material compactado no terreno; (ii) deslocamento do material do terreno igual ao volume de material introduzido e; (iii) o efeito da vibração decorrente do processo de cravação dinâmica. Todavia, esta técnica, apresenta algumas limitações, dentre elas a diminuição da sua eficiência quando existe excessiva presença de finos no solo, geralmente caracterizada pela porcentagem de solo que passa na peneira N° 200 (PACHECO, 2002).

O melhoramento possibilita elevar a pressão admissível do terreno para valores de até 600 kPa, implicando em uma significativa redução dos volumes de escavação e de concreto. Esta técnica

tem permitido a adoção de fundações superficiais em prédios com até 30 pavimentos, em locais que de outra maneira requereriam fundações profundas (GUSMÃO FILHO; GUSMÃO, 1994, 2000).

Na fase de projeto de uma solução de compactação com estacas de areia e brita, Gusmão Filho (1998) sugere levar em conta os seguintes aspectos:

- A execução de uma estaca promove a compactação do solo circundante em raio de influência de 2 a 2,5 vezes o diâmetro da estaca.
- A malha do estaqueamento projetado deve cobrir toda a área da projeção da lâmina do prédio, estendendo-se uma ou duas filas de estacas além dos limites da projeção das sapatas dimensionadas.
- O comprimento da estaca é função da variação da compacidade da camada (ou densidade relativa da areia) com profundidade e da estrutura projetada.
- Mitchell (1968 apud GUSMÃO et al. 2005) propôs uma faixa ideal para o melhoramento por vibração caracterizada por uma percentagem de finos inferior a 20%. Sugere-se que a técnica de melhoramento com estacas de areia e brita não seja utilizada em terrenos com teor de finos de solo superior à esta percentagem.
- Quanto maior a compacidade inicial do solo, menor será o efeito do melhoramento. Para camadas com N_{SPT} inicial superior a 20 golpes, verifica-se, para a energia de compactação utilizada no Recife, que o efeito da compactação é praticamente desprezível.

Posterior à execução do estaqueamento, deve ser realizado o controle pelas sondagens a percussão. Com as sondagens antes e depois do melhoramento, estima-se a densidade relativa da areia em função do N_{SPT} obtido e da pressão vertical na cota do ensaio. Eventualmente, realizam-se provas de carga vertical à compressão em placas. Durante a construção do prédio, deve ser realizado o monitoramento dos recalques.

2.5.2 Melhoramento com estacas de argamassa

A técnica de melhoramento com estacas de argamassa é uma variante do uso de estacas de areia e brita, e foi desenvolvida em virtude das difíceis condições do subsolo do Recife. O processo de melhoramento de solos, conhecidos como “estacas de argamassa”, na verdade se trata de uma estaca constituída de concreto simples. O seu emprego é determinado em função

da granulometria do terreno superficial e da presença de camadas argilosas moles superficiais, que devem ser ultrapassadas para redução de recalques.

Para realização do projeto em estacas de argamassa, devem ser consideradas as seguintes operações:

- O estaqueamento projetado abaixo de uma sapata, com espaçamento menos que duas vezes e meia o diâmetro, trabalha em grupo, devendo ser considerado em conjunto como bloco ou tubulão equivalente, com transferência de carga para à camada de base das estacas.
- A carga na estaca depende do espaçamento entre as estacas e da tensão admissível da sapata, que leva à determinação da pressão máxima a ser transmitida pela sapata.
- O espaçamento das estacas define a geometria da sapata, a qual deve ter todas as estacas contidas na sua projeção, transmitindo uma tensão total menor do que a admissível do solo.

Posteriormente à execução do estaqueamento, devem ser realizados três controles: sondagens a percussão; ensaios de placa; e monitoramento de recalques.

2.6 Grupo de estacas

2.6.1 Efeito de grupo

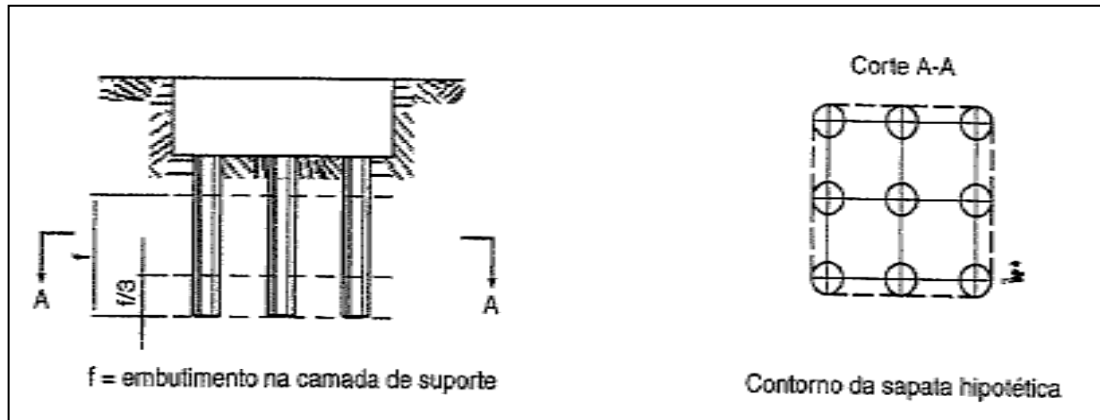
Entende-se por efeito de grupo de estacas ou tubulões como o processo de interação dos diversos elementos que constituem uma fundação ao transmitirem ao solo as cargas que lhe são aplicadas. Esta interação acarreta uma superposição de tensões, tal que o recalque do grupo seja, em geral, diferente daquele do elemento isolado (ABNT, 2010).

O grupo de estacas é usado para suportar pilares, com cargas mais elevadas que a carga de trabalho de uma única estaca. A ligação do grupo se dá por um bloco de coroamento no topo das estacas, que devem ser convenientemente espaçadas, em função do tipo de estaca e do solo (SOARES, 2011).

A carga admissível ou carga resistente de projeto de um grupo de estacas ou tubulões não pode ser superior à de uma sapata hipotética de mesmo contorno que o grupo seja assente a uma

profundidade acima da ponta das estacas ou tubulões igual a 1/3 do comprimento de uma penetração na camada de suporte, como mostrado na Figura 17 (ABNT, 2010).

Figura 17 - Grupo de elementos de fundação profunda



Fonte: ABNT (2010).

Atendidas essas condições, o espaçamento mínimo entre estacas ou tubulões deve levar em consideração a forma de transferência de carga ao solo e o efeito do processo executivo nas estacas adjacentes (ABNT, 2010).

2.6.2 Capacidade de carga de grupo de estacas

A capacidade de carga de um grupo de estacas dá-se pela relação entre o somatório das capacidades de carga das estacas isoladas e um fator de eficiência – Equação 21:

$$Q_{PG} = \eta \sum_{i=1}^n Q_P \quad (21)$$

onde: Q_{PG} - Capacidade de carga do grupo de estacas;

η - Fator de eficiência do grupo de estacas (depende do espaçamento, tipo do solo e do comprimento das estacas);

Q_P - Capacidade de carga de uma única estaca;

n - Número de estacas do grupo.

Gusmão Filho (2003) diz que o fator de eficiência em areias tem valor maior que 1, ou seja, a capacidade de carga do grupo é superior à soma das capacidades de carga individuais das estacas.

Randolph (1994) sugere que o valor da eficiência pode ser obtido em função do número de estacas do grupo (com e variando entre 0,3 a 0,5 para estacas de atrito, e valores maiores que 0,6 para estacas de ponta) – Equação 22.

$$\eta \approx n^{-e} \quad (22)$$

Vesic (1975 apud GUSMÃO FILHO, 2003) atribui o aumento da capacidade de carga à resistência de atrito na areia, que é crescente nas estacas do grupo. O autor conclui que a eficiência de atrito é igual a 3, enquanto a da ponta é igual a 1.

Todavia, é difícil a avaliação correta desse aumento de resistência e, em consequência, tanto no Brasil como no exterior, limita-se na rotina profissional a considerar-se que a capacidade de carga de um grupo de estacas em areia seja dada pela soma das capacidades de carga das estacas individualmente.

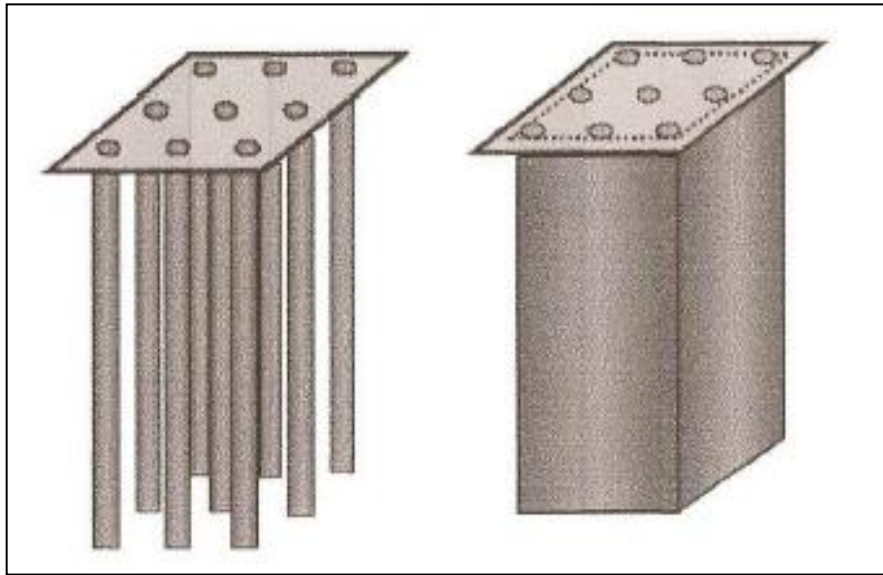
Usualmente em areias, admite-se como critério de projeto, o valor da eficiência igual a 1, para qualquer espaçamento (GUSMÃO FILHO, 2003; SOARES, 2011; PRESA; POUSADA, 2004).

Para argila, é costume proceder-se a considerações do tipo bloco de estacas, ou seja, considerar-se o grupo como sendo uma única estaca gigante com perímetro definido pela linha passando pelas estacas externas do grupo. A capacidade de carga dessa estaca gigante é comparada com a soma das capacidades de carga das estacas consideradas isoladamente adotando-se o menor entre esses dois valores.

Em argilas, geralmente, o efeito de grupo conduz a valores de eficiência menores que 1. Gusmão Filho (2003) considera a eficiência igual a 1 para as estacas, em um bloco de coroamento, com espaçamento maior que 3 vezes o diâmetro.

O modelo de ruptura considera que a resistência ao cisalhamento do solo é mobilizada na superfície vertical do bloco, definida pelo perímetro das estacas. A carga de ponta é calculada pela área da base do bloco (Figura 18).

Figura 18 - Ruptura por estaca isolada e por bloco



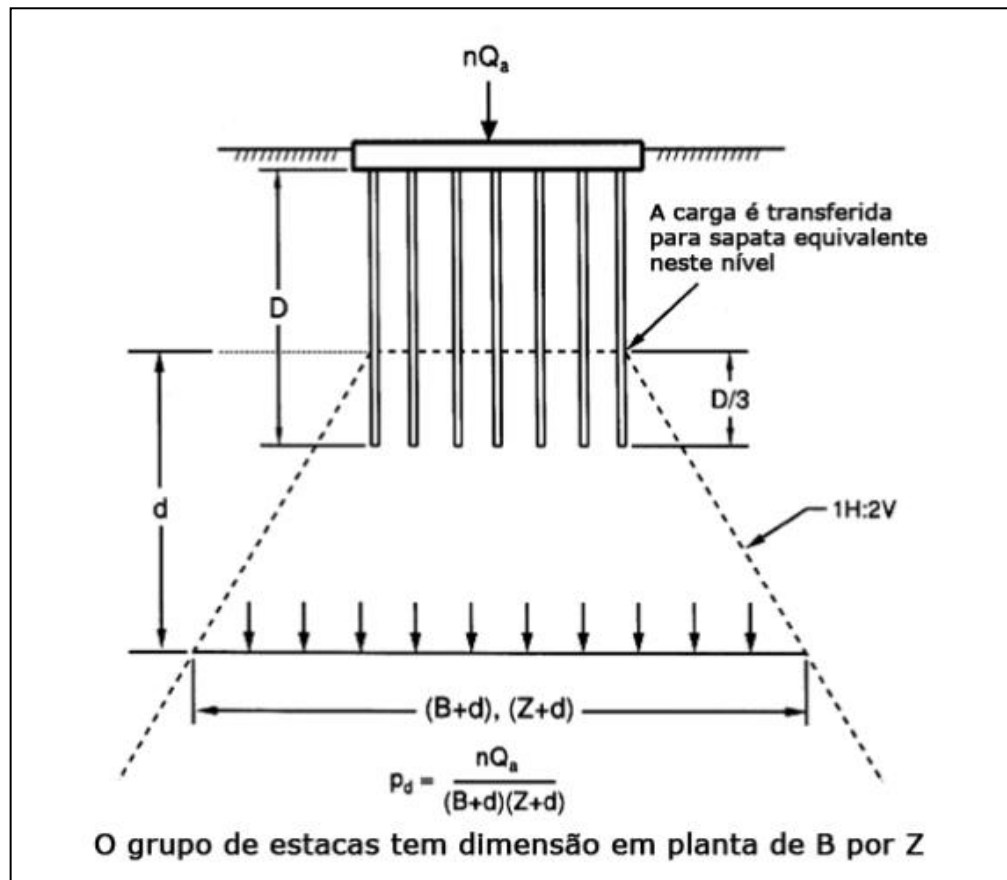
Fonte: Mandolini (2007 apud SOARES, 2011).

2.6.3 Recalque de um grupo de estacas

Para grupos de estacas é hoje possível estabelecer-se ligações entre o recalque do grupo e o de uma estaca isolada. Define-se como relação de recalque o quociente entre o recalque do grupo de estacas pelo recalque de uma estaca isolada submetida a carga média por estaca do grupo.

Terzaghi e Peck (1967) sugeriram avaliar o recalque de grupos de estacas nos solos coesivos introduzindo uma fundação equivalente (Figura 19) localizada na profundidade de $D/3$ acima da base das estacas. A pressão é transferida ao solo pela fundação. A carga é distribuída dentro de um tronco de uma pirâmide as faces da qual têm inclinação de 1:2 e causa a pressão adicional uniforme no solo subjacente. O cálculo do recalque de consolidação baseia-se nos incrementos de pressão nas camadas subjacentes.

Figura 19 - O esquema de fundação equivalente



Fonte: Terzaghi e Peck (1967).

Poulos e Davis (1980) propõem que a análise para o grupo de duas estacas pode ser estendida para qualquer número de estacas no caso do comportamento idêntico das mesmas, ou seja, o grupo deve ser “simétrico”, do arranjo circular, as estacas devem ter a carga e o recalque iguais. A solução para esse tipo de grupo revelou que o recalque adicional de uma estaca causado pelas estacas vizinhas pode ser aproximadamente calculado utilizando a superposição dos fatores de interação individuais. Porém, a superposição não pode ser considerada totalmente correta porque a adição de uma estaca muda o sistema elástico.

Deste modo o recalque s_i de uma estaca i em um grupo de n estacas, pode ser determinado pela Equação 23:

$$s_i = s_1 \sum_{j=1}^n P_j \alpha_{ji} \quad (23)$$

onde: s_1 - Recalque de uma estaca isolada sob carregamento unitário

P_j - carga na estaca j

α_{ij} - fator de interação para o espaçamento s_{ij} (para $i=j$, $\alpha_{ij} = 1$)

Para todas as estacas do grupo, tem-se a Equação 21:

$$P_G = \sum_{j=1}^n P_j \quad (24)$$

onde: P_G - Carga total aplicada ao grupo de estacas.

Assim, $n+1$ equações obtidas podem ser resolvidas para os dois casos: (i) carregamento igual aplicado a todas as estacas, condição do bloco flexível e; (ii) recalque igual de todas as estacas, bloco rígido.

Para simplificar o procedimento de cálculo no caso do bloco rígido, é sugerido que seja escolhida uma estaca representativa, sem ser estacas do centro ou das extremidades, e avaliado o seu recalque admitindo-se que todas as demais estacas do grupo suportem o mesmo carregamento.

2.7 Fundações mistas

Nos projetos de fundações profundas convencionais, a contribuição de capacidade de carga dos blocos de coroamento na transferência de cargas ao solo é desprezada. A ideia de se levar em conta a contribuição dos blocos nos projetos de fundações por estacas foi proposta pela primeira vez por Kishida e Meyerhof (1965).

As primeiras análises racionais de recalques desse tipo de fundação foram feitas por Poulos (1968). Hoje em dia, esse tipo de fundação vem tendo crescente aceitação em todo o mundo diante das suas características extremamente atraentes de segurança, economia e rapidez.

Fundações mistas são aquelas compostas por dois elementos, um vertical e vários horizontais. A transferência das cargas estruturais ao solo se faz por três maneiras: ao longo do fuste e da ponta do elemento vertical e também pela base do elemento horizontal.

a) Radier estaqueado

Esse tipo de solução para a fundação é adotado nos casos em que a capacidade de suporte do terreno para fundações rasas é de qualidade razoável, mas onde os recalques totais e diferenciais esperados possam ser elevados. A introdução de algumas estacas sob o radier tem como

objetivo reduzir os valores de recalque a níveis aceitáveis (BURLAND; BROMS; MELLO, 1977).

Segundo Poulos (2001), é comum em projetos de fundações considerar primeiramente o uso de um sistema de fundações superficiais, tal como um radier para suportar a estrutura, e se não for adequado, considerar o uso de fundações profundas, no qual toda carga será suportada por estacas. No entanto, uma estrutura, sua fundação e o solo ao redor interagem uns com os outros, mesmo que o projetista permita ou não essa interação (BURLAND, 2004).

O projeto de radier estaqueado envolve várias premissas que devem ser levadas em consideração, quer seja no aspecto geotécnico, quer seja no aspecto estrutural, pois o radier possui a função de distribuir adequadamente as cargas às estacas, necessitando, portanto, estar devidamente dimensionado e as estacas, por sua vez, devem estar posicionadas não só para reduzir os recalques diferenciais ou médios, mas também de maneira que permitam cooperar com o desempenho estrutural do radier (GARCIA, 2015).

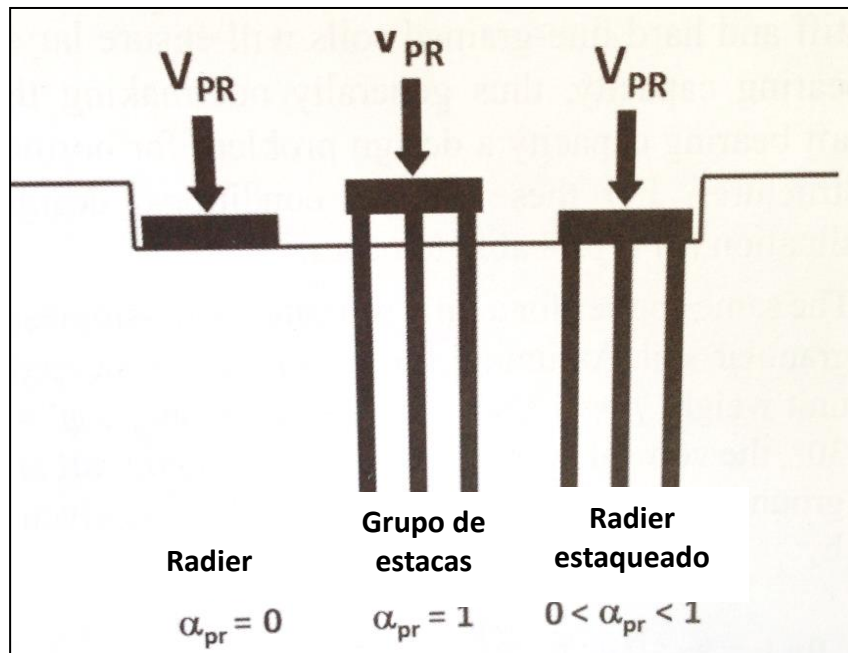
É possível considerar diferentes opções na utilização de estacas sob radier: aumentar a resistência do radier, reduzir o recalque médio ou recalques diferenciais, assim como momentos fletores e forças de cisalhamento no radier. Qualquer que seja o caso, a ampliação de diferentes opções de projetos é a base do conceito de radier estaqueado, que é considerar estacas cooperando com o radier em vez de ser vista como uma alternativa ao radier (MANDOLINI, 2012).

Entre os sistemas de fundações, o radier estaqueado pode ser caracterizado em função da distribuição de carga entre os elementos estaca (Q_P) e radier estaqueado (Q_{PR}), pelo coeficiente α_{pr} proposto por Mandolini (2003) - Equação 25:

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{P,i}}{Q_{PR}} \quad (25)$$

Um fator $\alpha_{pr} = 0$ representa uma fundação superficial sem estacas, enquanto $\alpha_{pr} = 1$ representa um grupo de estacas cujo topo não tem contato com o solo. Radiers estaqueados possuem um fator $0 < \alpha_{pr} < 1$. A princípio, toda fundação profunda, com uso de estacas, age como um radier estaqueado, com exceção de casos em que não há contato entre a estaca e o solo (Figura 20).

Figura 20 - Sistemas de fundação



Fonte: Mandolini (2003).

O comportamento do radier estaqueado é influenciado pelo espaçamento entre estacas. A razão de espaçamento crítico é o valor a partir do qual o contato do radier com o solo provoca um aumento na capacidade de carga da fundação. O aumento deve-se ao radier que transfere parte da carga diretamente ao solo ou impõe uma ruptura por bloco no grupo de estacas. Dessa forma a razão entre a capacidade de carga do grupo de estacas na ruptura por bloco e a capacidade de carga do radier estaqueado pode ser admitida como uma medida do aumento da capacidade de carga devido ao contato do radier com o solo (MANDOLINI, 2003).

Para espaçamentos menores que o crítico, o grupo de estacas e o radier estaqueado têm a mesma capacidade de carga e recalques iguais para as mesmas cargas de trabalho. Para espaçamentos maiores que o crítico, o grupo de estacas pode ter sua capacidade de carga muito aumentada se houver o contato do radier com o solo (COOKE, 1996 apud SOARES, 2011).

O modo mais simples de estimar a resistência de um radier estaqueado é somar a contribuição individual do radier sem estacas com o grupo de estacas, como foi originalmente proposto por Liu et al. (1985 apud MANDOLINI, 2012) – Equação 26:

$$Q_{PR} = Q_R + Q_{PG} \quad (26)$$

Phung (1992 apud MANDOLINI, 2012) observou que a instalação de estacas afetava as propriedades do solo e conseqüentemente mudaria o comportamento da carga recalque. Então seria preferível considerar a fórmula geral expressa na Equação 27:

$$Q_{PR} = \alpha_R \cdot Q_R + \alpha_{PG} \cdot Q_{PG} \quad (27)$$

onde: α_R e α_{PG} representam respectivamente a eficiência do topo e do grupo de estacas quando combinados num radier estaqueado.

Mandolini (2012) introduziu um valor ζ_{PR} (Equação 28) para verificar o aumento da capacidade de carga da fundação, devido ao contato do radier com o solo.

$$\zeta_{PR} = \frac{Q_{PR}}{Q_P} \quad (28)$$

Sem dúvida que a resistência de um radier estaqueado sempre será maior que de um grupo de estacas correspondente, existindo um aumento de carga devido ao contato do radier com o solo ($\zeta_{PR} > 1$). O coeficiente ζ_{PR} aumenta com o crescimento da razão de espaçamento e com a redução do número de estacas.

Ao associar uma estaca com um radier, existe uma diminuição da rigidez da estaca, em comparação com uma estaca isolada. Bezerra (2003 apud SOARES, 2011) explica que a presença do radier aumenta a capacidade de carga do sistema, em contrapartida, a estaca tem uma menor resistência pela diminuição de atrito entre o solo superficial e o fuste da estaca, que se deslocam quase por igual no primeiro quarto do comprimento da estaca, de cima para baixo. O que mostra que associar um radier e uma estaca isolada não significa um somatório das capacidades de carga de cada elemento do sistema.

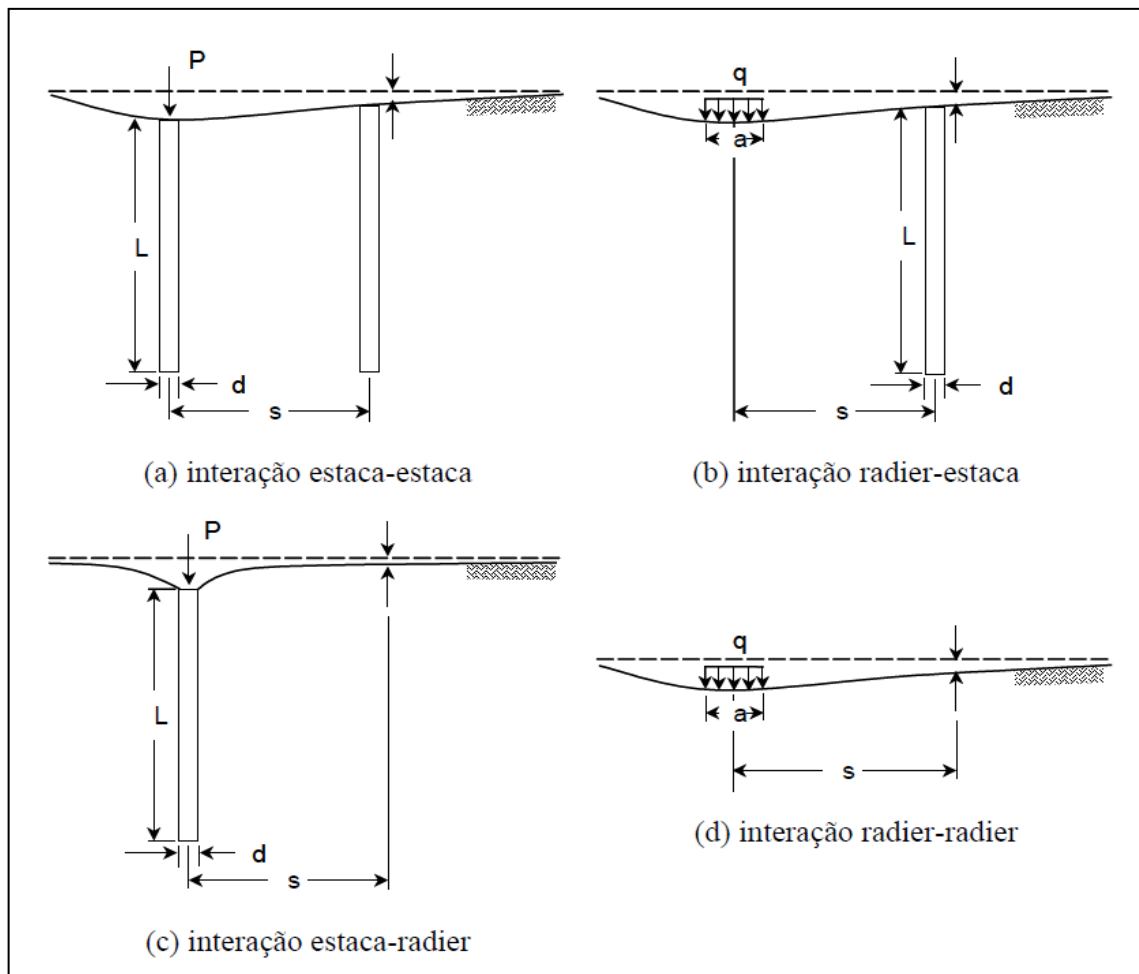
A aplicação mais eficaz da fundação em radier estaqueado ocorre quando o radier apresenta capacidade de carga adequada, mas os valores de recalques absolutos e/ou diferenciais no radier excedem os limites estabelecidos (SOARES, 2011). Poulos (2001) especificou como situação favorável ao uso da técnica, perfis de solo em argilas relativamente rígidas, ou areias relativamente compactas.

No entanto, não é favorável o uso desta técnica em solos fracos (argila mole ou areia fofa) próximos da superfície ou em profundidades relativamente rasas. E solos sujeitos a recalques por consolidação ou solos expansivos (SOARES, 2011).

O radier, ao entrar em contato com o solo, aumenta a tensão horizontal atuante no fuste da estaca; e ao mesmo tempo, o contato força o solo a recalcar. Como resultado o deslocamento relativo entre o fuste e o solo é reduzido na região próxima ao radier (PHUNG, 2010).

A análise de um radier estaqueado requer a consideração de quatro interações desenvolvidas entre os elementos da fundação mista (HAIN; LEE, 1978 apud BACELAR, 2003). A Figura 21 mostra essas interações.

Figura 21 - Mecanismos de interação em radiers estaqueados



Fonte: Modificado de Hain e Lee (1978 apud BACELAR, 2003).

O fator de interação (Figura 21 (a)) estaca-estaca é definido por Poulos (1972) conforme Equação 29:

$$\alpha = \frac{\text{recalque adicional devido a uma carga unitária na estaca adjacente}}{\text{recalque da estaca devido a uma carga unitária}} \quad (29)$$

Geralmente, esses fatores de interação são apresentados apenas para um meio contínuo homogêneo, isotrópico e linearmente elástico. Os fatores de interação (Figura 21 (b,c)) entre estaca – radier (β_p) e radier – estaca (β_s) são calculadas pelas Equações 30 e 31:

$$\beta_p = \frac{\text{recalque adicional da estaca devido à carga superficial unitária}}{\text{recalque da estaca sob carga unitária}} \quad (30)$$

$$\beta_s = \frac{\text{recalque adicional da superfície do solo devido à carga unitária aplicada na estaca}}{\text{recalque da superfície devido à carga superficial unitária}} \quad (31)$$

A interação radier – radier (Figura 21 (d)) representa a tradicional distribuição de recalques superficiais em um radier perfeitamente flexível, que pode ser avaliada usando-se as soluções da teoria da elasticidade linear para um meio homogêneo ou para o caso de um maciço de solo com módulo de elasticidade linearmente crescente com a profundidade.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para desenvolvimento desta pesquisa consistiu inicialmente de uma revisão bibliográfica sobre os itens dos quais compõem a fundação superficial com melhoramento de solo com de estacas de compactação. E como complemento, pesquisas sobre radier estaqueado foram utilizadas, também, como base bibliográfica, pois se trata de um sistema do qual englobam dois elementos de fundação distintos: um vertical e outro horizontal.

Foi utilizado um banco de dados de uma empresa local, especialista em geotecnia, com ênfase em projeto de fundações, onde foram analisadas 16 (dezesesseis) obras, as quais tiveram como solução de fundação, sapatas assentes no terreno melhorado com estacas de compactação, e foram selecionadas para utilização dos dados, apenas as obras das quais tinham resultados de provas de carga estática em placa, totalizando 09 (nove). Com os resultados das provas de carga, foi possível extrair dados que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa.

São apresentados fatores para estimar o recalque e a capacidade de carga do solo isolado e por fim, uma “curva padrão” para previsão da curva pressão x recalque obtidas por de ensaios de placa. E será demonstrada também, neste capítulo, a metodologia da proposta de modelo de transferência de carga para terrenos melhorados com estacas de compactação.

3.1 Estaca isolada

3.1.1 Capacidade de Carga

O Método de Décourt – 1996 foi originalmente previsto para estacas de deslocamento, posteriormente, utilizando-se coeficientes de majoração ou de minoração (α e β) para a reação de ponta e para o atrito lateral foi possível viabilizar o seu uso para estacas escavadas, hélice contínua, raiz e pré-moldada.

Como nesta pesquisa o foco é um aprimoramento do estudo da transferência de carga de fundação superficial em terreno melhorado com estacas de compactação, foram feitas análises dos resultados de ensaios de placa com placas com os mesmos diâmetros das estacas de compactação com o objetivo de se obter os coeficientes α e β para este tipo de estaca.

As etapas procedidas foram as seguintes:

- i. Coleta de dados: características da estaca (material, diâmetro, comprimento e resultados de ensaios de placa) e do solo (resultados de ensaios de placa e sondagens);
- ii. Com os dados das sondagens de referência, foi extraído o coeficiente K do solo sob a ponta da estaca, baseado no Método de Décourt -1996;
- iii. Em seguida, foi feita a extrapolação das curvas carga x recalque dos ensaios de placa, através do Método de Van der Veen (1953), para obtenção da carga de ruptura do ensaio;
- iv. A resistência lateral da estaca foi determinada como a carga correspondente a um recalque equivalente a 2% do diâmetro da estaca, encontrada nos gráficos dos resultados dos ensaios sobre as estacas;
- v. Com o valor da carga de ruptura (obtido no item iii), subtraiu-se a resistência lateral (item iv) da estaca de modo a obter a resistência de ponta da estaca;
- vi. Para encontrar os valores do atrito lateral unitário e da resistência de ponta unitária, os valores totais foram divididos pela área lateral e de ponta, respectivamente;
- vii. E por fim, com os valores de N_{SPT} lateral e de ponta médios, foram determinados os valores de α e β para cada obra em questão.

3.1.2 Curva padrão carga x recalque

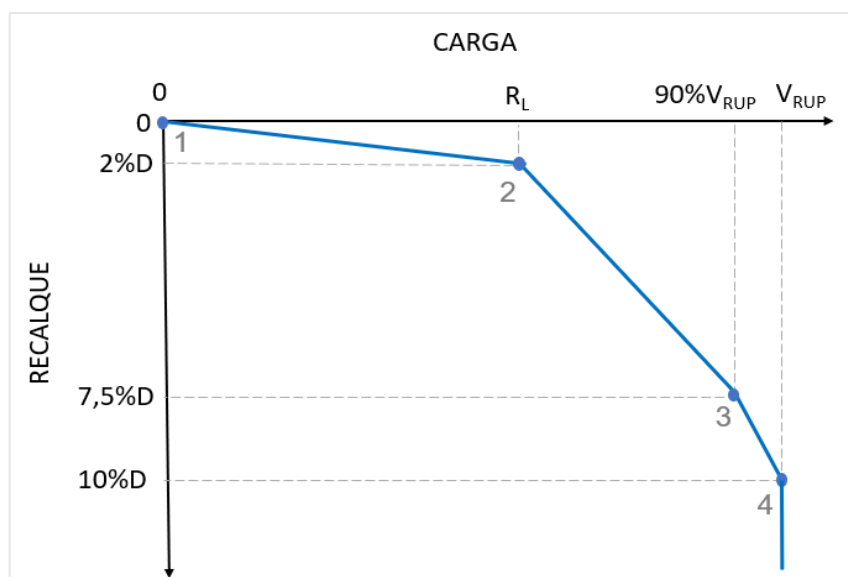
No intuito de obter-se uma curva carga x recalque padrão, da qual permitisse prever o resultado das provas de carga realizadas no elemento estaca isolada, utilizou-se o resultado de 09 ensaios de placa (os mesmos resultados utilizados para encontrar o α e β mencionados no item anterior).

Para encontrar uma “curva-padrão” carga x recalque, foram feitas várias correlações entre as cargas e os recalques fornecidos pelos ensaios em estaca isolada.

O ponto de partida da curva padrão, foi o ponto 1 (0;0), a partir dele, foi traçado o segundo ponto do gráfico, na ordenada seria o recalque equivalente a 2% do diâmetro da estaca e na abscissa a carga correspondente a resistência lateral da estaca (R_L).

Com os valores obtidos das cargas de ruptura de cada ensaio (Van der Veen - 1953), foi adotado como critério que a carga de ruptura possui um valor de recalque correspondente de aproximadamente 10% do diâmetro das placas. Sendo, este, o ponto 4 do gráfico (Figura 22). Então, para um ponto intermediário, após várias correlações entre os valores de carga e recalque dos ensaios de placa, percebeu-se que os recalques correspondentes a 90% da carga de ruptura, eram da ordem de 3,5 a 12,7 % do diâmetro da placa. Desta maneira, foi adotado um valor intermediário igual a 7,5 % do diâmetro. Encontrando-se o ponto 3 do gráfico. A Figura 22 mostra os pontos para encontrar a curva padrão carga x recalque da estaca isolada.

Figura 22 - Curva padrão carga x recalque da estaca isolada



Fonte: Autora.

3.2 Solo isolado

3.2.1 Recalque

Com o objetivo de se estimar o recalque com maior acurácia para solos melhorados com estacas compactação, inicialmente foram retroanalizados os valores do módulo de elasticidade utilizando valores de recalques e pressões médias resultantes de 09 provas de carga estática. Em seguida, foi verificado o N_{SPT} fornecido pelos relatórios de sondagens a percussão antes e após a compactação para cada prova de carga. Neste caso, utilizou-se a Equação 5.

Com os valores do módulo de elasticidade retroanalizados e do N_{SPT} antes e após a compactação, foi feita uma relação entre esses coeficientes, afim de se obter uma relação entre o N_{SPT} do solo compactado com o módulo de elasticidade (Equação 32):

$$\mu = \frac{E}{N_{SPT}} \quad (32)$$

Em um projeto convencional, não se tem, inicialmente, o valor do N_{SPT} após o melhoramento. A recomendação é usar um fator de melhoramento ($K = N_f/N_i$) proposto por Gusmão Filho e Gusmão (2000). E com o valor de N_f e o coeficiente “ μ ”, obtém-se o módulo de elasticidade.

3.2.2 Capacidade de Carga

Para se obter o ângulo de atrito de solos arenosos compactados, foram analisados 09 (nove) ensaios de placa realizados diretamente sobre o solo entre estacas de compactação.

A capacidade de carga para uma sapata corrida foi dada pela equação de Terzaghi - 1975, onde os três componentes da equação representam a influência da coesão, sobrecarga e atrito. Admitindo-se que a primeira e a segunda parcela sejam nulas, tem-se que a carga última do solo é dada por:

$$q_u = \gamma \frac{B}{2} N_\gamma S_\gamma \quad (33)$$

Como têm-se os valores de q_u (obtidos nesta pesquisa através do Método de Van der Veen, 1953) e B a partir dos ensaios de placa e S_γ igual a 0,6 pelo fato da placa ser circular, considerou-se o peso unitário do solo igual a 18 kN/m³ para se obter o valor de N_γ . Com esse dado, pode-se obter o ângulo de atrito para cada ensaio de placa. Então, obteve-se uma média dos valores do ângulo de atrito.

3.2.3 Curva padrão pressão x recalque do solo isolado

Para encontrar uma “curva padrão” pressão x recalque, foram realizadas várias correlações entre as pressões e os recalques fornecidos pelos 10 (dez) ensaios de placa para obter os pontos do gráfico que determinariam esta curva.

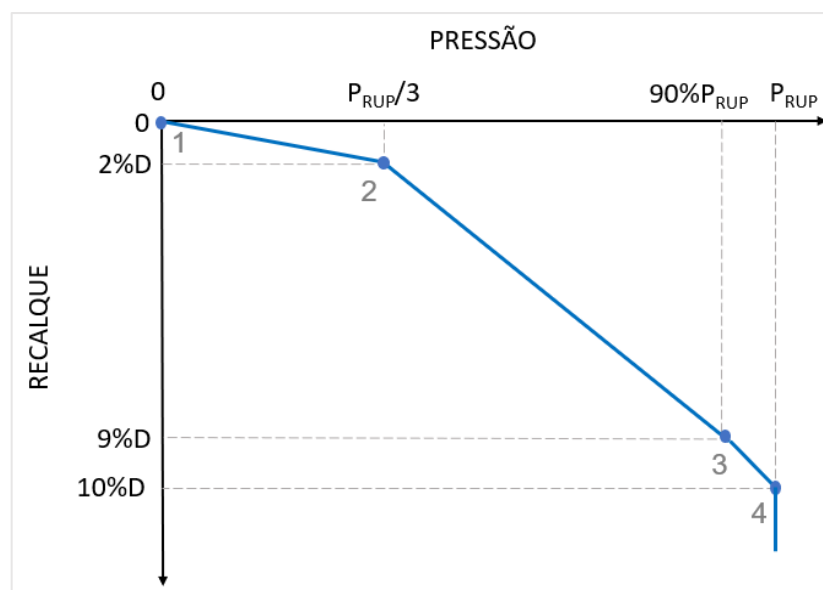
O ponto 1, da Figura 23, foi o (0;0). Diante deste ponto, foi encontrado o ponto 2 do gráfico, sendo na ordenada o recalque equivalente a 2% do diâmetro da placa e na abscissa a pressão correspondente a um terço da pressão de ruptura encontrada pela Equação 30.

Em seguida, foi admitido que o recalque correspondente a pressão de ruptura (Van der Veen) possuem um valor de aproximadamente 10% do diâmetro das placas. Correspondente ao quarto ponto.

E para encontrar um ponto intermediário, foram encontrados os recalques correspondentes a 90% da pressão de ruptura, concluindo-se que a ordem de grandeza desses recalques é 9% do diâmetro da placa do ensaio.

A Figura 23 mostra os pontos para encontrar a curva padrão pressão x recalque do solo isolado.

Figura 23 - Curva padrão pressão x recalque do solo isolado



Fonte: Autora.

3.3 Solo melhorado

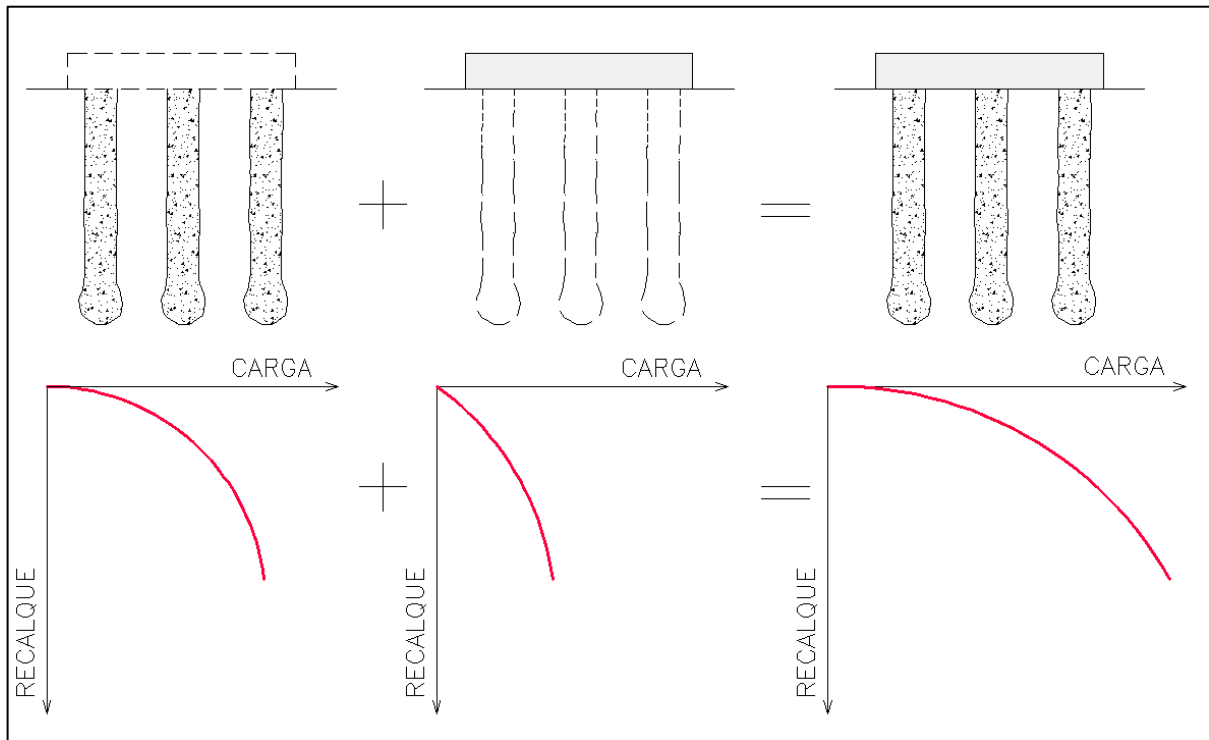
Para determinar o comportamento dos elementos isolados tanto da estaca como do solo, foram feitas as análises mencionadas nos itens 3.1 e 3.2, onde foram obtidas curvas padrões “carga x recalque” e “pressão x recalque” para estaca isolada e para o solo isolado, respectivamente.

É possível simular, a partir dessas curvas, o comportamento das estacas embutidas no solo melhorado.

A Figura 24 mostra que ao somar as curvas de cada elemento isolado (solo e estaca), obtém-se a curva do maciço melhorado. Percebe-se, desta forma, que a carga total (V_{pr}) do grupo, será o somatório das cargas aplicadas na placa (V_r : elemento horizontal) mais as cargas aplicadas nas estacas (V_p : elemento vertical) (Figura 25 e Equação 34).

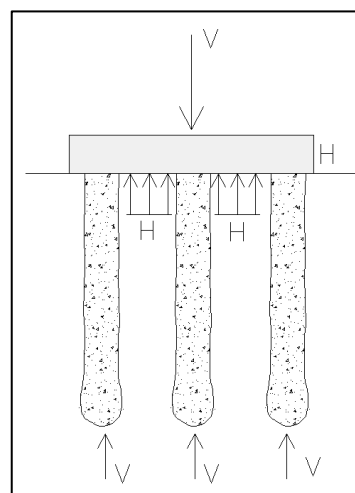
$$V_{pr} = V_r + V_p \quad (34)$$

Figura 24 - Curva do solo melhorado através do somatório das curvas da estaca isolada e do solo isolado



Fonte: Autora.

Figura 25 - Cargas aplicadas ao conjunto



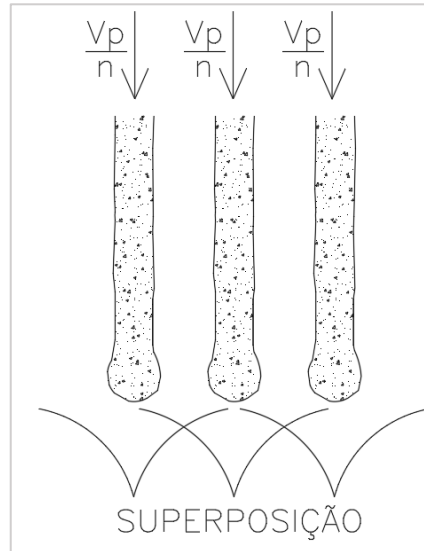
Fonte: Autora.

Considerando a placa como um elemento rígido, tem-se que o recalque da placa deverá ser igual ao recalque das estacas – Equação 35.

$$S_{\text{placa}} = S_{\text{estacas}} = S_{\text{grupo}} \rightarrow S_r = S_p = S_{pr} \quad (35)$$

No entanto, existe uma superposição da carga de uma estaca sobre a outra, havendo uma interação estaca-estaca, como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 - Superposição do acréscimo de recalque em função da interação estaca-estaca



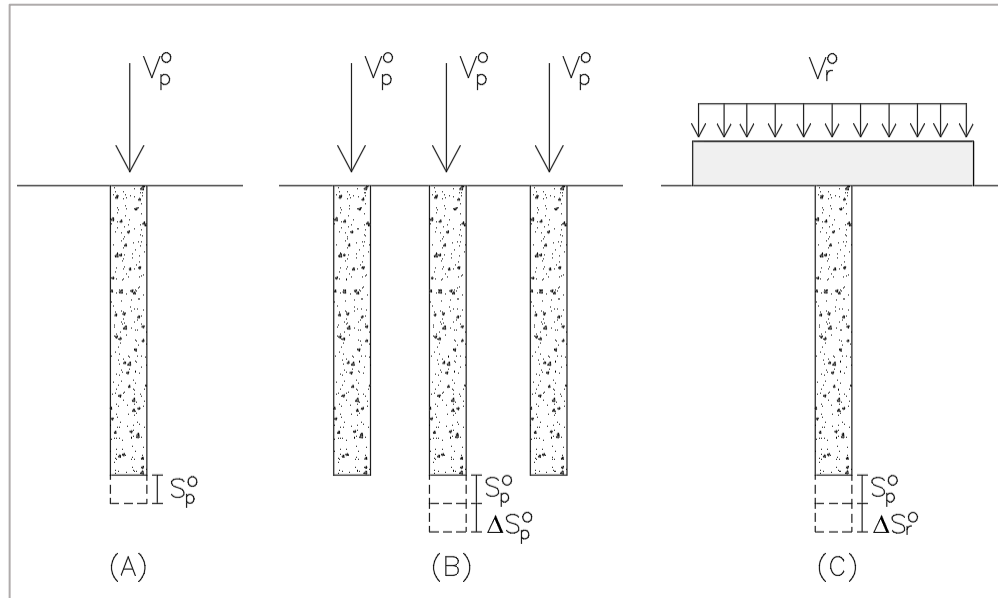
Fonte: Autora.

Em um sistema de fundação direta apoiada em estacas de compactação existe uma interação entre os elementos verticais entre si (estacas) e também entre o elemento horizontal (placa ou sapata) com as estacas subjacentes.

A Figura 27 (a) mostra que uma carga (V_p^o) aplicada em uma estaca ocasionará um recalque (S_p^o). Na Figura 27 (b) pode ser visto que se houver mais de uma estaca no mesmo sistema de fundação, aplicando-se a mesma carga (V_p^o), o recalque de uma estaca será o recalque (S_p^o) mais um acréscimo de recalque (ΔS_p) devido à superposição dos efeitos dos elementos verticais adjacentes (as estacas). Já a Figura 27 (c) indica que a presença de um elemento horizontal (placa ou sapata) sobre uma estaca, o recalque desse sistema de fundação será o recalque (S_r^o) mais o acréscimo de recalque devido a presença do elemento horizontal (ΔS_r).

Desta maneira em um sistema de fundação tanto com a presença de um elemento horizontal com mais de um elemento vertical, o recalque do grupo será o somatório do recalque (S_{pr}^o) da carga aplicada (V_{pr}^o), mais o acréscimo de recalque em função da interação estaca-estaca (S_{ov}), mais o acréscimo de recalque ocasionado pela interação placa-estaca (ΔS_{pr}), como mostra a Equação 37.

Figura 27 - (a) Recalque em função da carga V_o ; (b) Recalque em função da carga V_o mais o acréscimo de recalque devido a interação estaca-estaca e; (c) Recalque em função da carga P_o mais o acréscimo de recalque devido a interação placa-estaca



Fonte: Autora.

$$S_{\text{grupo}} = S_{\text{placa}} = S_{\text{estacas}} = S_{\text{pr}}^f = S_{\text{pr}}^o + \Delta S_r + \Delta S_p \quad (37)$$

Mas:

$$\Delta S_p = S_p^o \cdot \alpha_v \quad (38)$$

$$\Delta S_r = S_r^o \cdot \alpha_H \quad (39)$$

Desta forma:

$$S_{\text{pr}}^f = S_{\text{pr}}^o + S_p^o \cdot \alpha_v + S_r^o \cdot \alpha_H$$

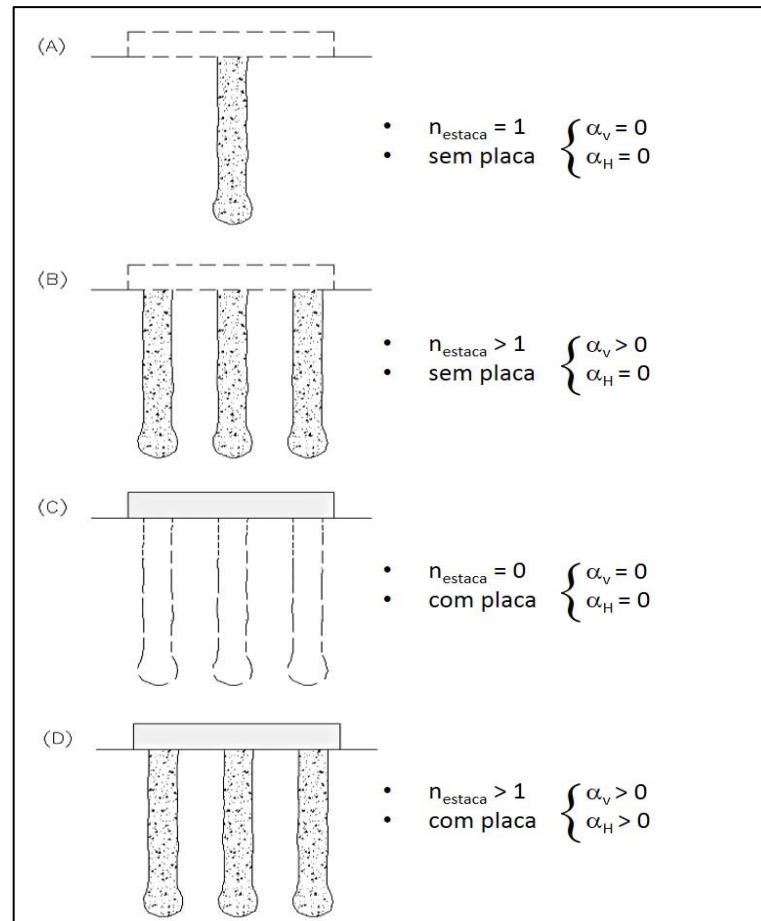
$$S_{\text{pr}}^f = S_{\text{pr}}^o [1 + \alpha_v + \alpha_H] \quad (40)$$

Como o objetivo desta pesquisa é simular um modelo de transferência de carga para solo melhorado com estacas de compactação, são calculados os valores das incógnitas α_v e α_H e apresentados posteriormente. Com essas incógnitas, pode-se calcular o recalque de um sistema de fundação em que se tem uma placa ou sapata apoiada sobre estacas de compactação.

A Figura 28 (a) mostra que para um sistema em que não existe a presença do elemento horizontal e apenas uma estaca $\alpha_v = 0$ e $\alpha_H = 0$. A Figura 28 (b) mostra que para um sistema em que não existe a presença do elemento horizontal e mais de um elemento vertical $\alpha_v > 0$ e $\alpha_H = 0$. A Figura 28 (c) mostra que para um sistema em que apenas existe a presença do elemento

horizontal sem elementos verticais, $\alpha_v = 0$ e $\alpha_H = 0$. E por fim a Figura 28 (d) mostra que para um sistema em que existe a presença tanto do elemento horizontal como de elementos verticais $\alpha_v > 0$ e $\alpha_H > 0$.

Figura 28 - Valores de α_v e α_H para diversos casos de sistemas de fundação



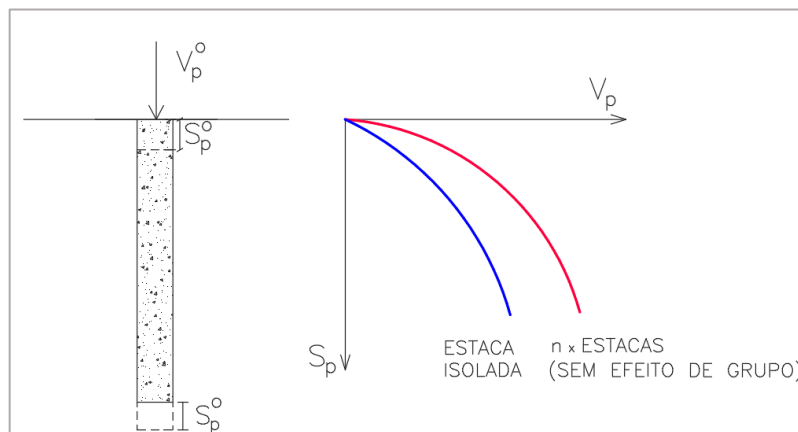
Fonte: Autora.

Para simulação do melhoramento do solo são feitos estudos com os dados de 4 obras. As etapas procedidas foram as seguintes:

- i. Seleção de uma prova de carga realizada sobre uma estaca (estaca isolada), e uma prova de carga realizada sobre o solo entre as estacas (solo isolado).
- ii. Obtenção da curva da estaca isolada e do solo isolado com o Modelo Hiperbólico através dos parâmetros “a” e “b”, carga de ruptura e módulo de deformação inicial (Figuras 29 e 30).
- iii. Seleção da prova de carga realizada sobre o terreno melhorado, ou seja, uma placa apoiada parte nas estacas e parte no solo entre as estacas.
- iv. Obtenção da curva carga-recalque da fundação mista admitindo-se a sapata rígida (Figura 31).

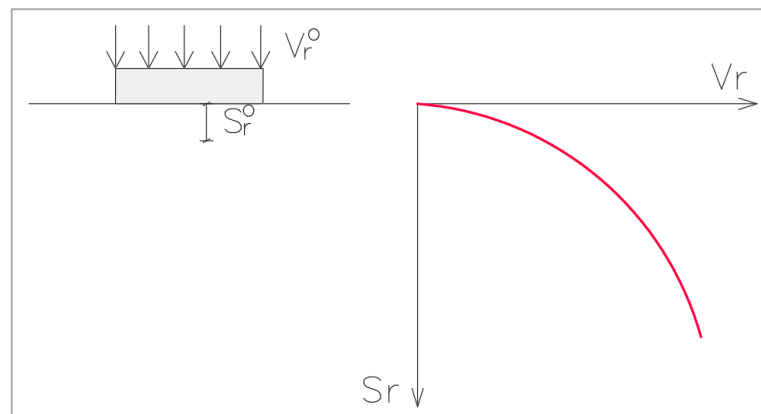
- v. Simulação da prova de carga no terreno melhorado como sendo a soma da prova de carga de “n” estacas isoladas, mais uma prova de carga de uma sapata fictícia apoiada apenas no solo.
- vi. Cálculo da dimensão da sapata fictícia (Figura 32);
- vii. Obtenção da curva carga-recalque da quantidade de estacas a ser simulada (Figura 33);
- viii. Obtenção da curva carga-recalque da sapata fictícia (Figura 34);
- ix. Obtenção da curva carga-recalque da placa sobre o terreno melhorado através da soma das curvas das provas de carga isoladas (Figura 35).
- x. Adoção de valores de α_V e α_H para ajuste da curva obtida no item x à curva do ensaio real (item iv), como mostrado na Figura 36.

Figura 29 - Curva carga-recalque de uma estaca isolada no Modelo Hiperbólico



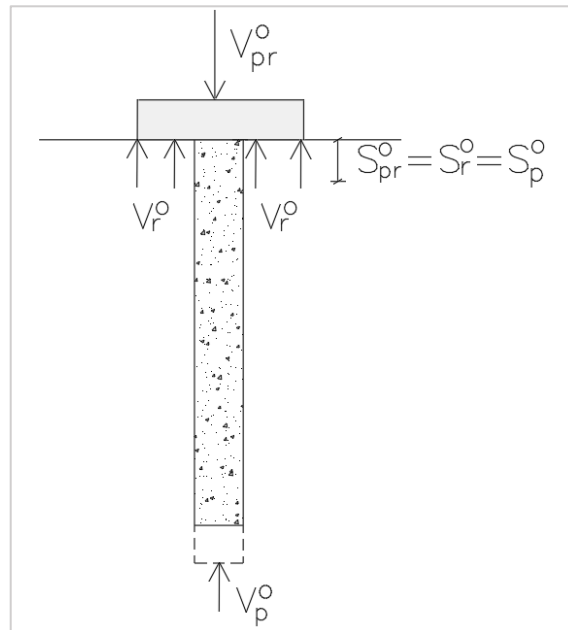
Fonte: Autora.

Figura 30 - Curva carga-recalque do solo isolado no Modelo Hiperbólico



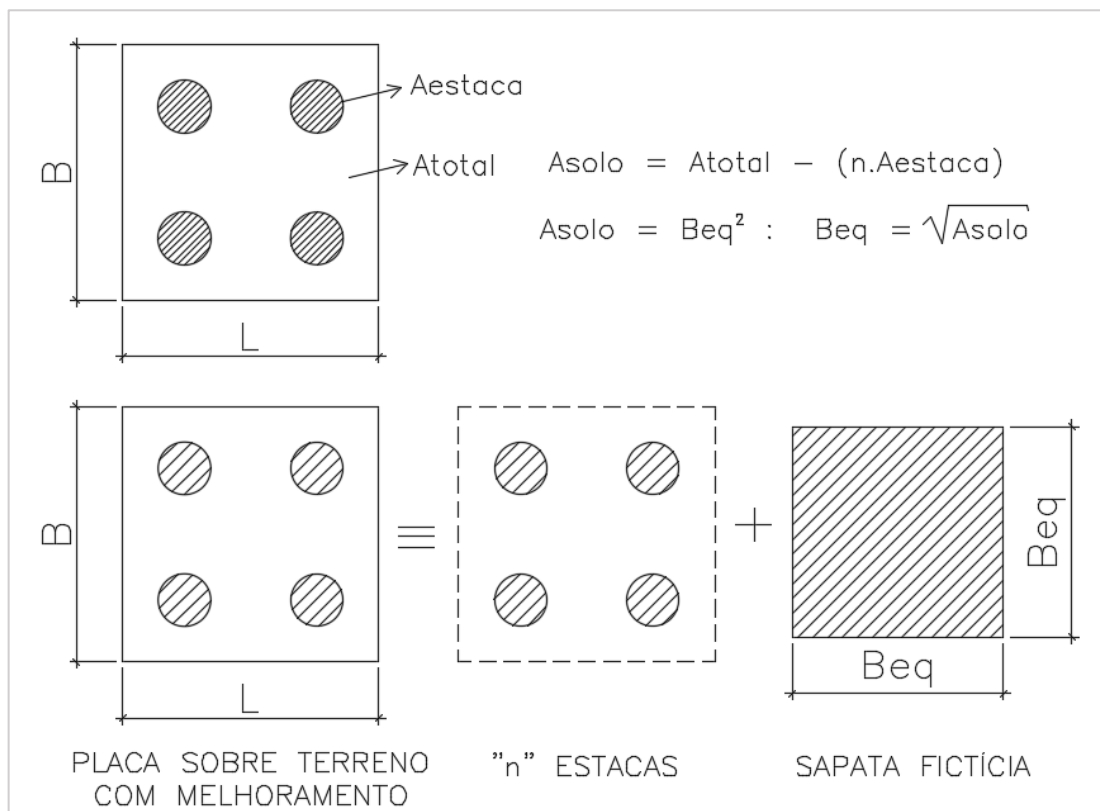
Fonte: Autora.

Figura 31 - Sapata rígida



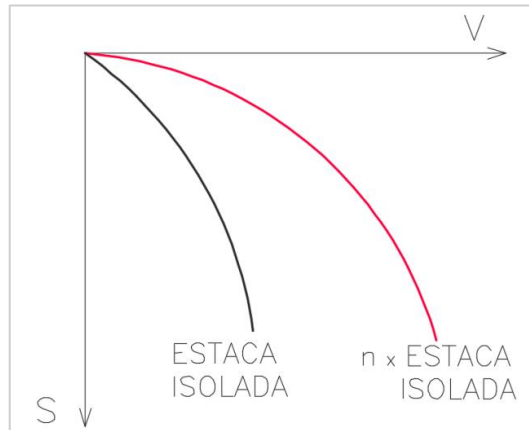
Fonte: Autora.

Figura 32 - Cálculo da área do solo isolado



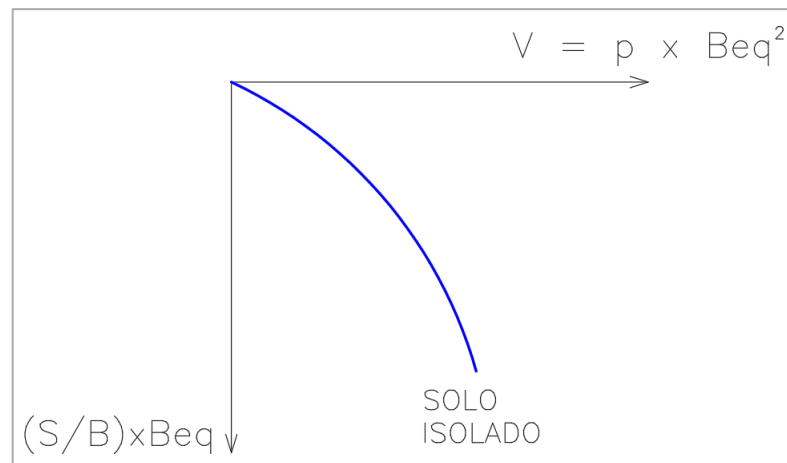
Fonte: Autora.

Figura 33 - Obtenção da curva carga-recalque de “n” estacas



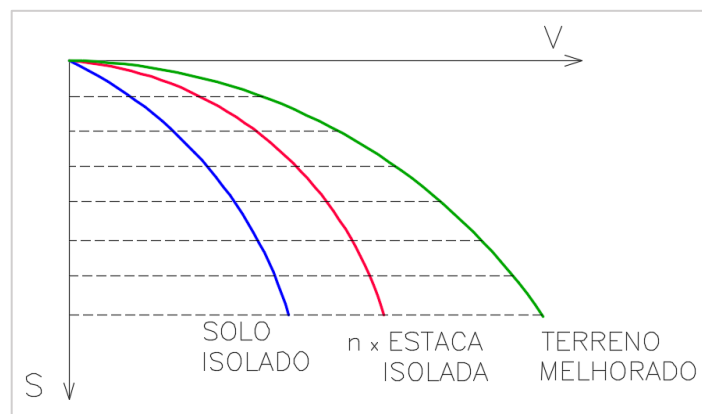
Fonte: Autora.

Figura 34 - Obtenção da curva carga-recalque do solo isolado



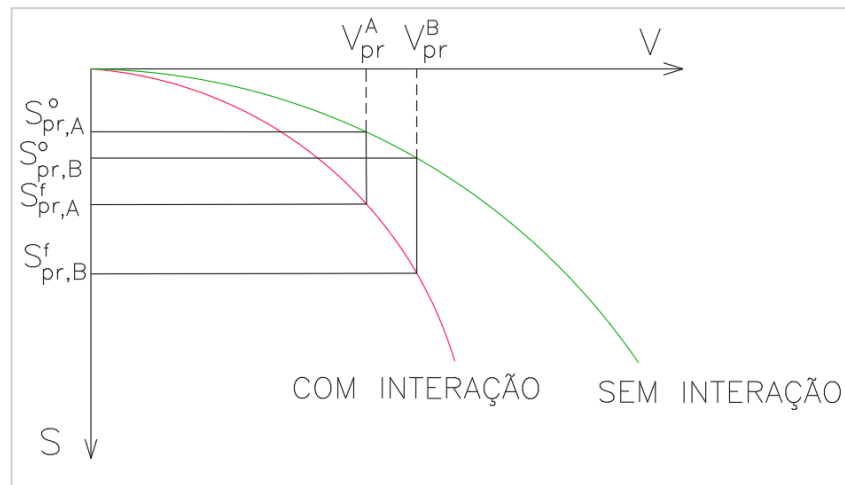
Fonte: Autora.

Figura 35 - Contribuição da curva carga-recalque do terreno com melhoramento



Fonte: Autora.

Figura 36 – Ajuste da curva com valores de α_H e α_V



Fonte: Autora.

Com os dados das provas de carga dos elementos isolados e do solo melhorado, outra análise pode ser feita: o percentual de carga que vai para o solo e o percentual que vai para as estacas.

A partir de um ensaio de placa realizado sobre o solo melhorado (solo + estaca), pode-se utilizar o valor da carga e do recalque de cada estágio do ensaio como sendo a carga e o recalque total do sistema.

Para a partição de cargas, foi considerado que o percentual de carga que vai para a placa ou para as estacas seria o mesmo, tanto com interação como sem interação.

4. BANCO DE DADOS – CARACTERIZAÇÃO DAS OBRAS

Este capítulo apresenta o banco de dados das obras em que foram realizados os ensaios de placa utilizados para desenvolvimento desta pesquisa.

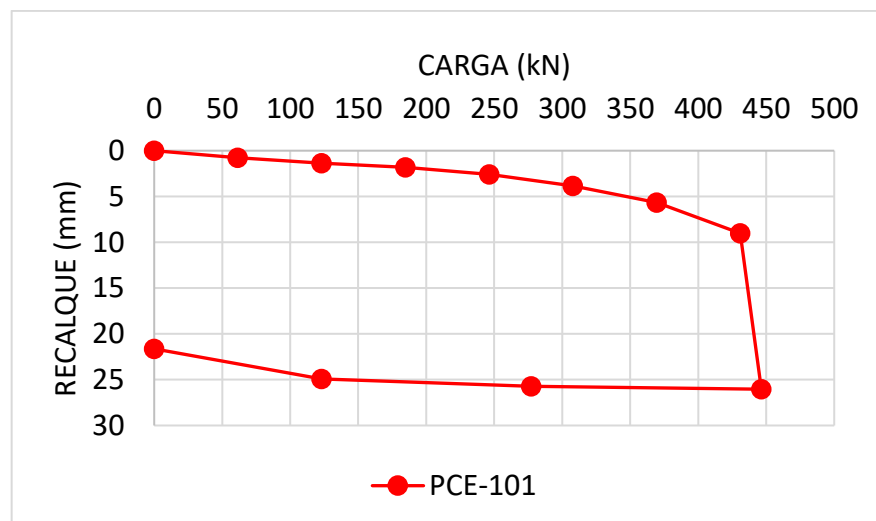
4.1 Obra A

A obra A é situada no bairro do Parnamirim, da cidade do Recife-PE, corresponde a um edifício residencial do qual teve como solução de fundação sapatas apoiadas em estacas de argamassa com 300 mm de diâmetro e 7 m de comprimento. O método executivo das estacas de compactação foi o método convencional.

As sondagens realizadas nesta obra (Apêndice A) indicam a existência de um solo preponderantemente arenoso até o limite das sondagens, com valores de N_{SPT} crescentes com a profundidade. A profundidade das sondagens foi cerca de 18 m.

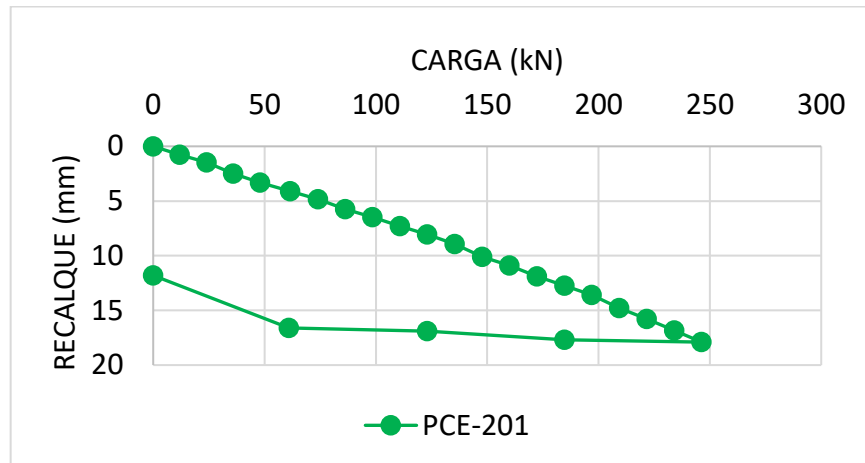
Foram realizadas quatro provas de carga estática: com uma placa de 300 mm de diâmetro sobre uma estaca isolada (PCE-101) e outra sobre o solo isolado (PCE-201), uma prova de carga com uma placa de 1 x 1 m sobre 4 estacas mais o solo compactado (PCE-301) e uma prova de carga com uma placa de 800 mm sobre uma estaca mais o solo (PCE-302), as Figuras 37 a 40 apresentam os gráficos correspondentes das mesmas.

Figura 37 - Curva carga x recalque: PCE-101 (estaca isolada)



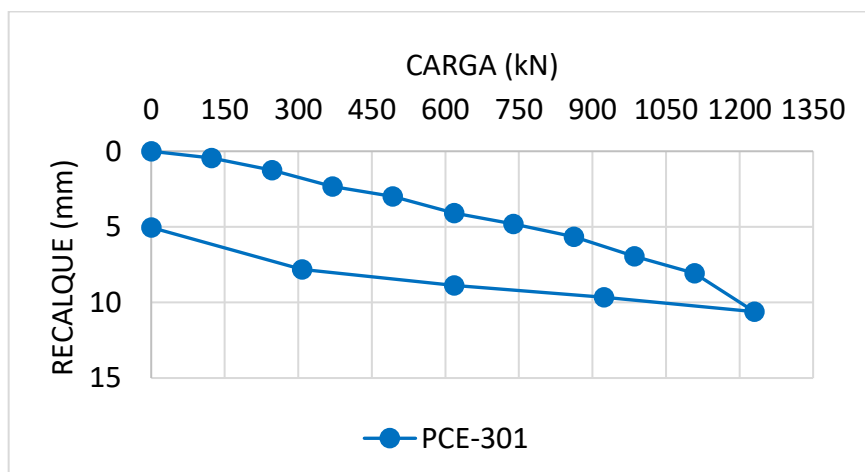
Fonte: Autora.

Figura 38 - Curva carga x recalque: PCE-201 (solo aislado)



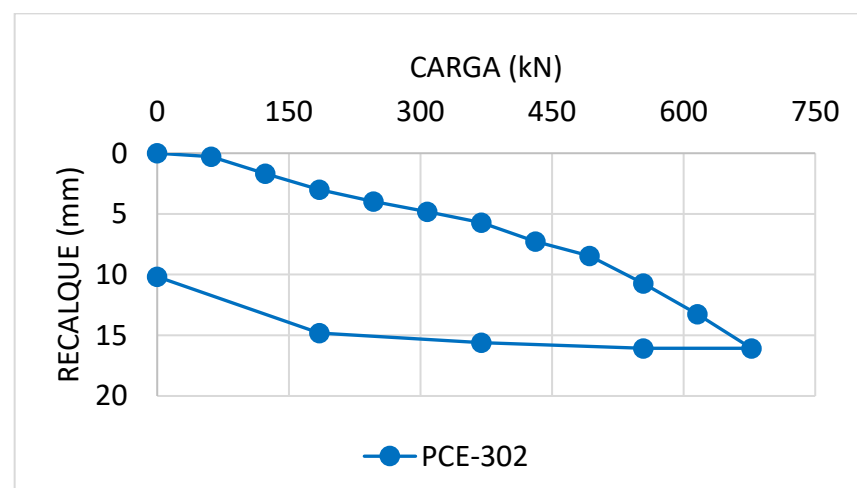
Fonte: Autora.

Figura 39 - Curva carga x recalque: PCE-301 (4 estacas + solo compactado)



Fonte: Autora.

Figura 40 - Curva carga x recalque: PCE-302 (1 estaca + solo compactado)



Fonte: Autora.

4.2 Obra B

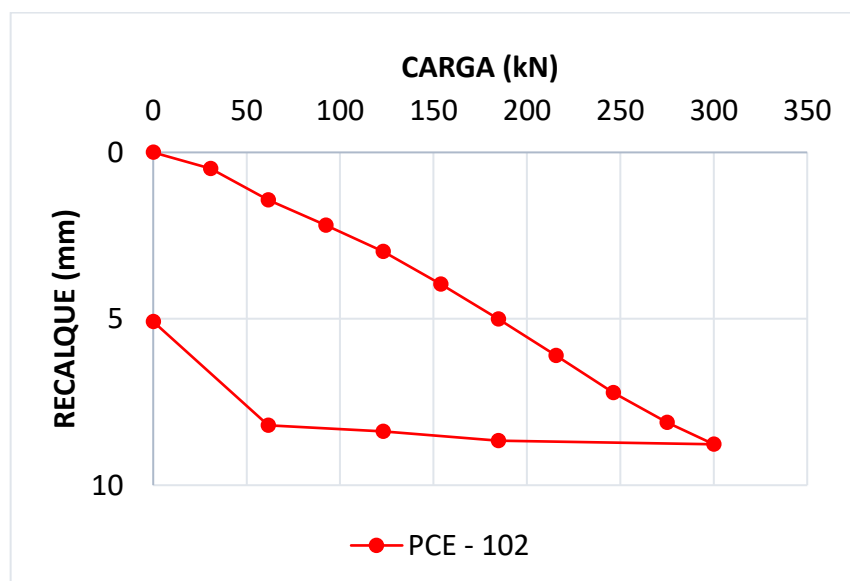
A obra B é uma obra residencial, situada no bairro de Piedade, da cidade de Jaboatão dos Guararapes-PE. A fundação desta obra foi fundação direta com estacas de compactação de areia e brita, 400 mm de diâmetro e 4 metros de comprimento. Foram realizadas 02 provas de carga estática nessa obra a PCE-102 e a PCE-202. O método executivo das estacas de compactação foi o método convencional.

As sondagens indicam um solo preponderantemente arenoso até uma profundidade de 4 m, onde encontra-se uma camada de areia, compacta, com 5 m de espessura. Em seguida, existe uma camada de argila orgânica, mole, com 3 m de espessura. E por fim, uma camada de areia siltosa, até os limites das sondagens. As sondagens encontram-se no Apêndice B.

A PCE-102 foi realizada com uma placa de 400 mm de diâmetro sobre uma estaca de areia e brita. Foi encontrado nas sondagens após a compactação um valor de N_{SPT} médio lateral de 15,3 e N_{SPT} médio de ponta de 37. A Figura 41 mostra a curva carga x recalque da PCE-102.

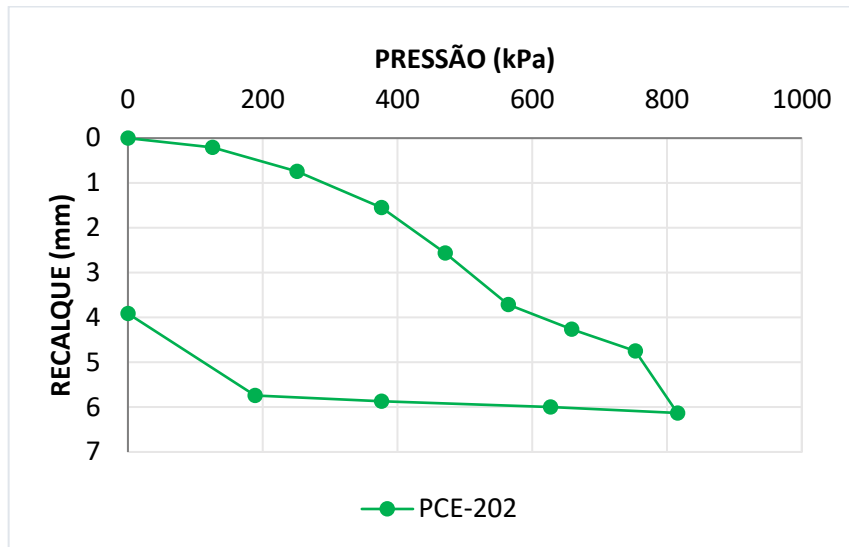
E a PCE-202 com uma placa de 500 mm de diâmetro sobre o solo compactado. E o valor de N_{SPT} médio até uma profundidade de duas vezes e meia o diâmetro da placa fornecido pelas sondagens após a compactação foi 15. A Figura 42 mostra a curva pressão x recalque da PCE-202.

Figura 41 - Curva carga x recalque: PCE-102 (estaca isolada)



Fonte: Autora.

Figura 42 - Curva pressão x recalque: PCE-202 (solo isolado)



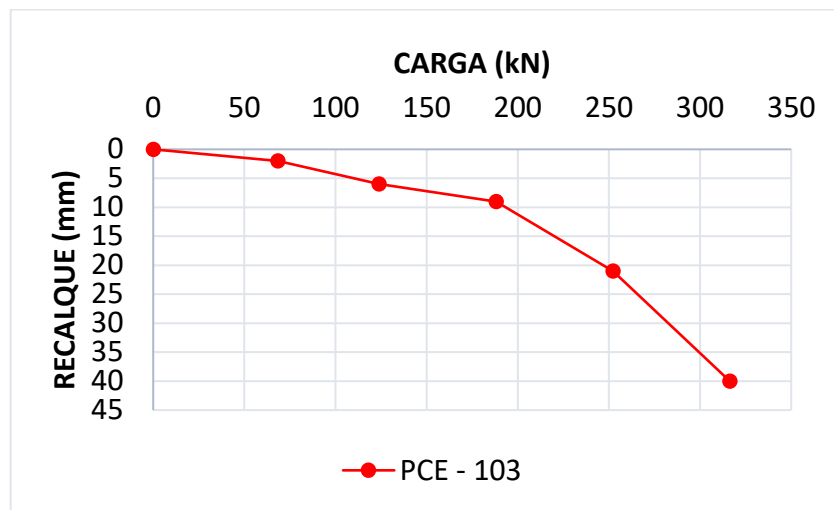
Fonte: Autora.

4.3 Obra C

A obra C também é uma obra residencial, situada no bairro dos Aflitos, da cidade do Recife-PE. A solução de fundação adotada para esta obra foi fundação direta (sapatas) sobre estacas de areia e brita com 320 mm de diâmetro e 4 m de comprimento, utilizando o método convencional.

Foi realizada nesta obra uma Prova de Carga Estática (PCE-103) com uma placa sobre uma estaca isolada (Figura 43). As sondagens (Apêndice C) indicam a existência de um solo preponderantemente arenoso até o limite das sondagens, com valores de N_{SPT} crescentes com a profundidade. As sondagens realizadas tiveram uma profundidade de 22,50 m (impenetrável ao trépano). O valor do N_{SPT} médio lateral encontrado nas sondagens realizadas após a compactação foi 22,5 e de ponta foi 40.

Figura 43 - Curva carga x recalque: PCE-103 (estaca isolada)



Fonte: Autora.

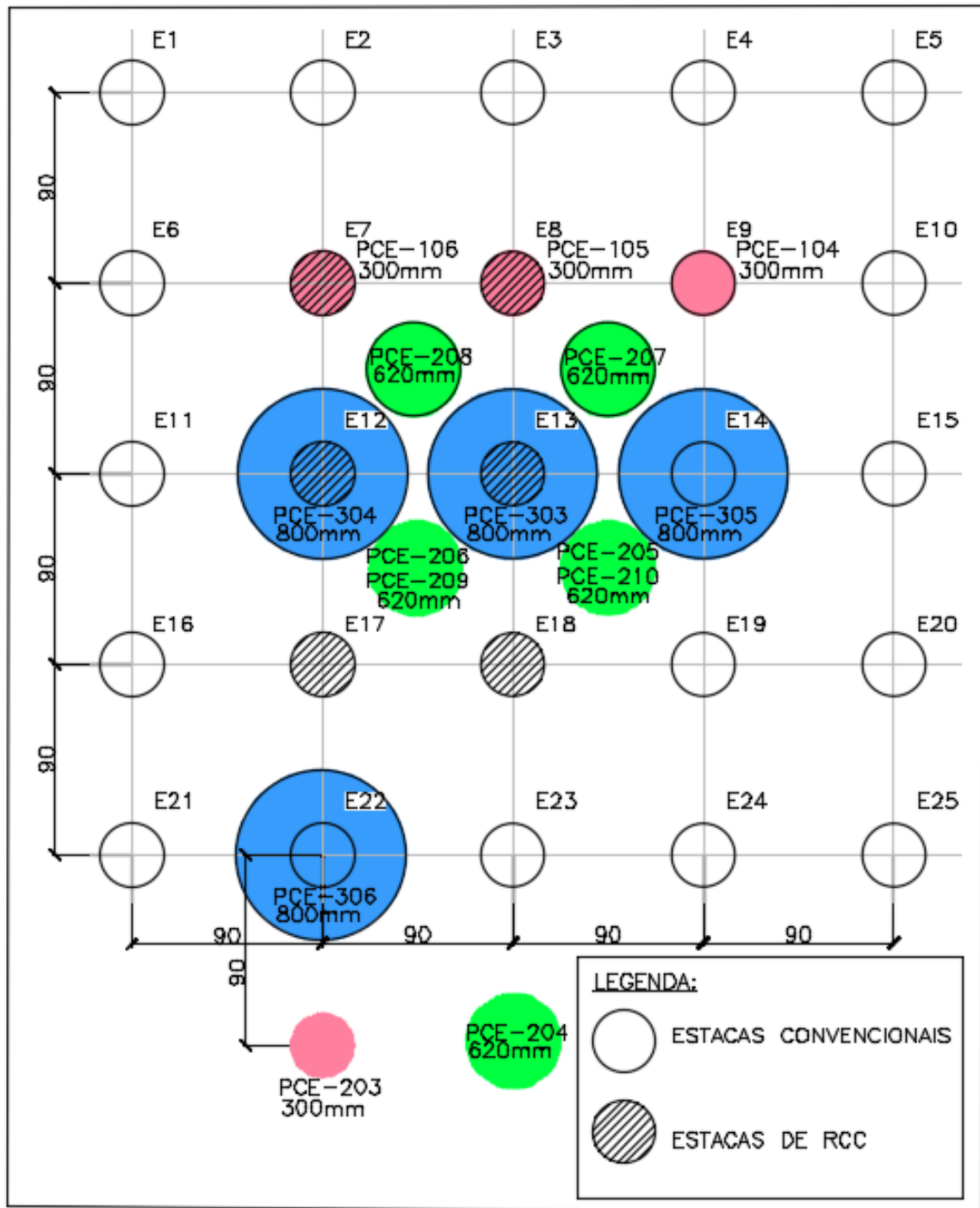
4.4 Obra D

A obra D é situada no bairro do Rosarinho, em Recife, trata-se de 2 blocos de edifícios com 28 lajes cada. A fundação projetada para os prédios foi superficial tipo sapatas, associadas a estacas de compactação com 300 mm de diâmetro e 4,5 metros de comprimento para melhoramento do solo, sendo estas executadas pelo método convencional. Para estudar a viabilidade do uso de RCC (Resíduos de Construção Civil) como material de preenchimento das estacas, foi realizada uma malha experimental no terreno desta obra, com 25 estacas, sendo 06 de RCC e 15 de pó-de-pedra e brita.

As sondagens realizadas nessa obra mostram que inicialmente o subsolo é composto por uma camada de areia, fofa a pouco compacta, até 5 m de profundidade; seguindo uma camada argila arenosa, média a rija, com 2,5 a 4,0 m de espessura. Após esta camada, existe uma camada de areia argilosa, até 17,50m de profundidade. Em seguida, existe uma camada de areia, medianamente compacta com 3 m de espessura. E por fim, encontra-se uma camada de areia silto-argilosa, muito compacta até o limite das sondagens em torno de 23,50 m de profundidade. O valor do N_{SPT} médio lateral após a compactação encontrado nas sondagens realizadas foi 16 e N_{SPT} médio de ponta foi 22. Nos Apêndices D e E, encontram-se as sondagens realizadas antes e após o melhoramento do solo.

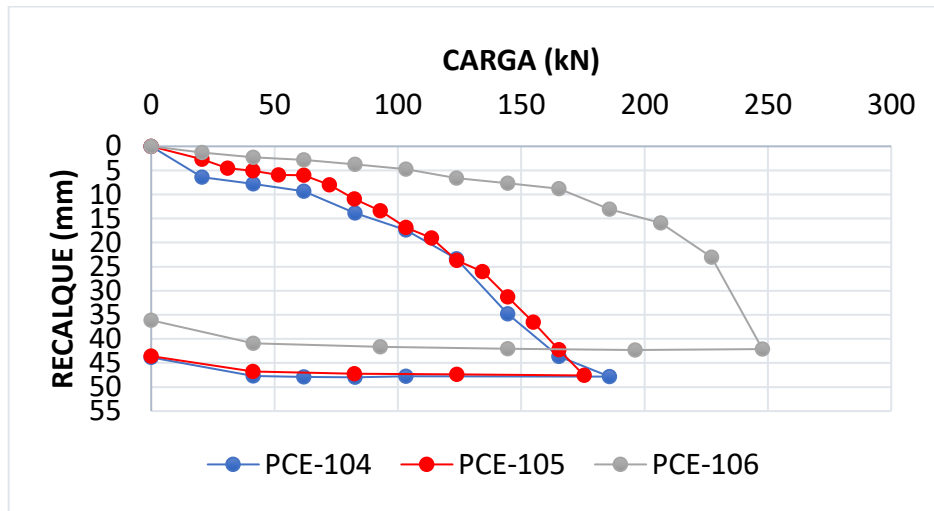
Foram realizadas 18 provas de carga estática na obra D que são apresentadas na Figura 44. Das 18 provas de carga, foram 3 (PCE – 104 a 106) com placas de 300 mm sobre estacas isoladas com 4,5 m de comprimento. A estaca da PCE-104 é composta por pó-de-pedra e as estacas das PCE-105 e PCE-106 são compostas por RCC. A Figuras 45 mostra as curvas carga x recalque das PCE – 104 a 106.

Figura 44 - Locação das provas de carga estáticas



Fonte: Autora.

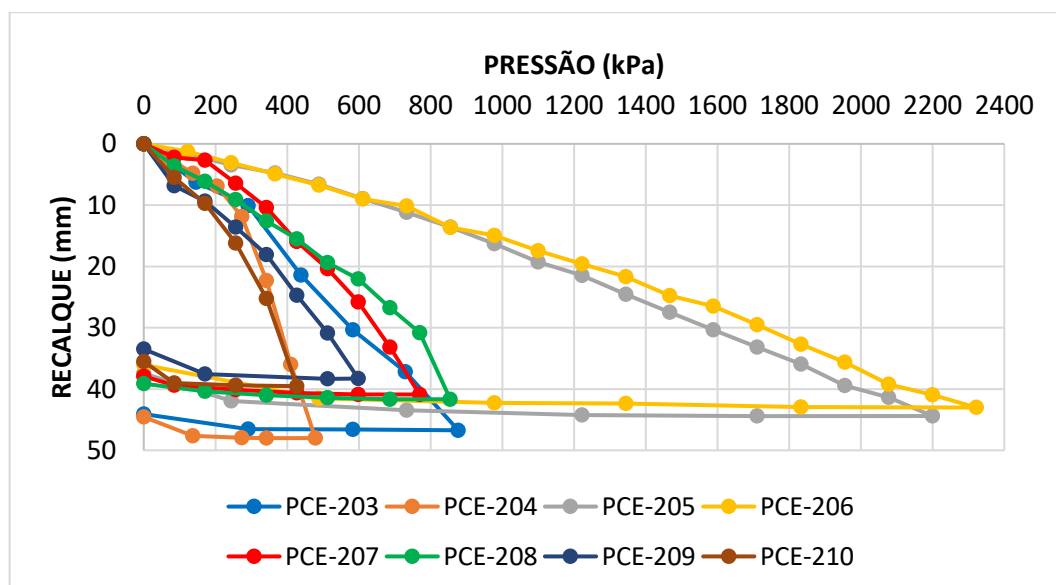
Figura 45 - Curvas carga x recalque: PCE-104 a 106 (estaca isolada)



Fonte: Autora.

Foram realizadas 2 provas de carga estática PCE-203 e 204 sobre o solo virgem e 6 provas de carga (PCE-205 a 210) sobre o solo compactado, com o objetivo de analisar o comportamento do solo isolado. A PCE-203 foi realizada com uma placa de 300 mm e as PCE - 204 a 210 com uma placa de 620 mm de diâmetro. E o valor de N_{SPT} médio até uma profundidade de duas vezes e meia o diâmetro da placa fornecido pelas sondagens foi 6 (PCE - 203 e 204) e 10 (PCE - 205 a 210). A Figura 46 mostra as curvas pressão x recalque das PCE - 203 a 210. Os resultados das provas de carga PCE-206 e 210 deram maiores por terem sido realizadas com 1,5 m de profundidade e as demais com 0,5 m.

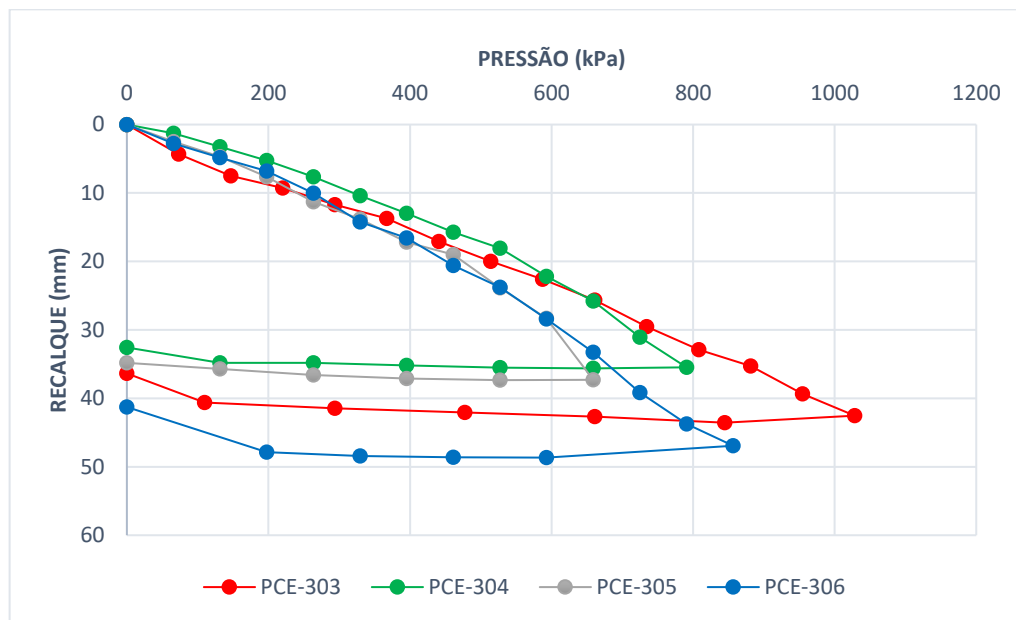
Figura 46 - Curva pressão x recalque: PCE-203 a 210 (solo isolado)



Fonte: Autora.

E por fim, as Provas de Carga Estática (PCE – 303 a 306) foram realizadas com placas de 800 mm de diâmetro sobre uma estaca de compactação de 300 mm mais a área compactada ao redor da estaca. As PCE-303 e 304 são sobre estacas e RCC e as PCE-305 e 306 de pó-de-pedra e brita. A Figura 47 mostra as curvas carga x recalque das PCE – 303 a 306.

Figura 47 - Curva carga x recalque: PCE-303 a 306 (1 estaca + solo compactado)



Fonte: Autora.

4.5 Obra E

A obra E trata-se de um conjunto de 12 tanques cilíndricos com diferentes diâmetros (8 a 46 m) de armazenamento de combustíveis. É uma obra situada em Ipojuca-PE, em uma área industrial do Porto de Suape.

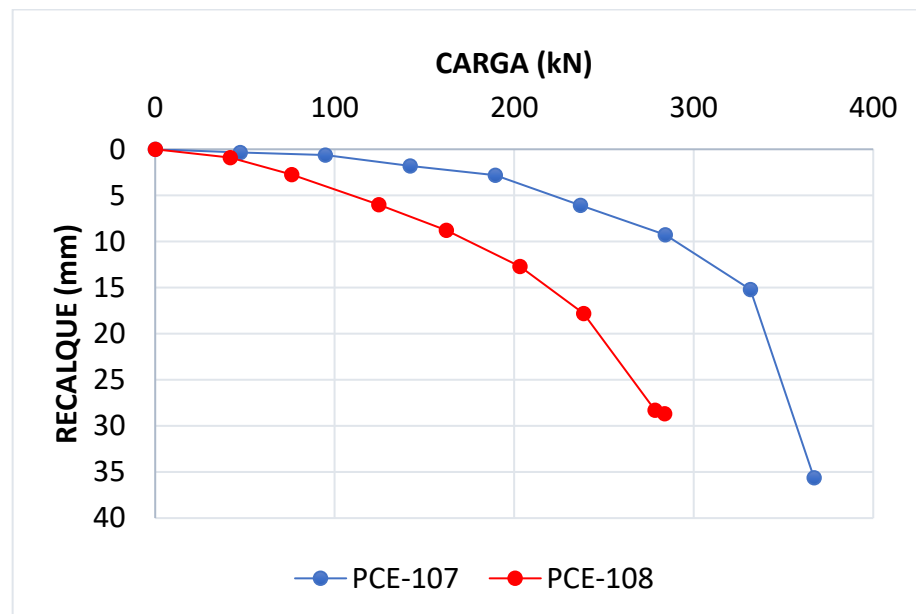
As sondagens realizadas nessa obra mostram que inicialmente o subsolo é composto por uma camada de areia, pouco compacta, até 4 m de profundidade; seguindo uma camada argilosa, média, com 2 m de espessura. Após esta camada, existe um solo preponderantemente arenoso até o limite das sondagens, com valores de N_{SPT} crescentes com a profundidade. As sondagens realizadas tiveram uma profundidade de 9 m. As sondagens realizadas antes e após o melhoramento em um dos tanques, encontra-se no Apêndice F.

Os tanques foram projetados com sapata corrida ao longo do perímetro do tanque, enquanto que na sua parte central, a chapa metálica de fundo apoiada sobre um colchão de areia compactada, seguido de um lastro de brita corrida (GUSMÃO et al., 2005).

Além disso, em função da baixa compacidade do terreno natural até cerca de 5 m de profundidade, foi executado um melhoramento superficial com estacas de argamassa (GUSMÃO et al., 2005). O método executivo das estacas de compactação foi o método convencional.

Foram feitos vários ensaios de placa em diferentes situações. As PCE – 107 e 108 foram realizadas com placas de 330 mm sobre estacas de argamassa com 5,5 m de comprimento. De acordo com as sondagens fornecidas, o valor do N_{SPT} médio lateral foi 13 m e N_{SPT} médio de ponta foi 22. A Figura 48 mostra as curvas carga x recalque das PCE – 107 e 108.

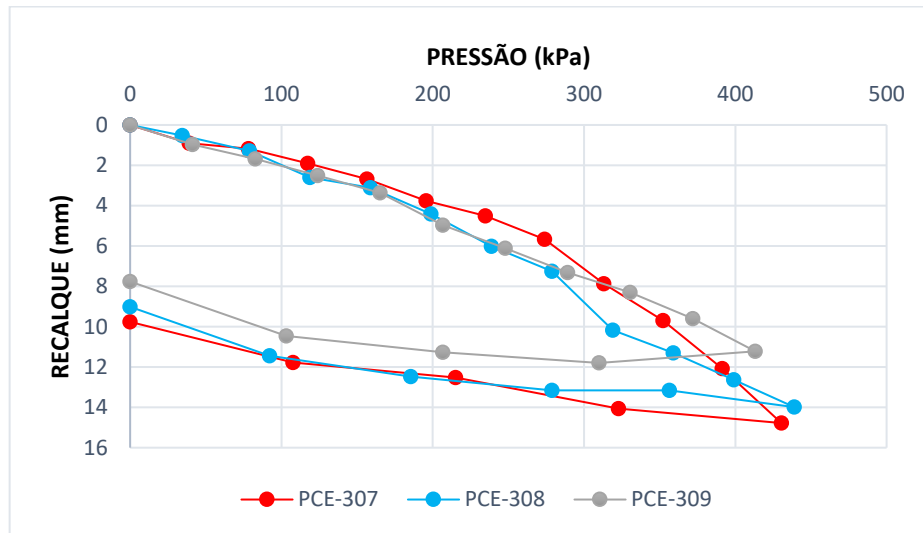
Figura 48 - Curvas carga x recalque: PCE-107 (estaca isolada)



Fonte: Autora.

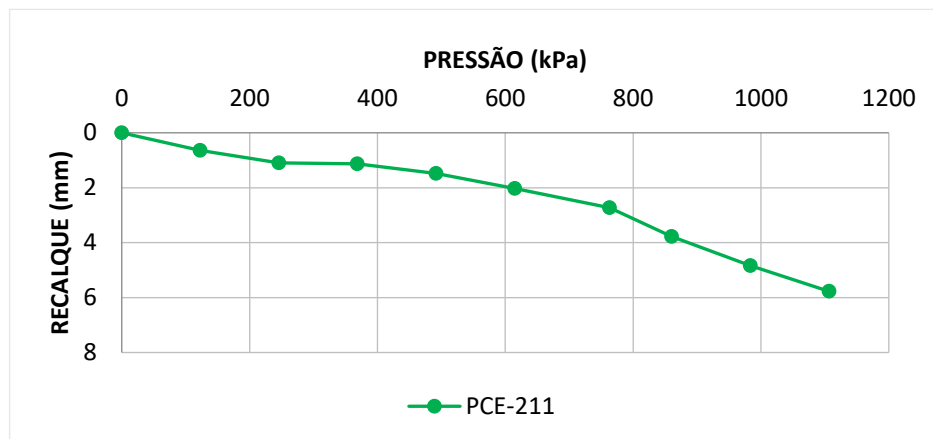
As PCE – 307 a 309 foram realizadas com placas de 1,1 x 1,1 m sobre 4 estacas de argamassa mais a área de solo compactado entre as 4 estacas. A Figura 49 mostra as curvas carga x recalque das PCE – 307 a 309. A PCE – 211 foi sobre o solo entre estacas com uma placa de 500mm de diâmetro. A Figura 50 mostra a curva carga x recalque da PCE – 211.

Figura 49 - Curvas pressão x recalque: PCE-307 a 309 (4 estacas + solo compactado)



Fonte: Autora.

Figura 50 - Curva pressão x recalque: PCE-211 (solo isolado)



Fonte: Autora.

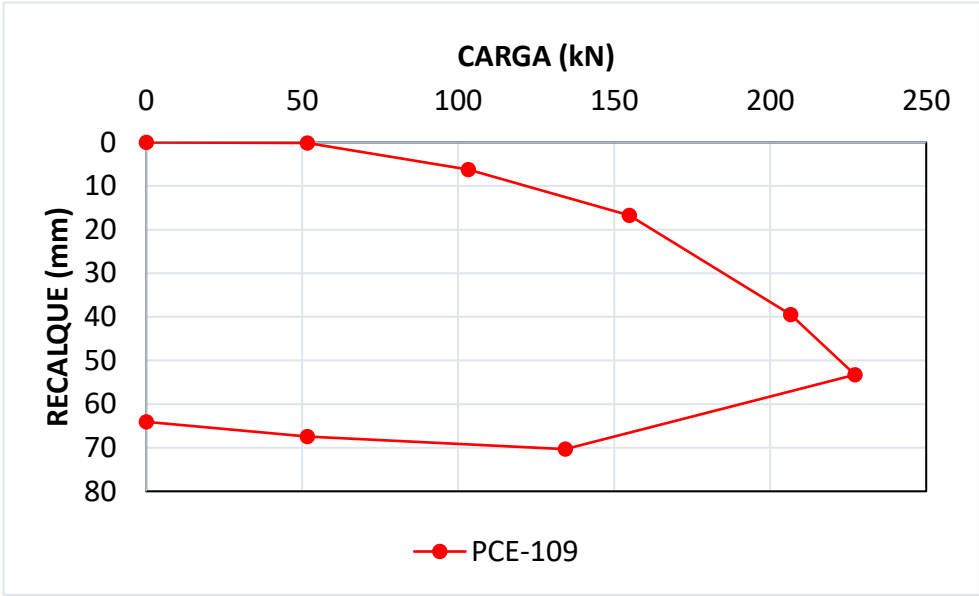
4.6 Obra F

A obra F é uma obra comercial, situada na praia do Cupe, da cidade de Ipojuca-PE. A fundação desta obra foi em sapatas com estacas de compactação de argamassa. Diferentemente das demais obras, o método executivo foi o Terra-Probe Foram realizadas 06 Provas de Carga Estática.

As sondagens (Apêndice G) indicam um solo arenoso até uma profundidade de 8 m, apresentando valores de N_{SPT} crescentes com a profundidade. Foi encontrado nas sondagens após a compactação um valor de N_{SPT} médio lateral 13 e N_{SPT} médio de ponta 22.

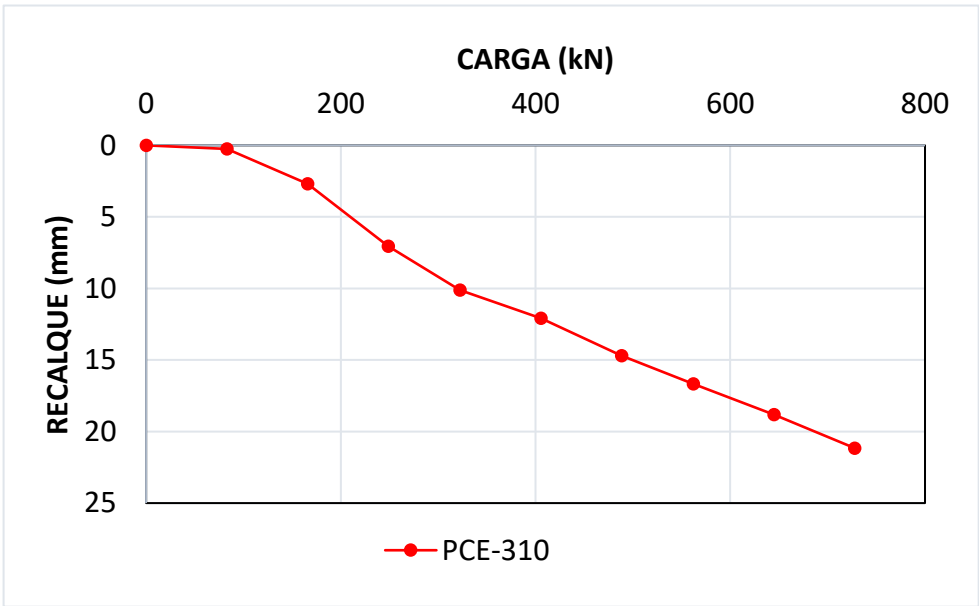
Foram realizadas: uma prova de carga com placa de 300 mm de diâmetro sobre uma estaca de argamassa com 4 m de comprimento (PCE-109); uma placa de 1m x 1m sobre uma estaca mais o solo compactado (PCE-310) e; quatro provas de carga com placas de 1 m x 1 m sobre 4 estacas de argamassa mais a área de solo compactado entre as 4 estacas (PCE- As figuras 51 a 53 mostram a curva carga x recalque das PCE-109 e 310 a 314.

Figura 51 - Curva carga x recalque PCE-109 (estaca isolada)



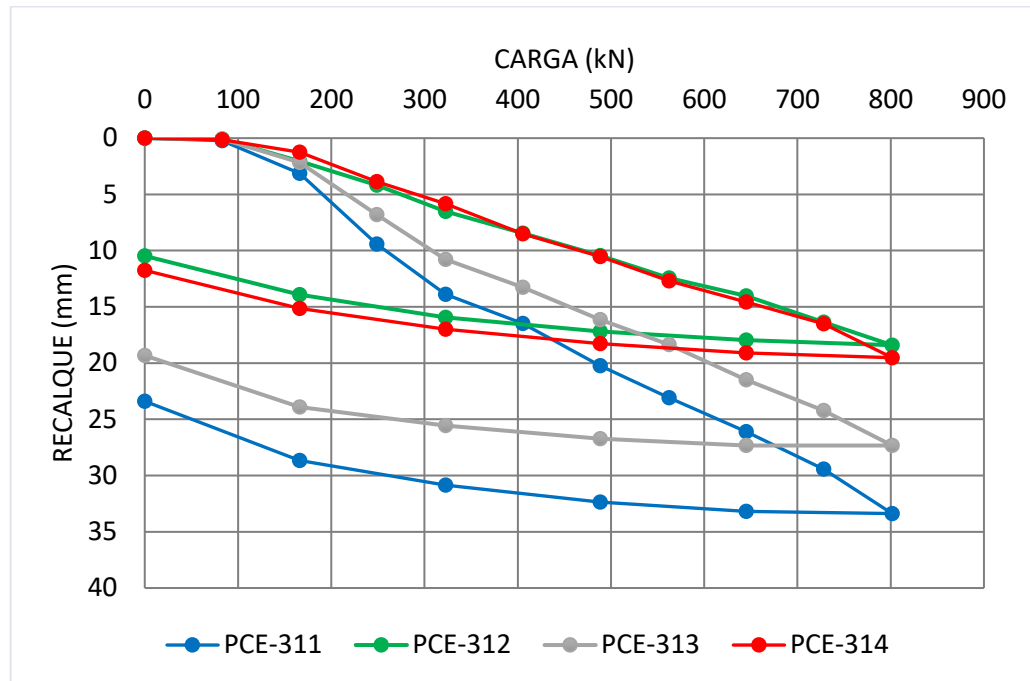
Fonte: Autora.

Figura 52 - Curva carga x recalque PCE-310 (1 estaca + solo compactado)



Fonte: Autora.

Figura 53 - Curva carga x recalque PCE-311 a 314 (4 estacas + solo compactado)



Fonte: Autora.

4.7 Resumo do banco de dados

É apresentado na Tabela 4 um resumo do banco de dados das obras mencionadas neste item.

Tabela 4 -Resumo do banco de dados

Obra	Estaca			Ensaio de Placa			N _{SPT}	N _{SPT}
	Material (Convencional)	φ (mm)	Comp (m)	Item	φ (mm)	Material ensaiado	lat.	ponta
A	Argamassa (Convencional)	300	7,0	PCE-101	300	Estaca	15	16
				PCE-201	300	Solo compactado		
				PCE-301	100 x 100	4 Estacas + solo compactados		
				PCE-302	800	Estaca + solo compactados		
B	Areia e brita (Convencional)	400	4,0	PCE-102	400	Estaca	15,3	37
				PCE-202	500	Solo compactado		
C	Areia e brita (Convencional)	320	4,0	PCE-103	320	Estaca	22,5	408
D	Pó de pedra e brita (Convencional)	300	4,5	PCE-104	300	Estaca	16	22
				PCE-105 e 106	300	Estaca		
				PCE-203	300	Solo virgem		
				PCE-204	620	Solo virgem		
	RCC (Convencional)	300	4,5	PCE-205 a 210	620	Solo compactado		
				PCE-303 e 304	800	Estaca + solo compactados		
				PCE-305 e 306	800	Estaca + solo compactados		
E	Argamassa (Convencional)	330	5,5	PCE-107 e 108	330	Estaca	13	22
				PCE-307 a 309	110 x 110	4 estacas + solo compactado		
				PCE-211	500	Solo compactado		
F	Argamassa (Terra Probe)	300	4,0	PCE-109	300	Estaca	13	22
				PCE-110	100 x 100	Estaca		
				PCE-311 a 314	100 x 100	4 estacas + solo compactado		

Fonte: Autora.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo contém os resultados dos estudos relatados no capítulo 3, do qual foi utilizado o método para previsão da capacidade de carga de estacas de melhoramento baseada no Método de Décourt - 1996, assim como os resultados de uma “curva padrão” para previsão da “curva carga x recalque” obtidas por ensaios de placa, para o elemento estaca isolada.

Para o elemento solo isolado, são apresentados os resultados para previsão do módulo de elasticidade do solo através de relatórios de sondagens. Assim como uma curva padrão pressão x recalque para previsão da “curva pressão x recalque” obtidas por ensaios de placa.

Por fim, é demonstrada a simulação para o modelo de transferência de carga proposto nesta pesquisa para fundações superficiais sobre terrenos melhorados com estacas de compactação. Assim como os gráficos de partição de carga. A simulação foi realizada para quatro obras das seis apresentadas na pesquisa, por serem as obras que possuem a maior quantidade de provas de carga.

5.1 Estaca isolada

5.1.1 Capacidade de Carga

Para cada ensaio de placa, foi determinado o material da estaca, diâmetro e comprimentos da estaca, tipo do solo e a carga de ruptura, pelo Método de Van der Veen – 1953, mostradas na Tabela 5. Já a Tabela 6 indica, para cada ensaio, o coeficiente K do solo, baseados no Método de Décourt – 1996, o recalque equivalente a 2% do diâmetro da placa, a resistência lateral e de ponta da estaca, assim como os valores de N_{SPT} lateral e de ponta médios. Os valores encontrados para os coeficientes de majoração ou de minoração (α e β) para a reação de ponta e para o atrito lateral são apresentados na Tabela 7.

Tabela 5 -Dados da PCE 1

Prova de Carga Estática	Material da estaca	Diâm. (mm)	L (m)	Tipo do Solo	Q _{rup} (kN)
PCE – 101	Argamassa	300	7,0	Areia	446,4
PCE – 102	Areia e brita	400	4,0	Areia	670
PCE – 103	Areia e brita	320	4,0	Areia	340
PCE – 104	Pó-de-pedra	300	4,5	Areia	250
PCE – 105	RCC	300	4,5	Areia	175,5
PCE – 106	RCC	300	4,5	Areia	250
PCE – 107	Argamassa	330	5,5	Areia	310
PCE – 108	Argamassa	330	5,5	Areia	320
PCE – 109	Argamassa	300	4,0	Areia	252,2

Fonte: Autora.

Tabela 6 - Dados da PCE 2

Prova de Carga Estática	S/D = 2% (mm)	R _L (kN)	N _L (golpes/ 0,3m)	r _L (kPa)	R _p (kN)	N _p (golpes/ 0,3m)	K (kPa)	r _p (kPa)
PCE – 101	6,0	375,8	15	57,0	70,6	16	400	998,8
PCE – 102	8,0	271,5	15,3	54,0	398,5	37	400	3171,2
PCE – 103	6,4	131,2	22,5	32,6	208,8	40	400	2596,2
PCE – 104	6,0	19,2	16	4,5	230,8	22	400	3265,2
PCE – 105	6,0	60,6	16	14,3	114,9	22	400	1625,5
PCE – 106	6,0	117,3	16	27,7	132,7	22	400	1877,3
PCE – 107	6,6	244,4	13	42,9	65,6	22	400	767,0
PCE – 108	6,6	196,1	13	34,4	123,9	22	400	1448,6
PCE – 109	6,0	101,0	23	26,8	151,2	22	400	2139,0

Fonte: Autora.

Tabela 7 - Valores de α e β para estacas de melhoramento

Prova de Carga Estática	β	α
PCE – 101	0,95	0,16
PCE – 102	0,89	0,21
PCE – 103	0,38	0,16
PCE – 104	0,07	0,37
PCE – 105	0,23	0,18
PCE – 106	0,44	0,21
PCE – 107	0,80	0,09
PCE – 108	0,64	0,16
PCE – 109	0,31	0,24
Média	0,58	0,18
Coeficiente de variação	0,479	0,269

Fonte: Autora.

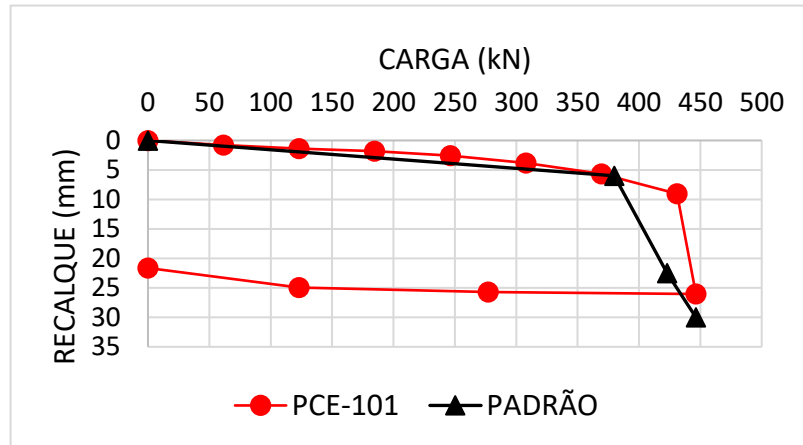
Foi feita uma média dos valores de α e β , desconsiderando o valor da PCE-104 por ter se apresentado bem diferente dos demais. A partir da média encontrada, foi adotado $\alpha=0,2$ e $\beta=0,6$.

Posteriormente, foi realizada uma análise utilizando-se $\alpha=0,2$ e $\beta=0,6$ para encontrar a carga de ruptura calculada com o objetivo de refinar os valores de α e β . O valor da carga de ruptura calculada foi 94,3% da carga fornecida pelo ensaio.

5.1.2 Curva padrão carga x recalque

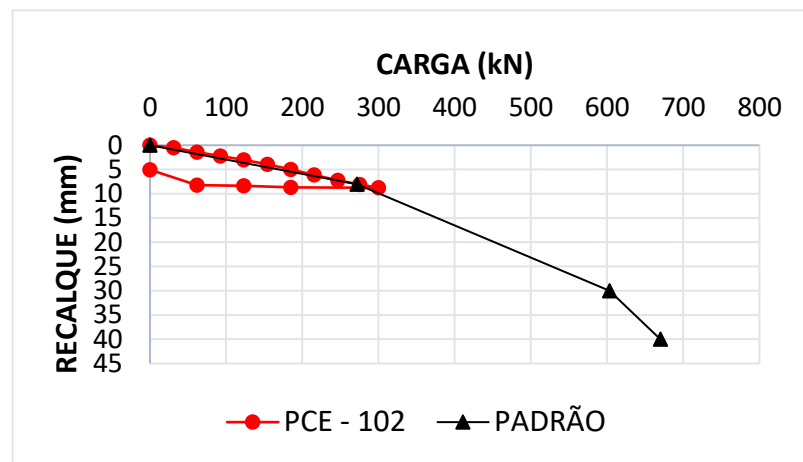
Foram realizados comparativos entre os resultados das provas de carga e da curva padrão mostrada na metodologia para a estaca isolada. As Figuras 54 a 62 mostram esses comparativos.

Figura 54 - Curva padrão carga x recalque: PCE-101 (estaca isolada)



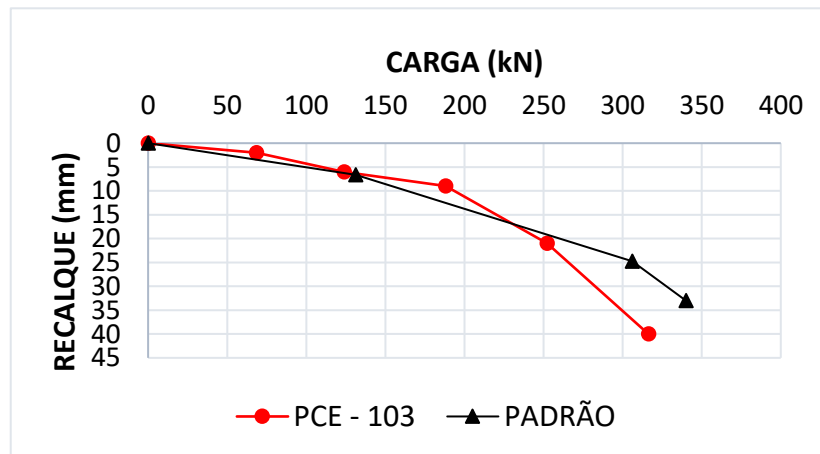
Fonte: Autora.

Figura 55 - Curva padrão carga x recalque: PCE-102 (estaca isolada)



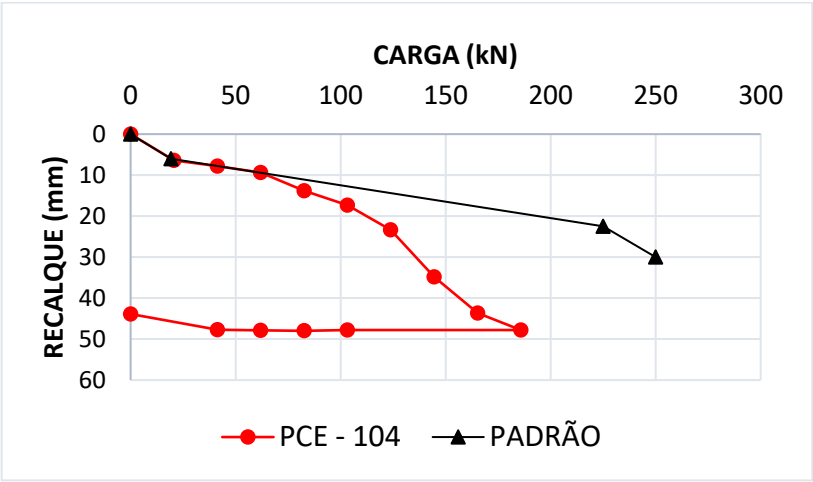
Fonte: Autora.

Figura 56 - Curva padrão carga x recalque: PCE-103 (estaca isolada)



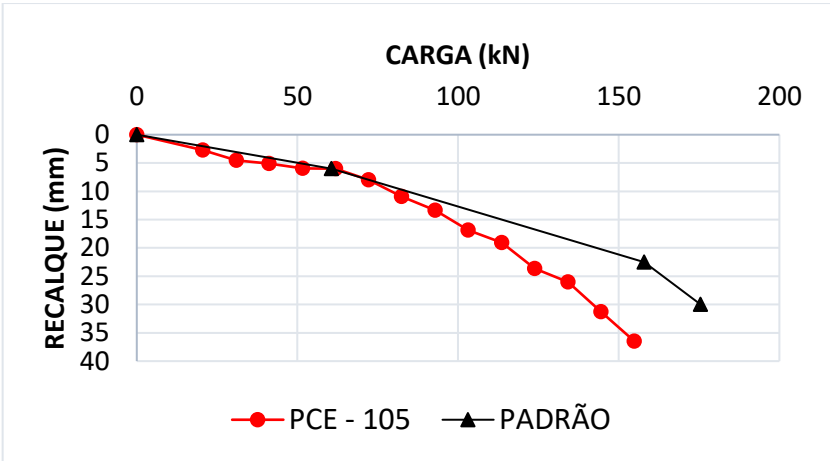
Fonte: Autora.

Figura 57 - Curva padrão carga x recalque: PCE-104 (estaca isolada)



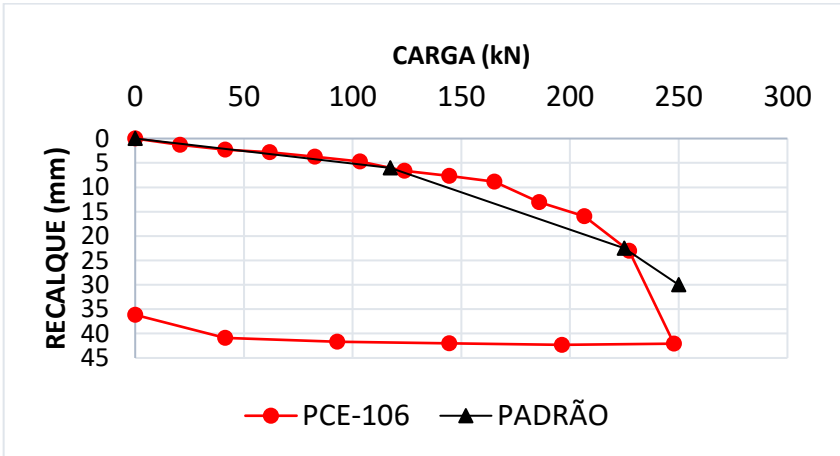
Fonte: Autora.

Figura 58 - Curva padrão carga x recalque: PCE-105 (estaca isolada)



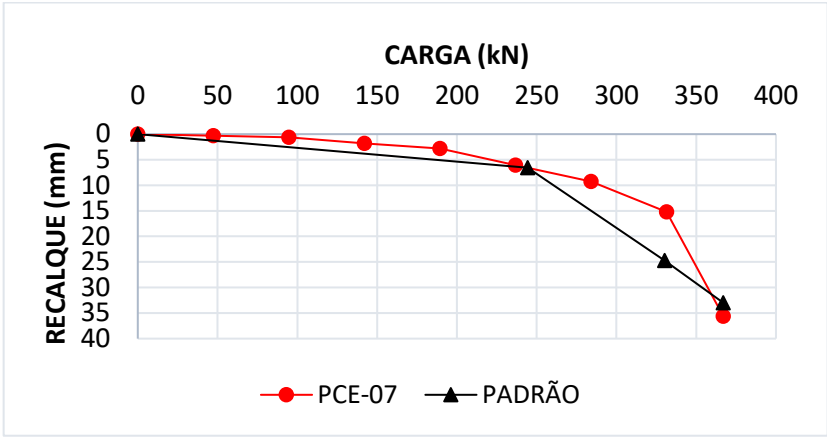
Fonte: Autora.

Figura 59 - Curva padrão carga x recalque: PCE-106 (estaca isolada)



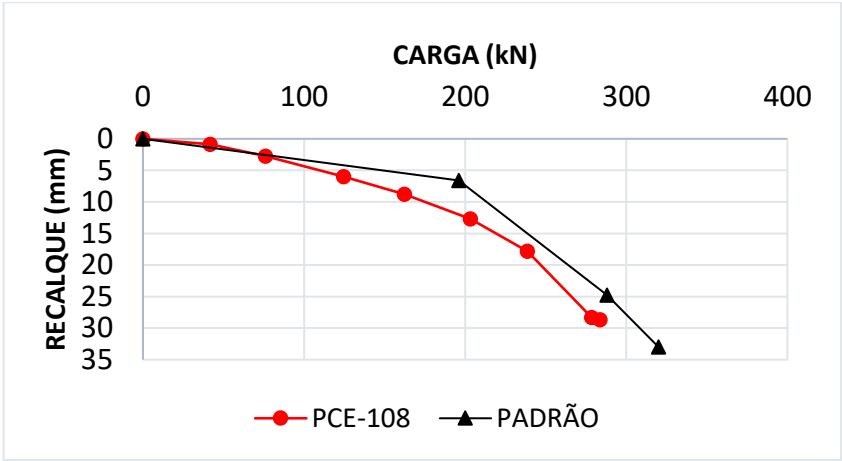
Fonte: Autora.

Figura 60 - Curva padrão carga x recalque: PCE-107 (estaca isolada)



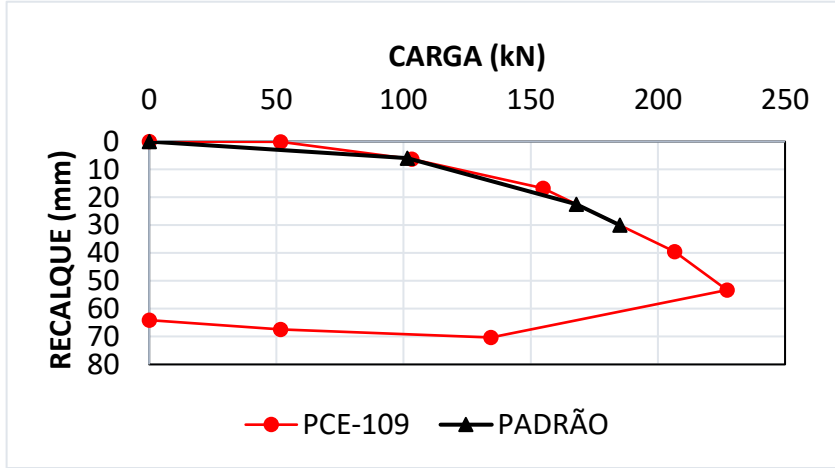
Fonte: Autora.

Figura 61 - Curva padrão carga x recalque: PCE-108 (estaca isolada)



Fonte: Autora.

Figura 62 - Curva padrão carga x recalque: PCE-109 (estaca isolada)



Fonte: Autora.

Observa-se que, as curvas carga x recalque previstas proporcionam um prévio conhecimento do comportamento as provas de carga realizadas, com exceção da PCE-104. Desta forma, PCE-04 não foi levada em consideração nos cálculos. Nota-se que a curva padrão da PCE-102 atingiu uma maior carga do que o ensaio realizado, pois na PCE-102 foi aplicada uma carga menor que a estaca suportaria. E a curva que apresentou melhor coincidência com o resultado da prova de carga foi da PCE-109.

5.2 Solo isolado

5.2.1 Recalque

Para encontrar a correlação entre o módulo de elasticidade do solo compactado e do seu respectivo N_{SPT} , ou seja, o fator “ μ ”, foram utilizados os dados da Tabela 8.

Tabela 8 - Dados para determinação do fator “ μ ”

Prova de Carga	B (m)	p_{rup} (kPa)	$p_{rup}/3$ (kPa)	ν	I_s	I_d	I_h	s (mm)	Es (kPa)	$N_{médio}$ (golpes/0,3m)	μ
PCE-201	0,3	395,5	131,83	0,3	0,79	1	1	6,17	9.771,2	16	61
PCE-202	0,5	865,8	288,6	0,3	0,79	1	1	1,88	32.503,5	15	217
PCE-203	0,3	2546,5	848,8	0,3	0,79	1	1	44,91	864,4	6	14
PCE-204	0,62	563,1	187,7	0,3	0,79	1	1	6,93	10.941,8	6	182
PCE-205	0,62	2200,0	733,3	0,3	0,79	1	1	11,21	26.420,9	10	264
PCE-206	0,62	3312,3	1104,1	0,3	0,79	1	1	17,50	25.469,6	10	255
PCE-207	0,62	1059,9	353,3	0,3	0,79	1	1	11,00	12.966,3	10	130
PCE-208	0,62	1093,1	364,4	0,3	0,79	1	1	13,00	11.314,4	10	113
PCE-209	0,62	927,4	309,1	0,3	0,79	1	1	15,00	8.320,1	10	83
PCE-210	0,62	530,0	176,7	0,3	0,79	1	1	10,00	7.131,5	10	71

Fonte: Autora.

Foi calculada a média dos valores de μ , desconsiderando apenas as PCE que não foram realizadas sobre solo compactado (PCE-203 e 204). Foi encontrado um resultado de 150 para μ , sendo os valores de N_{SPT} utilizados nos cálculos após o melhoramento do solo. Desta forma, $Es = 1,5 \times N_{SPT}$ (MPa).

5.2.2 Capacidade de Carga

Para se obter um valor para o ângulo de atrito de solos arenosos compactados, foram analisadas 10 (dez) ensaios de placa realizados diretamente sobre o solo entre estacas de compactação. E a partir da equação de capacidade de carga de Terzaghi (1943) foi encontrado um ângulo de atrito médio aproximadamente de 40 graus para solos arenosos compactados.

Tabela 9 - Dados para obtenção do ângulo de atrito (ϕ)

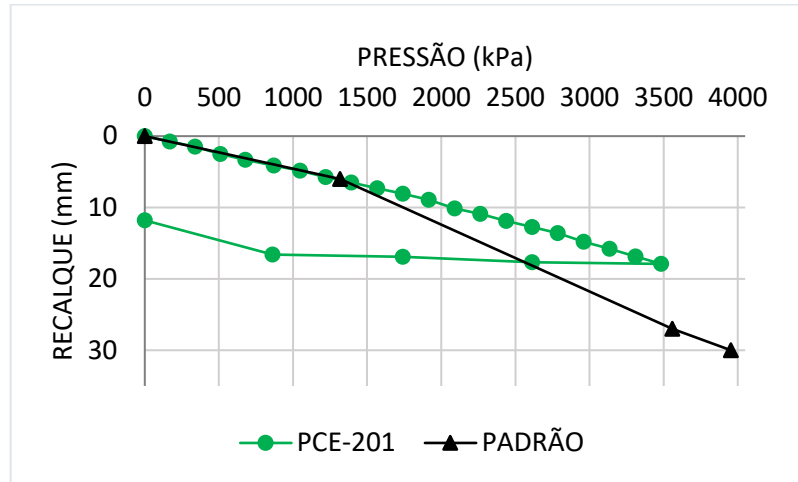
Prova de Carga	B (m)	p_{rup} (kPa)	$p_{rup} / 3$ (kPa)	γ (kN/m ³)	N_γ	ϕ (graus)
PCE - 201	0,3	395,5	131,83	18	172,56	42
PCE - 202	0,5	865,8	288,6	18	62,96	39
PCE - 203	0,3	2546,5	848,8	18	111,11	40
PCE - 204	0,62	563,1	187,7	18	50,78	37
PCE - 205	0,62	2200,0	733,3	18	198,39	43
PCE - 206	0,62	3312,3	1104,1	18	298,69	46
PCE - 207	0,62	1059,9	353,3	18	95,58	41
PCE - 208	0,62	1093,1	364,4	18	98,57	41
PCE - 209	0,62	927,4	309,1	18	83,63	40
PCE - 210	0,62	530,0	176,7	18	47,79	37

Fonte: Autora.

5.2.3 Curva padrão pressão x recalque do solo isolado

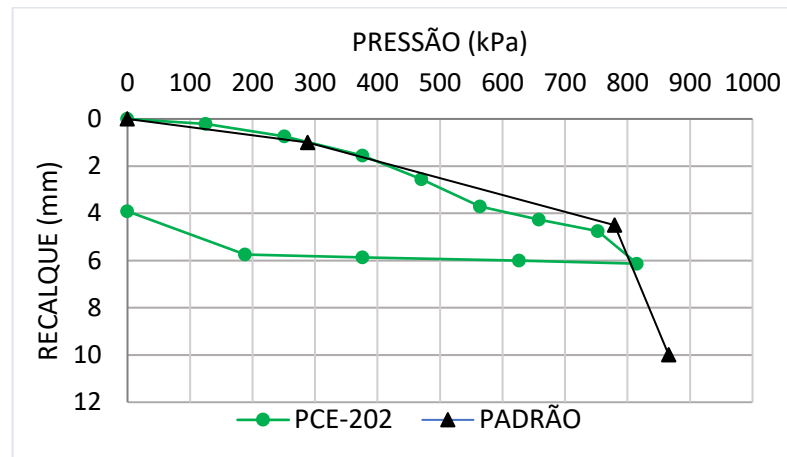
A partir das curvas padrão pressão x recalque para os pontos indicados no capítulo 3 do solo isolado, foi realizado um comparativo com os resultados obtidos das provas de carga correspondentes a cada curva. Esses comparativos são apresentados nas Figuras 63 a 70.

Figura 63 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-201 (solo isolado)



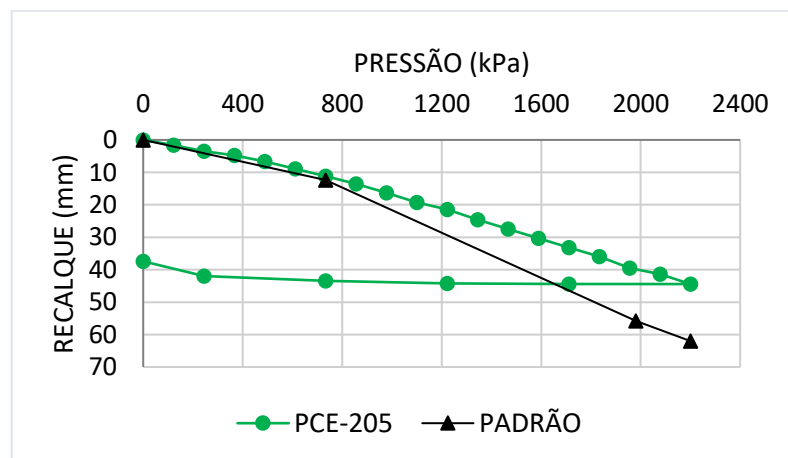
Fonte: Autora.

Figura 64 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-202 (solo isolado)



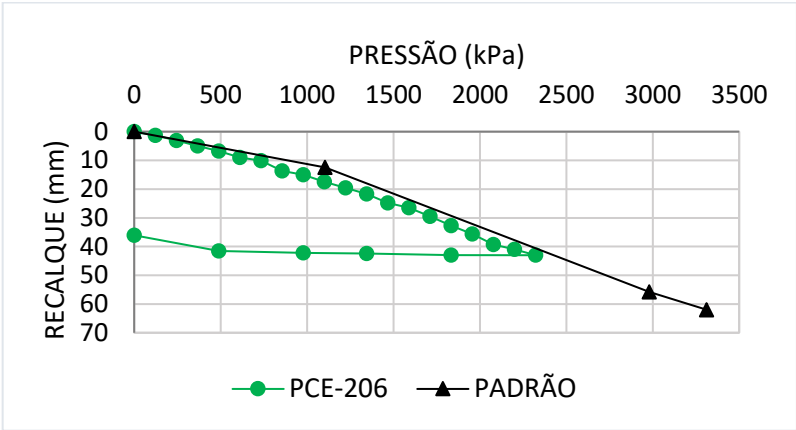
Fonte: Autora.

Figura 65 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-205 (solo isolado)



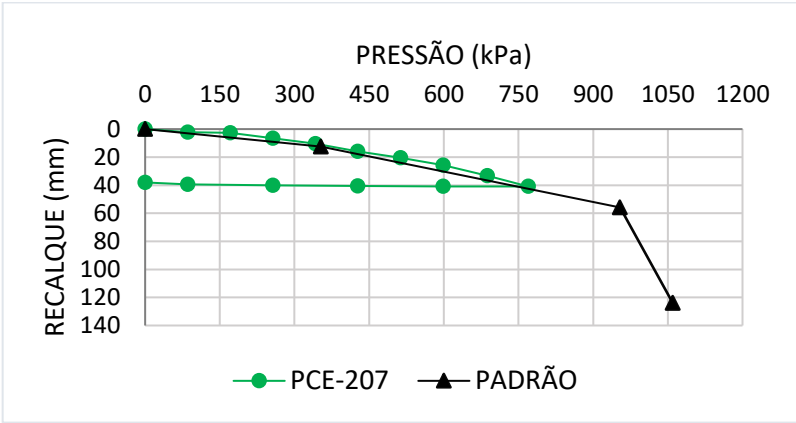
Fonte: Autora.

Figura 66 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-206 (solo isolado)



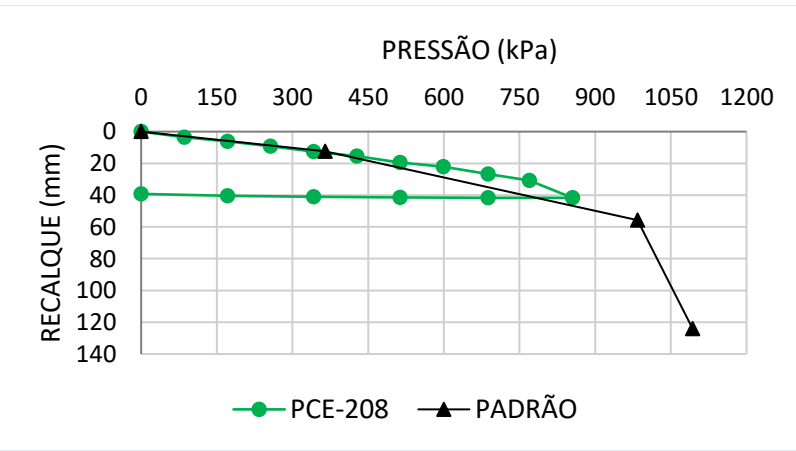
Fonte: Autora.

Figura 67 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-207 (solo isolado)



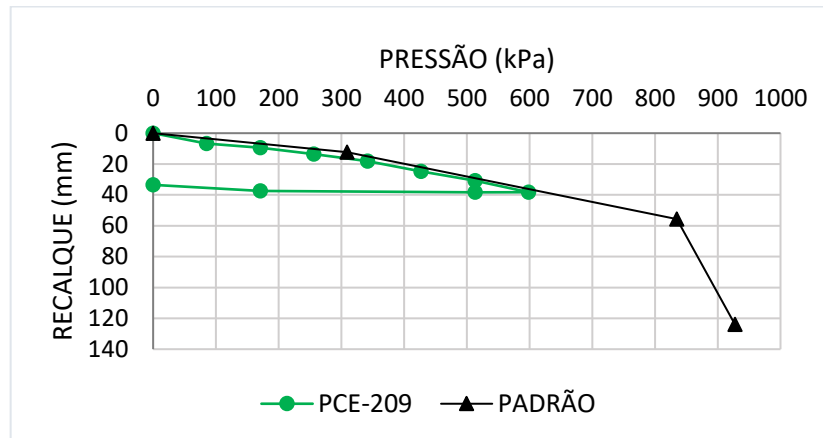
Fonte: Autora.

Figura 68 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-208 (solo isolado)



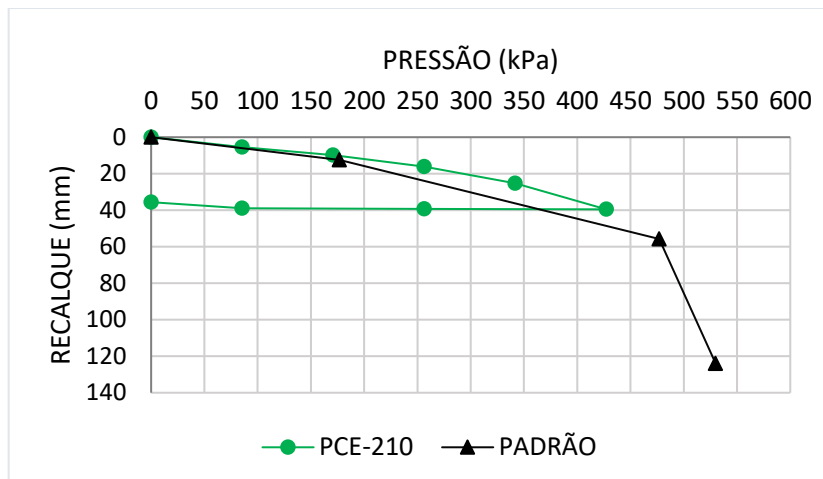
Fonte: Autora.

Figura 69 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-209 (solo isolado)



Fonte: Autora.

Figura 70 - Curva padrão pressão x recalque: PCE-210 (solo isolado)



Fonte: Autora.

Observa-se que, as curvas pressão x recalque previstas apresentam, até o ponto 3, cargas similares com as curvas pressão x recalque fornecidas pelas provas de carga estática realizadas nos terrenos melhorados, no entanto valores de recalque maiores. E o ponto 4 indica que as provas de carga realizadas não mobilizaram toda carga que o solo suportaria.

5.3 Simulação do solo melhorado

5.3.1 Obra A

Para fazer a simulação do solo melhorado para a obra A, foram utilizadas quatro provas de carga: uma com 300 mm de diâmetro sobre uma estaca (PCE-101) e outra sobre o solo isolado

(PCE-201), uma prova de carga sobre quatro estacas mais solo com uma placa de 1 x 1 m (PCE-301) e outra sobre uma estaca mais solo compactado com uma placa de 800 mm de diâmetro (PCE-302).

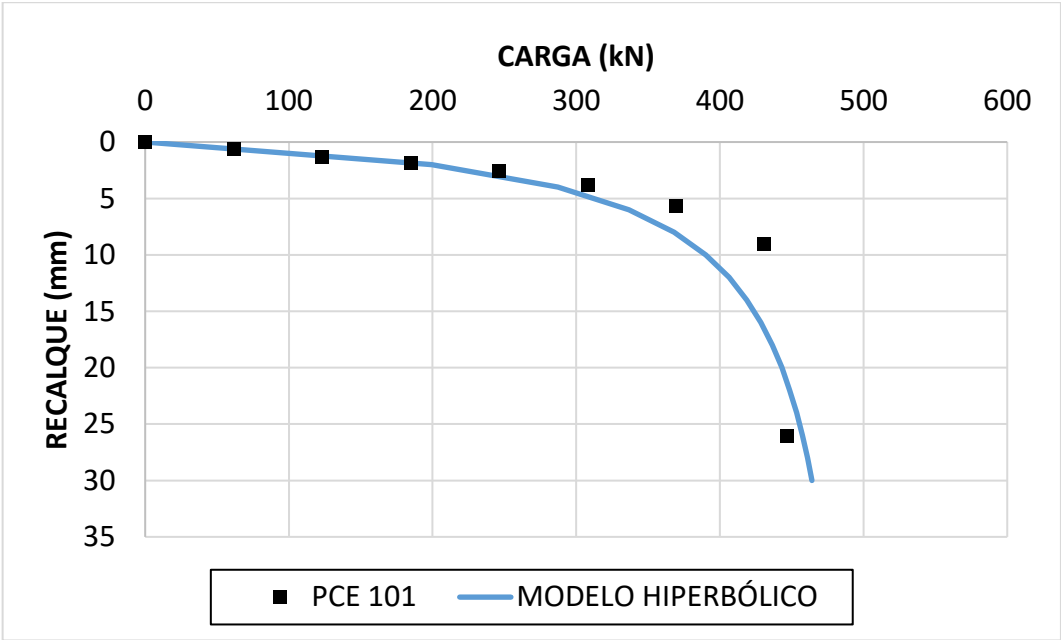
Com os resultados das provas de cargas dos elementos isolados (PCE-101 e 201), foi possível simular o comportamento das provas de cargas do terreno melhorado (PCE-301 e 302), através do modelo hiperbólico proposto no capítulo 3. O primeiro passo foi determinar os parâmetros “a” e “b” do modelo hiperbólico e consequentemente a carga de ruptura e módulo de deformação inicial (Tabelas 10 e 11), com estes valores, foram traçadas as curvas carga-recalque para cada elemento isolado (Figuras 71 e 72).

Tabela 10 - Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada (Obra A)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,0061
Carga de ruptura (kN)	512,58
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0020
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	163,40

Fonte: Autora.

Figura 71 - Gráfico carga x recalque para a estaca isolada (Obra A)



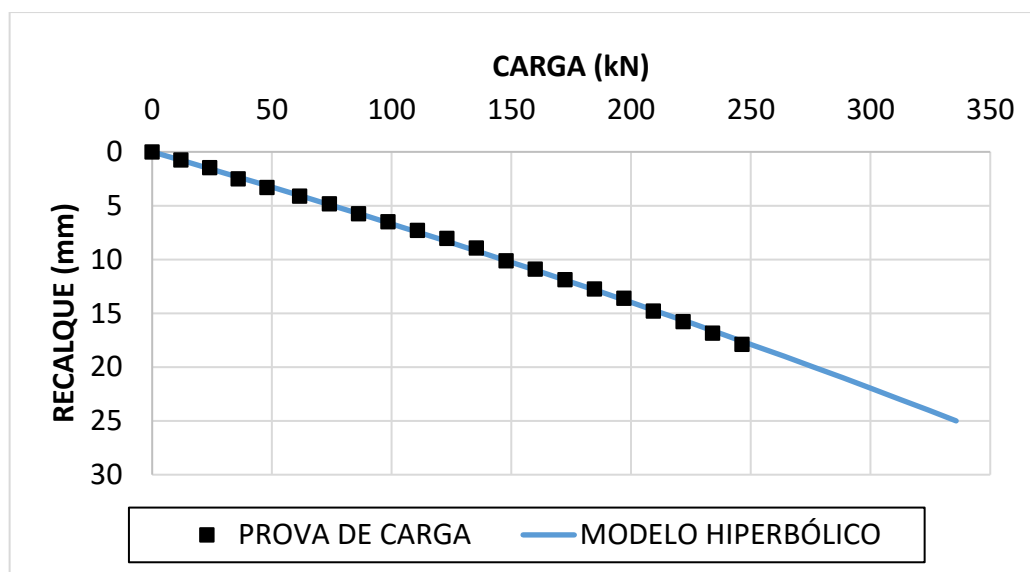
Fonte: Autora.

Tabela 11 - Parâmetros do modelo hiperbólico – solo isolado (Obra A)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,0642
Carga de ruptura (kN)	2.428,21
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0004
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	15,58

Fonte: Autora.

Figura 72 - Gráfico carga x recalque para a estaca isolada (Obra A)



Fonte: Autora.

Em seguida, para simular o comportamento da PCE-302, foi calculada a área da placa de 1 x 1 m, menos a área da estaca de 300 mm de diâmetro, obtendo uma placa fictícia com lado equivalente a 655 mm.

Utilizando a metodologia de Briaud e Gibbens (1999), foi simulado o comportamento do solo isolado para uma placa de lado de 655 mm, fazendo uma proporção entre as áreas do ensaio de placa de 300 mm e de 655 mm (tanto para achar a carga como o recalque). E para a estaca isolada foi utilizado o modelo hiperbólico correspondente à prova de carga da estaca isolada para determinar a carga análoga ao recalque de mesmo valor encontrado para placa equivalente, como mostra a Tabela 12.

Com os dados da Tabela 12, do solo isolado e da estaca isolada, a partir da equação 40, foi possível simular o comportamento da PCE-302 (placa 800 mm – 1 estaca mais solo compactado). Os valores de α_v e α_H que melhor se ajustaram com a curva da PCE-301 foi 0

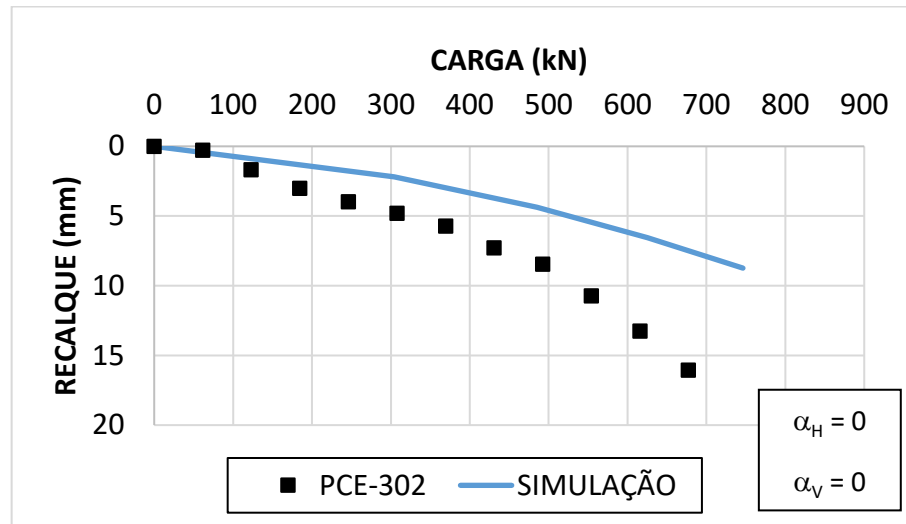
e 1,1, respectivamente, o que mostra a influência do acréscimo de recalque do elemento horizontal. As Figuras 73 e 74 mostram os gráficos da PCE-302 e da sua simulação com e sem os ajustes dos α_v e α_H . O gráfico da simulação da PCE-302 possuiu uma boa coincidência com o da prova de carga realizada.

Tabela 12 -Simulação PCE 302 (Obra A)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	15,49	219,04	0,0033	94,03	2,18	2,18	210,39	4,59	304,43
2	30,78	435,30	0,0067	186,87	4,37	4,37	298,33	9,17	485,21
3	45,87	648,84	0,0100	278,55	6,55	6,55	346,63	13,76	625,18
4	60,78	859,71	0,0133	369,07	8,74	8,74	377,16	18,35	746,23
5	75,50	1067,95	0,0167	458,47	10,92	10,92	398,20	22,93	856,67
6	90,04	1273,62	0,0200	546,77	13,10	13,10	413,58	27,52	960,35
7	104,41	1476,76	0,0233	633,97	15,29	15,29	425,32	32,11	1059,29
8	118,59	1677,43	0,0267	720,12	17,47	17,47	434,56	36,69	1154,68
9	132,61	1875,65	0,0300	805,22	19,66	19,66	442,04	41,28	1247,26
10	146,45	2071,49	0,0333	889,29	21,84	21,84	448,21	45,86	1337,50
11	160,13	2264,98	0,0367	972,35	24,02	24,02	453,39	50,45	1425,74
12	173,65	2456,16	0,0400	1054,43	26,21	26,21	457,79	55,04	1512,22
13	187,01	2645,08	0,0433	1135,53	28,39	28,39	461,59	59,62	1597,12
14	200,21	2831,77	0,0467	1215,68	30,58	30,58	464,89	64,21	1680,57
15	213,25	3016,27	0,0500	1294,89	32,76	32,76	467,79	68,80	1762,68
16	226,14	3198,63	0,0533	1373,17	34,94	34,94	470,36	73,38	1843,53
17	238,89	3378,88	0,0567	1450,55	37,13	37,13	472,65	77,97	1923,20
18	251,48	3557,05	0,0600	1527,04	39,31	39,31	474,71	82,56	2001,75
19	263,94	3733,18	0,0633	1602,66	41,50	41,50	476,56	87,14	2079,22
20	276,25	3907,31	0,0667	1677,41	43,68	43,68	478,24	91,73	2155,65

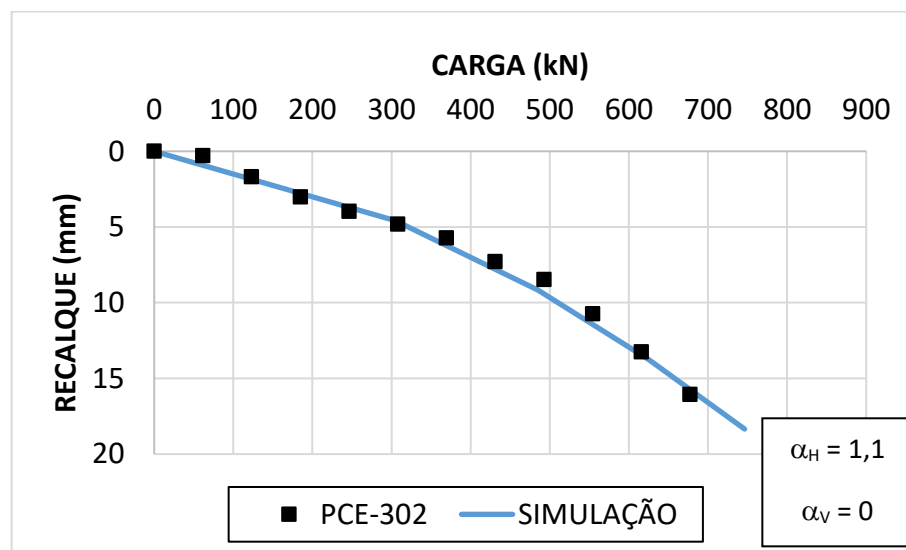
Fonte: Autora.

Figura 73 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-302 versus simulação (Obra A)



Fonte: Autora.

Figura 74 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-302 versus simulação (Obra A)



Fonte: Autora.

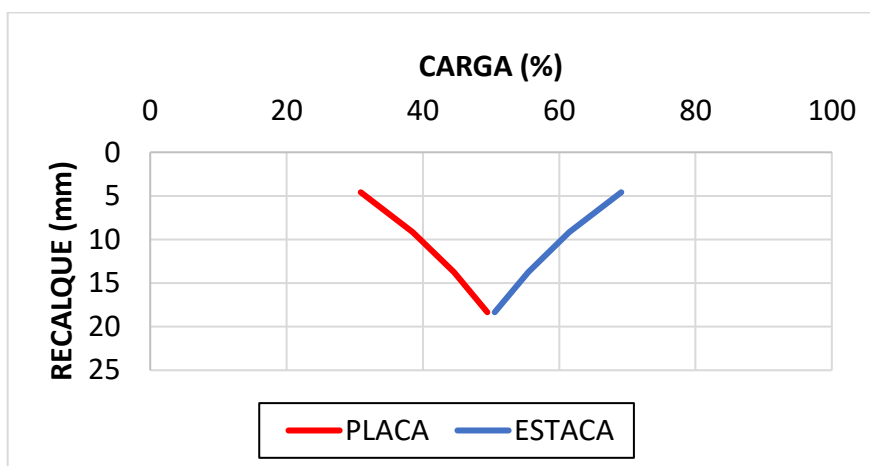
Para a partição de carga (estaca e solo), foi considerado que o percentual de carga de cada elemento do maciço melhorado era o mesmo tanto para as condições com ou sem interação. A Tabela 13 mostra os valores encontrados para cada estágio do ensaio de placa e o percentual de carga correspondente a cada elemento da fundação. A Figura 75 mostra o gráfico da partição de carga para melhor entendimento do comportamento do sistema de fundação; nota-se que cada elemento absorveu metade da carga do sistema.

Tabela 13 - Partição da carga PCE-302 (Obra A)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
4,59	30,89	69,11
9,17	38,51	61,49
13,76	44,55	55,45
18,35	49,46	50,54

Fonte: Autora.

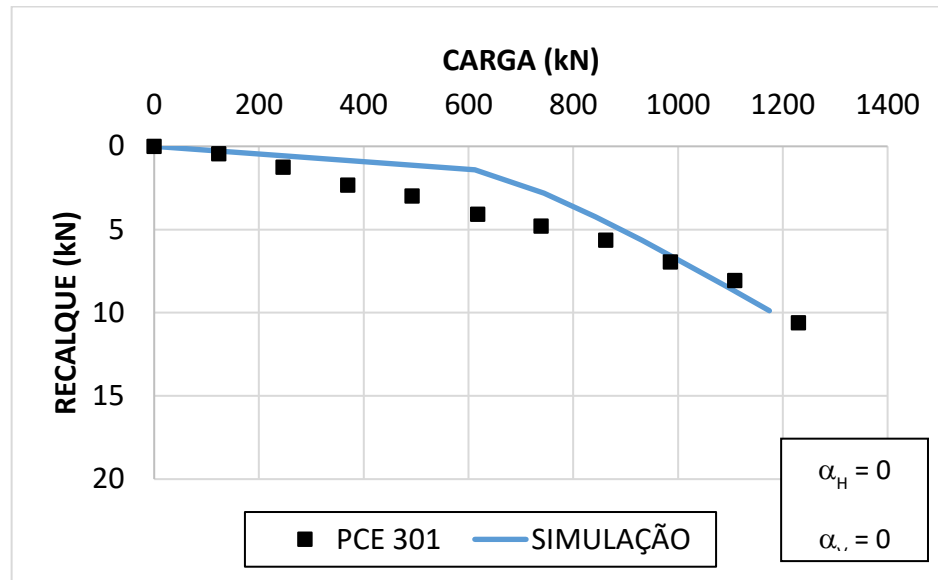
Figura 75 - Partição das cargas PCE-302 (Obra A)



Fonte: Autora.

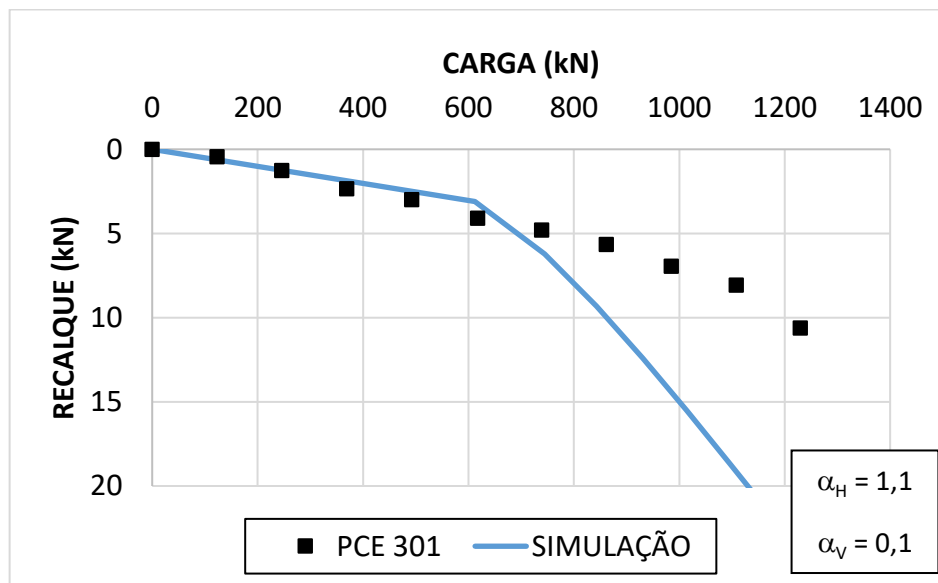
Posteriormente, foi feita a simulação para a PCE-301; utilizando-se o mesmo procedimento para determinar o diâmetro de uma placa fictícia (área de 1 m x 1 m menos a área das quatro estacas), encontrando uma largura equivalente de 847 mm. Para simular esta placa de 847 mm, foi utilizada a mesma metodologia aplicada na PCE-302, as tabelas encontram-se no Apêndice H e as Figuras 76 e 77 mostram os gráficos da PCE-301 e da sua simulação com e sem os ajustes dos valores de α_v e α_H . Para obter os valores de α_v e α_H que melhor se ajustassem com a curva da prova de carga realizada, utilizou o valor de α_H encontrado na simulação da PCE-302 e foi ajustado o α_v . Nesta simulação, foi obtida uma melhor coincidência até 600kN, após este valor, houve uma divergência da curva.

Figura 76 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-301 versus simulação (Obra A)



Fonte: Autora.

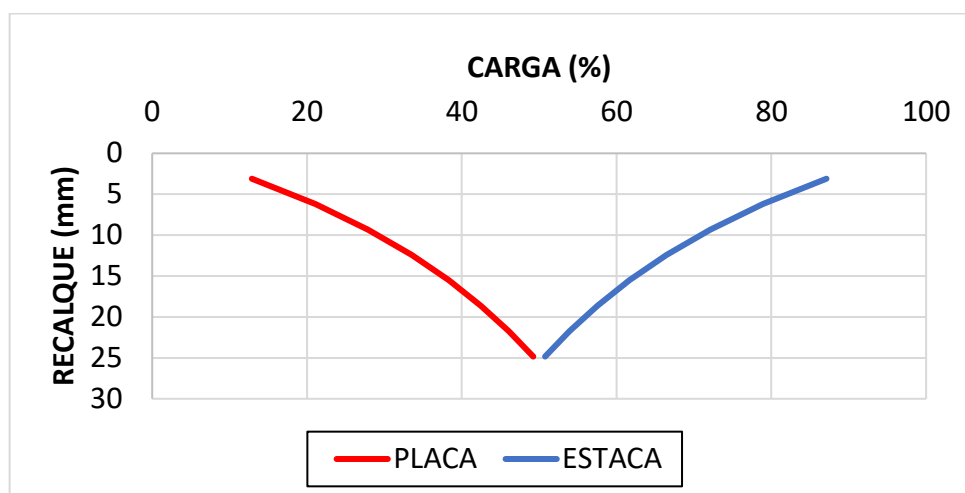
Figura 77 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-301 versus simulação (Obra A)



Fonte: Autora.

Os valores encontrados para cada estágio do ensaio de placa e o percentual de carga correspondente a cada elemento da fundação encontram-se no Apêndice H. A Figura 78 mostra o gráfico da partição de carga para melhor entendimento do comportamento do sistema de fundação; nota-se que também cada elemento absorveu metade da carga do sistema.

Figura 78 - Partição das cargas PCE-302 (Obra A)



Fonte: Autora.

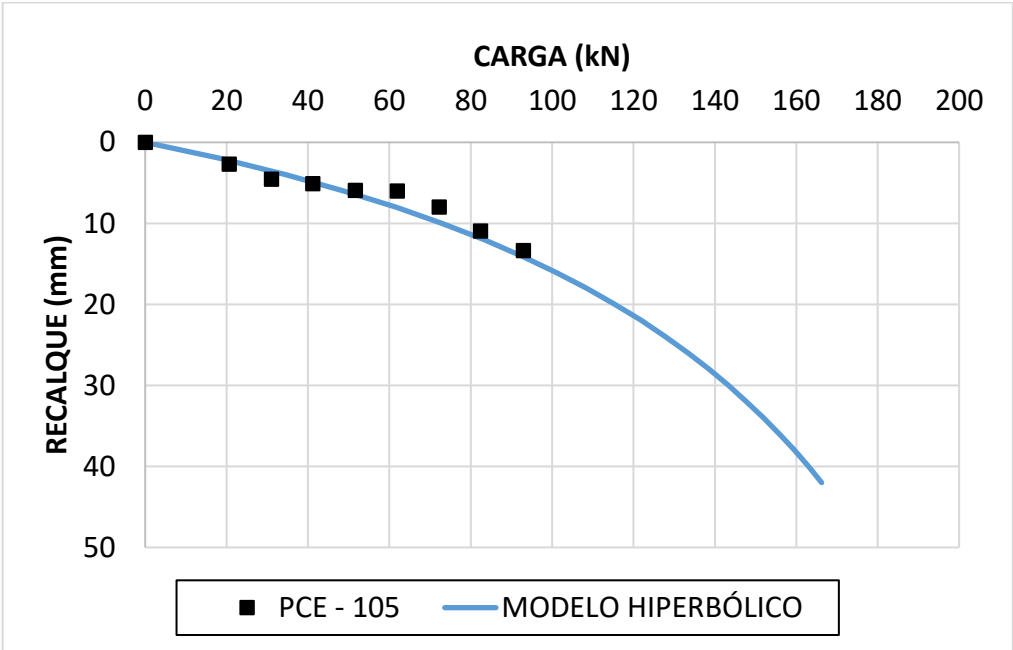
5.3.2 Obra D

As simulações dessa obra foram divididas em duas etapas: a primeira com estacas de RCC e a segunda com estacas de pó-de-pedra e brita.

Na primeira etapa, foram utilizados dados de uma prova de carga realizada sobre uma estaca com 300 mm de diâmetro de RCC (PCE-105), uma prova de carga de 620 mm de diâmetro sobre o solo isolado entre estacas de RCC (PCE-208) e duas provas de carga sobre estaca de RCC mais solo compactado com 800 mm de diâmetro (PCE-303 e 304).

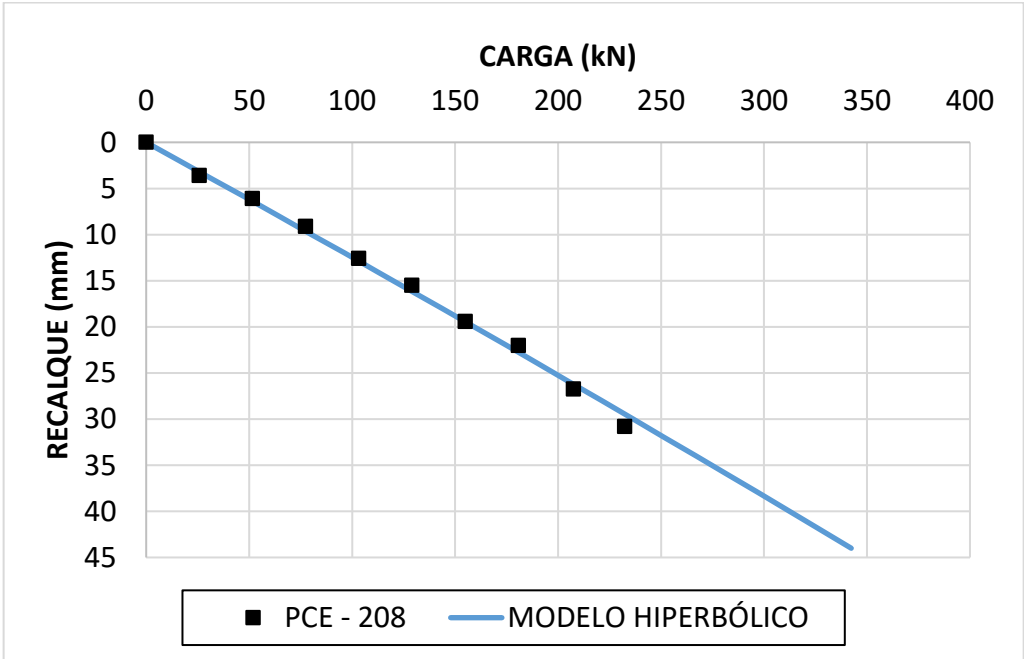
As Figuras 79 e 80 mostram os gráficos carga x recalque para as provas de carga dos elementos isolados obtidos para cada elemento isolado através do modelo hiperbólico. E as tabelas 14 e 15 apresentam os parâmetros dos quais foram utilizados para se obter as curvas dos elementos isolados.

Figura 79 - Gráfico carga x recalque para a estaca isolada - RCC (Obra D)



Fonte: Autora.

Figura 80 - Gráfico carga x recalque para o solo isolado - RCC (Obra D)



Fonte: Autora.

Tabela 14 - Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada RCC (Obra D)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,1010
Carga de ruptura (kN)	276,93
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0036
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	9,89

Fonte: Autora.

Tabela 15 - Parâmetros do modelo hiperbólico – solo isolado RCC (Obra D)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,1232
Carga de ruptura (kN)	8.236,95
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0001
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	8,12

Fonte: Autora.

Para simular o comportamento da PCE-303, foi calculada qual seria a área em que a placa foi aplicada apenas sobre o solo, subtraindo-se da área da placa total (800 mm), a área da estaca (300 mm). Em seguida, foi calculado qual seria a largura para uma placa equivalente a essa área. Com o modelo hiperbólico do solo isolado, foi encontrada a pressão atuante para uma placa de 620 mm (solo isolado) e utilizando a metodologia de Briaud e Gibbens (1999), foi simulado o comportamento do solo isolado para uma de largura 657 mm, fazendo uma proporção entre as áreas do ensaio de placa de 620 mm e de 657 mm (tanto para achar a carga como o recalque), como mostra a Tabela 16.

Com os dados da Tabela 16, do solo isolado e da estaca isolada, com o modelo hiperbólico foi possível simular o comportamento de uma fundação mista, para diferentes quantidades de estacas. Foram duas simulações para placas com 800 mm apoiadas em apenas uma estaca de 300 mm e solo compactado, com o objetivo de se comparar com os resultados das PCE-303 e 304 (RCC). Os dados da simulação da PCE-304 encontram-se no Apêndice I.

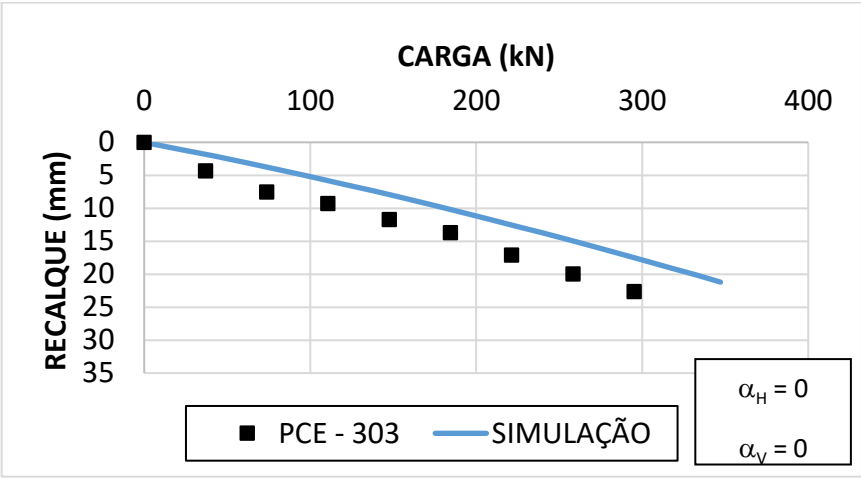
Como nas duas simulações, só existe uma estaca, o $\alpha_v = 0$, foi necessário ajustar os valores de α_H para que as curvas das simulações coincidissem com as das PCE-303 e 304 ao máximo, encontrando um melhor ajuste com 0,35 e 0,1, respectivamente. As Figuras 81 a 84 apresentam os gráficos das simulações para as PCE-303 e 304 com e sem os ajustes dos valores de α_v e α_H .

Tabela 16 - Simulação PCE 303 (Obra D)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0	0,0	0,0	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	8,1	26,9	0,0016	11,60	1,06	1,06	10,11	1,43	21,71
2	16,2	53,7	0,0032	23,18	2,12	2,12	19,51	2,86	42,69
3	24,3	80,4	0,0048	34,74	3,18	3,18	28,27	4,29	63,00
4	32,3	107,1	0,0065	46,27	4,24	4,24	36,45	5,72	82,72
5	40,4	133,8	0,0081	57,78	5,30	5,30	44,11	7,15	101,89
6	48,4	160,4	0,0097	69,27	6,36	6,36	51,30	8,59	120,56
7	56,4	186,9	0,0113	80,73	7,42	7,42	58,05	10,02	138,79
8	64,4	213,4	0,0129	92,18	8,48	8,48	64,42	11,45	156,59
9	72,4	239,9	0,0145	103,60	9,54	9,54	70,42	12,88	174,02
10	80,4	266,3	0,0161	115,00	10,60	10,60	76,10	14,31	191,09
11	88,3	292,6	0,0177	126,37	11,66	11,66	81,47	15,74	207,84
12	96,3	318,9	0,0194	137,73	12,72	12,72	86,56	17,17	224,29
13	104,2	345,1	0,0210	149,06	13,78	13,78	91,39	18,60	240,45
14	112,1	371,3	0,0226	160,37	14,84	14,84	95,98	20,03	256,35
15	120,0	397,4	0,0242	171,66	15,90	15,90	100,36	21,46	272,01
16	127,9	423,5	0,0258	182,92	16,96	16,96	104,52	22,90	287,45
17	135,7	449,6	0,0274	194,17	18,02	18,02	108,49	24,33	302,66
18	143,6	475,6	0,0290	205,39	19,08	19,08	112,29	25,76	317,68
19	151,4	501,5	0,0306	216,59	20,14	20,14	115,92	27,19	332,51
20	159,2	527,4	0,0323	227,77	21,20	21,20	119,39	28,62	347,16

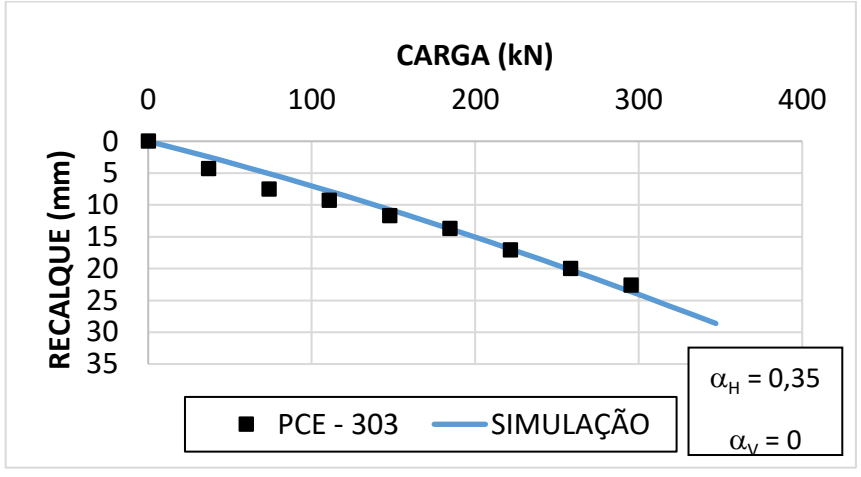
Fonte: Autora.

Figura 81 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-303 versus simulação (Obra D)



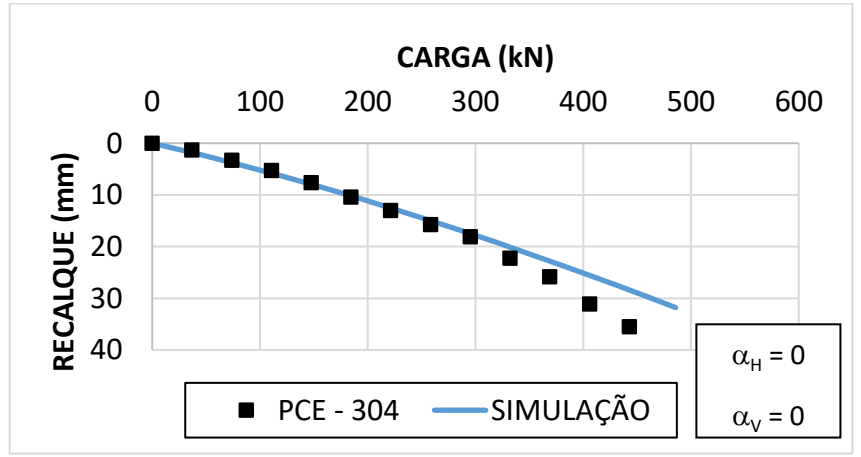
Fonte: Autora.

Figura 82 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-303 versus simulação (Obra D)



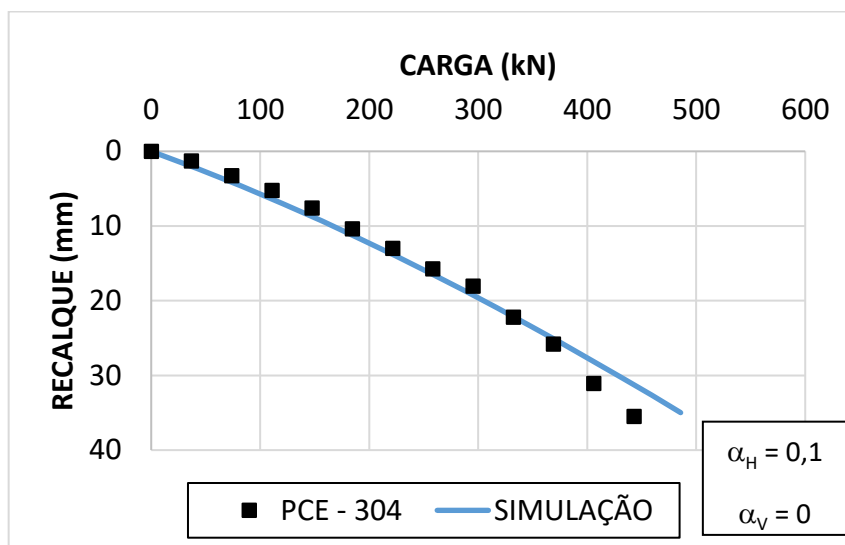
Fonte: Autora.

Figura 83 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-304 versus simulação (Obra D)



Fonte: Autora.

Figura 84 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-304 versus simulação (Obra D)



Fonte: Autora.

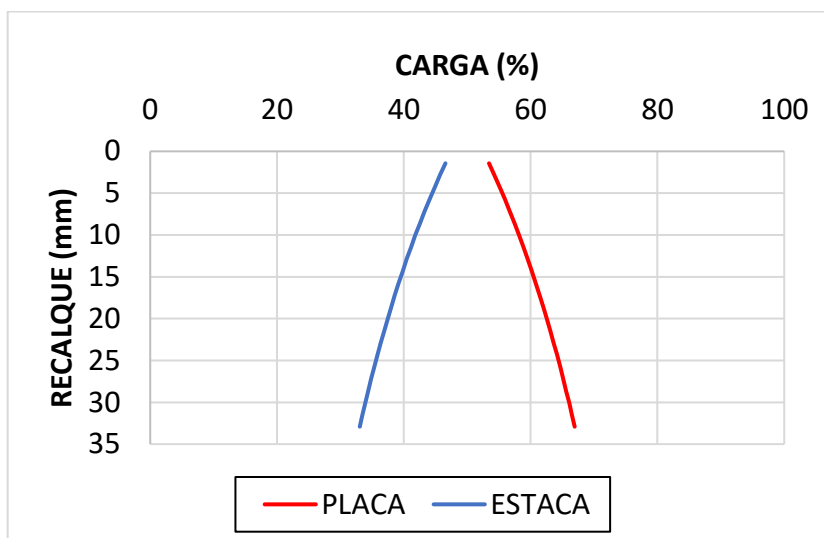
Para a partição de carga (estaca e solo), foi considerado que o percentual de carga de cada elemento do maciço melhorado era o mesmo tanto para as condições com ou sem interação. A Tabela 17 mostra os valores encontrados para cada estágio do ensaio de placa e o percentual de carga correspondente a cada elemento da fundação da PCE-303, e os dados da PCE-304 encontram-se no Apêndice I. As Figuras 85 e 86 mostram os gráficos da partição de carga das duas provas de carga para melhor entendimento do comportamento do sistema de fundação, nas duas provas de carga de RCC, a maior parte da carga foi para o solo. Na PCE-303 66,95% da carga foi para o solo e na PCE-304 69,67%.

Tabela 17 - Partição da carga PCE-303 (Obra D)

Spr (mm)	V _r (kN)	V _p (kN)
0,00	0,00	0,00
4,59	30,89	69,11
9,17	38,51	61,49
13,76	44,55	55,45
18,35	49,46	50,54

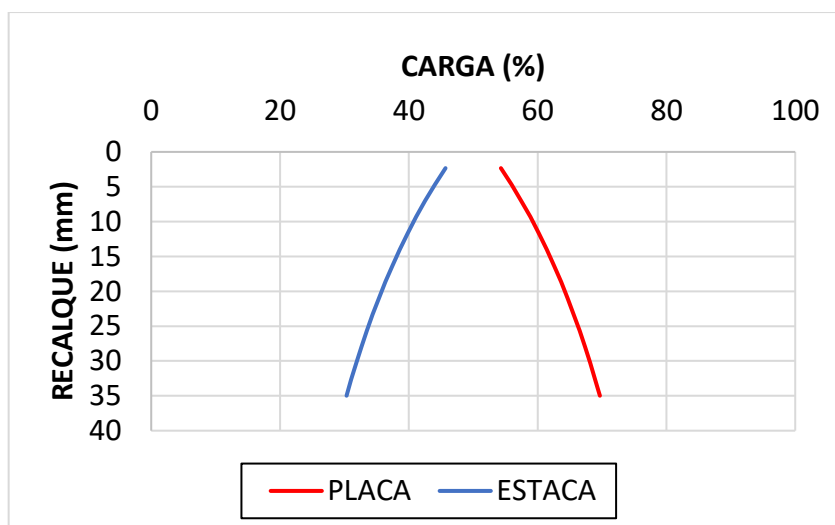
Fonte: Autora.

Figura 85 - Partição das cargas PCE-303 (Obra D)



Fonte: Autora.

Figura 86 - Partição das cargas PCE-304 (Obra D)



Fonte: Autora.

Na segunda etapa, foram utilizados dados de uma prova de carga realizada sobre uma estaca com 300 mm de diâmetro de pó-de-pedra e brita (PCE-104), uma prova de carga de 620 mm de diâmetro sobre o solo isolado entre estacas de pó-de-pedra e brita (PCE-210) e duas provas de carga sobre estaca de pó-de-pedra e brita mais solo compactado com 800 mm de diâmetro (PCE-305 e 306). As provas de carga, utilizadas nessa segunda etapa, e suas respectivas curvas carga-recalque construídas com o modelo hiperbólico são apresentadas nas Figuras 87 e 88. E as tabelas com os parâmetros do modelo hiperbólico utilizados para construção das curvas estão nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 - Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada pó-de-pedra e brita (Obra D)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,1844
Carga de ruptura (kN)	731,97
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0014
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	5,43

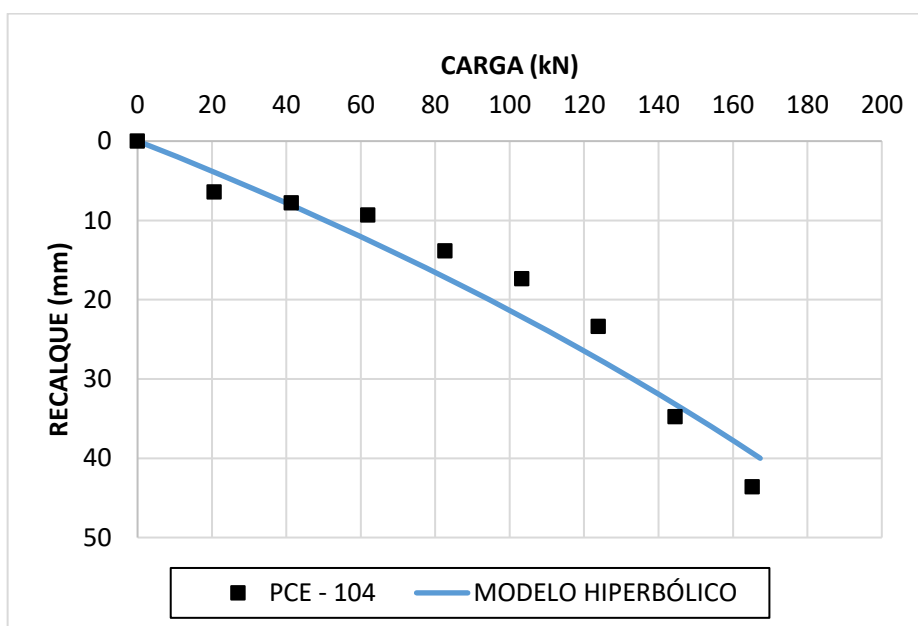
Fonte: Autora.

Tabela 19 -Parâmetros do modelo hiperbólico –solo isolado pó-de-pedra e brita (Obra D)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,0679
Carga de ruptura (kN)	354,64
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0028
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	14,74

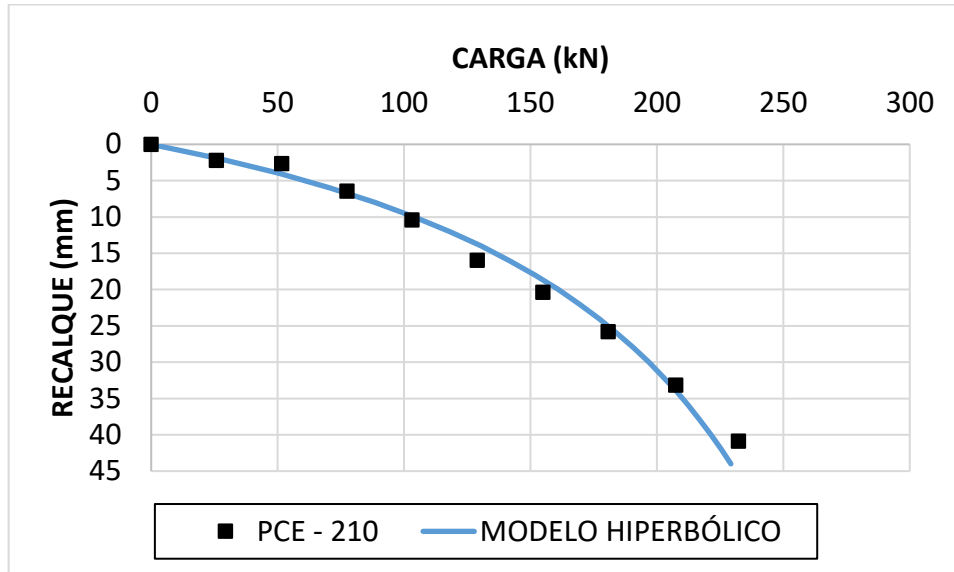
Fonte: Autora.

Figura 87 - Gráfico carga x recalque para a estaca isolada – pó-de-pedra e brita (Obra D)



Fonte: Autora.

Figura 88 - Gráfico carga x recalque para o solo isolada – pó-de-pedra e brita (Obra D)

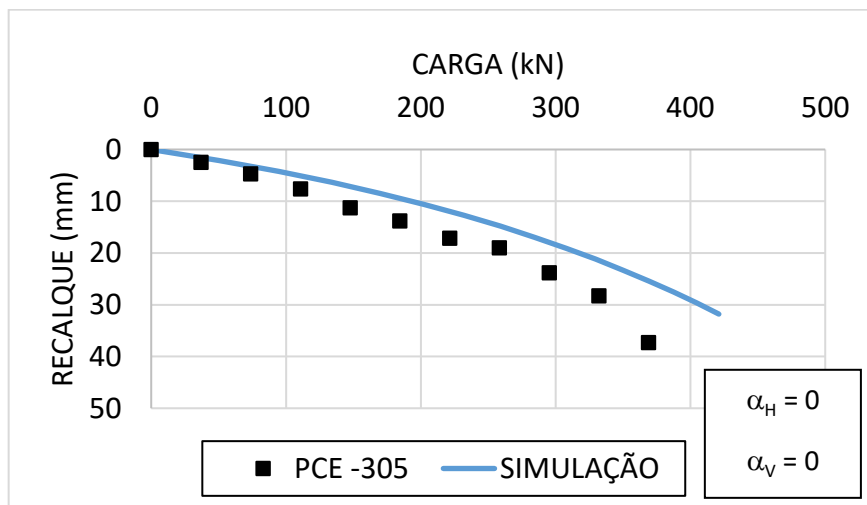


Fonte: Autora.

A simulação do comportamento das PCE-305 e 306, foi calculada utilizando o mesmo procedimento das PCE-303 e 304. Os dados da simulação encontram-se no Apêndice I.

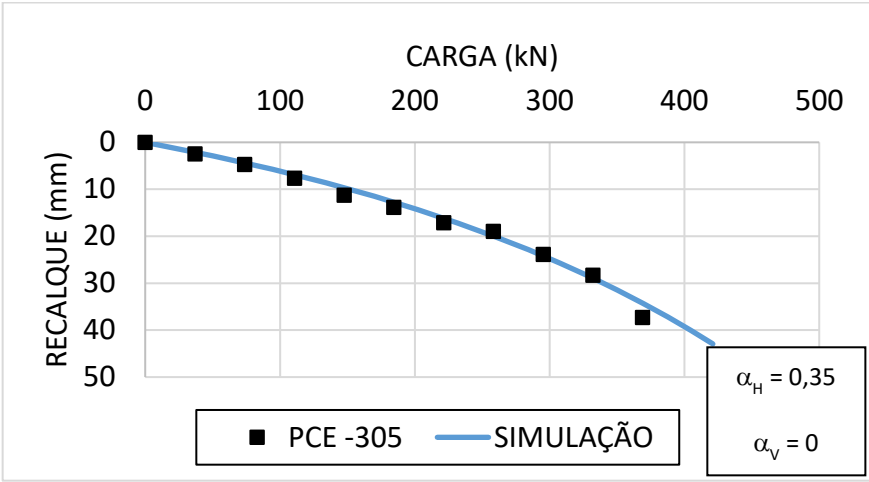
Como nas duas simulações, o valor de α_H que mais se ajustou para que as curvas das simulações coincidisse com as das PCE-305 e 306 foi 0,35. Como o valor de α_H foi o mesmo, a curva carga-recalque da simulação também fica a mesma para as duas provas de carga. As Figuras 89 a 92 mostram os gráficos das PCE-305 e 306 e de suas simulações correspondentes com e sem os ajustes dos valores de α_H e α_V .

Figura 89 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-305 versus simulação (Obra D)



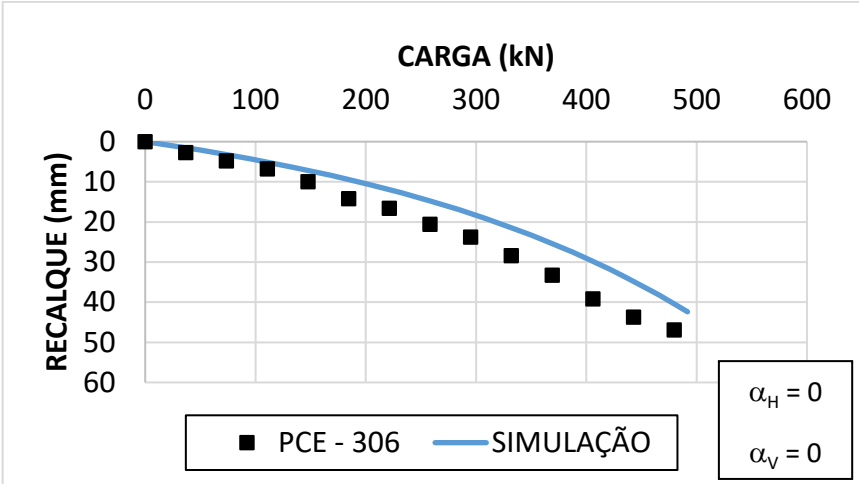
Fonte: Autora.

Figura 90 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-305 versus simulação (Obra D)



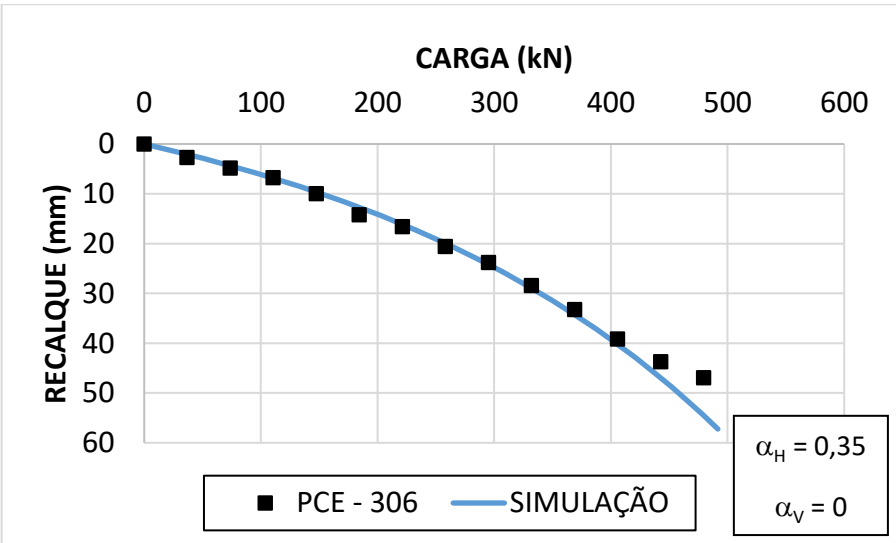
Fonte: Autora.

Figura 91 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-306 versus simulação (Obra D)



Fonte: Autora.

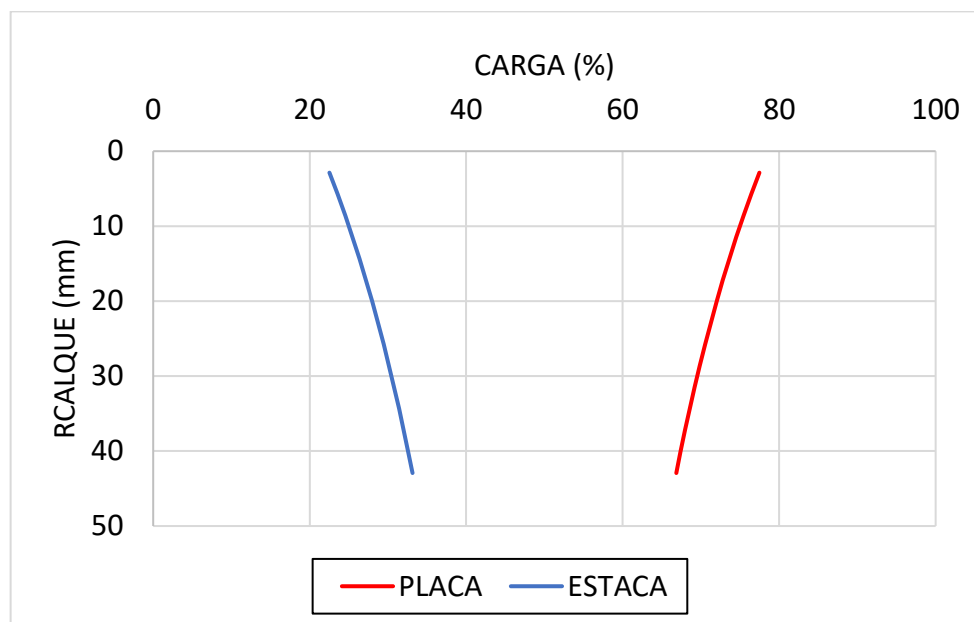
Figura 92 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-306 versus simulação (Obra D)



Fonte: Autora.

Também foi feita a análise da partição de carga para as provas de carga realizadas em estacas de pó-de-pedra (PCE-305 e 306), a Figura 93 mostra o gráfico da partição de carga para a curva da simulação. O percentual de carga absorvido pela placa foi 66,86%, sendo este valor muito próximo das PCE-303 e 304.

Figura 93 - Partição das cargas simulação PCE-305 e 6 (Obra D)



Fonte: Autora.

5.3.3 Obra E

Para a obra E foram utilizados dados de uma prova de carga realizada sobre uma estaca com 330 mm de diâmetro (PCE-108) e uma prova de carga de 500 mm de diâmetro sobre o solo isolado (PCE-211), além de nove testes de enchimento de tanques de combustível que são simulados neste capítulo e estão especificados na Tabela 20. A Figura 94 mostra o recalque dos tanques durante os testes de enchimento. O máximo recalque medido foi igual a 17 mm, evidenciando a eficiência do melhoramento do terreno.

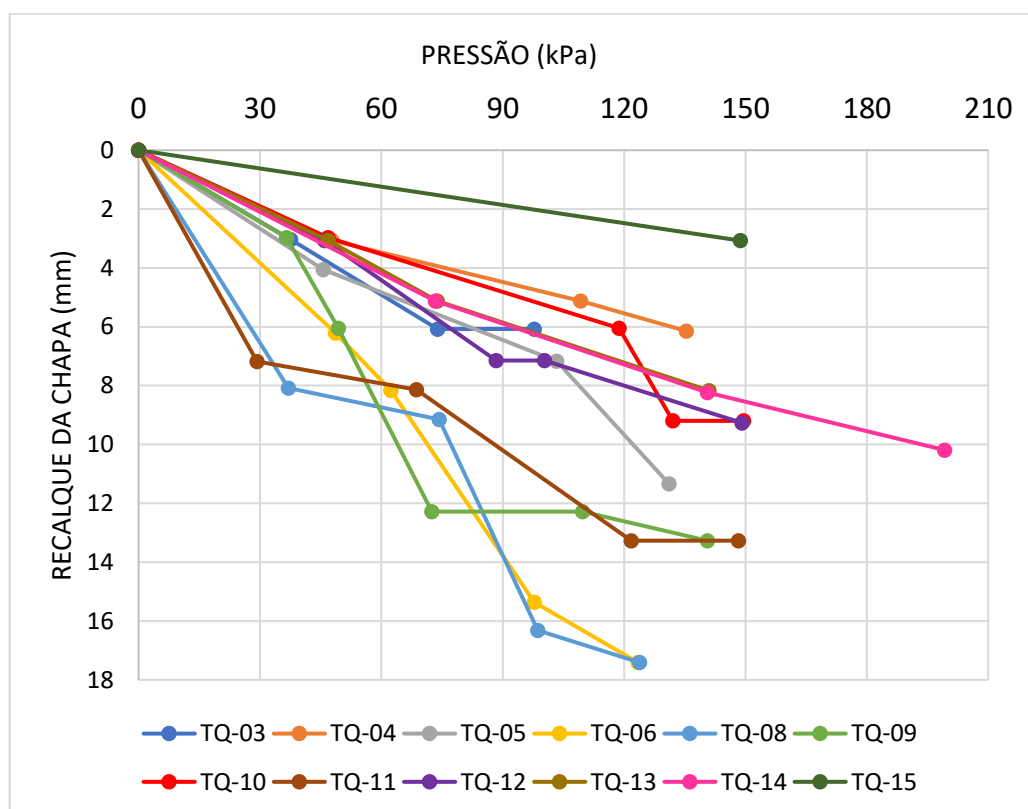
Para simular os testes de enchimentos tanques, foram utilizados dos dados das PCE-108 (estaca isolada) e PCE-211 (solo isolado). O primeiro passo foi determinar os parâmetros “a” e “b”, carga de ruptura e módulo de deformação do modelo hiperbólico apresentados nas Tabelas 21 e 22. A partir destes dados, foram traçadas as curvas carga-recalque para as PCE-108 e 211 apresentadas Figuras 95 e 96.

Tabela 20 - Dados dos tanques utilizados nos testes de enchimento (Obra E)

Tanque	Base (m)	No. de estacas	Área base (m ²)	Área estacas (m ²)	Área líquida (m ²)	Largura equivalente (m)
03	21,30	293	356,33	25,06	331,27	18,20
04=05=10 =11=12	27,75	500	604,81	42,76	562,04	23,71
07	46,15	1410	1672,76	120,60	1552,16	39,39
13=14	14,40	137	162,86	11,72	151,14	13,87

Fonte: Autora.

Figura 94 - Ensaio de enchimento dos tanques (Obra E)



Fonte: Autora.

Tabela 21 -Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada (Obra E)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,0257
Carga de ruptura (kN)	390,69
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0026
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	38,89

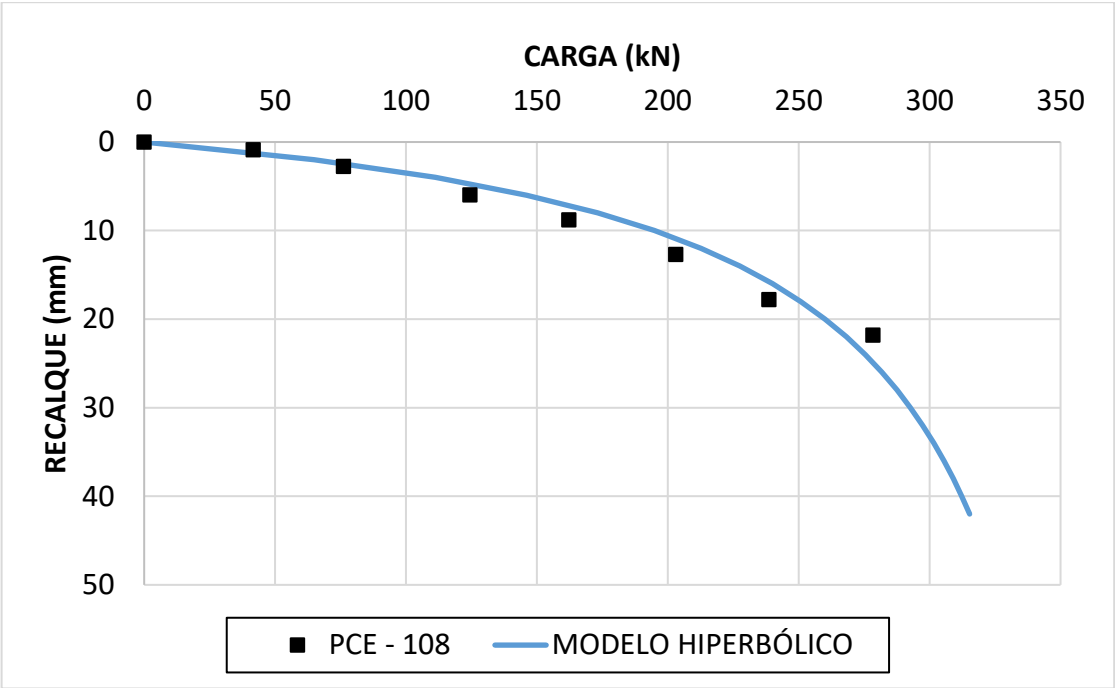
Fonte: Autora.

Tabela 22 - Parâmetros do modelo hiperbólico –solo isolado (Obra E)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,0183
Carga de ruptura (kN)	828,81
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0012
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	54,68

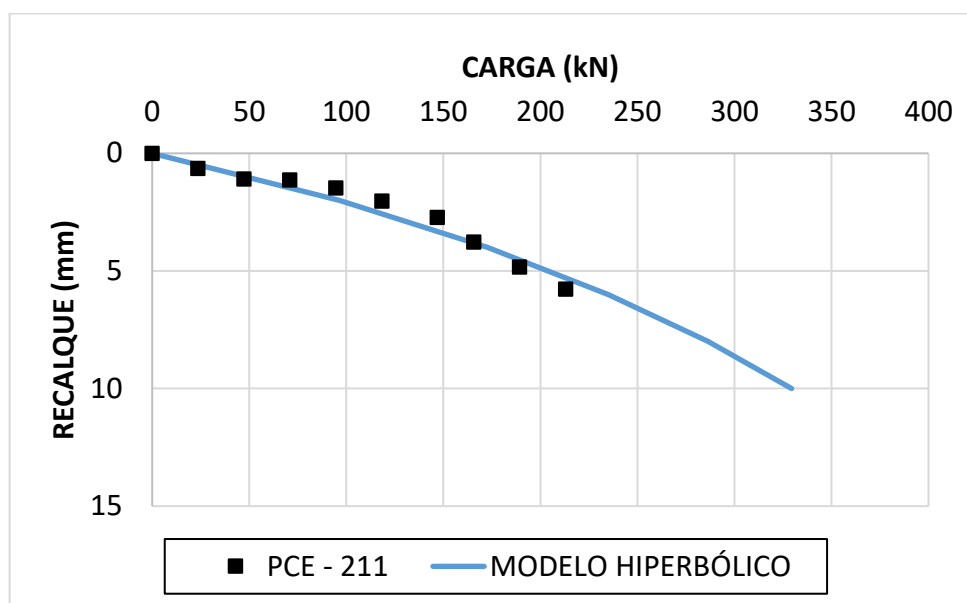
Fonte: Autora.

Figura 95 - Gráfico carga x recalque para a PCE-108 (Obra E)



Fonte: Autora.

Figura 96 - Gráfico carga x recalque para a PCE-211 (Obra E)



Fonte: Autora.

A primeira simulação foi feita para o Tanque 03. O Tanque 03 possui diâmetro de 21,30 m, ao retirar a área das 293 estacas foi encontrada uma largura equivalente a 18,20 m. Com o modelo hiperbólico do solo isolado, foi encontrada a pressão atuante para uma placa de 500 mm (solo isolado) e utilizando a metodologia de Briaud e Gibbens (1999), foi simulado o comportamento do solo isolado para uma de largura 18,20 m, fazendo uma proporção entre as áreas do ensaio de placa de 500 mm e de 1.820 mm (tanto para achar a carga como o recalque), como mostra a Tabela 23.

Com os dados da Tabela 19, do solo isolado e da estaca isolada, com o modelo hiperbólico foi possível simular o comportamento de uma fundação mista dos nove tanques. Os dados da simulação dos Tanques 04, 05, 07, 10, 11, 12, 13 e 14 encontram-se no Apêndice J. As Figuras 97 a 114 mostram o comparativo das curva carga-recalque da simulação com os testes de enchimento de cada tanque mostrando o comportamento das curvas com e sem os ajustes dos valores de α_V e α_H .

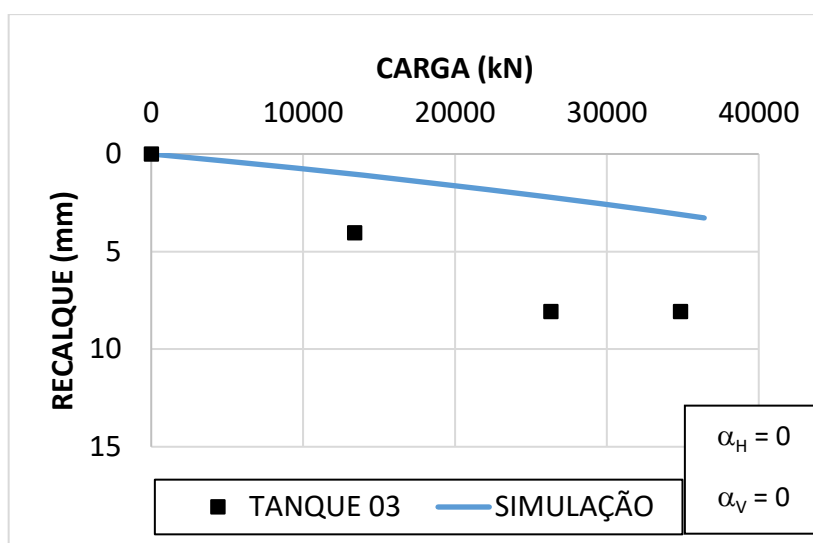
Como os testes de enchimento foram feitos nos bordos dos tanques, foi utilizado o fator de forma I_s para carregamentos de superfície de um meio de espessura infinita (PERLOFF, 1975, apud VELLOSO; LOPES 2004) para encontrar o recalque médio do tanque. Desta forma, o recalque fornecido pelo teste de enchimento dos tanques foi multiplicado por 1,33 para encontrar o recalque médio. As nove simulações foram feitas para o recalque médio.

Tabela 23 -- Simulação teste de enchimento Tanque 03 (Obra E)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,55	2,78	0,0000	922,19	0,36	0,36	4003,36	1,09	4925,56
0,02	1,09	5,56	0,0000	1843,17	0,73	0,73	7736,17	2,18	9579,35
0,03	1,64	8,34	0,0001	2762,94	1,09	1,09	11224,96	3,28	13987,90
0,04	2,18	11,11	0,0001	3681,50	1,46	1,46	14492,90	4,37	18174,40
0,05	2,73	13,88	0,0001	4598,84	1,82	1,82	17560,32	5,46	22159,17
0,06	3,27	16,65	0,0001	5514,99	2,18	2,18	20445,12	6,55	25960,11
0,07	3,81	19,41	0,0001	6429,92	2,55	2,55	23163,15	7,64	29593,07
0,08	4,35	22,17	0,0002	7343,66	2,91	2,91	25728,45	8,74	33072,11
0,09	4,89	24,92	0,0002	8256,20	3,28	3,28	28153,54	9,83	36409,75
0,10	5,43	27,67	0,0002	9167,55	3,64	3,64	30449,63	10,92	39617,17
0,11	5,97	30,42	0,0002	10077,69	4,00	4,00	32626,72	12,01	42704,42
0,12	6,51	33,16	0,0002	10986,65	4,37	4,37	34693,85	13,10	45680,50
0,13	7,05	35,90	0,0003	11894,42	4,73	4,73	36659,13	14,20	48553,56
0,14	7,59	38,64	0,0003	12801,00	5,10	5,10	38529,92	15,29	51330,92
0,15	8,12	41,37	0,0003	13706,40	5,46	5,46	40312,86	16,38	54019,26
0,16	8,66	44,10	0,0003	14610,62	5,82	5,82	42014,01	17,47	56624,62
0,17	9,19	46,83	0,0003	15513,65	6,19	6,19	43638,86	18,56	59152,51
0,18	9,73	49,55	0,0004	16415,51	6,55	6,55	45192,44	19,66	61607,95
0,19	10,26	52,27	0,0004	17316,19	6,92	6,92	46679,33	20,75	63995,52
0,20	10,79	54,99	0,0004	18215,70	7,28	7,28	48103,74	21,84	66319,44

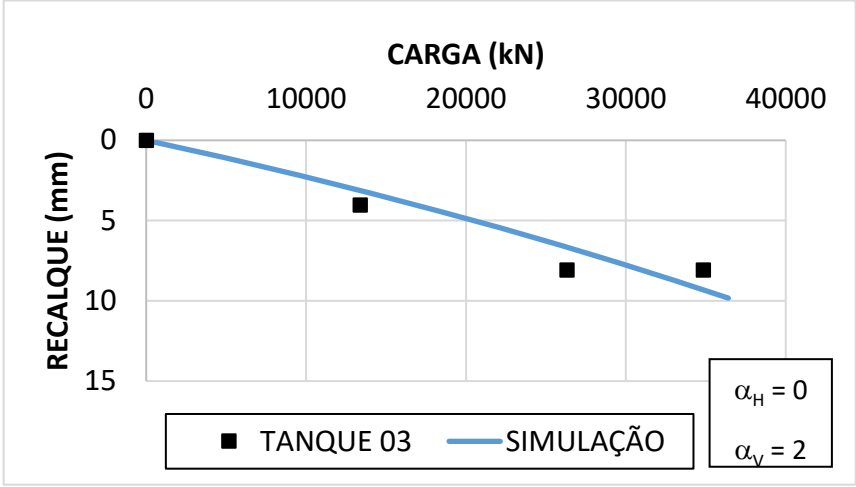
Fonte: Autora.

Figura 97 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-03 versus simulação (Obra E)



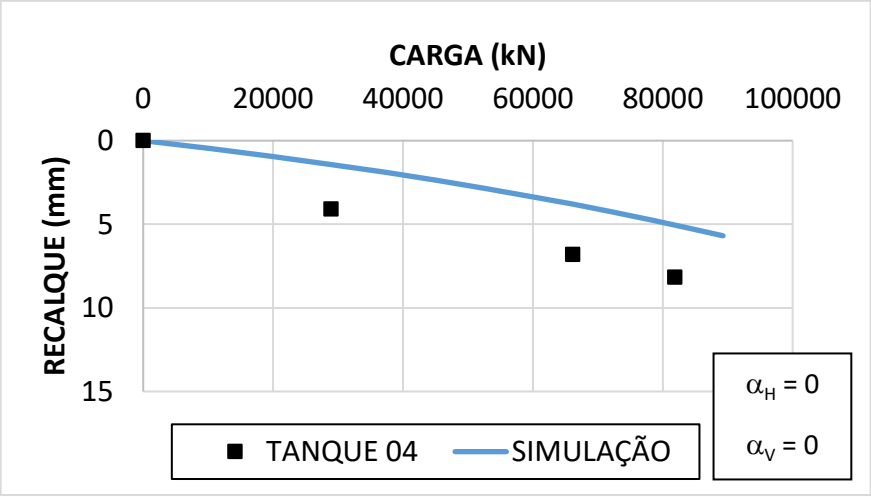
Fonte: Autora.

Figura 98 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-03 versus simulação (Obra E)



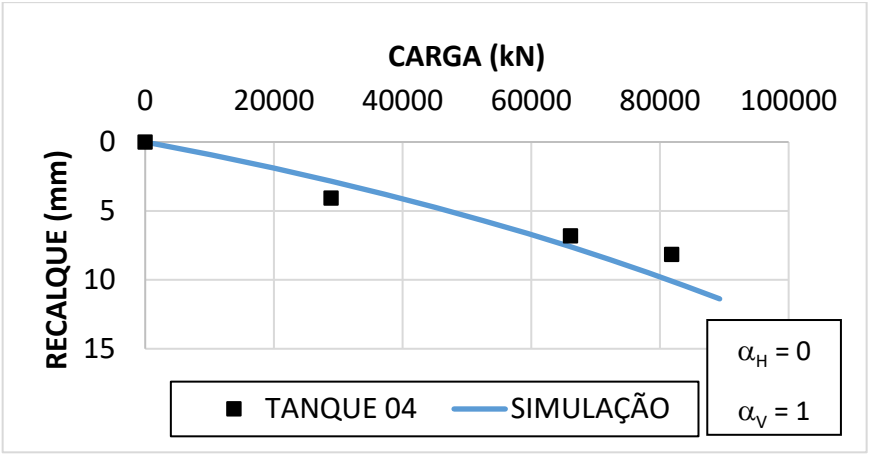
Fonte: Autora.

Figura 99 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-04 versus simulação (Obra E)



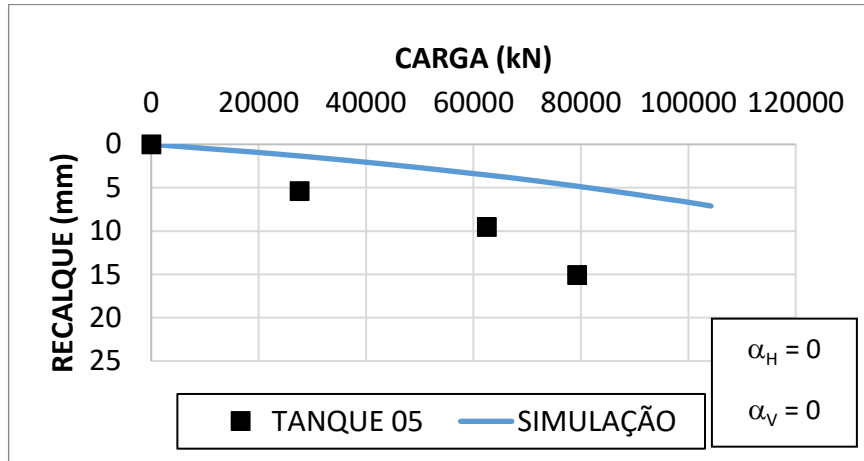
Fonte: Autora.

Figura 100 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-04 versus simulação (Obra E)



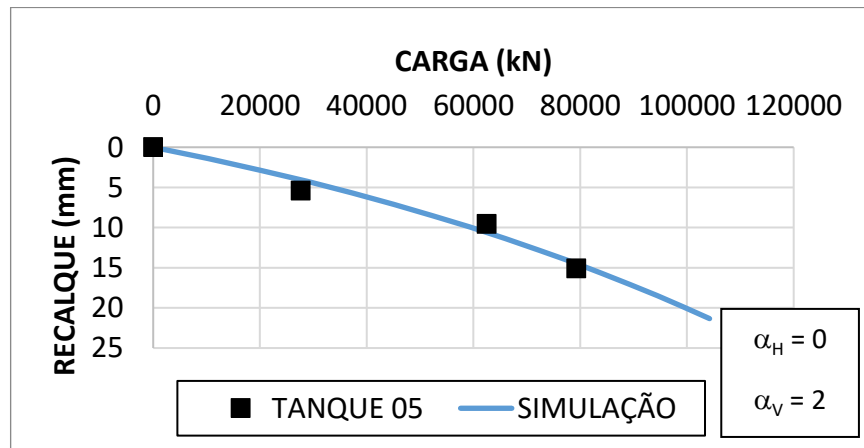
Fonte: Autora.

Figura 101 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-05 versus simulação (Obra E)



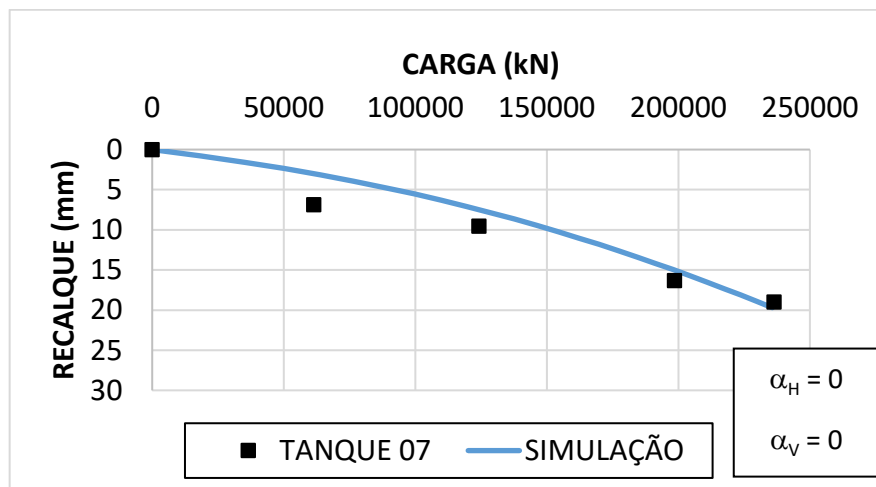
Fonte: Autora.

Figura 102 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-05 versus simulação (Obra E)



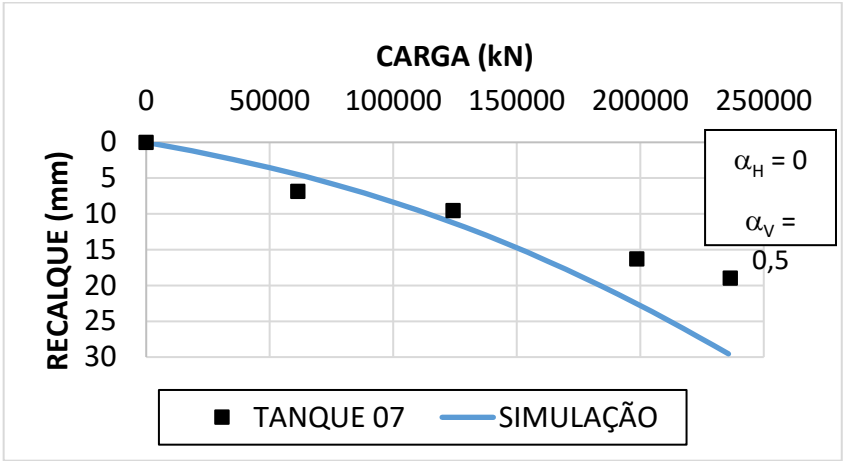
Fonte: Autora.

Figura 103 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-07 versus simulação (Obra E)



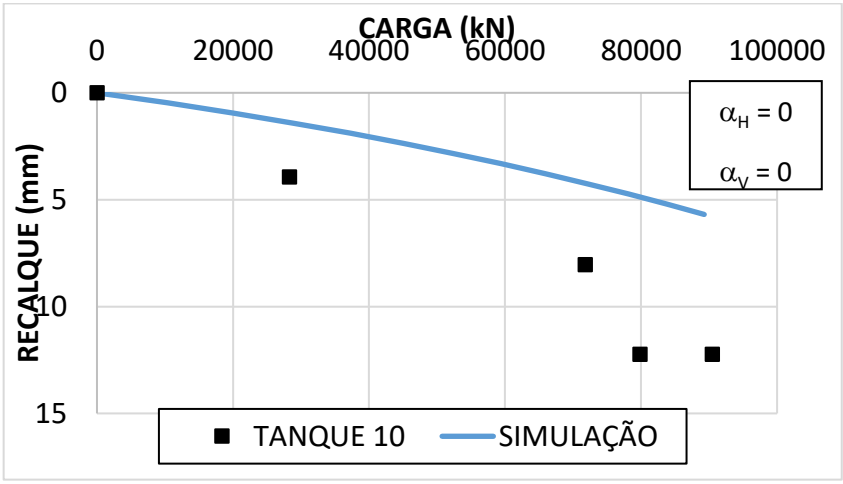
Fonte: Autora.

Figura 104 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-07 versus simulação (Obra E)



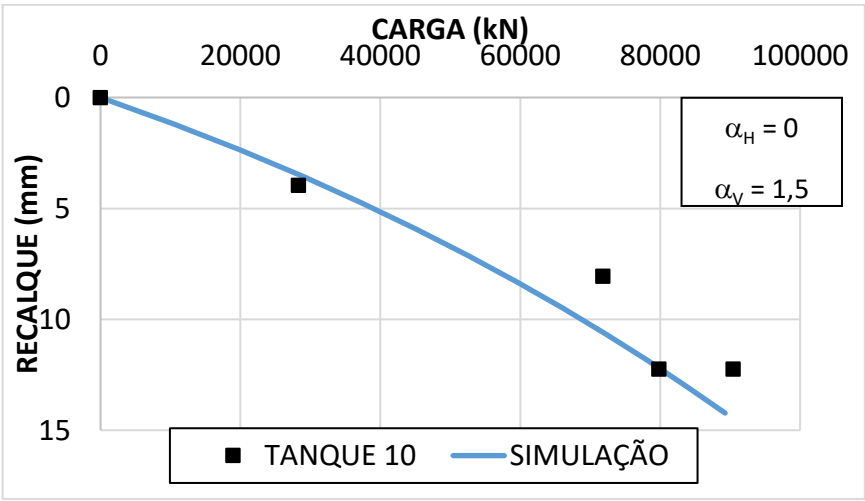
Fonte: Autora.

Figura 105 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-10 versus simulação (Obra E)



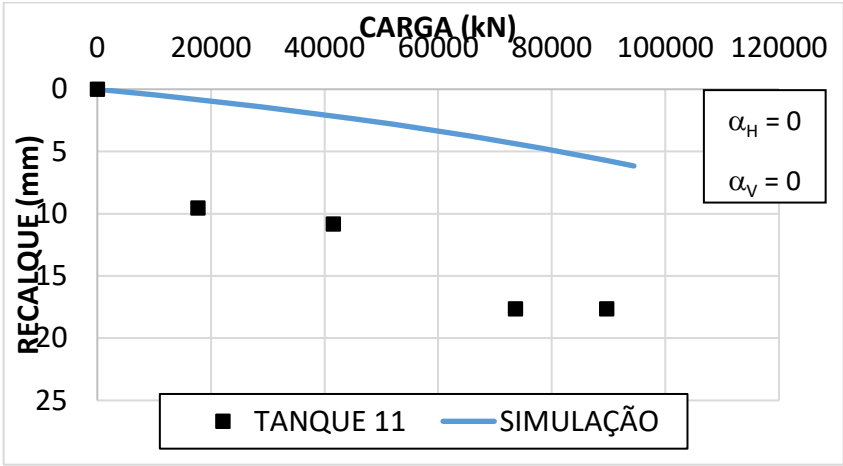
Fonte: Autora.

Figura 106 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-10 versus simulação (Obra E)



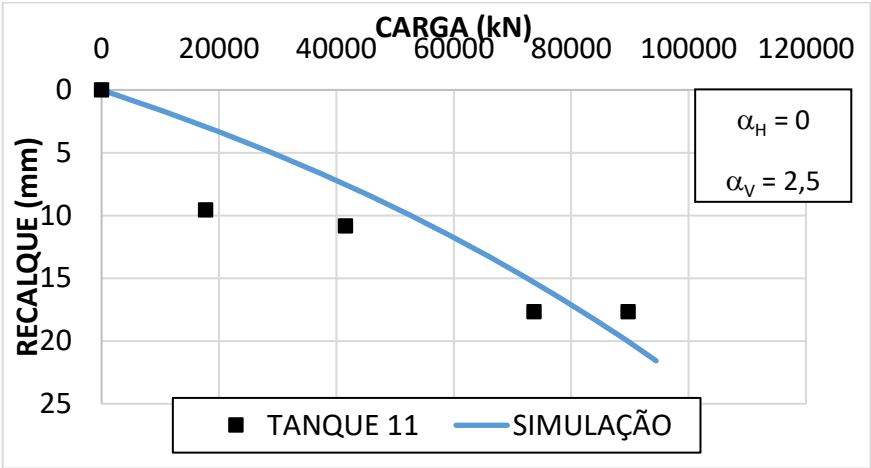
Fonte: Autora.

Figura 107- Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-11 versus simulação (Obra E)



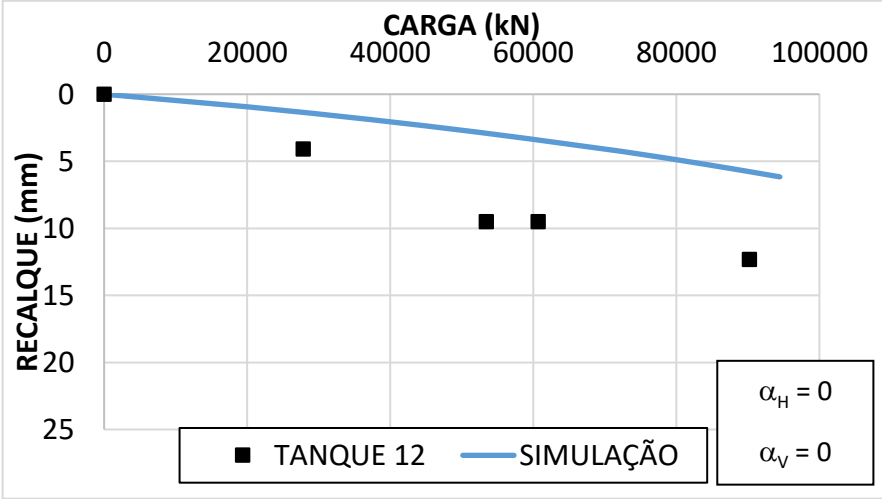
Fonte: Autora.

Figura 108- Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-11 versus simulação (Obra E)



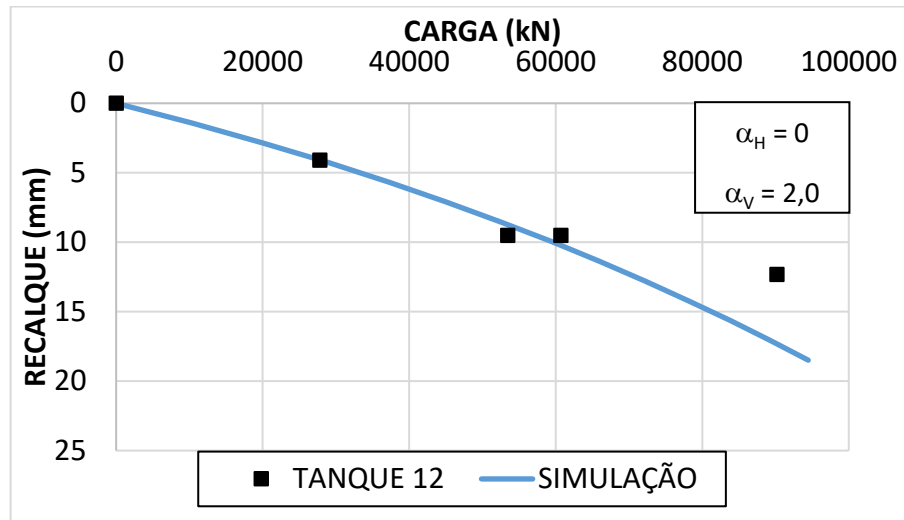
Fonte: Autora.

Figura 109 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-12 versus simulação (Obra E)



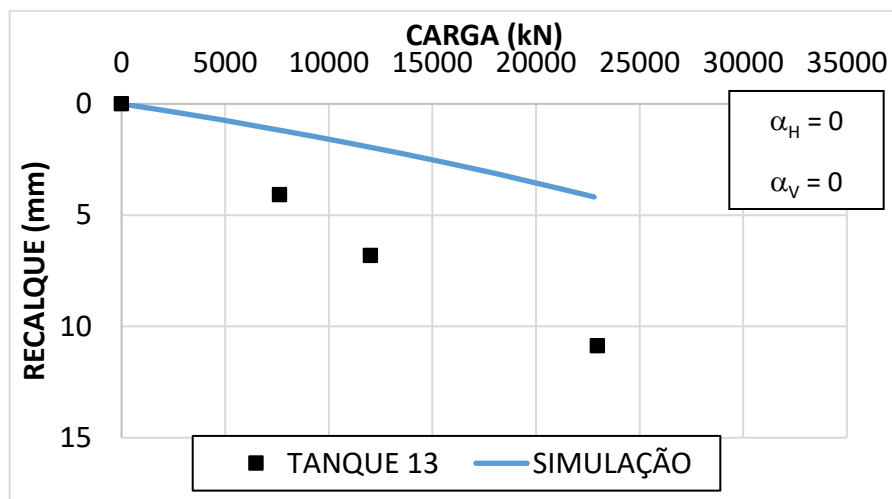
Fonte: Autora.

Figura 110 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-12 versus simulação (Obra E)



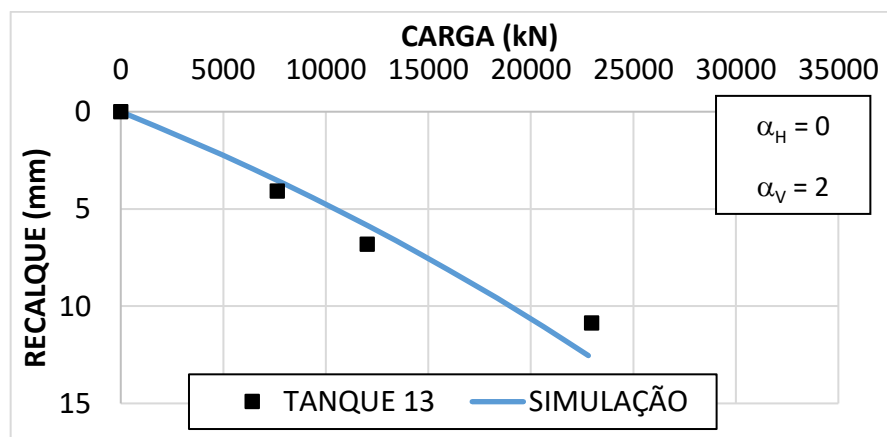
Fonte: Autora.

Figura 111 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-13 versus simulação (Obra E)



Fonte: Autora.

Figura 112 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-13 versus simulação (Obra E)



Fonte: Autora.

Figura 113 - Gráfico carga-recalque sem ajuste: teste de enchimento TQ-14 versus simulação (Obra E)

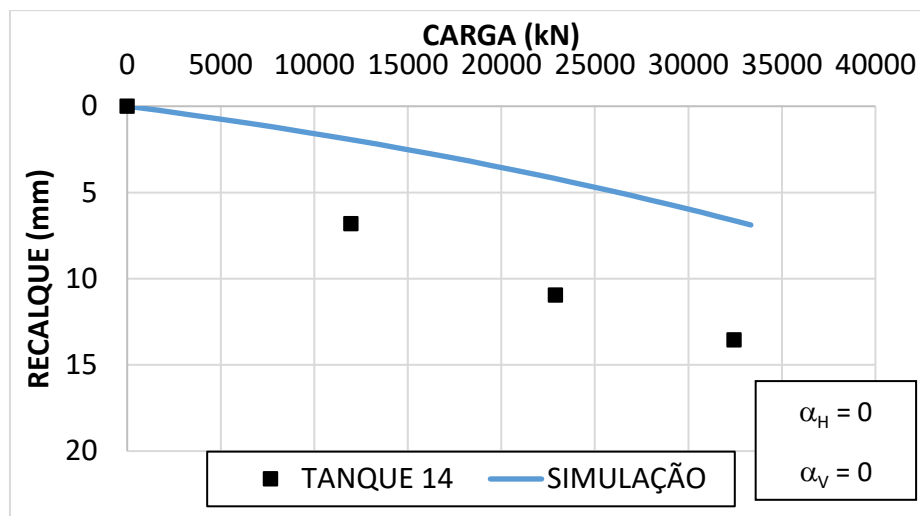
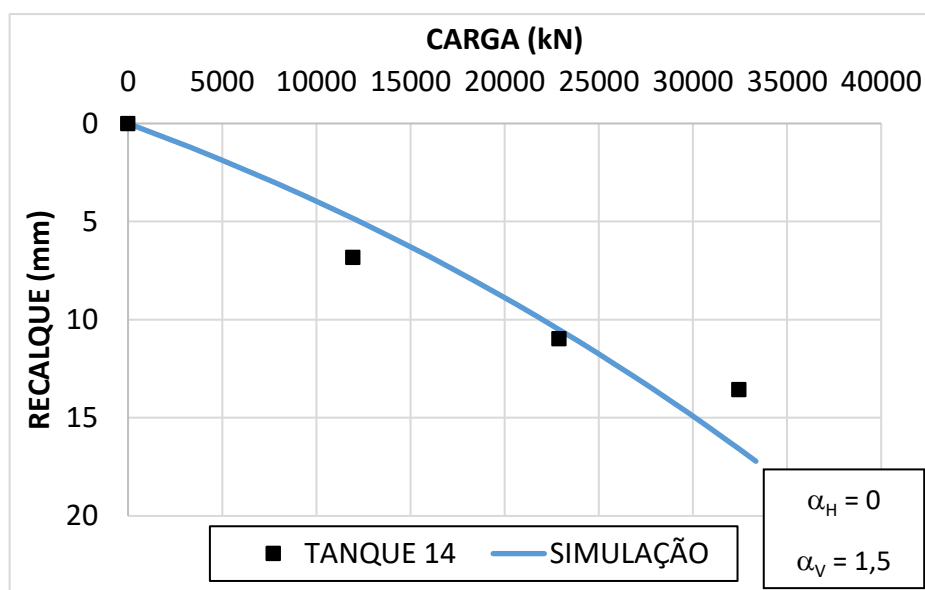


Figura 114 - Gráfico carga-recalque com ajuste: teste de enchimento TQ-14 versus simulação (Obra E)



Para todos os tanques, como não havia dado de uma prova de carga sobre solo melhorado com apenas uma estaca, foi adotado um $\alpha_H=0$ e o ajuste das curvas da simulação foi feito apenas com o α_V . Os valores de α_V encontram-se na Tabela 24. Os valores encontrados foram entre 0,5 e 2,5, o tanque que apresentou um menor valor foi o Tanque 07 e é o tanque que tem a maior quantidade de estacas. Estes valores mostram que praticamente não houve sobreposição das cargas das estacas entre si, e o recalque ocorrido foi apenas o encurtamento das próprias estacas.

Tabela 24 - Valores de α_v (Obra E)

Tanque 03	2,0
Tanque 04	1,0
Tanque 05	2,0
Tanque 07	0,5
Tanque 10	1,5
Tanque 11	2,5
Tanque 12	2,0
Tanque 13	2,0
Tanque 14	1,5

Fonte: Autora.

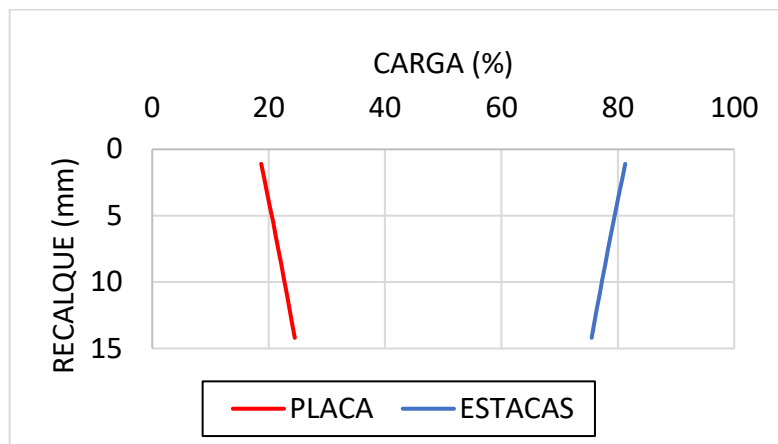
Para a partição de carga (estaca e solo), foi utilizado o resultado da simulação de cada tanque. Foi considerado que o percentual de carga que vai para as estacas ou solo, seria o mesmo havendo interação dos recalques ou não. A Tabela 25 mostra dos valores encontrados para a partição de cargas do Tanque 03 e dos demais tanques encontram-se no Apêndice I. As Figuras 115 a 123 mostram os gráficos da partição de carga para melhor entendimento do comportamento do sistema de fundação e a Tabela 26 apresenta os valores dos percentuais de carga para cada Tanque, percebe-se que as estacas absorvem em torno de 75% da carga dos tanques, com exceção do Tanque 07, que absorve em torno de 57%.

Tabela 25 - Partição da carga Tanque 03 (Obra E)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
1,09	18,72	81,28
2,18	19,24	80,76
3,28	19,75	80,25
4,37	20,26	79,74
5,46	20,75	79,25
6,55	21,24	78,76
7,64	21,73	78,27
8,74	22,21	77,79
9,83	22,68	77,32
10,92	23,14	76,86
12,01	23,60	76,40
13,10	24,05	75,95
14,20	24,50	75,50

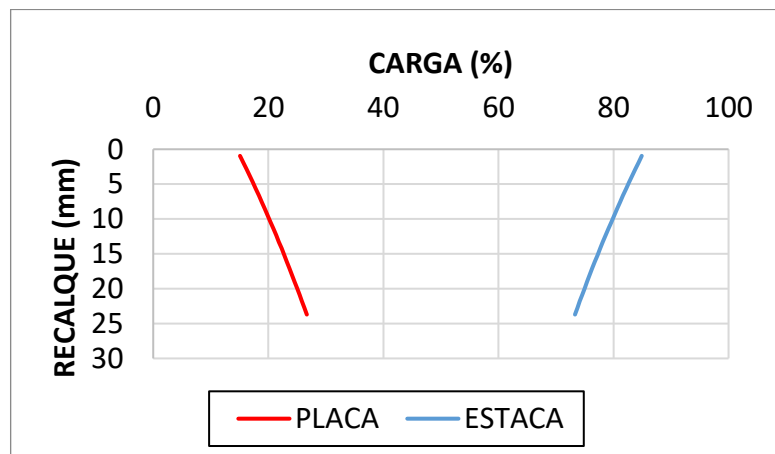
Fonte: Autora.

Figura 115 - Partição das cargas da simulação do TQ-03 (Obra E)



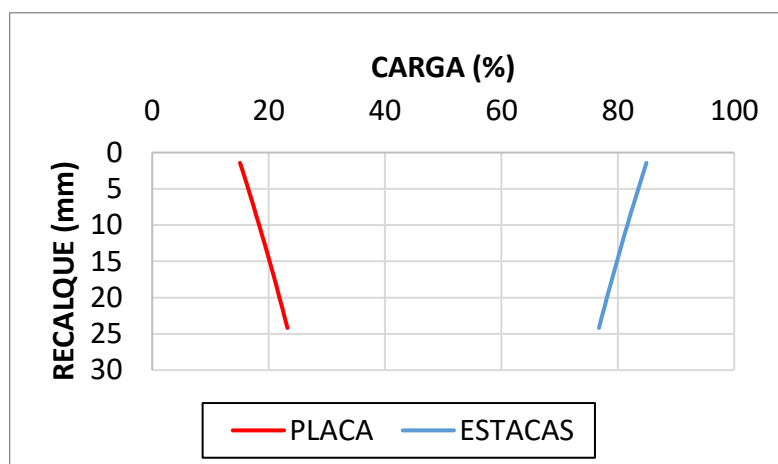
Fonte: Autora.

Figura 116 - Partição das cargas da simulação do TQ-04 (Obra E)



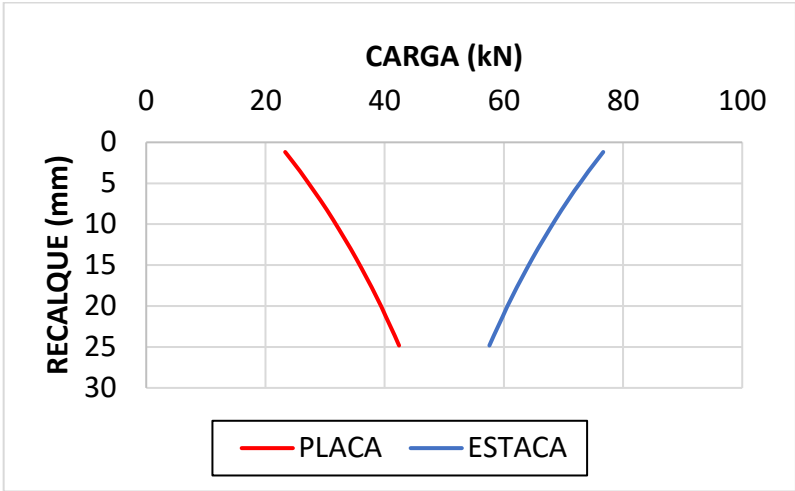
Fonte: Autora.

Figura 117 - Partição das cargas da simulação do TQ-05 (Obra E)



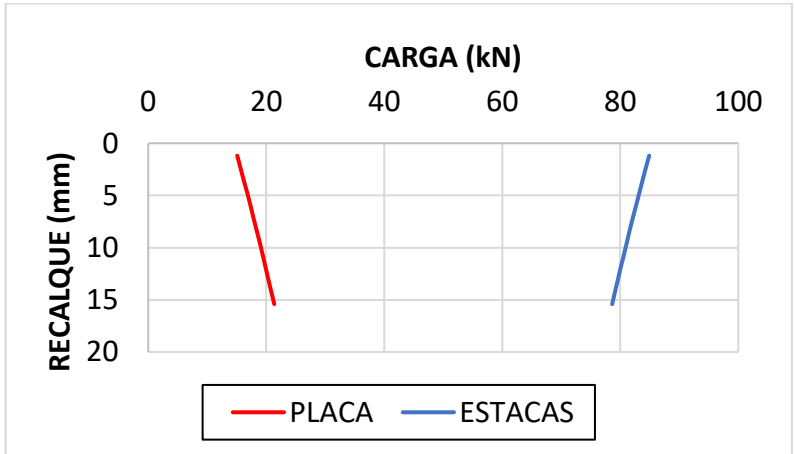
Fonte: Autora.

Figura 118 - Partição das cargas da simulação do TQ-07 (Obra E)



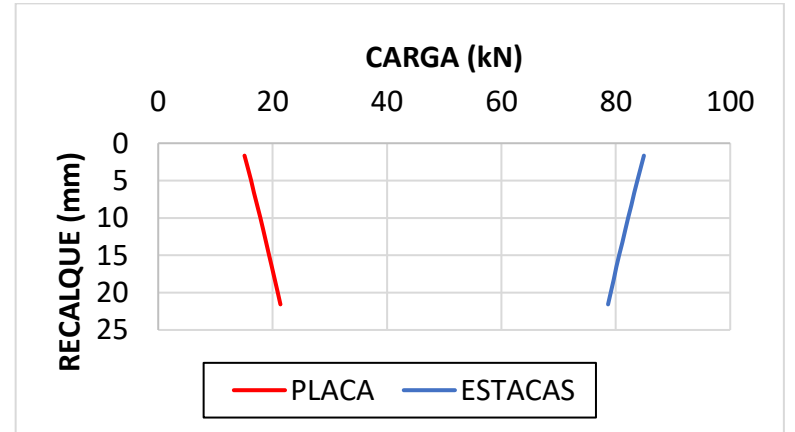
Fonte: Autora.

Figura 119 - Partição das cargas da simulação do TQ-10 (Obra E)



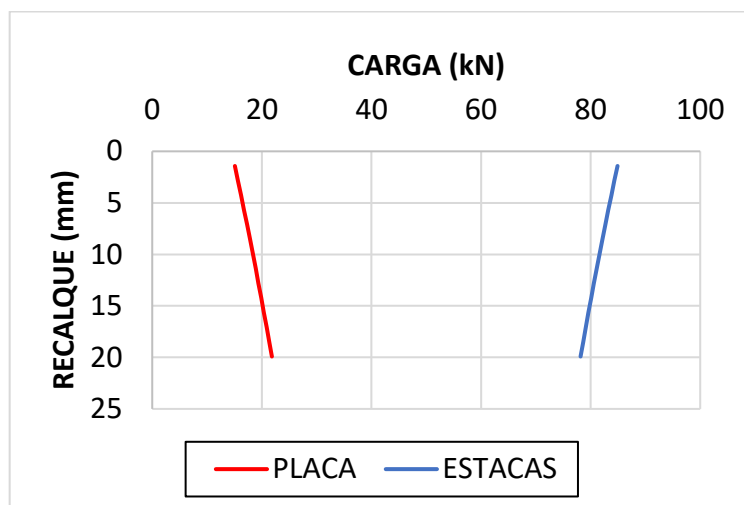
Fonte: Autora.

Figura 120 - Partição das cargas da simulação do TQ-11(Obra E)



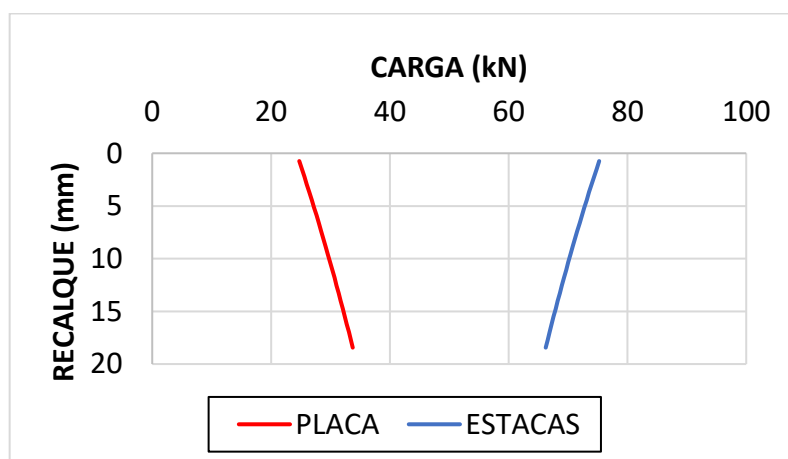
Fonte: Autora.

Figura 121 - Partição das cargas da simulação do TQ-12 (Obra E)



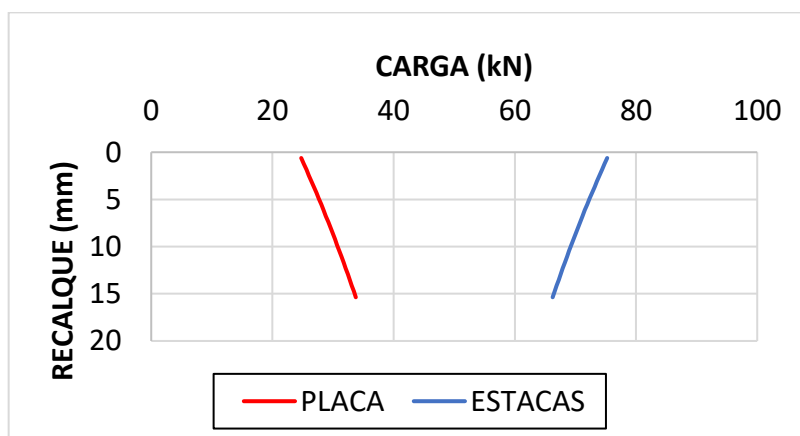
Fonte: Autora.

Figura 122 - Partição das cargas da simulação do TQ-13 (Obra E)



Fonte: Autora.

Figura 123 - Partição das cargas da simulação do TQ-14 (Obra E)



Fonte: Autora.

Tabela 26 - Partição de cargas (Obra E)

Tanque	%placa	%estacas
Tanque 03	24,50	75,50
Tanque 04	26,69	73,31
Tanque 05	23,23	76,77
Tanque 07	42,42	57,58
Tanque 10	21,36	78,64
Tanque 11	21,36	78,64
Tanque 12	26,69	73,31
Tanque 13	33,76	66,24
Tanque 14	33,76	66,24

Fonte: Autora.

5.3.4 Obra F

Para a obra F foram utilizados dados de uma prova de carga realizada sobre uma estaca com 300 mm de diâmetro (PCE-109), uma prova de carga de 1,0 x 1,0 m sobre uma estaca mais solo (PCE-310) e uma prova de carga de 1,0x1,0 m sobre 4 estacas mais solo (PCE-314).

A Figura 124 mostra o gráfico carga x recalque para a prova de carga da estaca isolada (PCE-109) obtido através do modelo hiperbólico, os parâmetros utilizados para se obter esta curva encontra-se na Tabela 27.

Para a obra F, não foi realizada prova de carga estática sobre o solo isolado melhorado. Por este fato, foi utilizado o resultado de uma prova de carga de placa 1,0 x 1,0 m, sobre uma estaca de 300mm mais o solo melhorado ao redor (PCE-310), e foi calculado a largura equivalente da projeção apenas solo melhorado. Foi, então, seguido o método de previsão para encontrar a curva padrão da estaca isolada achando primeiramente os valores dos recalques dos quais precisava encontrar as cargas correspondentes. Em seguida, foi encontrada a pressão de ruptura pela fórmula de Terzaghi e consequentemente os demais pontos para ser traçada a curva padrão de solo isolado para esta obra.

Para determinar a curva do modelo hiperbólico para o solo isolado desta obra, foi utilizada a curva padrão, no entanto, foram inseridos pontos intermediários no gráfico para conseguir um melhor ajuste, representada na Figura 125. Os parâmetros do modelo hiperbólico do solo isolado são apresentados na Tabela 28.

Tabela 27 -Parâmetros do modelo hiperbólico – estaca isolada (Obra F)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,0236
Carga de ruptura (kN)	241,95
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0041
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	42,38

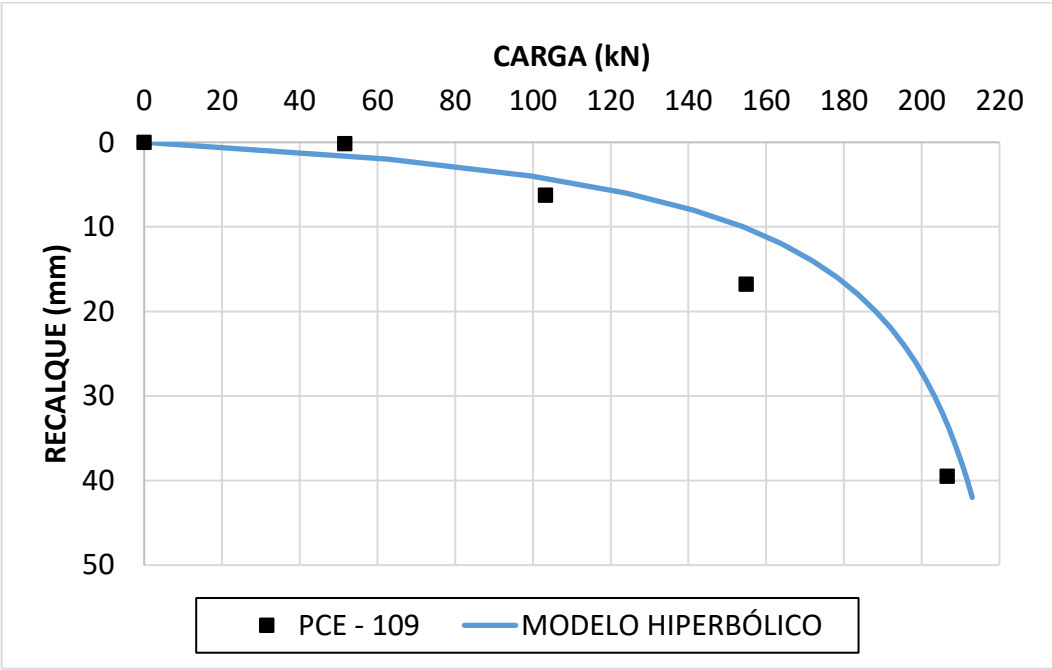
Fonte: Autora.

Tabela 28 -Parâmetros do modelo hiperbólico –solo isolado (Obra F)

Parâmetro “a” (mm/kN)	0,1005
Carga de ruptura (kN)	1.212,08
Parâmetro “b” (1/kN)	0,0008
Módulo de deformação inicial (kN/mm)	9,95

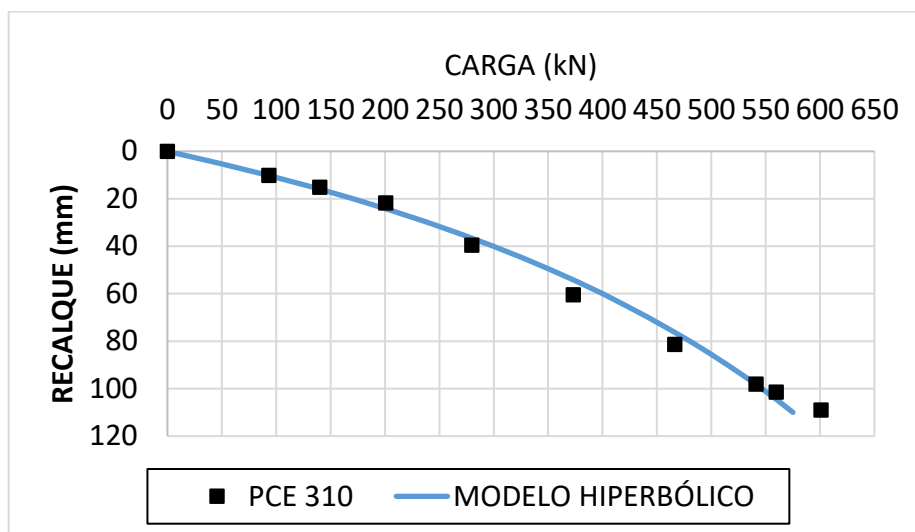
Fonte: Autora.

Figura 124 - Gráfico carga x recalque para estaca isolada (Obra F)



Fonte: Autora.

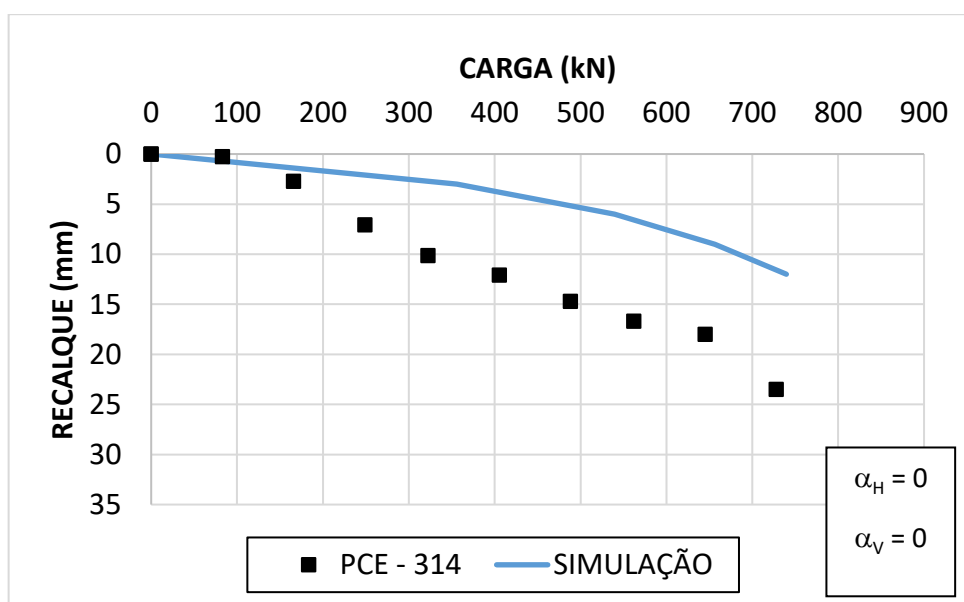
Figura 125 - Gráfico carga x recalque para o solo isolado (Obra F)



Fonte: Autora.

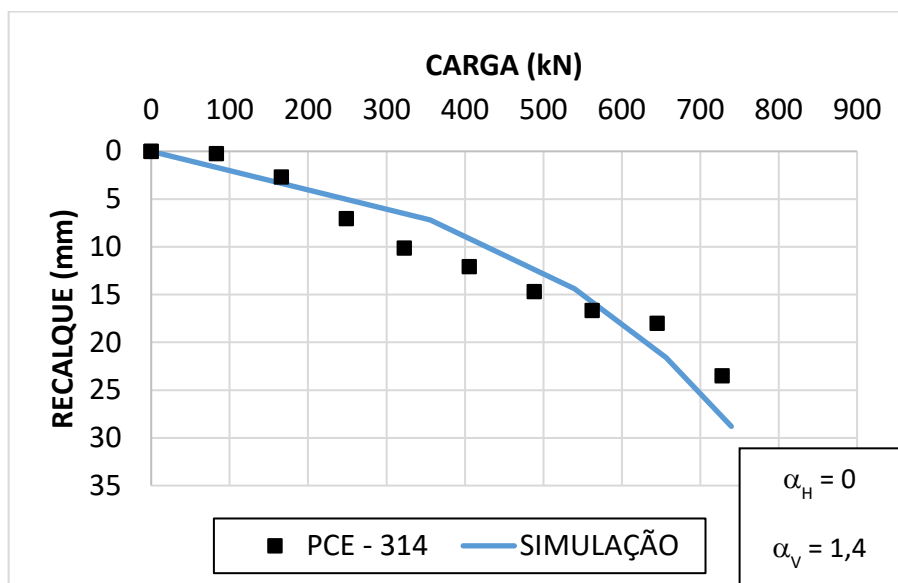
Com os dados da Tabela 28, do solo isolado e da estaca isolada, com o modelo hiperbólico foi possível simular o comportamento da PCE-310. Assim como a Obra E, também não havia sido realizada uma prova de carga com uma placa que abrangesse o terreno melhorado e uma estaca apenas, para que fosse ajustado o valor de α_H , foi adotado o valor de α_H como nulo e o valor que melhor se ajustou para α_v foi 1,4. As Figuras 126 e 127 apresentam os gráficos da simulação para a PCE-314 com e sem ajuste dos α_H e α_v .

Figura 126 - Gráfico carga x recalque sem ajuste: PCE-314 versus simulação (Obra F)



Fonte: Autora.

Figura 127 - Gráfico carga x recalque com ajuste: PCE-314 versus simulação (Obra F)



Fonte: Autora.

Tabela 29 -Simulação PCE-310 (Obra F)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,00	29,13	31,34	0,0031	22,48	3,00	3,00	333,37	6,60	355,85
6,00	56,88	61,21	0,0062	43,90	6,00	6,00	495,91	13,20	539,82
9,00	83,37	89,71	0,0093	64,34	9,00	9,00	592,16	19,80	656,50
12,00	108,67	116,94	0,0124	83,87	12,00	12,00	655,79	26,40	739,66
15,00	132,86	142,97	0,0156	102,54	15,00	15,00	700,99	33,00	803,53
18,00	156,01	167,88	0,0187	120,40	18,00	18,00	734,75	39,60	855,16
21,00	178,19	191,75	0,0218	137,52	21,00	21,00	760,93	46,20	898,45
24,00	199,46	214,63	0,0249	153,93	24,00	24,00	781,82	52,80	935,76
27,00	219,87	236,59	0,0280	169,69	27,00	27,00	798,88	59,40	968,56
30,00	239,47	257,69	0,0311	184,81	30,00	30,00	813,07	66,00	997,89
33,00	258,31	277,97	0,0342	199,36	33,00	33,00	825,06	72,60	1024,42
36,00	276,44	297,47	0,0373	213,35	36,00	36,00	835,33	79,20	1048,68
39,00	293,89	316,25	0,0405	226,81	39,00	39,00	844,22	85,80	1071,04
42,00	310,70	334,34	0,0436	239,79	42,00	42,00	851,99	92,40	1091,78
45,00	326,91	351,78	0,0467	252,30	45,00	45,00	858,84	99,00	1111,14
48,00	342,55	368,61	0,0498	264,36	48,00	48,00	864,93	105,60	1129,30
51,00	357,64	384,85	0,0529	276,01	51,00	51,00	870,37	112,20	1146,39
54,00	372,22	400,53	0,0560	287,26	54,00	54,00	875,27	118,80	1162,53
57,00	386,30	415,69	0,0591	298,13	57,00	57,00	879,70	125,40	1177,83
60,00	399,93	430,35	0,0622	308,65	60,00	60,00	883,72	132,00	1192,37

Fonte: Autora.

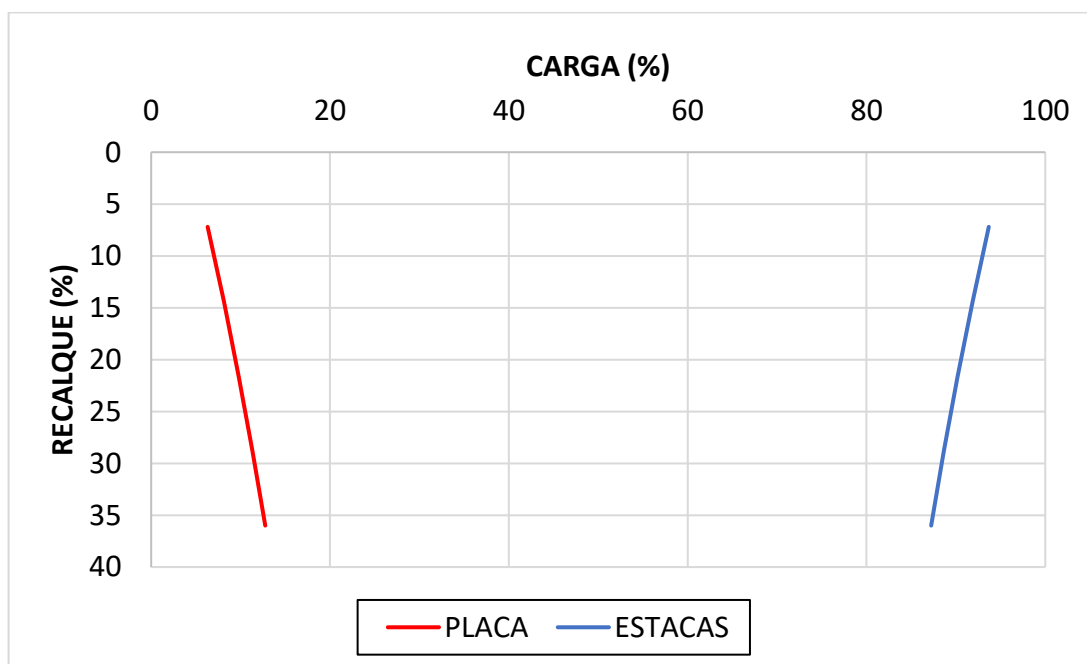
Para a partição de carga (estaca e solo), foi considerado que o percentual de carga de cada elemento do maciço melhorado era o mesmo tanto para as condições com ou sem interação. A Tabela 30 mostra os valores encontrados para cada estágio do ensaio de placa e o percentual de carga correspondente a cada elemento da fundação. A Figura 128 mostra o gráfico da partição de carga para melhor entendimento do comportamento do sistema de fundação; nota-se que as estacas absorveram 87,24% da carga.

Tabela 30 -Partição da carga PCE-314 (Obra F)

Spr (mm)	V _r (kN)	V _p (kN)
0,00	0,00	0,00
7,20	6,32	93,68
14,40	8,13	91,87
21,60	9,80	90,20
28,80	11,34	88,66
36,00	12,76	87,24

Fonte: Autora.

Figura 128 – Partição das cargas da PCE-314 (Obra F)



Fonte: Autora.

5.4 Resultados Gerais

As curvas de simulação para as obras A, D, E e F apresentaram resultados muito próximos às provas de carga e testes de enchimentos das quais foram compactadas, porém a PCE-301 só coincidiu metade do trecho. Os valores encontrados para α_V e α_H e da partição de carga são apresentados na Tabela 31.

A obra A obteve tantos valores de α_V e α_H como também valores da partição de cargas em ambas provas de carga bastante similares. Retratando coerência, pois as provas de carga foram realizadas no mesmo terreno. As cargas aplicadas nas provas de carga foram absorvidas metade pelo elemento horizontal e metade pelo vertical.

Tabela 31 -Valores encontrados para α_H e α_V e partição de carga

Obra	Simulação	α_H	α_V	Tipo da estaca	Carga na estaca (%)	Carga no solo (%)
A	PCE-301	1,10	0,00	Argamassa	50,54	49,46
A	PCE-302	1,10	0,00	Argamassa	50,76	49,24
D	PCE-303	0,35	0,00	RCC	33,05	66,95
D	PCE-304	0,10	0,00	RCC	30,33	69,67
D	PCE-305	0,35	0,00	Areia e brita	33,14	66,86
D	PCE-306	0,35	0,00	Areia e brita	33,14	66,86
E	Tanque 03	0,00	2,00	Argamassa	75,50	24,50
E	Tanque 04	0,00	1,00	Argamassa	73,31	26,69
E	Tanque 05	0,00	2,00	Argamassa	76,77	23,23
E	Tanque 07	0,00	0,50	Argamassa	57,58	42,42
E	Tanque 10	0,00	1,50	Argamassa	78,64	21,36
E	Tanque 11	0,00	2,50	Argamassa	78,64	21,36
E	Tanque 12	0,00	2,00	Argamassa	73,31	26,69
E	Tanque 13	0,00	2,00	Argamassa	66,24	33,76
E	Tanque 14	0,00	1,50	Argamassa	66,24	33,76
F	PCE-311	0,00	1,40	Areia e brita	87,24	22,76

Fonte: Autora.

A obra D também apresentou valores de α_V e α_H e de partição de carga coerentes entre si. Com exceção da PCE-304 que apresentou um α_H inferior aos das provas de carga da mesma obra. As placas das PCE-303 a 305 absorveram em torno de 67% da carga, enquanto as estacas absorveram 33%.

Os resultados da partição de carga da obra F demonstraram que as estacas absorveram 87% da carga, sendo a prova de carga em que as estacas pegaram mais carga da pesquisa. Esta obra foi a única obra que o método executivo foi o Terra-Probe, podendo esta característica ter influenciado para este resultado.

Para os testes de enchimentos, os valores de α_V indicam que praticamente não houve sobreposição das cargas das estacas entre si, e o recalque ocorrido foi apenas o encurtamento das próprias estacas.

Para as obras D e F o comportamento das curvas foi coerente com as sondagens, os terrenos não apresentam picos de resistência para as estacas transmitirem a carga, portanto a maioria da carga foi transmitida ao solo pela placa. Para a obra E, a carga foi mais absorvida pelas estacas do que pelo terreno, após a lente argilosa apresentada nas sondagens, existe uma camada mais resistente de areia, e é nessa camada que as estacas se apoiam.

6. CONCLUSÕES

Na bibliografia consultada foi possível observar a crescente necessidade de se conhecer melhor o tema desta pesquisa. Estudos vêm sendo desenvolvidos, porém ainda há uma necessidade de melhor compreensão do comportamento de fundações que envolvem elementos horizontais e verticais, principalmente quando se trata de melhoramento de terreno com estacas de compactação.

Quando se trata do elemento estaca isolada, pode-se concluir que com os dados fornecidos pelas sondagens e pelos nove ensaios de placa, abordados nesta pesquisa, foi possível obter os coeficientes α e β do Método de Décourt - 1996 para estacas de compactação, $\alpha=0,2$ e $\beta=0,6$.

Com os resultados dos mesmos nove ensaios de placa utilizados para encontrar α e β , foi encontrada uma curva padrão carga x recalque, por correlações entre as cargas e os recalques fornecidos pelas provas de carga estática. Como antes de fazer um projeto de fundações, só se dispõe dos dados das sondagens, a curva pode ser obtida através dos valores de α e β apresentados nesta pesquisa, pois com estes valores é possível calcular a resistência lateral e de ponta da estaca e conseqüentemente determinar os quatro pontos propostos para confecção de uma curva carga x recalque padrão. Estas curvas obtiveram comportamentos similares aos fornecidos pelas provas de carga.

Para o solo isolado, com base na teoria da elasticidade, nos resultados de sondagens realizadas antes e após a compactação do solo com estacas de melhoramento e nos resultados de dez ensaios de placa aplicados diretamente no solo melhorado, foi calculado um fator “ μ ” que correlaciona o módulo de elasticidade e o N_{SPT} do solo compactado. Foi feita uma média para os valores encontrados para o fator “ μ ” e foi adotado $\mu = 1500$. Conseqüentemente, $E_s = 1,5 \times N_{SPT}$ (MPa). Este fator “ μ ” dá a possibilidade de estimar o módulo de elasticidade do solo a partir dos dados da sondagem do terreno.

Foi obtida também, para o solo isolado, uma curva padrão pressão x recalque baseada nas oito provas de carga estática realizadas sobre o solo, proposta no Capítulo 3. Como o objetivo dessa curva é prever o comportamento de um solo compactado durante um ensaio de placa antes da execução da fundação, para simulá-la, deve-se utilizar os valores do módulo de elasticidade e do ângulo de atrito encontrados para calcular a pressão de ruptura do solo.

Após obter as curvas padrões carga x recalque tanto para o solo como para a estaca, é possível através do somatório das mesmas, utilizando a fórmula proposta no capítulo 3 e encontrar uma curva carga x recalque para uma fundação mista.

Para um sistema de fundação tanto com a presença de um elemento horizontal como mais de um elemento vertical, o recalque do grupo será o somatório do recalque da carga aplicada mais um acréscimo de recalque em função da interação estaca-estaca mais um acréscimo de recalque ocasionado pela interação placa-estaca.

Foram, então, feitas simulações para quatro obras, totalizando dezessete simulações para um modelo de transferência de carga do solo melhorado com estacas de compactação. E para determinar esse acréscimo de recalque, foi calculado um coeficiente de acréscimo de recalque tanto para interação placa-estaca, como para interação estaca-estaca, chamados de α_V e α_H , respectivamente. Para obter as características das curvas carga-recalque de cada ensaio do elemento isolado das obras A, D, E e F foi utilizado o modelo hiperbólico.

Para as obras A e D, que possuíam mais de uma simulação, percebeu-se que os valores de α_V e α_H para cada obra separadamente, deram muito próximos entre si, demonstrando coerência do modelo proposto de simulação.

Para os testes de enchimentos, os valores de α_V indicaram que praticamente não houve sobreposição das cargas das estacas entre si, e o recalque ocorrido foi apenas o encurtamento das próprias estacas.

O modelo de simulação de transferência de carga de terrenos melhorados com estacas de compactação se demonstrou satisfatório. Foi possível demonstrar a rigidez de um solo melhorado através do somatório das rigidezes dos elementos isolados (solo e estaca).

Foram confeccionados, também, gráficos de partição da carga do solo e da estaca. Quanto à partição de cargas, a obra A, tanto para placa com 1 estaca ou com 4 estacas, a estaca e o terreno absorveram parcelas de carga iguais. Para as obras D e F o comportamento das curvas foi coerente com as sondagens, os terrenos não apresentam picos de resistência para as estacas transmitirem a carga, portanto a maioria da carga foi transmitida ao solo pela placa. Para a obra

E, a carga foi mais absorvida pelas estacas do que pelo terreno, após a lente argilosa apresentada nas sondagens, existe uma camada mais resistente de areia, e é nessa camada que as estacas se apoiam.

O assunto abordado na pesquisa é bastante amplo. Os conhecimentos adquiridos precisam ser expandidos para conseguir obter um melhor ajuste dos resultados propostos na pesquisa, embora os resultados obtidos tenham sido bastante satisfatórios. Com isso, sugere-se:

- Comparar entre diferentes métodos de cálculo de capacidade de carga a coerência dos valores encontrados para α e β ;
- Fazer simulações semelhantes com o modelo proposto para outros casos de obras com o objetivo de refinar os valores de α_H e α_V ;
- Realizar as simulações na fase de projeto de uma obra para comparar os valores obtidos após a execução da fundação;
- Fazer um estudo da partição de carga para diversos tipos de terrenos.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12131**: Estacas prova de carga estática. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 6489**: Prova de Carga Direta Sobre Terreno de Fundação. Rio de Janeiro, 1984.

ALHEIROS, M. M. et al. **Carta geotécnica da cidade do Recife: Sub-Área Geologia/Geologia de Engenharia – Relatório final**. Relatório - Convênio FINEP-FNDCT/LSI-UFPE, 1990.

AMORIM, M. D et al. Plate Load Tests on Improved Ground with Construction and Demolition Wastes Compaction Piles. In: 5TH INTERNATIONAL YOUNG GEOTECHNICAL ENGINEERS' CONFERENCE. **Proceedings...** Paris, 2013. p. 69-72.

AMORIM, M. D et al. Study of Shallow Foundation Load Transfer on Improved Ground with Compaction Piles. In: XV CONGRESO PANAMERICANO DE MACÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA. **Proceedings...** Buenos Aires, 2015. p. 1694-1701.

AOKI, N. **Determinação da Capacidade de Carga Última de Estaca Cravada em Ensaio de Carregamento Dinâmico de Energia Crescente**. 1997. 111p. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

BACELAR, C. J. R. **Análises de Recalque em Radiers Estaqueados**. 2003. Tese (doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

BJERRUM, L. Interaction Between Structure and Soil. In. EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **Proceedings ...** Wiesbaden, 1963, p. 135-137.

BRIAUD, J. L. E GIBBENS, R. Behavior of Five Large Spread Footings in Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineerings**, v. 125, p. 787-796, 1999.

BURLAND, J. B.; BROMS, B. B.; MELLO, V. F. B. Behavior of foundations and structures. In: 9TH INT. CONF. ON SOIL MECH. AND FOUND. **Proceedings...** Eng., Tóquio, 1977, p. 495-546.

BURLAND J. B. Interaction Between Structural and Geotechnical Engineer. New Perspectives in the Design and Construction of Foundation Structures. JOINT DIVISION ANNUAL SEMINAR. **Proceedings...** Hong Kong, 2004.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Editora S. A., vol. 2. 3a ed., Rio de Janeiro - RJ, 1976.

CINTRA, J.C.A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Tensão Admissível em Fundações Diretas**. Rima Editora, São Carlos (São Paulo). 2003.

DÉCOURT, L.; ALBIERO, J. H.; CINTRA, J. C. **Análise e Projeto de Fundações Profundas. Fundação: Teoria e Prática**, Ed. Pini Ltda., São Paulo, 1998.

GARCIA, J. R., **Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas**. 2015. Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2015.

GUSMÃO, A.D. et al. **Geotecnia no Nordeste**. Recife, PE: Editora Universitária, 2005.

GUSMÃO FILHO, J. A. **Fundações do conhecimento geológico à prática de engenharia**. Ed. Universitária, da UFPE, Recife, 1998.

GUSMÃO FILHO, J. A. **Fundações de Pontes**. Ed. Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2003.

GUSMÃO FILHO, J. A.; GUSMÃO A.D. Contribuição ao estudo do Melhoramento de Terrenos Arenosos. In: 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Anais...** Salvador, 1990. p 395-492.

GUSMÃO FILHO, J. A.; GUSMÃO A.D. Estudo de Casos de Fundações em Terrenos Melhorados. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Anais...** Foz do Iguaçu, 1994. p 191-198.

GUSMÃO FILHO, J. A.; GUSMÃO A. D. Compaction Piles for Building Foundation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOLOGICAL ENGINEERING. **Proceedings...** Melbourne, 2000. CD-ROM.

GUSMÃO, A. D.; OLIVEIRA, P.E.; AMORIM, M. D. Estudo Comparativo de Métodos de Melhoramento de Solos no Recife. In: SEFE7 – SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA. **Anais...**, São Paulo, 2012.

KISHIDA, H.; MEYERHOF, G. G. Bearing Capacity of Pile Groups Under Eccentric Loads in Sand. VI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. **Proceedings...** Toronto, 1965. p. 270-74.

MANDOLINI, A. Design of Piled Raft Foundations: Practice and Development. In: VI INTERNATIONAL SEMINAR AND BORED AND AUGER PILES. **Proceedings...** Bélgica, 2003. p. 59-82.

MANDOLINI, A. Raft Concept and its Rational Use in Foundation Design. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Anais...** Porto de Galinhas, 2012, 15-18 setembro.

MASSAD, F. Notes on the interpretation of failure load routine pile loads tests. **Solos e Rochas**. São Paulo, 1986, v. 9, n.1.

MILITITSKY, J. Provas de carga estáticas. In: SEFE II – 2º SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA **Anais...**, São Paulo, 1991. p. 203-228.

PACHECO, J. L. **Estudo de Técnicas de Melhoramento de Terrenos Superficiais Arenosos em Recife**. 2002. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2002.

PHUNG, D. L. Piled Raft – A Cost Effective Foundation method for High-Rises. **Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA**, vol. 41, n.3, p.1-12, 2010.

PINTO, C. S. **Propriedades dos Solos**. Fundação: teoria e prática, Ed. Pini, São Paulo, 1998, p. 51 a 118.

POULOS, H. G. The Influence of a Rigid Cap on the Settlement Behavior of an Axially Loaded Pile. **Civ. Eng. Trans. Inst. Engrs.**, n. 2 Austrália. p. 106-208, 1968.

POULOS, H. G. Load settlement prediction for piles and piers. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE, v. 98, n. 9, p. 379-397, 1972.

POULOS, H. G. Piled Raft Foundations: Design and Applications. **Geotechnique**, v.51, n. 2, p. 95-113, 2001.

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Pile Foundation Analysis and Design**. 397p. John Wiley and Sons, New York, 1980.

PRESA, E. P.; POUSADA, M. C. **Retrospectiva e Técnicas Modernas de Fundações em Estacas**. 2ª Ed. Salvador, BA, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Núcleo da Bahia, 2004.

RANDOLPH, M. F. Design methods for pile groups and piled rafts. In: XIII ICSMFE. **Proceedings...** New Delhi, Índia, 1994. p.61-82.

RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. P. Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, v. 104, p. 1465- 1488, 1978.

REINERT, J. **Estudo do Comportamento das Fundações Profundas de Obra Industrial no Litoral Fluminense Usando Abordagem Probabilística**. 2011. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2011.

SKEMPTON, A.W. The Bearing Capacity of Clays. **BUILDING RESEARCH CONGRESS, Proceedings...** London, 1951. p. 180-189.

SOARES, W. C. **Radier Estaqueado com Estacas Hollow Auger em Solo Arenoso**. 2011. 302 p. Tese (doutorado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

TERZAGHI, K. **Teorical Soil Mechanics**. Ed. Wiley International, New York, 1943.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. Ed. Wiley International, 1967.

VAN DER VEEN, C. The Bearing Capacity of a Pile. III International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. **Proceedings...** Zurique, 1953. p. 66-71.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, SP, 1977.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações Vol. 1**. Nova Edição. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2004.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações Vol. 2**. Nova Edição. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2010.

APÊNDICE

Apêndice A- sondagem da obra A

PERCUSSÃO (SPT)			LAVAGEM POR TEMPO em/min.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE [m]			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO	
— ANTES — DEPOIS GOLPES/30cm		GOLPES 30cm		TEST E H'	ABSORÇÃO K - em/seg	CERÂMICA	ABSORÇÃO DE CIMENTO	SOLUÇÕES CEMENTOSAS			
ANTES	DEPOIS	ANTES									DEPOIS
		6					0,50			Areia siltosa, com restos de construções (Aterro).	
		5					2,00	1,95		Argila Siltosa, c/areia fina.	
		5									
		4					4,00				
		5					5,00			Areia média e fina, cinza claro, pouco compacta a fofa	
		5					6,00				
		17					7,00			Aria fina siltosa, c/poucos pedregulhos, cinza claro, pouco compacta	
		15					8,00				
		16									
		13					10,00			Areia fina e média, cinza claro, medianamente compacta, c/pedregulhos	
		12					11,00				
		10					12,00	12,50		Areia média e fina, siltosa, com pouca areia grossa e pedregulhos, cinza claro, medianamente a pouco compacta	
		10									
		15					14,00	14,45		Silte arenoso, pouco argiloso, cinza claro e amarelado, pouco compacto	
		125									
125					16,00						
150					18,00	18,00		Areia fina e média siltosa, cinza claro, muito compacta			
Limite de sondagem											
LOCALIZAÇÃO:											
RODOVIA:		TRECHO:				SUBTRECHO:			SONDAGEM N.º		
COORDENADAS:		COTA BOCA		NÍVEL D'ÁGUA		OPERADOR:		DATA:			
N-:		E-:									

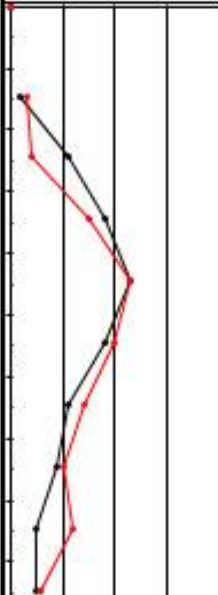
Apêndice B– sondagem da obra B

PERCUSSÃO (SPT)			LAVAGEM POR TEMPO em/min.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	DIBUJAMENTO
— ANTES — DEPOIS GOLPES/30 cm	GOLPES 30 cm			TEST E H'	ABSORÇÃO K- em/seg	CRÂNUA	MUDANÇA DE CAMADA	CONTINUIDADE CRÂNUA		
	ANTES	DEPOIS								
		6					0,30		Aterro de areia c/restos de construção, restos de vegetais, variegada	
		6					0,75			
		6				2,00	2,80		Areia, pouco compacta	
		6					3,20		Areia, fofa	
		3				4,00	3,70		Areia, pouco compacta	
		10					4,75		Areia c/frag. de conchas, fofa	
		11				5,10	5,25		Areia, pouco compacta	
		13				6,00			Areia variegada	
		14				8,00	8,15		Areia, medianamente compacta	
		23					9,00		Areia c/matéria orgânica e restos de vegetais	
		24				10,00				
		37				12,00				
		4					12,25		Areia c/pedregulhos, compacta	
		3				14,00			Silte Argiloso, c/matéria orgânica, mole	
		2					14,80			
		5				15,25			Argila siltosa, muito mole	
		3				16,00	16,30		Argila siltosa c/veios de areia, mole	
		4					17,25		Argila siltosa c/matéria orgânica e restos de vegetais, mole	
		5				18,00	18,25		Argila siltosa, c/matéria orgânica, mole	
		4					19,25		Areia argilosa c/matéria orgânica, pouco compacta	
		2				20,00	20,80		Areia argilosa, muito mole	
LOCALIZAÇÃO: _____ Limite de sondagem										
RODOVIA:		TRECHO:				SUBTRECHO:			SONDAGEM N.º	
COORDENADAS:			COTA BOCA		NÍVEL D'ÁGUA		OPERADOR:		DATA:	
N- _____			E- _____							

Apêndice D – sondagens antes compactação da obra D

PERCUSSÃO (SPT)				LAVAGEM POR TEMPO em/min.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	BOMBEAMENTO
— ANTES — ANTES GOLPES/30cm		GOLPES 30cm			TEST E H'	ABSORÇÃO K-saturq	CRÁQUEA	MUDANÇA DE CAMADA	CONDIÇÕES CRÁQUEAS		
ANTES	ANTES	ANTES	ANTES								
		3									
		5	4					2,00			
		6	2								
		5	9								
		10	11					4,00			
		9	9					5,50		Areia fina e média fofa a pouco compacta	
		10	3					6,00			
		10	11					7,50		Argila arenosa, média a rija	
		9	10					8,00			
		4	5					9,00		Areia fina, argilosa, pouco compacta	
								10,00		Limite de sondagem	
								12,00			
								14,00			
								16,00			
								18,00			
								20,00			
LOCALIZAÇÃO:											
RODOVIA:		TRECHO:					SUBTRECHO:			SONDAGEM N.º	
COORDENADAS:				COTA BOCA		NÍVEL D'ÁGUA		OPERADOR:		DATA:	
N.		E.									

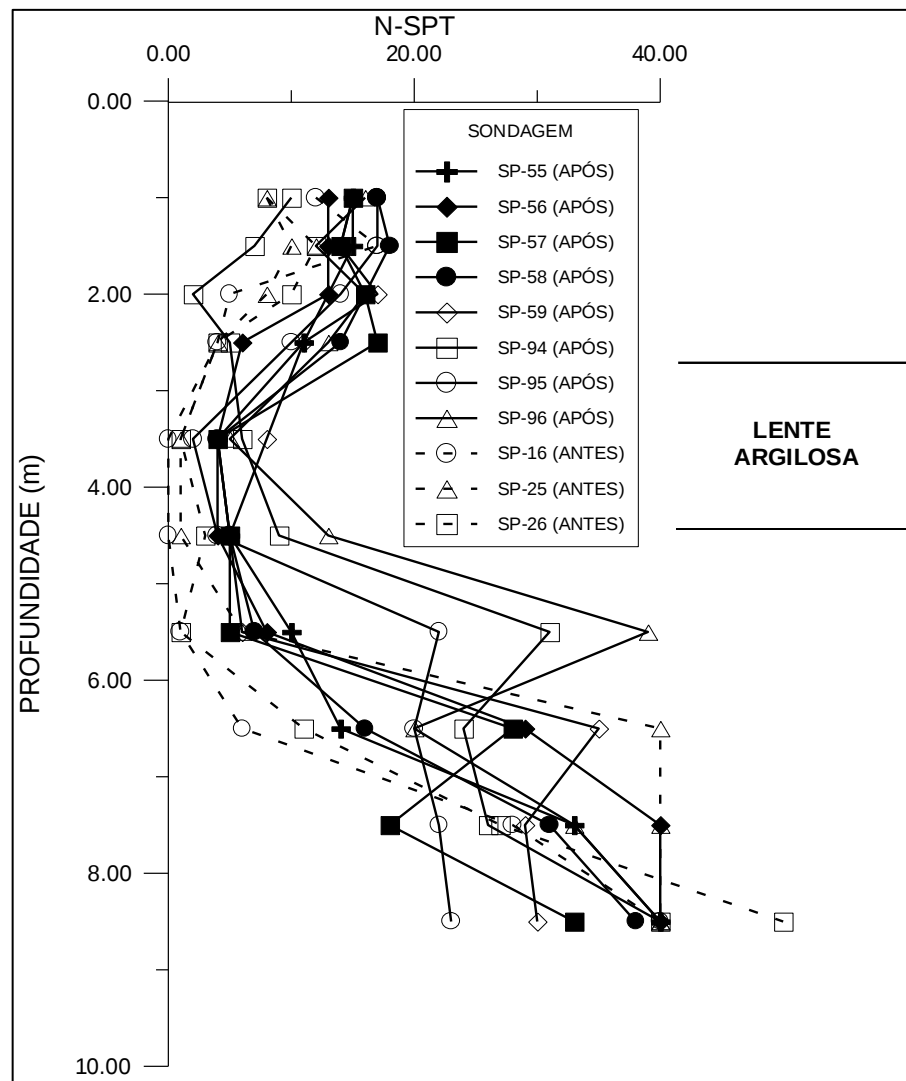
Apêndice E – sondagens após compactação da obra D

PERCUSSÃO (SPT)			INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	INVENTÁRIO
	GOLPES 30 cm		LAVAGEM POR TEMPO em/min.	TESTE H'	ABSORÇÃO K em/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA		
	DEPOIS	DEPOIS							
	2	3							
	11	4				2,00			
	18	15							
	23	23				4,00			
	18	20				5,50		Areia fina e média fofa a pouco compacta	
	11	14				6,00			
	9	10				7,50		Argila arenosa, média a rija	
	5	12				8,00			
	5	6				9,00		Areia fina, argilosa, pouco compacta	
						10,00		Limite de sondagem	
						12,00			
						14,00			
						16,00			
						18,00			
						20,00			

LOCALIZAÇÃO:

RODOVIA:	TRECHO:	SUBTRECHO:	SONDAGEM N.º
COORDENADAS: N- E-	COTA BOCA	NÍVEL D'ÁGUA	OPERADOR: DATA:

Apêndice F– sondagens antes e após compactação da obra E



Fonte: Gusmão et al. (2005).

Apêndice G– sondagens antes e após compactação da obra F

PERCUSSÃO (SPT)			LAVAGEM HP POR TEMPO cm/min.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	COMETIMENTO
— ANTES — DEPOIS GOLPES/30cm	GOLPES 30cm			TEST E N°	ABSORÇÃO K- cm/seg	CARGA	MUDANÇA DE CAMADA CARGAS CARGAS	CARGAS		
	ANTES	DEPOIS								
	3	13				0,30		Areia fina e média, pouco a medianamente compacta		
	11	13				2,00				
	7	22								
	9	27				4,00	4,00	Areia fina e média, pouco a muito compacta		
	30	50				6,00				
	40	61				8,00	8,00	Limite de sondagem		
	30	59				10,00				
34	58				12,00					
					14,00					
					16,00					
					18,00					
					20,00					

LOCALIZAÇÃO:

RODOVIA:	TRECHO:	SUBTRECHO:	SONDAGEM N.º
COORDENADAS: N- E-	COTA BOCA	NÍVEL D'ÁGUA	OPERADOR: DATA:

Apêndice H – Tabelas Obra A

Tabela 1 - Simulação PCE 301 (Obra A)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	7,77	109,87	0,0017	78,80	1,41	1,41	533,19	3,11	611,99
1	15,49	219,04	0,0033	157,09	2,82	2,82	587,29	6,21	744,38
1,5	23,16	327,51	0,0050	234,89	4,23	4,23	607,85	9,32	842,74
2	30,78	435,30	0,0067	312,20	5,65	5,65	618,68	12,42	930,87
2,5	38,35	542,41	0,0083	389,02	7,06	7,06	625,36	15,53	1014,38
3	45,87	648,84	0,0100	465,35	8,47	8,47	629,90	18,63	1095,25
3,5	53,35	754,60	0,0117	541,20	9,88	9,88	633,18	21,74	1174,38
4	60,78	859,71	0,0133	616,58	11,29	11,29	635,66	24,84	1252,24
4,5	68,17	964,15	0,0150	691,49	12,70	12,70	637,61	27,95	1329,10
5	75,50	1067,95	0,0167	765,93	14,11	14,11	639,17	31,05	1405,11
5,5	82,80	1171,10	0,0183	839,92	15,53	15,53	640,46	34,16	1480,37
6	90,04	1273,62	0,0200	913,44	16,94	16,94	641,53	37,26	1554,97
6,5	97,25	1375,50	0,0217	986,51	18,35	18,35	642,45	40,37	1628,96
7	104,41	1476,76	0,0233	1059,13	19,76	19,76	643,23	43,47	1702,37
7,5	111,52	1577,40	0,0250	1131,31	21,17	21,17	643,91	46,58	1775,23
8	118,59	1677,43	0,0267	1203,05	22,58	22,58	644,51	49,68	1847,56
8,5	125,62	1776,84	0,0283	1274,35	23,99	23,99	645,04	52,79	1919,39
9	132,61	1875,65	0,0300	1345,22	25,41	25,41	645,51	55,89	1990,73
9,5	139,55	1973,87	0,0317	1415,66	26,82	26,82	645,93	59,00	2061,59
10	146,45	2071,49	0,0333	1485,67	28,23	28,23	646,31	62,10	2131,98
10,5	153,31	2168,52	0,0350	1555,27	29,64	29,64	646,65	65,21	2201,92
11	160,13	2264,98	0,0367	1624,44	31,05	31,05	646,97	68,31	2271,41
11,5	166,91	2360,85	0,0383	1693,20	32,46	32,46	647,25	71,42	2340,46
12	173,65	2456,16	0,0400	1761,56	33,88	33,88	647,51	74,53	2409,07
12,5	180,35	2550,90	0,0417	1829,50	35,29	35,29	647,76	77,63	2477,26

Tabela 2 - Partição da carga PCE-301 (Obra A)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
3,11	12,88	87,12
6,21	21,10	78,90
9,32	27,87	72,13
12,42	33,54	66,46
15,53	38,35	61,65
18,63	42,49	57,51
21,74	46,08	53,92
24,84	49,24	50,76

Apêndice I – Tabelas Obra D

Tabela 1 - Simulação PCE 304 (Obra D)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	16,20	53,67	0,0032	23,18	2,12	2,12	19,51	2,33	42,69
4	32,34	107,13	0,0065	46,27	4,24	4,24	36,45	4,66	82,72
6	48,42	160,38	0,0097	69,27	6,36	6,36	51,30	7,00	120,56
8	64,43	213,42	0,0129	92,18	8,48	8,48	64,42	9,33	156,59
10	80,39	266,26	0,0161	115,00	10,60	10,60	76,10	11,66	191,09
12	96,27	318,89	0,0194	137,73	12,72	12,72	86,56	13,99	224,29
14	112,10	371,31	0,0226	160,37	14,84	14,84	95,98	16,32	256,35
16	127,87	423,53	0,0258	182,92	16,96	16,96	104,52	18,66	287,45
18	143,57	475,55	0,0290	205,39	19,08	19,08	112,29	20,99	317,68
20	159,22	527,37	0,0323	227,77	21,20	21,20	119,39	23,32	347,16
22	174,80	578,99	0,0355	250,07	23,32	23,32	125,90	25,65	375,96
24	190,32	630,41	0,0387	272,27	25,44	25,44	131,89	27,98	404,17
26	205,79	681,63	0,0419	294,40	27,56	27,56	137,43	30,32	431,82
28	221,19	732,66	0,0452	316,43	29,68	29,68	142,56	32,65	458,99
30	236,54	783,49	0,0484	338,39	31,80	31,80	147,32	34,98	485,71
32	251,83	834,12	0,0516	360,26	33,92	33,92	151,76	37,31	512,02
34	267,06	884,56	0,0548	382,04	36,04	36,04	155,91	39,64	537,95
36	282,23	934,81	0,0581	403,75	38,16	38,16	159,79	41,98	563,53
38	297,34	984,87	0,0613	425,37	40,28	40,28	163,43	44,31	588,79
40	312,40	1034,74	0,0645	446,91	42,40	42,40	166,85	46,64	613,75
42	327,39	1084,42	0,0677	468,36	44,52	44,52	170,06	48,97	638,43
44	342,34	1133,92	0,0710	489,74	46,64	46,64	173,10	51,30	662,84
46	357,22	1183,22	0,0742	511,03	48,76	48,76	175,97	53,64	687,00
48	372,05	1232,34	0,0774	532,25	50,88	50,88	178,68	55,97	710,93
50	386,83	1281,28	0,0806	553,38	53,00	53,00	181,26	58,30	734,64

Tabela 2 - Partição da carga PCE-304 (Obra D)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
2,33	54,30	45,70
4,66	55,94	44,06
7,00	57,45	42,55
9,33	58,86	41,14
11,66	60,18	39,82
13,99	61,41	38,59
16,32	62,56	37,44
18,66	63,64	36,36
20,99	64,65	35,35
23,32	65,61	34,39
25,65	66,51	33,49
27,98	67,37	32,63
30,32	68,17	31,83
32,65	68,94	31,06
34,98	69,67	30,33

Tabela 3 - Simulação PCE 305 e 306 (Obra D)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	27,21	90,13	0,0032	38,93	2,12	2,12	11,32	2,86	50,24
4	50,54	167,41	0,0065	72,31	4,24	4,24	22,29	5,72	94,60
6	70,77	234,42	0,0097	101,24	6,36	6,36	32,94	8,59	134,18
8	88,48	293,06	0,0129	126,57	8,48	8,48	43,26	11,45	169,84
10	104,10	344,82	0,0161	148,93	10,60	10,60	53,29	14,31	202,22
12	118,00	390,84	0,0194	168,80	12,72	12,72	63,03	17,17	231,84
14	130,43	432,02	0,0226	186,59	14,84	14,84	72,50	20,03	259,09
16	141,62	469,09	0,0258	202,60	16,96	16,96	81,70	22,90	284,30
18	151,75	502,64	0,0290	217,09	19,08	19,08	90,65	25,76	307,74
20	160,96	533,14	0,0323	230,26	21,20	21,20	99,35	28,62	329,62
22	169,37	560,99	0,0355	242,29	23,32	23,32	107,83	31,48	350,12
24	177,08	586,53	0,0387	253,32	25,44	25,44	116,07	34,34	369,39
26	184,17	610,02	0,0419	263,47	27,56	27,56	124,11	37,21	387,58
28	190,72	631,71	0,0452	272,84	29,68	29,68	131,93	40,07	404,77
30	196,78	651,80	0,0484	281,51	31,80	31,80	139,56	42,93	421,07
32	202,41	670,45	0,0516	289,57	33,92	33,92	146,99	45,79	436,56
34	207,66	687,82	0,0548	297,07	36,04	36,04	154,25	48,65	451,31
36	212,55	704,03	0,0581	304,07	38,16	38,16	161,32	51,52	465,39
38	217,13	719,20	0,0613	310,62	40,28	40,28	168,22	54,38	478,84
40	221,42	733,41	0,0645	316,76	42,40	42,40	174,96	57,24	491,72

Tabela 4 - Partição da carga PCE-305 e 306 (Obra D)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
2,86	77,47	22,53
5,72	76,44	23,56
8,59	75,45	24,55
11,45	74,53	25,47
14,31	73,65	26,35
17,17	72,81	27,19
20,03	72,02	27,98
22,90	71,26	28,74
25,76	70,54	29,46
28,62	69,86	30,14
31,48	69,20	30,80
34,34	68,58	31,42
37,21	67,98	32,02
40,07	67,41	32,59
42,93	66,86	33,14

Apêndice J – Tabelas Obra E

Tabela 1 - Simulação teste de enchimento Tanque 04 (Obra E)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,55	2,78	0,0000	1564,65	0,47	0,47	8805,47	0,95	10370,12
0,02	1,09	5,56	0,0000	3127,23	0,95	0,95	16851,35	1,90	19978,58
0,03	1,64	8,34	0,0001	4687,75	1,42	1,42	24231,86	2,84	28919,61
0,04	2,18	11,11	0,0001	6246,23	1,90	1,90	31026,26	3,79	37272,48
0,05	2,73	13,88	0,0001	7802,65	2,37	2,37	37301,69	4,74	45104,34
0,06	3,27	16,65	0,0001	9357,02	2,84	2,84	43115,44	5,69	52472,47
0,07	3,81	19,41	0,0001	10909,36	3,32	3,32	48516,64	6,64	59426,00
0,08	4,35	22,17	0,0002	12459,66	3,79	3,79	53547,70	7,59	66007,36
0,09	4,89	24,92	0,0002	14007,92	4,27	4,27	58245,41	8,53	72253,33
0,10	5,43	27,67	0,0002	15554,16	4,74	4,74	62641,83	9,48	78195,99
0,11	5,97	30,42	0,0002	17098,36	5,22	5,22	66765,06	10,43	83863,42
0,12	6,51	33,16	0,0002	18640,55	5,69	5,69	70639,78	11,38	89280,33
0,13	7,05	35,90	0,0003	20180,72	6,16	6,16	74287,81	12,33	94468,53
0,14	7,59	38,64	0,0003	21718,88	6,64	6,64	77728,48	13,28	99447,35
0,15	8,12	41,37	0,0003	23255,02	7,11	7,11	80978,97	14,22	104233,99
0,16	8,66	44,10	0,0003	24789,16	7,59	7,59	84054,63	15,17	108843,79
0,17	9,19	46,83	0,0003	26321,30	8,06	8,06	86969,20	16,12	113290,50
0,18	9,73	49,55	0,0004	27851,44	8,53	8,53	89735,00	17,07	117586,45
0,19	10,26	52,27	0,0004	29379,59	9,01	9,01	92363,16	18,02	121742,75
0,20	10,79	54,99	0,0004	30905,75	9,48	9,48	94863,68	18,97	125769,43
0,21	11,33	57,70	0,0004	32429,92	9,96	9,96	97245,66	19,91	129675,57
0,22	11,86	60,41	0,0004	33952,10	10,43	10,43	99517,31	20,86	133469,42
0,23	12,39	63,11	0,0005	35472,31	10,91	10,91	101686,14	21,81	137158,46
0,24	12,92	65,81	0,0005	36990,55	11,38	11,38	103758,98	22,76	140749,52
0,25	13,45	68,51	0,0005	38506,81	11,85	11,85	105742,05	23,71	144248,86

Tabela 2 - Partição das cargas simulação Tanque 04 (Obra E)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
0,95	15,09	84,91
1,90	15,65	84,35
2,84	16,21	83,79
3,79	16,76	83,24
4,74	17,30	82,70
5,69	17,83	82,17
6,64	18,36	81,64
7,59	18,88	81,12
8,53	19,39	80,61
9,48	19,89	80,11
10,43	20,39	79,61
11,38	20,88	79,12
12,33	21,36	78,64
13,28	21,84	78,16
14,22	22,31	77,69
15,17	22,77	77,23
16,12	23,23	76,77
17,07	23,69	76,31
18,02	24,13	75,87
18,97	24,57	75,43
19,91	25,01	74,99
20,86	25,44	74,56
21,81	25,86	74,14
22,76	26,28	73,72
23,71	26,69	73,31

Tabela 3 - Simulação teste de enchimento Tanques 05 e 12 (Obra E)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,55	2,78	0,0000	1564,65	0,47	0,47	8805,47	1,42	10370,12
0,02	1,09	5,56	0,0000	3127,23	0,95	0,95	16851,35	2,84	19978,58
0,03	1,64	8,34	0,0001	4687,75	1,42	1,42	24231,86	4,27	28919,61
0,04	2,18	11,11	0,0001	6246,23	1,90	1,90	31026,26	5,69	37272,48
0,05	2,73	13,88	0,0001	7802,65	2,37	2,37	37301,69	7,11	45104,34
0,06	3,27	16,65	0,0001	9357,02	2,84	2,84	43115,44	8,53	52472,47
0,07	3,81	19,41	0,0001	10909,36	3,32	3,32	48516,64	9,96	59426,00
0,08	4,35	22,17	0,0002	12459,66	3,79	3,79	53547,70	11,38	66007,36
0,09	4,89	24,92	0,0002	14007,92	4,27	4,27	58245,41	12,80	72253,33
0,10	5,43	27,67	0,0002	15554,16	4,74	4,74	62641,83	14,22	78195,99
0,11	5,97	30,42	0,0002	17098,36	5,22	5,22	66765,06	15,65	83863,42
0,12	6,51	33,16	0,0002	18640,55	5,69	5,69	70639,78	17,07	89280,33
0,13	7,05	35,90	0,0003	20180,72	6,16	6,16	74287,81	18,49	94468,53
0,14	7,59	38,64	0,0003	21718,88	6,64	6,64	77728,48	19,91	99447,35
0,15	8,12	41,37	0,0003	23255,02	7,11	7,11	80978,97	21,34	104233,99
0,16	8,66	44,10	0,0003	24789,16	7,59	7,59	84054,63	22,76	108843,79
0,17	9,19	46,83	0,0003	26321,30	8,06	8,06	86969,20	24,18	113290,50
0,18	9,73	49,55	0,0004	27851,44	8,53	8,53	89735,00	25,60	117586,45
0,19	10,26	52,27	0,0004	29379,59	9,01	9,01	92363,16	27,03	121742,75
0,20	10,79	54,99	0,0004	30905,75	9,48	9,48	94863,68	28,45	125769,43
0,21	11,33	57,70	0,0004	32429,92	9,96	9,96	97245,66	29,87	129675,57
0,22	11,86	60,41	0,0004	33952,10	10,43	10,43	99517,31	31,29	133469,42
0,23	12,39	63,11	0,0005	35472,31	10,91	10,91	101686,14	32,72	137158,46
0,24	12,92	65,81	0,0005	36990,55	11,38	11,38	103758,98	34,14	140749,52
0,25	13,45	68,51	0,0005	38506,81	11,85	11,85	105742,05	35,56	144248,86

Tabela 4 - Partição das cargas simulação Tanques 05 e 12 (Obra E)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
1,4	15,09	84,91
2,8	15,65	84,35
4,3	16,21	83,79
5,7	16,76	83,24
7,1	17,30	82,70
8,5	17,83	82,17
10,0	18,36	81,64
11,4	18,88	81,12
12,8	19,39	80,61
14,2	19,89	80,11
15,6	20,39	79,61
17,1	20,88	79,12
18,5	21,36	78,64
19,9	21,84	78,16
21,3	22,31	77,69
22,8	22,77	77,23
24,2	23,23	76,77

Tabela 5 - Simulação teste de enchimento Tanque 07 (Obra E)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	1,09	5,56	0,0000	4320,98	0,79	0,79	14209,19	1,18	18530,17
0,02	1,64	8,34	0,0001	8636,27	1,58	1,58	26491,44	2,36	35127,71
0,03	2,18	11,11	0,0001	12945,87	2,36	2,36	37213,83	3,55	50159,70
0,04	2,73	13,88	0,0001	17249,80	3,15	3,15	46655,77	4,73	63905,57
0,05	3,27	16,65	0,0001	21548,07	3,94	3,94	55033,71	5,91	76581,78
0,06	3,81	19,41	0,0001	25840,69	4,73	4,73	62517,89	7,09	88358,59
0,07	4,35	22,17	0,0002	30127,68	5,52	5,52	69244,11	8,27	99371,79
0,08	4,89	24,92	0,0002	34409,04	6,30	6,30	75321,95	9,46	109730,98
0,09	5,43	27,67	0,0002	38684,78	7,09	7,09	80840,85	10,64	119525,62
0,10	5,97	30,42	0,0002	42954,91	7,88	7,88	85874,53	11,82	128829,44
0,11	6,51	33,16	0,0002	47219,45	8,67	8,67	90484,28	13,00	137703,73
0,12	7,05	35,90	0,0003	51478,41	9,46	9,46	94721,49	14,18	146199,91
0,13	7,59	38,64	0,0003	55731,80	10,24	10,24	98629,58	15,37	154361,38
0,14	8,12	41,37	0,0003	59979,63	11,03	11,03	102245,45	16,55	162225,07
0,15	8,66	44,10	0,0003	64221,90	11,82	11,82	105600,69	17,73	169822,59
0,16	9,19	46,83	0,0003	68458,64	12,61	12,61	108722,51	18,91	177181,15
0,17	9,73	49,55	0,0004	72689,85	13,40	13,40	111634,45	20,09	184324,29
0,18	10,26	52,27	0,0004	76915,54	14,18	14,18	114356,97	21,27	191272,51
0,19	10,79	54,99	0,0004	81135,72	14,97	14,97	116907,99	22,46	198043,71
0,20	11,33	57,70	0,0004	85350,41	15,76	15,76	119303,21	23,64	204653,62
0,21	11,86	60,41	0,0004	89559,61	16,55	16,55	121556,48	24,82	211116,10
0,22	12,39	63,11	0,0005	93763,34	17,34	17,34	123680,06	26,00	217443,41
0,23	12,92	65,81	0,0005	97961,61	18,12	18,12	125684,84	27,18	223646,44
0,24	13,45	68,51	0,0005	102154,42	18,91	18,91	127580,50	28,37	229734,91
0,25	1,09	5,56	0,0000	106341,79	19,70	19,70	129375,72	29,55	235717,51

Tabela 6 - Partição das cargas simulação Tanque 07 (Obra E)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
1,18	23,32	76,68
2,36	24,59	75,41
3,55	25,81	74,19
4,73	26,99	73,01
5,91	28,14	71,86
7,09	29,25	70,75
8,27	30,32	69,68
9,46	31,36	68,64
10,64	32,37	67,63
11,82	33,34	66,66
13,00	34,29	65,71
14,18	35,21	64,79
15,37	36,10	63,90
16,55	36,97	63,03
17,73	37,82	62,18
18,91	38,64	61,36
20,09	39,44	60,56
21,27	40,21	59,79
22,46	40,97	59,03
23,64	41,70	58,30
24,82	42,42	57,58

Tabela 7 - Simulação teste de enchimento Tanque 10 (Obra E)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,55	2,78	0,0000	1564,65	0,47	0,47	8805,47	1,19	10370,12
0,02	1,09	5,56	0,0000	3127,23	0,95	0,95	16851,35	2,37	19978,58
0,03	1,64	8,34	0,0001	4687,75	1,42	1,42	24231,86	3,56	28919,61
0,04	2,18	11,11	0,0001	6246,23	1,90	1,90	31026,26	4,74	37272,48
0,05	2,73	13,88	0,0001	7802,65	2,37	2,37	37301,69	5,93	45104,34
0,06	3,27	16,65	0,0001	9357,02	2,84	2,84	43115,44	7,11	52472,47
0,07	3,81	19,41	0,0001	10909,36	3,32	3,32	48516,64	8,30	59426,00
0,08	4,35	22,17	0,0002	12459,66	3,79	3,79	53547,70	9,48	66007,36
0,09	4,89	24,92	0,0002	14007,92	4,27	4,27	58245,41	10,67	72253,33
0,10	5,43	27,67	0,0002	15554,16	4,74	4,74	62641,83	11,85	78195,99
0,11	5,97	30,42	0,0002	17098,36	5,22	5,22	66765,06	13,04	83863,42
0,12	6,51	33,16	0,0002	18640,55	5,69	5,69	70639,78	14,22	89280,33
0,13	7,05	35,90	0,0003	20180,72	6,16	6,16	74287,81	15,41	94468,53
0,14	7,59	38,64	0,0003	21718,88	6,64	6,64	77728,48	16,60	99447,35
0,15	8,12	41,37	0,0003	23255,02	7,11	7,11	80978,97	17,78	104233,99
0,16	8,66	44,10	0,0003	24789,16	7,59	7,59	84054,63	18,97	108843,79
0,17	9,19	46,83	0,0003	26321,30	8,06	8,06	86969,20	20,15	113290,50
0,18	9,73	49,55	0,0004	27851,44	8,53	8,53	89735,00	21,34	117586,45
0,19	10,26	52,27	0,0004	29379,59	9,01	9,01	92363,16	22,52	121742,75
0,20	10,79	54,99	0,0004	30905,75	9,48	9,48	94863,68	23,71	125769,43
0,21	11,33	57,70	0,0004	32429,92	9,96	9,96	97245,66	24,89	129675,57
0,22	11,86	60,41	0,0004	33952,10	10,43	10,43	99517,31	26,08	133469,42
0,23	12,39	63,11	0,0005	35472,31	10,91	10,91	101686,14	27,26	137158,46
0,24	12,92	65,81	0,0005	36990,55	11,38	11,38	103758,98	28,45	140749,52
0,25	13,45	68,51	0,0005	38506,81	11,85	11,85	105742,05	29,63	144248,86

Tabela 8 - Partição das cargas simulação Tanque 10 (Obra E)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
1,19	15,09	84,91
2,37	15,65	84,35
3,56	16,21	83,79
4,74	16,76	83,24
5,93	17,30	82,70
7,11	17,83	82,17
8,30	18,36	81,64
9,48	18,88	81,12
10,67	19,39	80,61
11,85	19,89	80,11
13,04	20,39	79,61
14,22	20,88	79,12
15,41	21,36	78,64

Tabela 9 - Simulação teste de enchimento Tanque 11 (Obra E)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,55	2,78	0,0000	1564,65	0,47	0,47	8805,47	1,66	10370,12
0,02	1,09	5,56	0,0000	3127,23	0,95	0,95	16851,35	3,32	19978,58
0,03	1,64	8,34	0,0001	4687,75	1,42	1,42	24231,86	4,98	28919,61
0,04	2,18	11,11	0,0001	6246,23	1,90	1,90	31026,26	6,64	37272,48
0,05	2,73	13,88	0,0001	7802,65	2,37	2,37	37301,69	8,30	45104,34
0,06	3,27	16,65	0,0001	9357,02	2,84	2,84	43115,44	9,96	52472,47
0,07	3,81	19,41	0,0001	10909,36	3,32	3,32	48516,64	11,62	59426,00
0,08	4,35	22,17	0,0002	12459,66	3,79	3,79	53547,70	13,28	66007,36
0,09	4,89	24,92	0,0002	14007,92	4,27	4,27	58245,41	14,94	72253,33
0,10	5,43	27,67	0,0002	15554,16	4,74	4,74	62641,83	16,60	78195,99
0,11	5,97	30,42	0,0002	17098,36	5,22	5,22	66765,06	18,26	83863,42
0,12	6,51	33,16	0,0002	18640,55	5,69	5,69	70639,78	19,91	89280,33
0,13	7,05	35,90	0,0003	20180,72	6,16	6,16	74287,81	21,57	94468,53
0,14	7,59	38,64	0,0003	21718,88	6,64	6,64	77728,48	23,23	99447,35
0,15	8,12	41,37	0,0003	23255,02	7,11	7,11	80978,97	24,89	104233,99
0,16	8,66	44,10	0,0003	24789,16	7,59	7,59	84054,63	26,55	108843,79
0,17	9,19	46,83	0,0003	26321,30	8,06	8,06	86969,20	28,21	113290,50
0,18	9,73	49,55	0,0004	27851,44	8,53	8,53	89735,00	29,87	117586,45
0,19	10,26	52,27	0,0004	29379,59	9,01	9,01	92363,16	31,53	121742,75
0,20	10,79	54,99	0,0004	30905,75	9,48	9,48	94863,68	33,19	125769,43
0,21	11,33	57,70	0,0004	32429,92	9,96	9,96	97245,66	34,85	129675,57
0,22	11,86	60,41	0,0004	33952,10	10,43	10,43	99517,31	36,51	133469,42
0,23	12,39	63,11	0,0005	35472,31	10,91	10,91	101686,14	38,17	137158,46
0,24	12,92	65,81	0,0005	36990,55	11,38	11,38	103758,98	39,83	140749,52
0,25	13,45	68,51	0,0005	38506,81	11,85	11,85	105742,05	41,49	144248,86

Tabela 10 - Partição das cargas simulação Tanque 11 (Obra E)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
1,66	15,09	84,91
3,32	15,65	84,35
4,98	16,21	83,79
6,64	16,76	83,24
8,30	17,30	82,70
9,96	17,83	82,17
11,62	18,36	81,64
13,28	18,88	81,12
14,94	19,39	80,61
16,60	19,89	80,11
18,26	20,39	79,61
19,91	20,88	79,12
21,57	21,36	78,64

Tabela 11 - Simulação teste de enchimento Tanque 13 (Obra E)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,55	2,78	0,0000	420,76	0,25	0,25	1278,91	0,74	1699,67
0,02	1,09	5,56	0,0000	840,96	0,49	0,49	2498,13	1,48	3339,09
0,03	1,64	8,34	0,0001	1260,61	0,74	0,74	3661,74	2,21	4922,35
0,04	2,18	11,11	0,0001	1679,71	0,98	0,98	4773,47	2,95	6453,17
0,05	2,73	13,88	0,0001	2098,25	1,23	1,23	5836,70	3,69	7934,95
0,06	3,27	16,65	0,0001	2516,25	1,48	1,48	6854,55	4,43	9370,79
0,07	3,81	19,41	0,0001	2933,69	1,72	1,72	7829,85	5,16	10763,55
0,08	4,35	22,17	0,0002	3350,59	1,97	1,97	8765,23	5,90	12115,82
0,09	4,89	24,92	0,0002	3766,94	2,21	2,21	9663,08	6,64	13430,02
0,10	5,43	27,67	0,0002	4182,75	2,46	2,46	10525,62	7,38	14708,37
0,11	5,97	30,42	0,0002	4598,01	2,70	2,70	11354,89	8,11	15952,90
0,12	6,51	33,16	0,0002	5012,73	2,95	2,95	12152,78	8,85	17165,50
0,13	7,05	35,90	0,0003	5426,90	3,20	3,20	12921,03	9,59	18347,94
0,14	7,59	38,64	0,0003	5840,54	3,44	3,44	13661,28	10,33	19501,81
0,15	8,12	41,37	0,0003	6253,63	3,69	3,69	14375,01	11,06	20628,64
0,16	8,66	44,10	0,0003	6666,18	3,93	3,93	15063,64	11,80	21729,82
0,17	9,19	46,83	0,0003	7078,20	4,18	4,18	15728,46	12,54	22806,66
0,18	9,73	49,55	0,0004	7489,68	4,43	4,43	16370,69	13,28	23860,37
0,19	10,26	52,27	0,0004	7900,62	4,67	4,67	16991,46	14,02	24892,08
0,20	10,79	54,99	0,0004	8311,03	4,92	4,92	17591,82	14,75	25902,85
0,21	11,33	57,70	0,0004	8720,90	5,16	5,16	18172,78	15,49	26893,67
0,22	11,86	60,41	0,0004	9130,24	5,41	5,41	18735,24	16,23	27865,48
0,23	12,39	63,11	0,0005	9539,05	5,66	5,66	19280,09	16,97	28819,14
0,24	12,92	65,81	0,0005	9947,32	5,90	5,90	19808,14	17,70	29755,46
0,25	13,45	68,51	0,0005	10355,07	6,15	6,15	20320,14	18,44	30675,21

Tabela 12 - Partição das cargas simulação Tanque 13 (Obra E)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
0,74	24,76	75,24
1,48	25,19	74,81
2,21	25,61	74,39
2,95	26,03	73,97
3,69	26,44	73,56
4,43	26,85	73,15
5,16	27,26	72,74
5,90	27,65	72,35
6,64	28,05	71,95
7,38	28,44	71,56
8,11	28,82	71,18
8,85	29,20	70,80
9,59	29,58	70,42

Tabela 13 - Simulação teste de enchimento Tanque 14 (Obra E)

Solo isolado				Radier fictício		Estacas pré-carregadas		Simulação	
S (mm)	V (kN)	p (kPa)	S / B	Vr (kN)	Sr (mm)	Sp (mm)	Vp (kN)	Spr (mm)	Vpr (kN)
0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,55	2,78	0,0000	420,76	0,25	0,25	1278,91	0,61	1699,67
0,02	1,09	5,56	0,0000	840,96	0,49	0,49	2498,13	1,23	3339,09
0,03	1,64	8,34	0,0001	1260,61	0,74	0,74	3661,74	1,84	4922,35
0,04	2,18	11,11	0,0001	1679,71	0,98	0,98	4773,47	2,46	6453,17
0,05	2,73	13,88	0,0001	2098,25	1,23	1,23	5836,70	3,07	7934,95
0,06	3,27	16,65	0,0001	2516,25	1,48	1,48	6854,55	3,69	9370,79
0,07	3,81	19,41	0,0001	2933,69	1,72	1,72	7829,85	4,30	10763,55
0,08	4,35	22,17	0,0002	3350,59	1,97	1,97	8765,23	4,92	12115,82
0,09	4,89	24,92	0,0002	3766,94	2,21	2,21	9663,08	5,53	13430,02
0,10	5,43	27,67	0,0002	4182,75	2,46	2,46	10525,62	6,15	14708,37
0,11	5,97	30,42	0,0002	4598,01	2,70	2,70	11354,89	6,76	15952,90
0,12	6,51	33,16	0,0002	5012,73	2,95	2,95	12152,78	7,38	17165,50
0,13	7,05	35,90	0,0003	5426,90	3,20	3,20	12921,03	7,99	18347,94
0,14	7,59	38,64	0,0003	5840,54	3,44	3,44	13661,28	8,61	19501,81
0,15	8,12	41,37	0,0003	6253,63	3,69	3,69	14375,01	9,22	20628,64
0,16	8,66	44,10	0,0003	6666,18	3,93	3,93	15063,64	9,84	21729,82
0,17	9,19	46,83	0,0003	7078,20	4,18	4,18	15728,46	10,45	22806,66
0,18	9,73	49,55	0,0004	7489,68	4,43	4,43	16370,69	11,06	23860,37
0,19	10,26	52,27	0,0004	7900,62	4,67	4,67	16991,46	11,68	24892,08
0,20	10,79	54,99	0,0004	8311,03	4,92	4,92	17591,82	12,29	25902,85
0,21	11,33	57,70	0,0004	8720,90	5,16	5,16	18172,78	12,91	26893,67
0,22	11,86	60,41	0,0004	9130,24	5,41	5,41	18735,24	13,52	27865,48
0,23	12,39	63,11	0,0005	9539,05	5,66	5,66	19280,09	14,14	28819,14
0,24	12,92	65,81	0,0005	9947,32	5,90	5,90	19808,14	14,75	29755,46
0,25	13,45	68,51	0,0005	10355,07	6,15	6,15	20320,14	15,37	30675,21
0,26	13,98	71,20	0,0005	10762,29	6,39	6,39	20816,83	15,98	31579,12
0,27	14,51	73,90	0,0005	11168,98	6,64	6,64	21298,88	16,60	32467,86
0,28	15,03	76,58	0,0006	11575,14	6,88	6,88	21766,93	17,21	33342,07
0,29	15,56	79,27	0,0006	11980,77	7,13	7,13	22221,58	17,83	34202,35
0,30	16,09	81,95	0,0006	12385,89	7,38	7,38	22663,39	18,44	35049,28

Tabela 14 - Partição das cargas simulação Tanque 14 (Obra E)

Spr (mm)	Vr (kN)	Vp (kN)
0,00	0,00	0,00
0,61	24,76	75,24
1,23	25,19	74,81
1,84	25,61	74,39
2,46	26,03	73,97
3,07	26,44	73,56
3,69	26,85	73,15
4,30	27,26	72,74
4,92	27,65	72,35
5,53	28,05	71,95
6,15	28,44	71,56
6,76	28,82	71,18
7,38	29,20	70,80
7,99	29,58	70,42
8,61	29,95	70,05
9,22	30,32	69,68
9,84	30,68	69,32
10,45	31,04	68,96
11,06	31,39	68,61
11,68	31,74	68,26
12,29	32,09	67,91
12,91	32,43	67,57
13,52	32,77	67,23
14,14	33,10	66,90
14,75	33,43	66,57
15,37	33,76	66,24