



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO EUGENIO SILVA DE OLIVEIRA

ESTIMATIVA DE RECALQUES MÉDIOS EM FUNDAÇÃO: NOVO MÉTODO

Recife

2023

PEDRO EUGENIO SILVA DE OLIVEIRA

ESTIMATIVA DE RECALQUES MÉDIOS EM FUNDAÇÃO: NOVO MÉTODO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão

Recife

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

O48e Oliveira, Pedro Eugênio Silva de.
Estimativa de recalques médios em fundação: novo método. / Pedro Eugênio
Silva de Oliveira. – 2023.
300 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2023.

Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Fundação mista. 3. Fundação profunda. 4. Grupo de
estacas. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (orientador). II. Gusmão, Alexandre
Duarte (coorientador). III. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2023-128

PEDRO EUGENIO SILVA DE OLIVEIRA

ESTIMATIVA DE RECALQUES MÉDIOS EM FUNDAÇÃO: NOVO MÉTODO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Geotecnia

Aprovado em: 11/04/2023

Orientador: Professor Silvio Romero de Melo Ferreira

Co-orientador: Professor Alexandre Duarte Gusmão

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência

Prof. Dr. PAULO JOSE ROCHA DE ALBUQUERQUE (examinador externo)

Universidade Estadual de Campinas

Participação por videoconferência

Prof. Dr. OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JUNIOR (examinador externo)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Participação por videoconferência

Prof. Dr. MAURÍCIO MARTINES SALES (examinador externo)

Universidade Federal de Goiás

Participação por videoconferência

Prof. Dra. BERNADETE RAGONI DANZIGER (examinadora externa)

Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Participação por videoconferência

Prof. Dr. LEONARDO JOSE DO NASCIMENTO GUIMARAES (examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

A Deus. Amigo Fiel.

AGRADECIMENTOS

A quem me amou primeiro, o meu primeiro obrigado. Ao autor e consumidor da minha existência dedico toda a minha história e esta obra. Obrigado, Deus, por ter sido meu amigo e companheiro. Nas noites em claro, meu instrutor. Espero estar me aproximando mais de ti, entendendo a verdade por detrás da tua criação.

A meus queridos pais, Fernanda e Joaquim Oliveira. Presentes em toda a minha trajetória acadêmica como guias e motivação. Refutando o desânimo com palavras de superação. Que cuidaram de mim, quando eu mais precisei, e se alegram comigo com o gozo da cura.

A minha irmã, mais jovem, e alegre Mariana. O perfeito exemplo de pessoa feliz. A pessoa mais capaz de arrancar meus sorrisos quando mais preciso. A quem repouso toda a minha admiração e respeito.

Dedico esse trabalho ao meu avô, o qual tive a sorte de aprender o valor do trabalho, e a determinação pelo conhecimento. O homem que me ensinou o peso da enxada e da caneta.

Os últimos treze anos não tem sido os mesmos, pois eu encontrei o amor. Agradeço do fundo do coração a minha dama, Raissa. Meiga e simples ratificou a importância das pessoas na minha vida. Com seu ombro compreensivo me conquistou, seu sorriso discreto me cativou e sempre juntos somos felizes, na alegria ou na tristeza, na saúde ou na doença. Esses votos fazem mais sentido hoje em dia.

A toda a minha família, representada por avós, primos, tios, parentes e aderentes.

Ao professor Alexandre Gusmão, motivador por excelência. Separado no meio de muitos para fazer a diferença. Convence a todos da importância do Geotécnico. Nos ajuda a acreditar na relevância do nosso trabalho e na mudança que uma mente pode trazer ao mundo.

Ao professor Silvio Romero, que desde tão cedo investiu seus esforços em mim. Acreditou em um jovem desorganizado e tem sido ao longo dos anos, meu orientador acadêmico, e com certeza um mestre da minha formação como cristão e como ser humano.

Ao corpo docente da Universidade Católica de Pernambuco onde fui graduado e acolhido e que ainda me ajudou bastante para elaboração deste trabalho.

E fechando o ciclo acadêmico, até o momento, ao corpo docente da Universidade Federal de Pernambuco que participou ativamente desta etapa da minha formação.

Ao amigo Gilmar, que representa um mestre no ofício de Engenheiro de Fundações, com formação ampla e detentor do incrível dom de ensinar o Bom Senso do engenheiro às novas gerações.

A colega e amiga Marina, que dividiu comigo o desafio de se tornar mestre de fato e direito, e nesse tempo podemos contemplar o florescer de uma amizade. Sempre me mostrando que eu posso ir mais além. Dupla de trabalhos e companhia da vida. Muito obrigado. Parabéns por quem você é.

Aos amigos do trabalho que sempre acreditaram em mim, algumas vezes mais do que eu mesmo: Lindemberg Pereira, Cláudio, João, Victor Rufino, Allan Almeida, Rodrigo Roma, Willians Perley, Lais, Antonio, Victor Cazzoli, Fernando Mellia, Micaella Falcão e em especial ao professor Ângelo Just e a aluna Letícia Sarinho.

Os meus sócios e amigos: Raissa Andrada e Marcelo Sabino, que dividem comigo as dores das incertezas do mundo corporativo e caminham ao meu lado em direção a excelência no servir.

Portanto, quem ouve estas minhas palavras e as pratica é como um homem prudente que construiu a sua casa sobre a rocha. Caiu a chuva, transbordaram os rios, sopraram os ventos e deram contra aquela casa, e ela não caiu, porque tinha seus alicerces na rocha. (Jesus Cristo Bíblia Sagrada – Mateus 7:24,25)

RESUMO

O conceito de fundação profunda e superficial passa por processo internacional de revisitação. Das diversas questões levantadas a principal indagação consiste no comportamento das fundações mistas, a exemplo do radier estaqueado que é composto da junção das fundações superficiais e profundas, ambas trabalhando concomitantemente. Porém, recentemente o paradigma foi invertido, no sentido em que não mais as fundações mistas são escritas como apresentando duas dimensões (superficial e profunda), mas as fundações superficiais e profundas seriam casos particulares e extremos do radier estaqueado que passa a representar a generalização do conceito de fundação a partir desse ponto de vista. Por isso temas se entrelaçam para tecer o pano de fundo do conhecimento acerca do comportamento das fundações. Temas como efeito de grupo, verificação de estado limite de serviço e otimização da disposição das estacas no sistema, assumem centralidade na pesquisa e publicações. Do mundo ao Brasil, do Brasil a Pernambuco, esforços são dirigidos para responder às questões referentes a esse novo paradigma. Pesquisas desenvolvidas em Recife, caminham para elucidar questões pertinentes e avançar a fronteira do conhecimento sistematizado até o momento. O presente trabalho se alicerça sobre o conceito estendido de fundações e se alinha aos esforços regionais e internacionais, para propor uma nova metodologia para prever os recalques médios de edificações, que funcionem como radier estaqueado ou em seu extremo como um grupo de estacas. Como resultados é possível demonstrar e encontrar um parâmetro que relacione a rigidez do sistema (λ), reduzindo a análise tipicamente não linear para uma análise linear e de mais fácil manipulação, de Fator de Melhoria *versus* Demanda por Estacas (N). Foram avaliadas 159 casos de obra (ao longo da revisão bibliográfica) para aplicação da metodologia, dos quais foram utilizados 6. Logo em seguida é realizada análise paramétrica, validação numérica com dois softwares de elementos finitos e aplicação para 9 pesquisas/casos de obra, das quais 3 estudadas internacionalmente, 2 estudadas em âmbito nacional e 4 locais. Todos os resultados dos ajustes da metodologia apresentam coeficiente de correlação R^2 superior a 0,89. Com erro médio de 22%. Fato que confirma o potencial de aplicação da mesma para fins práticos da engenharia de fundações. Por fim é analisada a possibilidade de estimativa de λ a partir de metodologia de Mandolini (2012) que considera a geometria da fundação. É sugerida uma modificação ao método, com a finalidade de considerar as peculiaridades do sistema de fundação associado a colunas de melhoria. Como conclusão a hipótese é confirmada e demonstra-se que é possível estimar os recalques de fundação em radier a partir da metodologia proposta.

Palavras-chave: fundação mista; fundação profunda; grupo de estacas.

ABSTRACT

The concept of deep and superficial foundation undergoes an international process of revisitation. Of the various issues raised, the main question is the behavior of composite foundations, such as the piled raft which is composed of the junction of superficial and deep foundations, both working concomitantly. However, recently the paradigm has been inverted, meaning that composite foundations are no longer written as presenting two dimensions (superficial and deep), but superficial and deep foundations would be a particular and extreme case of the piled raft that starts to represent the generalization of the foundation concept from this point of view. Therefore, themes are intertwined to weave the background of knowledge about the behavior of foundations. Topics such as group effect, verification of the service limit state and optimization of the arrangement of the piles in the system, assume centrality in the research and development of the articles. From the world to Brazil, from Brazil to Pernambuco, efforts are being made to answer questions regarding this new paradigm. Research carried out in Recife, is moving towards elucidating pertinent issues and advancing issues of systematized knowledge so far. This work is based on the extended concept of foundations and aligns with regional and international efforts, to propose a new methodology to predict the average settlement of buildings, that works as a staked raft or at its end as a group of piles. As a result, it is possible to demonstrate and find a parameter that relates the rigidity of the system (λ), reducing the typically non-linear analysis to a linear and easier-to-manipulate analysis of Improvement Factor versus Demand for Piles (N). 159 cases were evaluated (throughout the bibliographic review) for the application of the methodology, of which 6 were used. Soon after, parametric analysis, numerical validation with two finite element softwares and application for 9 research/construction cases are carried out, of which 3 studied internationally, 2 studied nationally and 4 locally. All the results of the methodology adjustments have an R^2 correlation coefficient greater than 0.89 and average error of 22%. A fact that confirms its great potential for application for practical purposes in foundation engineering. Finally, the possibility of estimating λ based on the methodology of Mandolini (2012) is analyzed, which considers the geometry of the foundation. A modification to the method is suggested, in order to consider the peculiarities of the foundation system associated with improvement columns. As a conclusion, the hypothesis is confirmed, and it is demonstrated that it is possible to estimate the foundation settlements in rafts from the proposed methodology.

Keywords: composite foundations; deep foundations; pile group.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de artigos publicados por ano.....	30
Figura 2 – Citações por ano.....	31
Figura 3 – Número de citações dos artigos mais citados, por ano.....	32
Figura 4 – Transição do sistema de (a) Fundação direta para (b) Grupo de estacas, passando pelo radier estaqueado (c).....	34
Figura 5 – Quadro resumo do comportamento esperado de fundações.....	35
Figura 6 – Sistema de cargas idealizado para o radier estaqueado.....	36
Figura 7 – Relação de α_{cp} para os casos particulares de fundações.....	37
Figura 8 – Redução de recalque em função da partição de cargas.....	37
Figura 9 – Radier Estaqueado e esforços envolvidos.....	38
Figura 10 – Curvas carga x recalque, em função dos diversos tipos de filosofias de projeto.....	40
Figura 11 – Burj Khalifa (a) em corte, (b) locação em planta e (c) em execução.....	42
Figura 12 – Edifícios construídos na Alemanha.....	43
Figura 13 – Shanghai Tower (a) corte e (b) locação das estacas em planta.....	43
Figura 14 – Critério de classificação dos edifícios altos.....	44
Figura 15 – Correlação da espessura do Radier (t) com a altura do edifício (H).....	45
Figura 16 – Perfil Construtivo para Região Metropolitana do Recife.....	48
Figura 17 – Comparação de Recife com a experiência mundial.....	49
Figura 18 – Valores de α_h e α_v , para diversos tipos de fundações.....	53
Figura 19 – Coeficiente de efeito de grupo, a partir de Amorim (2019) e Almeida et al (2019).....	56
Figura 20 – Variação dos recalques com o aumento do número de estacas.....	58
Figura 21 – Diferenças Finitas a (a) Montante, a (b) Jusante, (c) centrada, (d) variação com carregamento.....	62
Figura 22 – Diagrama Carga-Recalque-Demanda.....	63
Figura 23 – Diagrama Pressão-Recalque-Demanda.....	67
Figura 24 – Erro <i>versus</i> Eficiência.....	69
Figura 25 – Ilustração da análise paramétrica realizada.....	71
Figura 26 – Influência da rigidez estaca-placa (λ) sobre a diminuição dos recalques.....	72
Figura 27 – Métodos de estimativa de λ	73
Figura 28 – Conjunto típico de ensaios de placa em Recife.....	76
Figura 29 –Obtenção da Rigidez relativa estaca-placa (λ) – Plano de Melhoramento.....	77
Figura 30 – Rotina para cálculo a partir de 2 ensaios.....	81
Figura 31 – Velocidade Inicial de Recalques.....	83
Figura 32 – Modelo Mola-Amortecedor, ou Modelo de Kelvin.....	84
Figura 33 – Diagrama α <i>versus</i> Spr/Ssf (1/F).....	89
Figura 34 – Rigidez relativa estaca-placa a partir de equações empíricas de Mandolini et al. (2005) e Mandolini (2012) – visualização em gráficos 2D.....	92
Figura 35 – λ a partir de equações empíricas.....	93

Figura 36 – λ a partir de equações empíricas de Mandolini et al. (2005).....	93
Figura 37 –Tela de abertura do site da suíte Geotec Office – software gratuito com limitações.....	96
Figura 38 – Modelo proposto para análise de Elementos Finitos, (a) corte, (b) planta.....	97
Figura 39 – Sistema de carregamento e modelo em planta e perspectiva.	97
Figura 40 – Sistema de carregamento e modelo em planta e perspectiva.	98
Figura 41 – Modelos para $N = \{0, 5, 9, 25\}$	99
Figura 42 – Distribuição de Recalques para 60 kPa e $N = 25$	100
Figura 43 – Plano de Melhoramento – $F \times N$ – Validação Numérica.	101
Figura 44 – Recalque <i>versus</i> Número de Estacas.....	101
Figura 45 – Recalque Calculado Híbrido - ELPLA <i>versus</i> Recalques Ajustados.....	102
Figura 46 – Espaçamento relativo e Rigidez Relativa.....	103
Figura 47 – Espaçamento relativo e Rigidez Relativa para o caso modelado.....	104
Figura 48 – Rigidez relativa estaca-placa, função do número de estacas para $L/e = 5$	105
Figura 49 – Malha utilizada para análise no Plaxis.....	107
Figura 50 – Exemplo de Resultado de Análise no Plaxis.	109
Figura 51 – Exemplo de Resultado de Análise no Plaxis.	109
Figura 52 – Plano de Melhoramento.....	110
Figura 53 – Ajuste dos recalques com o aumento do Número de Estacas.	110
Figura 54 – Recalques Calculados via Plaxis x Recalques Ajustados.	111
Figura 55 – Grupos de aplicações e resultados estudados.....	112
Figura 56 – Quadro resumo dos dados dos casos estudados.....	113
Figura 57 – Quadro resumo dos dados dos casos estudados.....	114
Figura 58 –Exemplo apresentado por Poulos (2001).....	115
Figura 59 – Obtenção da Rigidez relativa estaca-placa, via regressão linear.....	115
Figura 60 – Curva de Recalque <i>versus</i> o aumento do número de estacas.	116
Figura 61 – Recalque medido <i>versus</i> Recalque ajustado.	116
Figura 62 – Recalque <i>versus</i> o número de estacas, comparativo de metodologias.	117
Figura 63 – Rigidez Estaca-placa e N. de Estacas (a partir de MANDOLINI 2012).....	118
Figura 64 – Planta baixa da locação das peças de fundação.....	119
Figura 65 – Perfil Geotécnico.....	119
Figura 66 –Variação dos recalques com o aumento do número de estacas.....	120
Figura 67 – Plano de Melhoramento obtido com $\lambda = 0,1348$	121
Figura 68 – Ajuste dos recalques.....	121
Figura 69 – Sobreposição das curvas de Poulos (2000) com a curva obtida via retro análise da rigidez relativa estaca-placa.	122
Figura 70 – Rigidez Estaca-placa, (MANDOLINI, 2013).....	123
Figura 71 – Edf. Hochhaus Treptowers.....	124
Figura 72 – Simulações numéricas realizadas por Katzenbach (2015).....	125
Figura 73 – Recalque no tempo, medido e ajustado.	126
Figura 74 – Valores de Rigidez Relativa estaca-placa.....	127

Figura 75 – Perfil Geotécnico do Campus Experimental da UnB.	128
Figura 76 – Resumo dos ensaios realizados.	129
Figura 77 – Exumação de grupo de 4 estacas escavadas.	130
Figura 78 – Detalhe de superfície e diâmetro de estaca escavada.	130
Figura 79 – Resultados dos Ensaios.	131
Figura 80 – Plano de Melhoramento obtido para os três estágios de cargas (5, 50 e 100 kN).	133
Figura 81 – Recalque <i>versus</i> o aumento do número de estacas (5, 50 e 100 kN).	134
Figura 82 – Rigidez Relativa estaca solo, para o solo com umidade natural e pré-inundado.	136
Figura 83 – Estimativa da Rigidez estaca-placa – a partir de Mandolini (2012).	138
Figura 84 – Locação dos ensaios realizados no campo experimental da UnB.	139
Figura 85 – Ensaio de placa sobre solo melhorado (a) configuração (b) fissuras no entorno.	140
Figura 86 – Ensaio de placa sobre solo + 2 estacas (a) configuração (b) células de carga.	140
Figura 87 – Ensaio de placa sobre solo + 4 estacas (a) configuração (b) células de carga.	140
Figura 88 – Diagrama Carga x Recalque para os ensaios realizados.	141
Figura 89 – Plano de melhoramento.	142
Figura 90 – Plano de melhoramento.	142
Figura 91 – Estimativa da Rigidez estaca-placa – a partir de Mandolini (2012).	143
Figura 92 – Perfil Geotécnico Simplificado.	144
Figura 93 – Edificação, Sondagem e Solução de Fundação.	145
Figura 94 – Curvas de granulometria dos materiais envolvidos.	146
Figura 95 – Coluna de argamassa em campo – Ano 2000.	146
Figura 96 – Corpos de prova obtidos.	147
Figura 97 – Resultado dos Ensaios de Compressão Axial.	148
Figura 98 – Disposição dos ensaios de Placa Executados.	149
Figura 99 – Quadro dos Resultados Ensaios de Placa, por número de Estacas N.	150
Figura 100 – Carga x Recalque para os ensaios de placa executados.	150
Figura 101 – Resumo dos ensaios – aplicação da metodologia.	151
Figura 102 – Plano de Melhoramento F x N; obtenção de λ	152
Figura 103 – Recalques <i>versus</i> Número de Estacas.	153
Figura 104 – Rigidez (escala log) x Carga para a coluna e para o solo.	154
Figura 105 – Rigidez estaca solo para ambos os métodos <i>versus</i> o carregamento.	154
Figura 106 – Recalque <i>versus</i> Número de estacas para ambos os métodos e ambas as cargas.	156
Figura 107 – Efeito de grupo <i>versus</i> o Número de estacas.	157
Figura 108 – Ajuste de Van der Veen (1953).	159
Figura 109 – Aplicação de Van der Veen até obtenção do Efeito de Grupo.	160
Figura 110 – Comparação entre a Rigidez Relativa experimental e extrapolada.	161
Figura 111 – Comparação entre o coeficiente de efeito de grupo experimental e extrapolado e encontrado por Amorim (2019).	162
Figura 112 – Praia do Cupe, no litoral Sul de Pernambuco.	163
Figura 113 – Carta Geotécnica de Ipojuca e ênfase para a Praia do Cupe.	164

Figura 114 – Amostra de areia da praia do Cupe ampliada em Microscopia óptica.	165
Figura 115 – Perfil típico.	166
Figura 116 – Esquema dos ensaios realizados, placa sobre solo+1 coluna (superior), placa sobre solo + 4 estacas (inferior)	167
Figura 117 – Resultados dos Ensaios em Placa.....	168
Figura 118 – Rigidez Relativa Estaca – Solo (λ média = 0,1578)	170
Figura 119 – Curva Reconstituída – Carga x Recalque solo sem estacas.	170
Figura 120 – Rigidez do Solo (k_p média = 29,27 kN /mm).....	171
Figura 121 – Curvas carga x recalques ajustados.....	172
Figura 122 – Dados Reais e família de curvas ajustadas.....	173
Figura 123 – Comparação entre recalques ajustados e recalques medidos.	173
Figura 124 – Estimativa da Rigidez estaca-placa – a partir de Mandolini (2012).	174
Figura 125 – Perfil Geotécnico – Melhor Visualização no Apêndice A.	175
Figura 126 – Resumo dos dados – Melhor visualização no Apêndice A.....	176
Figura 127 – Fundação com colunas de argamassa (a) em planta (b) corte esquemático.....	178
Figura 128 – Resultado das provas de carga em placa (a) sobre solo (b) solo + 1 estaca.....	179
Figura 129 – Resultado dos recalques medidos para a Torre A.	180
Figura 130 – Resultado dos recalques medidos para a Torre B.	181
Figura 131 – Resultado dos recalques medidos para a Torre B.	182
Figura 132 – Resultado dos recalques estimados pela metodologia (a) Torre A, (b) Torre B	182
Figura 133 – Resultado dos recalques no tempo, estimados pelo Método D.	183
Figura 134 – Recalques Medidos <i>versus</i> Recalques Estimados	184
Figura 135 – Dados de caracterização do subsolo, resistência a penetração, frações granulométricas e limites de consistência – Melhor visualizada no Apêndice A.....	186
Figura 136 – Granulometria, camadas até 20 m de profundidade	187
Figura 137 – Granulometria camadas entre 20 e 30 m de profundidade.	187
Figura 138 – Carta de plasticidade – resultados entre 20,00 m e 30,00 m.....	188
Figura 139 – Perfil Geotécnico dos Tanques – Melhor visualizada no Apêndice A.	188
Figura 140 – Resultado dos Ensaios de Placa Realizados	190
Figura 141 – Rigidez Relativa Estaca-placa – Obtidas a partir dos ensaios de placa	191
Figura 142 – Ajuste linear da curva carga recalque e aproximação da Rigidez do solo.....	194
Figura 143 – Histograma de Frequência Absoluta da Rigidez Relativa Estaca-Placa.....	194
Figura 144 – Resultado da Rigidez Relativa obtida em ensaios de placa e retro analisadas.....	196
Figura 145 – Recalques medidos <i>versus</i> os recalques estimados.	197
Figura 146 – Recalques medidos <i>versus</i> os recalques estimados.	198
Figura 147 – Rigidez Relativa Estaca-Placa <i>versus</i> Comprimento Relativo.....	199
Figura 148 – Recalques Medidos <i>versus</i> Recalques estimados	200
Figura 149 – Resumo dos resultados – Efeito de Grupo	203
Figura 150 – RG <i>versus</i> R – dados de casos de compactação.....	204
Figura 151 – RG, Máx <i>versus</i> R – dados de casos de compactação	204

Figura 152 – λ retro analizada.....	205
Figura 153 – Ábacos para estimativa de λ	206
Figura 154 – Ábacos para estimativa de λ	207
Figura 155 – Superfície de Estado de λ	207

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesquisa na base SCOPUS.....	30
Tabela 2 – Principais autores	31
Tabela 3 – Artigos mais citados	32
Tabela 4 – Critério detalhado do CTBUH.....	44
Tabela 5 – Correlações obtidas – valores encontrados e recomendados	45
Tabela 6 – Banco de dados de radier estaqueado para Recife (RMR)	46
Tabela 7 – Correlações obtidas – valores encontrados e recomendados (mais conservadores)	48
Tabela 8 – Equações de estimativa de Efeito de Grupo	50
Tabela 9 – Parâmetros dos grupos de estacas, Mandolini et al (1997) e Viggiani (1998)	51
Tabela 10 – Valores de ξ obtidos a partir dos dados de Amorim (2019)	54
Tabela 11 – Banco de dados apresentado por Almeida et al (2020).....	55
Tabela 12 – Resultados apresentados por Almeida et al (2020)	56
Tabela 13 – Demanda de estacas em função da rigidez estaca-placa adotada	71
Tabela 14 – Distribuição dos carregamentos na edificação.	84
Tabela 15 – Distribuição dos carregamentos na edificação.	87
Tabela 16 – Recalques médios* em função do número de estacas do radier	100
Tabela 17 – Parâmetros do solo, utilizados para análise no Plaxis.....	106
Tabela 18 – Recalques e Fatores de Melhoria <i>versus</i> o número de estacas	108
Tabela 19 – Recalques e Fatores de Melhoria obtidos	115
Tabela 20 – Recalques Medidos e Ajustados	116
Tabela 21 – Fatores de Melhoria obtidos.....	120
Tabela 22 – Resultados obtidos	126
Tabela 23 – Resultados dos ensaios em Placa, a partir de Sales (2000)	132
Tabela 24 – Fatores de Melhoria obtidos.....	132
Tabela 25 – Fatores de Melhoria obtidos para o solo com umidade natural.....	135
Tabela 26 – Fatores de Melhoria obtidos para o solo pré-inundado.	136
Tabela 27 – Rigidez relativa estaca-placa obtida.	141
Tabela 28 – Recalques médios e Fator de Melhoria	152
Tabela 29 – Recalques médios e Fator de Melhoria	152
Tabela 30 – Resultados das extrapolações pelo Método de Van der Veen (1953).....	158
Tabela 31 – Resultados dos ensaios de prova de Carga em Placa	168
Tabela 32 – Resultados encontrados.....	169
Tabela 33 – Recalques para a Torre A.	179
Tabela 34 – Recalques para a Torre B.	180
Tabela 35 – Distribuição dos carregamentos na edificação.	182
Tabela 36 – Resultados das estimativas dos parâmetros do modelo de Kelvin.....	183
Tabela 37 – Resultados dos ensaios de prova de carga em placa.	190
Tabela 38 – Cargas Consideradas.....	190

Tabela 39 – Resultado da Rigidez da estaca do solo e Rigidez relativa estaca-placa.	191
Tabela 40 – Resultados dos testes de enchimento.	193
Tabela 41 – Resultados dos valores de rigidez relativa estaca-placa retro analisados.	194
Tabela 42 – Coeficientes de Variação por parâmetro Geotécnico.	195
Tabela 43 – Equações obtidas.	205

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Número de Estacas
B	Largura Horizontal
L	Comprimento das Estacas
B/L	Relação entre largura horizontal e comprimento das estacas
α_{pr} , α_{KPP} , α_{CPRF} .	Coefficiente de radier estaqueado
$\sum R_{estacas}$	Parcela de cargas atuante nas estacas
R_{total}	Carga total aplicada
R_{placa}	Parcela de carga oriunda do contato entre a placa e o solo superficial
S_{pr}	Recalques do radier estaqueado
S_{sf}	Recalques de uma fundação direta
ξ_s	S_{pr}/S_{sf}
e	Espaçamento entre estacas/colunas
d	Diâmetro das estacas/colunas
e/d	Espaçamento relativo
t	Espessura da placa do radier
H	Altura das Edificações
IN	Índice
N. PAV	Número de Pavimentos
A	Área
L/e	Comprimento relativo
R^2	Coefficiente de correlação
ξ	Coefficiente de aumento do recalque devido ao efeito do grupo
Bg	Dimensão transversal do grupo de estacas
n_r	Número de linhas de estacas num bloco quadrado.
η	Expoente utilizado nos métodos de Fleming et al (1985) e Poulos (1989), varia de 0,33 a 0,60 (segundo os autores)
R_s	Razão de efeito de grupo médio
$R_{s,máx}$	Razão de efeito de grupo máximo
S_{pr}^f	Recalque do grupo
S_{p^0}	Recalque da coluna isolada
α_h	Fator de interação horizontal

α_v	Fator de interação vertical
F	Fator de melhoramento
R_e	Carga média nas estacas
$\sum R_{e,i}$	Parcela atuante nas estacas (somatório das cargas R_e em cada estaca i)
S	Recalques
S_N	Recalque do grupo de N estacas
k	Rigidez
dR/dS	Rigidez Variacional (derivada das cargas R em relação aos recalques S)
$k = dR_t/dS$	Rigidez Variacional do Sistema
$k_e = dR_e/dS$	Rigidez Variacional da Estaca
$k_p = dR_p/dS$	Rigidez Variacional da Placa sobre o solo
λ	Rigidez relativa Estaca-Placa (com a consideração de efeito de grupo)
$k_v = \frac{dR}{dS}$	Rigidez Variacional, derivada das cargas R em relação aos recalques S, Oliveira (2013)
$\frac{\Delta R}{\Delta S}$	Diferencial que aproxima a rigidez variacional, a partir da série de Taylor
S_0	Caso particular de S_N para $N = 0$, que representa o recalque da fundação direta, sem estacas.
q	Pressão
MR	Módulo de reação do Subgreide – Constante de proporcionalidade utilizada na hipótese de Winkler (em alguns livros e autores aparece com K, fato que confunde com a rigidez)
MR_p	Módulo de Reação do Subgreide para o caso da placa isolada
A_e	Área de uma estaca
ρ	Razão de áreas (entre as áreas de uma estaca e área da placa radier)
E	Eficiência – Relação entre λ e ρ
ε	Erro

e (índice)	Associado a estacas (ex.: Se – recalque na estaca)
S_e	Recalque da estaca para a carga Q
S_1	Recalque do sistema solo+1 Estaca (N=1)
S_4	Recalque do sistema solo + 4 estacas (N=4)
F1	Fator de melhoramento para o grupo de 1 (N=1) estaca em relação ao sistema sem estacas (N=0)
F4	Fator de melhoramento para o grupo de 4 (N=4) estacas em relação ao sistema sem estacas (N=0)
j, k	Valores que N pode assumir, sendo $j > k$
$F_{j,k}$	Fator de melhoramento entre configurações de j e k estacas
S_k	Recalques para a configuração de k estacas
S_j	Recalques para a configuração de j estacas
R_t	Carga total da edificação (em relação ao tempo t)
v_c	Velocidade de Carregamento
v_0	Velocidade inicial de recalques
$S_N(t)$	Recalques no tempo
C	Coeficiente de Amortecimento (amortecedor do modelo de Kelvin)
P	Carga transmitida para o sistema mola-amortecedor
F_m	Força na mola
F_a	Força no amortecedor
x	Deslocamentos
t	Tempo
v	Velocidade de deslocamentos
\dot{x}	Velocidade de deslocamentos, notação mecânica
dx/dt	Velocidade de deslocamentos, notação diferencial (derivada dos deslocamentos em relação ao tempo)
CI	Constante de integração
R, Q	Carga total no sistema
β	Parcela de cargas na placa
α	Parcela de cargas nas estacas
S_i	Recalques estimados para o sistema sem a consideração do efeito de grupo

λ_0	Rigidez relativa Estaca-placa, sem a consideração do efeito de grupo
$\xi_{Máx}$	Efeito de grupo máximo (quando N tende ao infinito)
Z	Profundidade
Ee	Módulo de Elasticidade das colunas – obtido em laboratório
PC	Prova de carga
S246	Recalque para a carga de 246 kN
S123	Recalque para a carga de 123 kN
Qu	Carga última
a, b	Constantes obtidas a partir do método de Van der Veen
$\xi_{Médio}$	Coeficiente de efeito de grupo médio referente a uma massa de dados retro analisados
F _{4,1}	Fator de melhoramento entre a configuração de 4 estacas e a configuração de 1 estaca.
μ	Média
σ	Desvio Padrão
COV	Coeficiente de Variação
γ	Peso específico
γ_{sub}	Peso específico submerso
φ'	Ângulo de atrito efetivo
S _u	Resistência não drenada
S _u / σ'_{v}	Parâmetro de resistência não drenada
C _c	Índice de Compressão
p _p	Pressão de Pré-consolidação
k	Coeficiente de permeabilidade de argila saturada
k	Coeficiente de permeabilidade de argila não saturada
c _v	Coeficiente de adensamento
q _c	Resistência de ponta elétrica
q _c	Resistência de ponta mecânica
q _{DMT}	Resistência do Dilatômetro
S _v	Resistência não drenada - Ensaio de palheta
$\lambda_{0,média}$	Rigidez Relativa Estaca-placa retro analisada média, sem consideração do efeito de grupo

λ média retro analisada

Rigidez Relativa Estaca-placa retro analisada média, com
consideração do efeito de grupo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	24
1.1	Objetivo Geral	27
1.2	Objetivos Específicos	27
1.3	Hipótese	28
1.4	Delimitações	28
1.5	Apresentação da estrutura do trabalho	28
2.	LEVANTAMENTO E AVALIAÇÃO CRÍTICA DA LITERATURA	30
2.1	Estudo Bibliométrico	30
2.1.1	Estudo de Citações	31
2.2	A relação entre grupo de estacas e radier estaqueado	33
2.3	Filosofias de projeto	38
2.3.1	Filosofias de projeto e alternativas	39
2.3.2	Etapas de Projeto	41
2.4	Compilação dos resultados de medição de recalques para radier estaqueado	41
2.5	A experiência de Recife e Região Metropolitana	46
2.6	Recalque em grupo de estacas	49
2.6.1	Experiência de Recife e Região Metropolitana – Efeito de grupo	51
3.	PROPOSTA DE MÉTODO DE ESTIMATIVA DE RECALQUES DE RADIER ESTAQUEADO	57
3.1	Formulação desenvolvida para estimativa do recalque médio	58
3.1.1	Considerações sobre a Rigidez Variacional	60
3.1.2	A hipótese da proporcionalidade e a hipótese de Winkler	63
3.1.3	A hipótese não linear	70
3.2	Avaliação paramétrica da influência da rigidez relativa estaca-placa sobre a diminuição de recalques com o aumento de estacas N	70
3.3	Alternativas para a obtenção da Rigidez-Relativa Estaca-Solo	72
3.3.1	Método A - Aplicação direta	73
3.3.2	Método B - Aplicação a partir de regressão linear	75
3.3.3	Método C - Aplicação a partir de dois ensaios (sem o solo natural)	78
3.3.4	Método D - Estimativa de recalques de edificação	82
3.4	Partição de Carga e Efeito de Grupo	88
3.4.1	Efeito de Grupo	89
3.4.2	Correlação com Mandolini (2012)	91
4.	VALIDAÇÃO NUMÉRICA	95
4.1	Hipótese Elástica	95

4.1.1	Avaliação da Influência do Espaçamento relativo _____	102
4.1.2	Influência do Carregamento _____	103
4.1.3	Principais conclusões acerca Hipótese Elástica _____	104
4.2	Hipótese Elasto-Plástica _____	106
5.	RESULTADOS E APLICAÇÕES _____	112
5.1	Primeira aplicação – Poulos (2001) _____	114
5.2	Edifício Akasaka em São Paulo, (POULOS, 2000) _____	118
5.3	O caso do Treptowers, Alemanha, (Katzenbach, 2015) _____	124
5.4	Campo Experimental da UNB _____	128
5.4.1	Estudo UNB1 – Sales 2000 _____	129
5.4.2	Estudo UNB2 – Passos 2005 _____	138
5.5	Edificação no bairro do Parnamirim, Recife/PE _____	144
5.5.1	Ensaio de Caracterização _____	146
5.5.2	Ensaio de Placa _____	148
5.5.3	Aplicação da Metodologia Proposta _____	151
5.6	Residencial na Praia do Cupe, Ipojuca/PE _____	163
5.7	Duas Torres no Rosarinho, Recife/PE _____	175
5.7.1	Recalques e velocidades estimadas _____	181
5.8	Tanques de Suape: Retro análise _____	184
5.9	Resumo dos resultados _____	198
5.9.1	Rigidez Relativa estaca-placa x Comprimento Relativo _____	199
5.9.2	Recalques Medidos x Recalques Ajustados _____	200
5.9.3	Proposta para modificação de Mandolini (2012) _____	201
6.	CONCLUSÕES _____	208
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS _____	210
	REFERÊNCIAS _____	211
	APÊNDICE A – PERFIS GEOTÉCNICOS DOS CASOS LOCAIS _____	219
	APÊNDICE B – BANCO DE DADOS DE OBRAS DE RADIER ESTAQUEADO _____	224

1. INTRODUÇÃO

[...] o homem de ciência, ao abordar uma determinada questão, seleciona aquelas que julga mais significativas ao tratamento do caso considerado. Faz-se, assim, uma modelagem da realidade. Mas, então, a solução oferecida é sempre uma redução, apenas uma aproximação daquilo que a natureza sugerira” (BICUDO, 2009).

Historicamente, os fenômenos físicos são descritos com base em duas perspectivas: a partir da observação da realidade (física de Aristóteles) ou a partir do mundo das ideias e das concepções humanas (pensamento de Platão). Para Vargas (1996), em seu livro a História da Matematização da Natureza, “a expressão dessa realidade dual está justamente nas equações matemáticas, quando essas recebem o veredicto da comprovação experimental”. Dessa forma, o ápice do desenvolvimento tecnológico e descritivo da natureza acontece no momento em que se encontram a capacidade de dedução matemática a partir de premissas estabelecidas, e a verificação experimental prática tangível, e verificável pelo método científico. Assim o papel do cientista é modelar a realidade com a finalidade de selecionar, reduzir ou ampliar a gama de variáveis ao ponto que o modelo se torne aderente à massa de dados mensurados empiricamente. Fundamentado pela consciência de que o modelo sempre será um estimador da verdade natural.

A principal consequência dessa premissa supracitada, consiste em que o modelo não é o fenômeno, mas apenas uma forma de descrevê-lo ou representa-lo. Em segunda instancia, entende-se e percebe-se que o modelo não é fechado em si mesmo, sendo um recorte da capacidade de abstração de uma era, ou de uma geração, que de fato deve ser ampliado com o passar dos anos e aprofundamento do entendimento sobre o fato. A ciência é construída e reformada. Em constante reforma e evolução.

Essa é a razão pela qual as normas são atualizadas e revisadas periodicamente. Pois entende-se que a boa prática da engenharia, bem como os

conhecimentos agregados, se desenvolve no tempo.

Pode-se observar a aplicação desse paradigma para a norma brasileira de fundações NBR 6122/2019 (ABNT, 2022). A qual evoluiu em relação a forma de analisar as fundações diretas e profundas. Modificações quanto aos critérios de avaliação e verificações foram alteradas e novos conceitos incorporados, como por exemplo os coeficientes parciais de segurança. Anexos a norma foram criados para detalhar e especificar a execução das fundações mais recorrentes no país. Porém, em seu escopo, o mesmo documento deixa claro que não contempla as fundações mistas como radier estaqueado ou sapatas estaqueadas, bem como as soluções de melhoramento de solos. Ao passo que a norma não define a forma de análise deste tipo de fundações, os edifícios mais altos do país são construídos com esse tipo de solução de fundação. Existe uma lacuna brasileira acerca do tema das fundações mistas.

Enquanto o Brasil constrói (radier estaqueado) sem diretrizes, internacionalmente existe muito debate sobre o tema associado a aprofundamentos das formas de pensamento, concepção e execução do radier estaqueado. Assim como seus princípios de verificação em projeto. Os edifícios mais altos do mundo foram construídos assentes sobre esse tipo de fundação há pelo menos 15 anos, como é o caso do Burj Khalifa, construído em 2007. Por essas e tantas razões pesquisadores investiram esforços em décadas passadas para consolidar conhecimentos em torno do assunto. Muitos deles juntos escreveram o manual internacional de fundação em radier estaqueado (Combined Pile-Raft Foundation Guideline, 2013) chancelado pela Associação Internacional de Mecânica dos Solos (ISSMGE) em seu comitê técnico de fundações (TC 212). Segundo os próprios editores o manual foi escrito devido a necessidade de uniformização das etapas de projeto e verificação para todo o mundo. Mas, embora seja um avanço, ainda pelas palavras dos editores o manual serve como orientação geral, mas não como um código de projeto com valores exatos ou quantificação. Assim como em outros projetos de estruturas de fundações a filosofia de concepção perpassa por verificações de estados limites últimos (ELU) e verificações de estado limites de serviço (ELS), bem como o entendimento que as estacas no sistema podem servir apenas como elemento redutor de recalques não necessariamente trabalhando com fator de segurança igual ao do modelo de fundações profundas tradicionais.

Inicialmente para a solução de uma fundação, são escolhidas alternativas de fundações diretas, ora por sua facilidade de execução, ora por seu preço reduzido. Porém, devido ao contexto geotécnico dos solos, existem cenários possíveis em que o sistema de fundação direta não atende a critérios de estado limite de serviço. Principalmente em regiões de baixadas e planícies onde se espera encontrar solos de baixa capacidade de suporte, ou de alta compressibilidade. Dessa forma, os deslocamentos estimados se mostram superiores aos deslocamentos admissíveis para a estrutura. Em outras palavras, o recalque encontrado para soluções sem estacas ($N=0$) pode ser superior ao recalque admissível. Em casos assim, a solução de fundação tradicionalmente proposta consiste no uso de fundações profundas, com número de estacas $N>0$, onde toda a carga dos pilares é transferida para a fundação por meio do bloco de coroamento. Para os projetos tradicionais não existe meio termo entre a dicotomia das soluções rasas e profundas. Além de tudo a parcela de solo em contato com o bloco de coroamento é negligenciada na avaliação de cargas e deslocamentos. Porém, é comum que o uso de fundações profundas concebidas, projetadas e executadas a partir dessas premissas apresente recalques diminutos, menores até do que os recalques admissíveis. De forma que, representam, por vezes, uma situação segura, porém mais onerosa do que o necessário para satisfazer o ELU.

Estabelecida a relação entre o número de estacas e o recalque, e observado que com o aumento do número N de estacas são esperadas reduções significativas dos deslocamentos da estrutura, o próximo passo é avaliar como se realiza a variação entre recalque e número de estacas, ou, em pensamento alternativo, qual seria a demanda de estacas para se atingir o recalque admissível.

O problema enunciado anteriormente questiona qual seria o formato da curva de correlação entre recalque e demanda por estacas, e se essa curva pode ser escrita em termos analíticos. Pois a sua forma incorrerá em demandas de estacas maiores ou menores para obtenção do recalque admissível. Para o caso linear o número de estacas estaria incluído na vizinhança do número de estacas do sistema de fundações profundas, porém à medida que a curva deflete a demanda diminui se afastando do comportamento de fundação profunda tradicional.

Segundo Poulos (2001) faz-se necessária a estimativa da demanda de estacas para se reduzir os recalques até valores considerados admissíveis, contudo, para se obter a variação do recalque médio da edificação com o aumento do número de

estacas são necessárias planilhas computacionais de interação para encontrar o número N de estacas. Em etapas posteriores esse número pode ser otimizado, porém com variações não muito expressivas na ordem de grandeza da demanda de estacas para o sistema. Esse fato condiz com o conhecimento acumulado acerca de interação solo-estrutura onde a locação das peças influencia diretamente no recalque diferencial, mas não tão ativamente em termos de recalques médios (Gusmão, 1990).

Os métodos postos atualmente para avaliação da variação do recalque com o número de estacas necessitam de vários parâmetros de entrada que em dadas ocasiões específicas, e principalmente o contexto regional, podem ser de difícil obtenção (como ensaios de campo especiais e provas de carga anteriores ao projeto de fundações).

Embora ainda sejam realizados esforços nesse sentido, fica clara a necessidade de avanço das fronteiras do conhecimento de forma a se obter métodos e formulações matemáticas teoricamente robustas mas de uso prático o suficiente para a estimativa da demanda de estacas pelo sistema de fundação em radier estaqueado, sem a necessidade de lançar mão de planilhas interativas com vários parâmetros ou métodos matemáticos muito sofisticados que não condizem com a etapa inicial de concepção de projeto.

1.1 Objetivo Geral

Apresentar metodologia analítica para estimativa de recalque médio em radier estaqueado.

1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver revisão crítica da literatura, utilizando estudo bibliométrico como critério, para obter casos em que se possa aplicar a metodologia proposta;
- Desenvolver a proposta matemática para entendimento do sistema de fundações a partir do conceito expandido de radier estaqueado;
- Estimar os parâmetros necessários para aplicação da metodologia a partir de métodos empíricos consagrados e avaliar seu grau de aproximação;
- Validar a proposta através de análise numérica por meio de dois softwares de

elementos finitos, a fim de confirmar o princípio físico apresentada na metodologia;

- Aplicar as formulações desenvolvidas na metodologia para casos de obra ou de pesquisas internacionais, nacionais e locais;
- Avaliar a capacidade do método em indicar: efeito de grupo, deformações por colapso, velocidade de recalques, coeficientes de amortecimento.

1.3 Hipótese

O recalque médio de sistema de fundação em radier estaqueado pode ser obtido de forma analítica em função do número de estacas por uma única equação, essencialmente explicitada pela rigidez relativa estaca-placa.

1.4 Delimitações

Para o presente trabalho foi utilizada a aproximação de diferenciais por método das diferenças finitas obtidas a montante baseada na série de Taylor, onde são esperados ajustes aproximados para trechos pseudo-elásticos. Para o caso de hipóteses de diagramas carga x recalque curvos, aproximações obtidas a partir de diferenças finitas centradas devem se mostrar mais apropriadas.

1.5 Apresentação da estrutura do trabalho

Para o melhor entendimento desde a formulação, validação e aplicação da metodologia, o trabalho foi dividido em capítulos nos quais conclusões parciais são apresentadas.

O Capítulo 2 versa sobre um panorama das fundações em radier estaqueado no mundo, delineamento e construção de banco de dados de radier estaqueado pelo mundo, apresentando aplicações para o propósito do trabalho.

O Capítulo 3 apresenta o núcleo básico da metodologia, com a apresentação das premissas e hipóteses simplificadoras adotadas, bem como a demonstração matemática até a obtenção da formulação final. São apresentadas marchas de

cálculo, ou métodos próprios para contextos específicos para facilitar a aplicação da formulação. É realizada uma demonstração paramétrica da variação do parâmetro de rigidez relativa sobre os recalques médios estimados. São desenvolvidas formulações para análise de: efeito de grupo, partição de carga e estimativa de parâmetros a partir da metodologia proposta por Mandolini (2005) e Mandolini (2012).

O Capítulo 4 se concentra em apresentar a validação numérica utilizando-se de 48 modelagens em software comercial de elementos finitos para a hipótese elástica (Elpla) e 8 modelagens em software comercial que contempla a hipótese plástica (Plaxis – versão introdutória).

O Capítulo 5 apresenta os resultados encontrados para a aplicação da metodologia em diversos casos de obra/pesquisa obtidos para a verificação da aderência da formulação apresentada com o desempenho dos ensaios de placa e medições de recalques em obras reais. É apresentada uma proposta de estimativa da rigidez relativa estaca-placa a partir da geometria do problema a ser resolvido.

Por fim, o Capítulo 6 compila e enumera as principais conclusões encontradas de forma holística e panorâmica interligando os resultados apontando para uma síntese do conhecimento acumulado.

2. LEVANTAMENTO E AVALIAÇÃO CRÍTICA DA LITERATURA

2.1 Estudo Bibliométrico

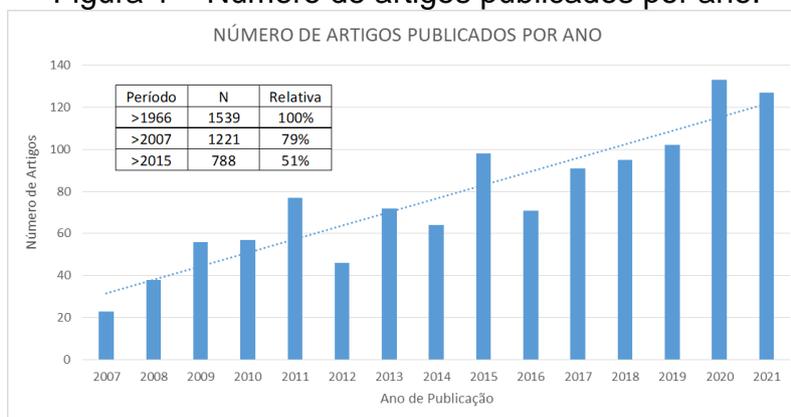
Inicialmente, para desenvolver uma revisão bibliográfica que efetivamente avalie os principais trabalhos sobre um dado tema, é comum desenvolver um estudo bibliométrico que avalie os trabalhos mais relevantes para dar subsídio ao desenvolvimento dos objetivos em questão. Dessa forma foi realizado um estudo dessa natureza utilizando a plataforma SCOPUS, mantida pelo grupo editorial ELSEVIER. Para a pesquisa foram utilizados os termos “Pile” e “Raft”. Não foram restringidas as fontes do material, nem a língua em que foi escrito. O termo de pesquisa final é apresentado por meio da Tabela 1. A pesquisa foi definida para dar preferência as ocorrências mais relevantes a partir do título, do resumo e das palavras-chave.

Tabela 1 – Pesquisa na base SCOPUS

Termo Utilizado Para Pesquisa	TITLE-ABS-KEY (pile AND raft)
-------------------------------	---------------------------------

Foi encontrado um total de 1.539 artigos, distribuídos entre 1966 e 2022 com tendência de crescimento nos últimos 15 anos, porém com maior concentração de publicação a partir de 2015 (788, 51%, conforme Figura 1). Com predominância de artigos publicados em Periódicos (938, 60%), e Conferências (419, 27%). Escritos principalmente em língua inglesa (1.275, 82,84%), e chinesa (215, 14%).

Figura 1 – Número de artigos publicados por ano.



Fonte: Base Scopus, adaptado.

A plataforma ainda lista os principais autores que publicaram trabalhos relativos a esse tema, essa lista é apresentada por meio da Tabela 2.

Tabela 2 – Principais autores

Autor	Número de Publicações
Yamashita, K.	40
Hamada, J	36
Poulos, H.G.	36
Matsumoto, T.	33
Kitiyodom, P.	21
Katzenbach, R.	19
Saha, R.	18
Small, J.C.	17
Haldar, S.	16
Yang, M.	15

Fonte: Autoria Própria

2.1.1 Estudo de Citações

Com o objetivo de entender e avaliar quais artigos representavam maior centralidade, é possível manipular a plataforma para listar em ordem decrescente os artigos mais citados ao longo do período, e desta forma elencar os principais trabalhos desenvolvidos com base em sua relevância para o desenvolvimento de outras pesquisas. A saída do sistema SCOPUS é apresentada por meio da Figura 2. É possível observar crescimento das citações aos trabalhos desenvolvidos sobre o tema ao longo do período observado. Em especial um crescimento acima da tendência para os anos de 2020 e 2021 (os anos de maior intensidade da pandemia sanitária internacional).

Figura 2 – Citações por ano.



Fonte: Base Scopus.

Os dados obtidos de citações por ano, são divididos por autor, e podem ser ordenados de forma decrescente com o número total de citações. Assim é possível se obter a lista dos trabalhos publicados mais citados para todo o período de avaliação, conforme apresentado por meio da Tabela 3. É possível observar que existe uma predominância dos trabalhos desenvolvidos por pesquisadores da Austrália (os 6 primeiros colocados) como Mark Randolph e Harry Poulos. Esses pesquisadores juntos, em seus trabalhos de 2003 e 2001 respectivamente somaram 895 citações.

Outros países como: (i) Itália com os professores Alessandro Mandolini, Carlo Viggiani e Gianpiero Russo, bem como a (ii) Alemanha com os professores Oliver Reul e Rolf Katzenbach figuram nas primeiras colocações. Vale salientar que os trabalhos mais citados foram desenvolvidos entre 1981 e 2006 com período principal de citações entre os anos de 2001 e 2005, como pode ser observado por meio da Figura 3. Esses trabalhos servirão de base para o desenvolvimento da revisão bibliográfica, uma vez que são os mais citados pelos trabalhos recentes que se desenvolvem a partir deles.

Tabela 3 – Artigos mais citados

Índice	Periódico	Autor/Referência	País de origem dos autores	Total de Citações
1	Geotechnique	Randolph M.F. (2003)	Austrália	504
2	Geotechnique	Poulos H.G. (2001)	Austrália	391
3	IJNAMG	Balaam N.P., Booker J.R. (1981)	Austrália	269
4	IJNAMG	Clancy P., Randolph M.F. (1993)	Austrália	181
5	Geotechnique	Horikoshi K., Randolph M.F. (1998)	Austrália	164
6	IJNAMG	Poulos H.G. (1994)	Austrália	150
7	Geotechnique	Mandolini A., Viggiani C. (1997)	Itália	125
8	JHE	Coleman S.E. (2005)	Nova Zelândia	120
9	JGGE	de Sanctis L., Mandolini A. (2006)	Itália	119
10	CG	Liang F.-Y., Chen L.-Z., Shi X.-G. (2003)	China	119
11	JGGE	Prakoso W.A., Kulhawy F.H. (2001)	Estados Unidos	119
12	JGGE	Reul O., Randolph M.F. (2004)	Alemanha/Austrália	117
13	Geotechnique	Reul O., Randolph M.F. (2003)	Alemanha/Austrália	115
14	16th ICSMGE	Mandolini A., Russo G., Viggiani C. (2005)	Itália	111
15	Geotechnique	Horikoshi K., Randolph M.F. (1996)	Japão/Austrália	109

IJNAMG - International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics

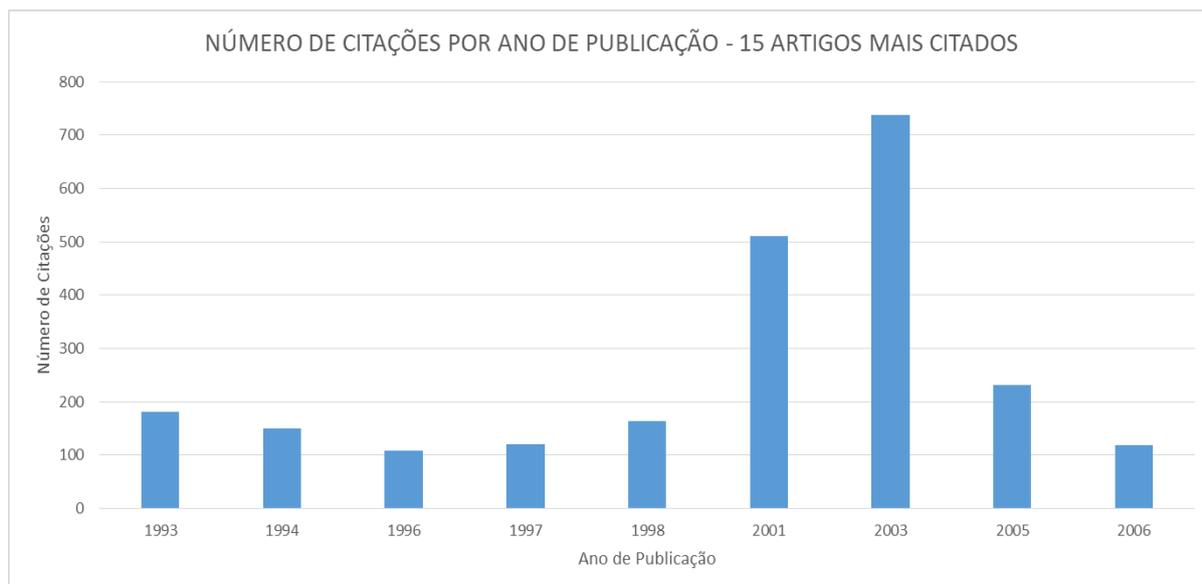
JHE - Journal of Hydraulic Engineering

JGGE - Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering

CG - Computers and Geotechnics

ICSMGE - International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

Figura 3 – Número de citações dos artigos mais citados, por ano.



Fonte: Autoria Própria a partir da Base Scopus

2.2 A relação entre grupo de estacas e radier estaqueado

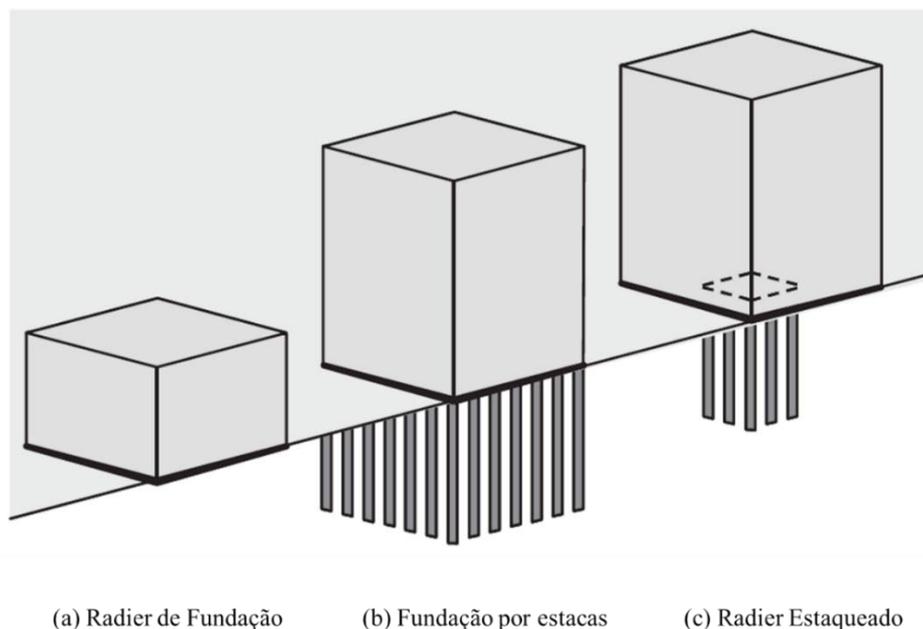
O trabalho mais citado do tema, do professor Randolph (2003), aborda diversos assuntos da engenharia de fundações, e em certo trecho se dedica a avaliar as similaridades entre uma fundação realizada por estaqueamento convencional, ou grupo de estacas, e um radier estaqueado. O autor afirma que os projetos tradicionais por estacas verificam estados limites de deslocamento (Estado limite de serviço) e contra o colapso (Estado Limite Último), normalmente considerando que as estacas isoladas rompem para dado deslocamento (que pode ser assumido de forma arbitrária comumente como 50 mm, 100 mm, ou uma relação com o diâmetro da estaca, que varia entre 10 e 15% do diâmetro). Porém, o estado limite que mais se aproxima da realidade deveria levar em consideração a interação solo-estrutura e modelar o sistema como um todo, avaliando as tensões e deformações por completo. Nesse contexto o sistema de fundações pode ser avaliado como sendo composto por várias estacas com ou sem o elemento horizontal (placa ou tampo) que está em contato com o solo, conforme Figura 4, em 4a apenas o elemento horizontal é considerado na transferência de cargas; em 4b, apenas os elementos verticais são considerados (Fundação por estacas – grupo de estacas); e em 4c, ambos (Radier Estaqueado).

Desta forma o radier estaqueado representa uma situação mais geral do sistema de fundações que pode variar entre os limites de fundação totalmente

superficial (Figura 4a), ou totalmente em profundidade (Figura 4b), em que esses seriam casos particulares daquele.

Ainda segundo o autor existe uma relação entre a largura (B) da fundação com o comprimento (L) das estacas que sugere qual o comportamento que o sistema de fundação tende a assumir. Para valores em torno de $B/L < 1$, as fundações são chamadas de “estreitas” e convergem para um comportamento de grupo de estacas (onde a reação do solo entre estacas não é significativa). No caso de $B/L > 1$ as fundações começam a se mostrar mais flexíveis e os recalques diferenciais são mais relevantes, então, a partir desse valor as fundações são chamadas de “amplas” e devem ser melhor avaliadas quanto a deslocamentos e distorções, e o elemento horizontal do sistema tem parcela significativa de transferência de carregamentos para o subsolo e as estacas assumem o papel de elemento redutor de recalques.

Figura 4 – Transição do sistema de (a) Fundação direta para (b) Grupo de estacas, passando pelo radier estaqueado (c).



Fonte: Randolph (2003), adaptado.

As estacas foram primeiramente definidas como elementos redutores de recalques por Zeevaert (1957). Esse raciocínio apresentado é sintetizado na Figura 5.

Figura 5 – Quadro resumo do comportamento esperado de fundações.

Relação entre largura horizontal e comprimento das estacas (-)	Comportamento esperado
B/L < 1	<ul style="list-style-type: none"> • Fundações “estreitas”; • Grupo de estacas; • Parcela de carga transferida ao solo superficial não é significativa.
B/L > 1	<ul style="list-style-type: none"> • Fundações “amplas”; • Radier estaqueado; • Cargas transferidas superficialmente pelos elementos horizontais são relevantes.

Fonte: Adaptado de Randolph (2003)

Um outro coeficiente para avaliação do sistema de fundações foi definido por Katzenbach e Reul (1997) como Coeficiente de radier estaqueado (α_{pr} – Equação 1), esse coeficiente consiste na relação entre a parcela de cargas atuante nas estacas ($\sum R_{estacas}$) em relação a carga total aplicada (R_{total}). Por definição esse coeficiente seria igual a zero para fundações diretas, e igual a unidade para fundações profundas com elemento horizontal sem contato com o solo. O caso de radier estaqueado apresentaria valores para α_{pr} entre 0 e 1 (Expressão 2). Esse coeficiente foi posteriormente chamado por Mandolini et al (2013) de relação de partição de carga. Em julho de 2013 foi lançado o documento da Associação Internacional de Mecânica dos Solos (ISSMGE) com as diretrizes para o projeto de radier estaqueado (Katzenbach e Choudchoury, 2013) onde os dois autores participaram da elaboração do material, e o coeficiente é apresentado como Coeficiente de radier estaqueado e apresentado com a simbologia de α_{pr} , que será adotada para esse trabalho. Vale salientar a participação do professor brasileiro Jarbas Milititsk. Em alguns outros trabalhos esse coeficiente pode ser representado como α_{KPP} , ou α_{CPRF} .

Segundo Katzenbach e Reul (1997) imaginando que a capacidade de carga do radier estaqueado seja obtida a partir da soma das resistências de todas as estacas ($\sum R_{estaca}$) acrescida da parcela de carga oriunda do contato entre a placa e o solo superficial (R_{placa}), é possível escrever a Equação 3 para a carga total da peça de

fundação. Apresentado segundo a Figura 6.

Dessa forma, a o sistema de fundação pode ser descrito por um coeficiente adimensional. E a Figura 4 apresentada por Randolph (2003) pode ser reapresentada sob a forma da Figura 7, proposta por Mandolini et al. (2013).

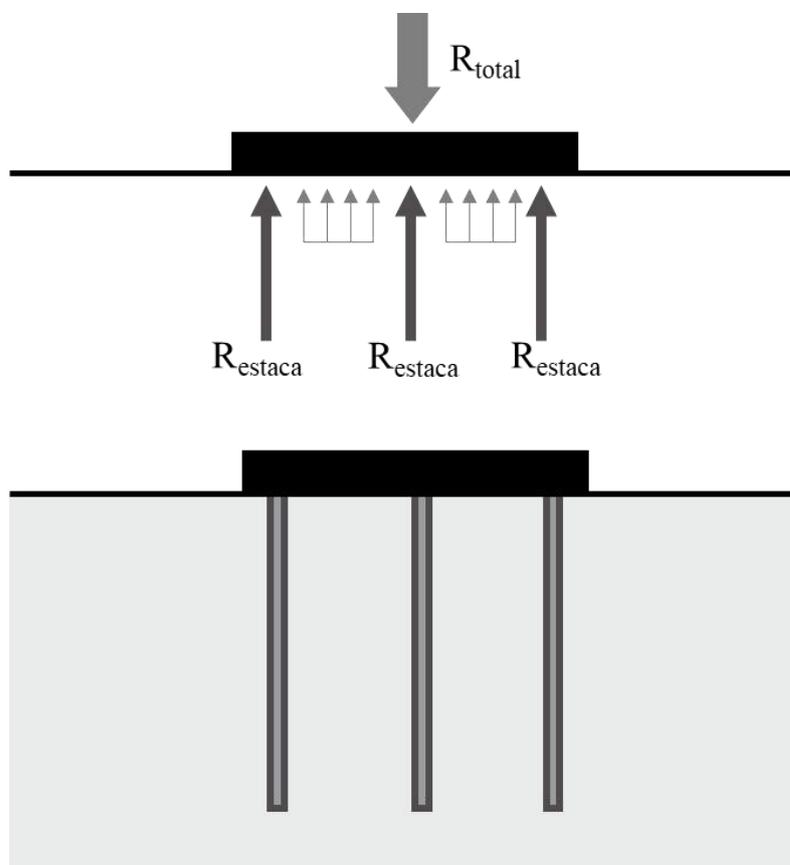
$$\alpha_{pr} = \frac{\sum R_{estaca}}{R_{total}} \quad (1)$$

$$0 \leq \alpha_{pr} \leq 1 \quad (2)$$

$$R_{total} = \sum R_{estaca} + R_{placa} \quad (3)$$

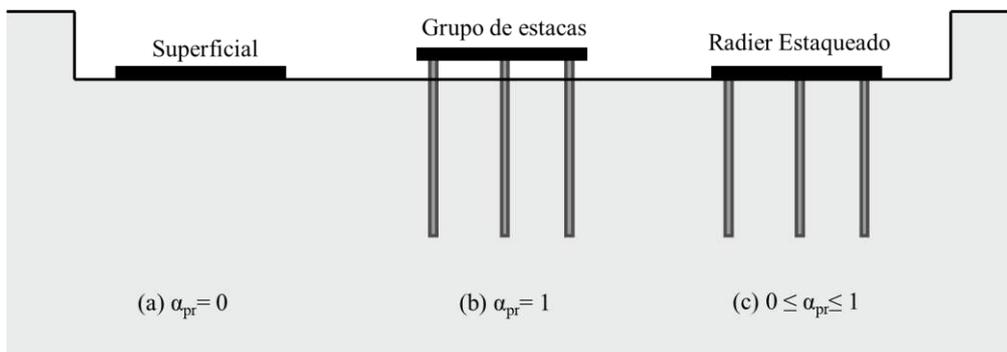
onde: α_{pr} = Coeficiente de radier estaqueado; $\sum R_{estaca}$ = soma das resistências de todas as estacas; R_{placa} = parcela de carga oriunda do contato entre a placa e o solo superficial; R_{total} = carga total aplicada.

Figura 6 – Sistema de cargas idealizado para o radier estaqueado.



Fonte: Adaptado de Katzenbach e Reul (1997)

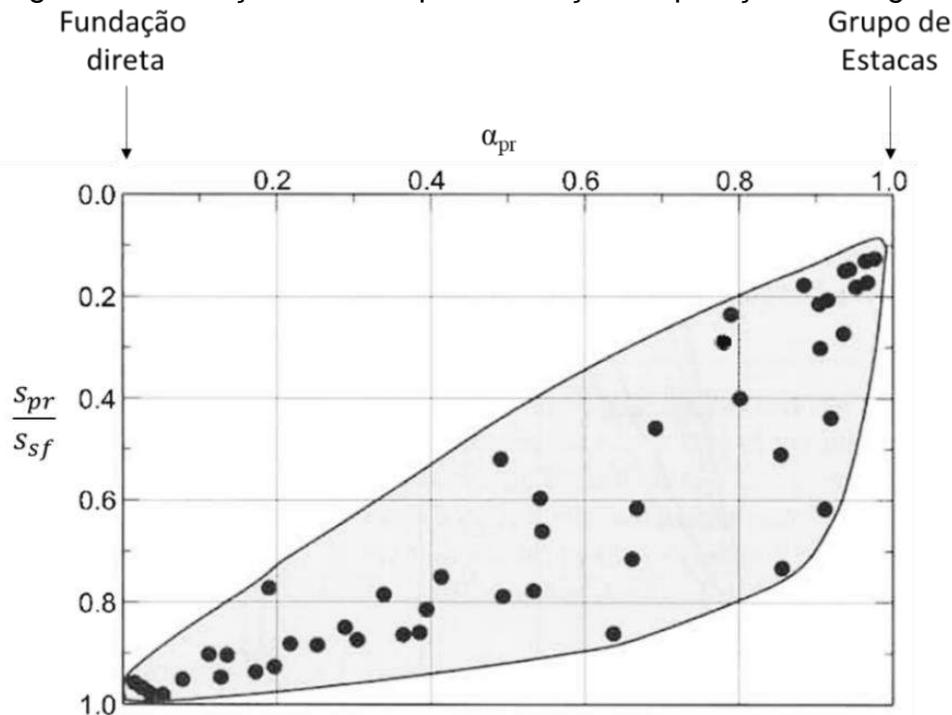
Figura 7 – Relação de α_{pr} para os casos particulares de fundações



Fonte: Mandolini et al (2013)

Semelhantemente às definições realizadas para os carregamentos, Katzenbach e Moorman (1998) definiram uma relação com fins de comparação para os recalques do radier estaqueado (s_{pr}) e os recalques de uma fundação direta de mesma geometria e mesmo carregamento, porém sem estacas (s_{sf} – segundo Reul, 2005, $\xi_s = s_{pr}/s_{sf}$). A Figura 8 apresenta a redução de recalque em função do coeficiente de Partição de Carga (α_{pr}).

Figura 8 – Redução de recalque em função da partição de cargas.



onde:

α_{pr} = coeficiente de radier estaqueado

s_{pr} = recalques do radier estaqueado;

s_{sf} = recalques de uma fundação direta de mesma geometria e mesmo carregamento

Fonte: Katzenbach e Moorman (1998), adaptado.

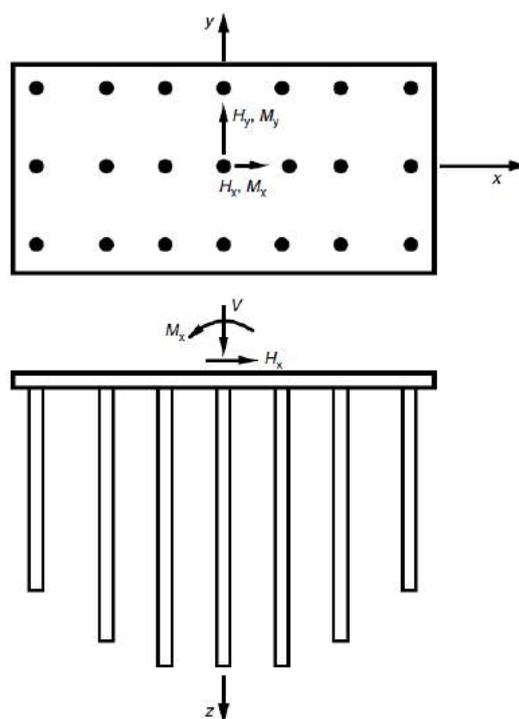
2.3 Filosofias de projeto

Durante a escolha do tipo de fundação a ser realizada para uma obra, em etapa de projeto, é comum que se procure na prática uma solução em fundação direta ou radier. Porém quando os recalques estimados se mostram superiores aos requisitos estruturais pode-se optar por associar a placa do radier com estacas com objetivo de reduzir os recalques do sistema (POULOS, 2001). Ainda segundo o autor os problemas que devem ser considerados para o projeto de um radier estaqueado inclui:

- Carga última geotécnica tanto para esforços verticais, horizontais e momentos;
- Recalque e Rigidez envolvidos no processo;
- Recalques diferenciais e rotações angulares (distorções);
- Movimentos laterais;
- Projeto estrutural de estacas e radier.

A Figura 9 apresenta de forma generalizada um radier estaqueado e os esforços a que estão submetidos (POULOS, 2000).

Figura 9 – Radier Estaqueado e esforços envolvidos.



Fonte: Poulos, 2000.

2.3.1 Filosofias de projeto e alternativas

Randolph (1994) apresentou um estado da arte para a Associação internacional de mecânica dos solos (ISSMGE) e tratou sobre as alternativas de filosofias de projeto que podem ser adotadas para radier estaqueado. Ele as dividiu em três (foram acrescentados comentários de POULOS, 2001):

- Convencional: onde o sistema é dimensionado como um grupo de estacas, com espaçamento regular entre estacas que estão distribuídas de forma completamente uniforme abaixo da área de projeção da fundação (Randolph, 1994). As estacas absorvem a maior parte do carregamento (POULOS, 2001);
- Estacas de fluência (*Creep Piling*): Segundo Randolph (1994), os primeiros trabalhos que estudaram esse assunto foram os de Hansbo e Källström (1983), e cada estaca é dimensionada para uma carga elevada, próxima a carga de ruptura do sistema solo/estaca (em torno de 70 a 80% da carga última da estaca). Estacas suficientes são colocadas para reduzir o contido da placa com o solo a valores inferiores a tensão de pré-adensamento do solo (POULOS, 2001);
- Controle de recalque diferencial: Os métodos anteriores tendem a considerar as estacas distribuídas uniformemente. Por esses métodos os recalques diferenciais são reduzidos como uma consequência da redução do recalque médio (RANDOLPH, 1994). Porém, uma abordagem mais direta é projetar e locar as estacas de forma estratégica para reduzir os recalques diferenciais, sem necessariamente reduzir o recalque médio (POULOS, 2001).

A Figura 10 apresenta quatro curvas idealizadas por Poulos (2001), para apresentar o comportamento esperado do sistema de fundações para as diversas filosofias de projeto apresentadas por Randolph (1994).

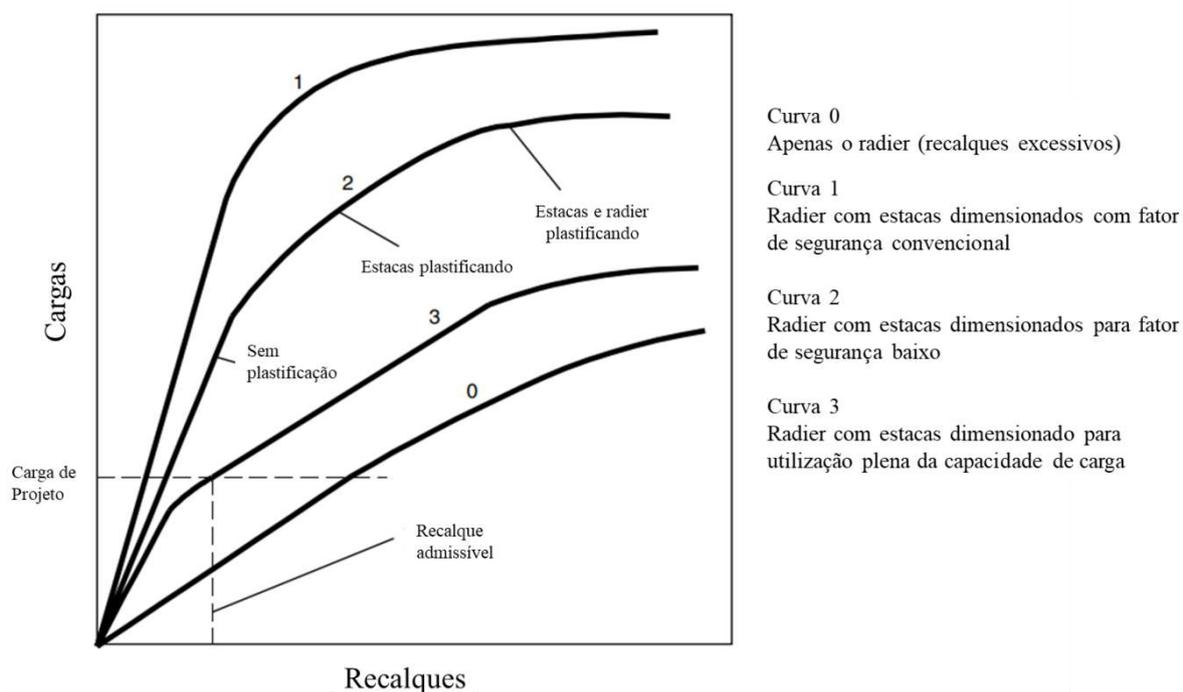
Com um nível de deslocamento excessivo é apresentada a curva 0, com os maiores recalques esperados para um dado nível de carregamento. Ou, de outra forma, apresentando uma carga admissível de projeto reduzida para o recalque admissível. Já a curva 1 apresenta a curva de projeto idealizada para um

dimensionamento dito convencional, onde toda a carga é transferida ao solo pelas estacas, e a parcela de carga referente ao contato do radier com o solo é considerada insignificante para o sistema.

Essa filosofia apresenta a maior rigidez final do sistema e a maior capacidade de carga para o recalque admissível. Normalmente esse projeto leva em consideração os fatores de segurança globais previstos em norma para as estacas.

As curvas 2 e 3 representam o comportamento de um radier estaqueado. A curva 2 com um fator de segurança reduzido em relação as normas vigentes, e a curva 3 sem fator de segurança associado, ou seja, as estacas são projetadas para valores muito próximos da sua ruptura. Esse seria o método de estacas de fluência. A curva 3 em relação a curva 0 apresenta maior rigidez, e maior capacidade de carga para o recalque admissível, mesmo que as estacas já estejam em regime plástico.

Figura 10 – Curvas carga x recalque, em função dos diversos tipos de filosofias de projeto.



Fonte: Adaptado de Poulos, 2001 (tradução livre).

2.3.2 Etapas de Projeto

Em seu trabalho, o segundo mais citado na plataforma Scopus, Poulos (2001) sugere que o processo de projeto de um radier estaqueado siga três etapas:

- Um estágio inicial onde é avaliado o uso desse tipo de solução e são encontradas o número de estacas que satisfaça os critérios de projeto para a obra em questão;
- O segundo estágio é caracterizado pela definição das características gerais de todo o sistema, das estacas e do radier, bem como a disposição do estaqueamento;
- Por fim, é realizado o estágio de projeto detalhado, onde se obtém o número ótimo e a locação das estacas, e são verificados de forma detalhada os recalques, os momentos e cortantes na placa, e os esforços nas estacas.

Ele sugere ainda que os estágios 1 e 2 devem ser realizados com cálculos simplificados, sem a necessidade de uso de programas complexos. Porém o estágio 3 deve envolver softwares mais robustos para a verificação da interação solo-estrutura e detalhamento dos esforços nas peças de fundação.

O presente trabalho tem objetivo de contribuir para o estágio inicial onde são avaliados os recalques médios estimados e a determinação da ordem de grandeza do número de estacas necessário para o projeto de obras com esse tipo de fundações, por essa razão apenas o estágio preliminar será detalhado nesse capítulo.

2.4 Compilação dos resultados de medição de recalques para radier estaqueado

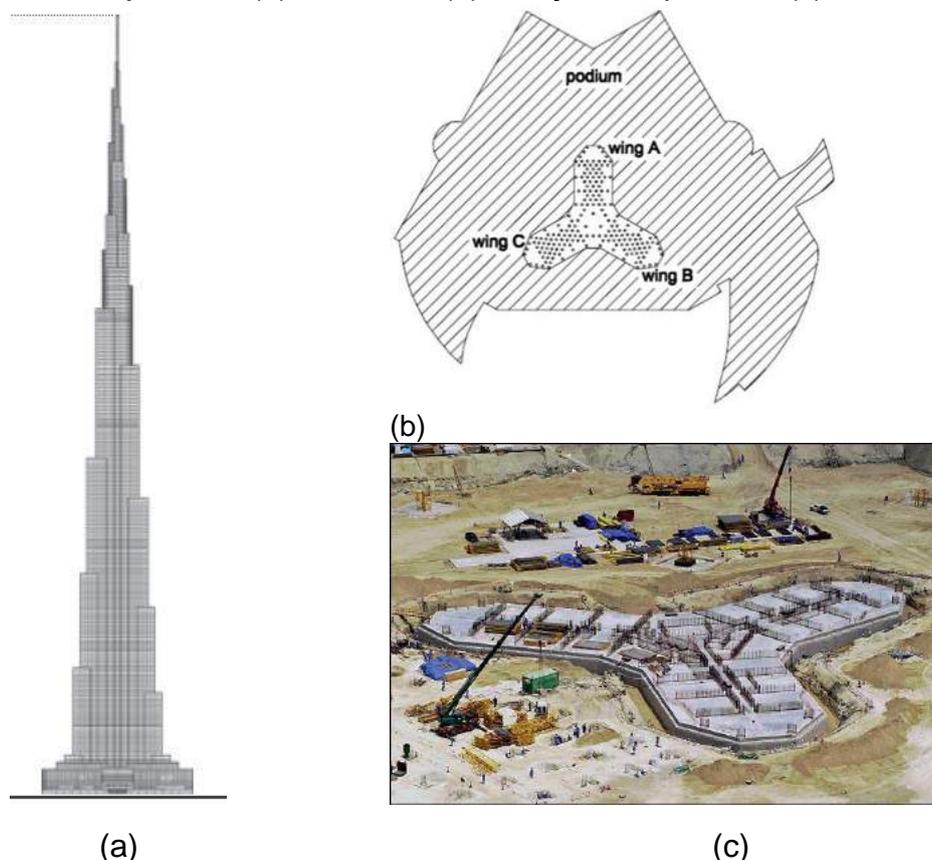
Ao avaliar os artigos de Randolph (2003) e Poulos (2001), são verificados alguns casos de obras e alguns detalhes referentes a edifícios específicos construídos sobre radier estaqueado. Do aprofundamento da revisão bibliográfica por meio da leitura de artigos referentes a casos de obras, foram encontrados outros dados de edificações reais dentre os quais muitos edifícios icônicos internacionais a exemplo

do Burj Khalifa, o edifício mais alto construído até o momento (POULOS e BUNCE, 2008; RUSSO et al, 2012; BADELOW e POULOS , 2016, ver Figura 11), do Messenturn, Maintower e Commerzbank, construídos sobre o subsolo bastante estudado de Frankfurt na Alemanha, (KATZENBACH, 2016, Figura 12), e o Shangai Tower na China apresentado na Figura 13 (ZHAO E LIU, 2017).

A partir desse aprofundamento da literatura foi possível obter informações relevantes dos edifícios tais como:

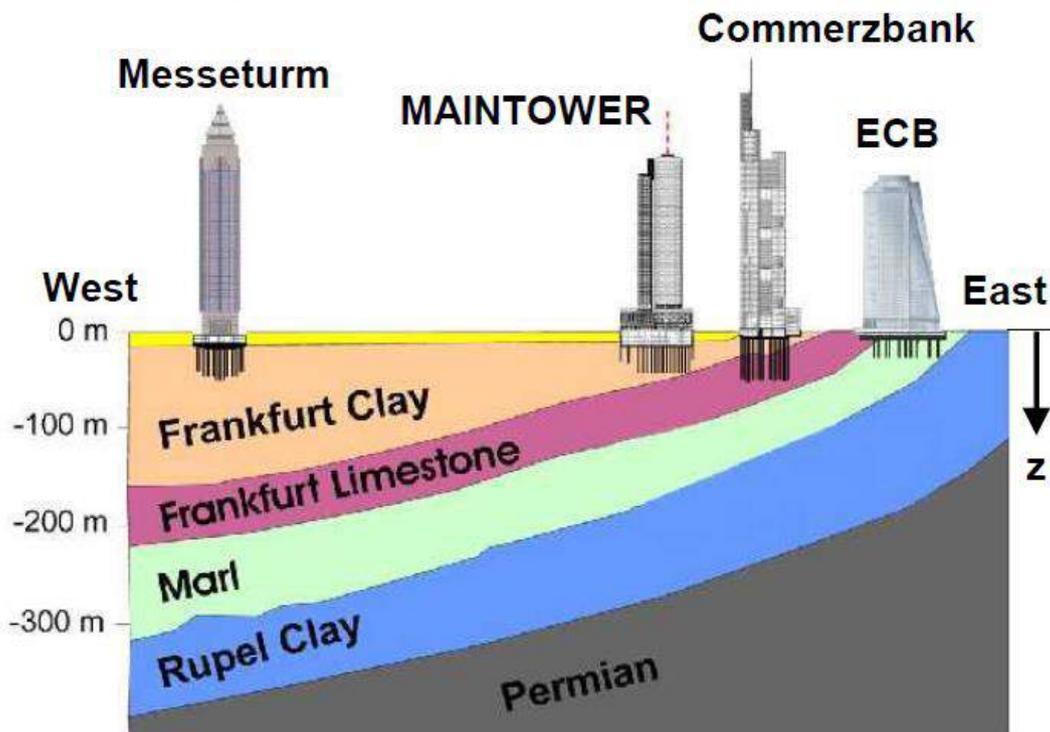
- Período de construção;
- Local de construção;
- Espessura do radier;
- Altura do Edifício;
- Comprimento das estacas;
- Espaçamento entre estacas;
- Recalques medidos.

Figura 11 – Burj Khalifa (a) em corte, (b) locação em planta e (c) em execução.



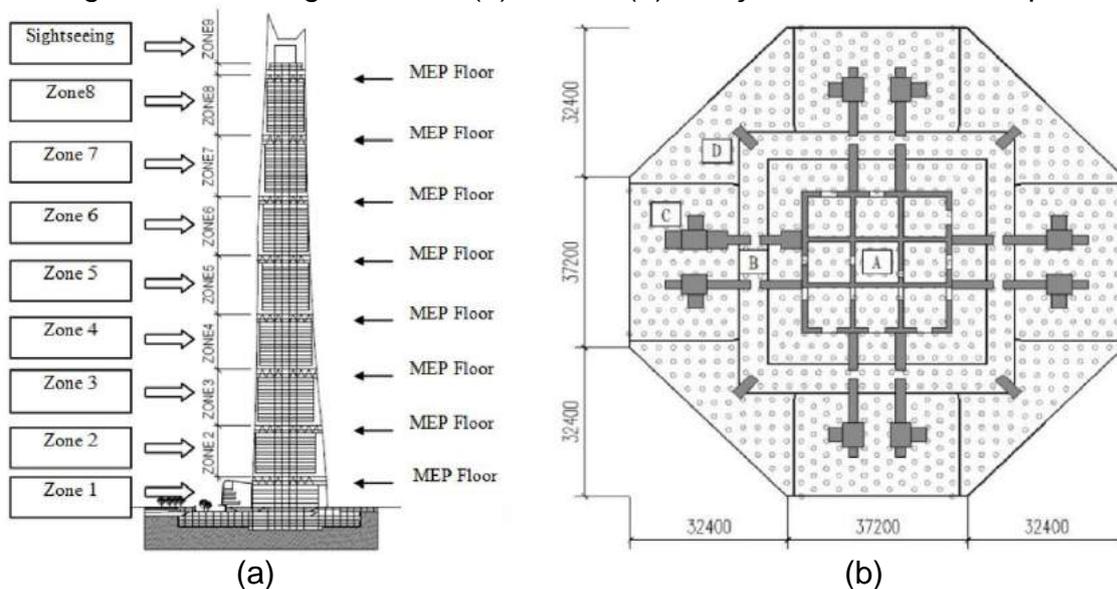
Fonte: (a) CBTUH (2022), (b) Russo et al (2012), (c) Poulos e Bounce (2008b)

Figura 12 – Edifícios construídos na Alemanha.



Fonte: Katzenbach (2016)

Figura 13 – Shanghai Tower (a) corte e (b) localização das estacas em planta.



Fonte: Zhao e Liu (2017)

Ao passo que o estudo do radier estaqueado era aprofundado, outras obras eram encontradas. Para não se estender na revisão bibliográfica, o resumo dessas obras é apresentado na forma de banco de dados. Foram listadas 75 obras (Apêndice B) descritas no banco de dados. As alturas das edificações variaram de 36 a 1.000 m, com áreas de 110 a 10.200 m², espessuras de radier variando entre 0,15 e 7,00 m, e

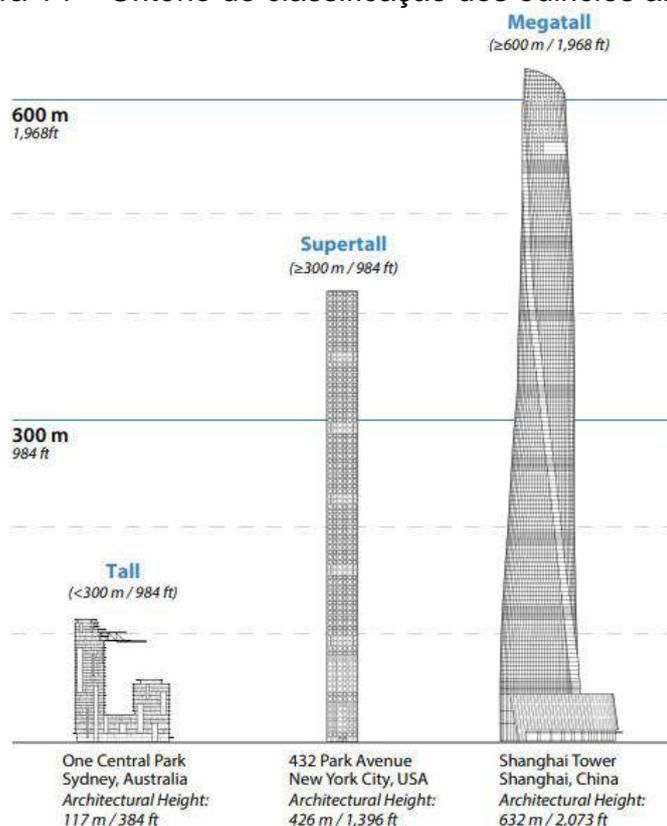
número de estacas variando de 16 a 1.242. O diâmetro (d) das estacas variou entre 0,15 a 2,5 m, e os espaçamentos (e) entre 1,20 e 12,00 m. O espaçamento relativo (e/d) variou entre 2,29 a 11,23. A partir desse banco de dados foi possível obter uma correlação entre altura do edifício e espessura do radier. Essa análise foi dividida em 3 classes seguindo o critério de classificação de edifícios altos propostos pelo Conselho de Edifícios Altos (Council on Tall Buildings and Urban Habitat – CTBUH, 2022), conforme apresentado na Figura 11. Por esse critério os edifícios se classificam em três grupos, conforme Tabela 4. O banco de dados resultante, bem como uma página dedicada a cada edificação em especial são apresentados nos apêndices deste trabalho.

Tabela 4 – Critério detalhado do CTBUH

Classificação	Critério
Alto	14 pavimentos ou 50 m, até 300 m
Superalto	300 até 600 m
Mega-Alto	Acima de 600 m

Fonte: Council on Tall Buildings and Urban Habitat – CTBUH, 2022.

Figura 14 – Critério de classificação dos edifícios altos.



Fonte: Council on Tall Buildings and Urban Habitat – CTBUH, 2022.

Foram obtidas 3 equações de correlação entre a altura da edificação e a espessura do radier que foi adotado como solução de fundações. Vale salientar que essas equações são produto de correlações com regiões do mundo todo, cada região com sua normatização vigente e divergentes entre si, porém os valores se mostraram da mesma ordem de grandeza.

Recomenda-se que essas equações sejam utilizadas apenas como indicativo de valores estimativos e que devem sempre ser submetidas ao crivo dos métodos racionais. As equações são apresentadas na Figura 15 e na Tabela 5 (onde são apresentados os valores encontrados e equações sugeridas, mais conservadoras e de mais fácil memorização).

Nos apêndices são apresentados todos os casos de obras reunidos para essa revisão. Cada edifício é apresentado em separado, e ainda é apresentado um resumo dos dados encontrados.

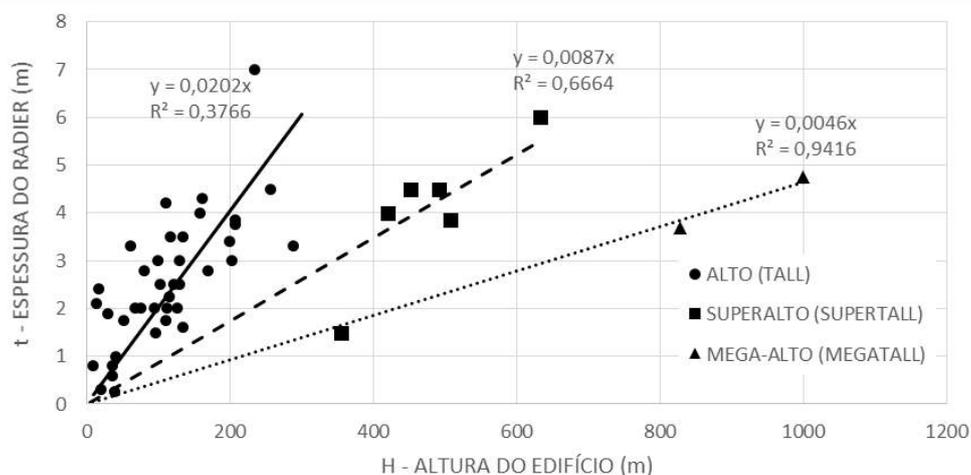
Tabela 5 – Correlações obtidas – valores encontrados e recomendados

Tipo de Edificação	Correlação	Coefficiente de Correlação (R ²)	Equação Recomendada
Alta	$t = 0,0202.H$	0,3766	$t = \frac{H}{50}$
Superalta	$t = 0,0087.H$	0,6664	$t = \frac{H}{100}$
Mega-alta	$t = 0,0046.H$	0,9416	$t = \frac{H}{200}$

onde: t = espessura do radier; H = altura do edifício.

Fonte: Autoria Própria a partir dos dados compilados para essa revisão.

Figura 15 – Correlação da espessura do Radier (t) com a altura do edifício (H).



Fonte: Autoria Própria, a partir da revisão da literatura.

2.5 A experiência de Recife e Região Metropolitana

Entre 2017 e 2019 foram realizados esforços em Recife para se mapear e compilar os dados referentes as fundações realizadas em radier estaqueado na cidade, e nos municípios ao redor que compõem a região metropolitana. Nesse período foi possível compilar 60 obras realizadas sobre o sistema de fundações, conforme Tabela 6, obtida do trabalho de Costa et al (2019).

Tabela 6 – Banco de dados de radier estaqueado para Recife (RMR)

IN	N. PAV	H (m)	A (m ²)	t (m)	N	TIPO	d (m)	L (m)	e (m)	e/d	L/e
1	4	12	515,38	0,26	30	ARGAMASSA	0,28	7,00	4,14	14,79	1,69
2	1	3	649,00	0,30	120	PRÉ-MOLDADA	0,30	14,00	2,33	7,77	6,01
3	4	12	513,17	0,35	34	PRÉ-MOLDADA	0,37	14,00	3,89	10,51	3,60
4	1	3	12,25	0,30	9	HÉLICE CONTÍNUA	0,50	30,00	1,17	2,34	25,64
5	1	3	47,58	0,30	20	HÉLICE CONTÍNUA	0,60	30,00	1,54	2,57	19,48
6	3	9	535,00	0,70	112	HÉLICE CONTÍNUA	0,60	24,00	2,19	3,65	10,96
7	1	3	300,00	0,25	25	PRÉ-MOLDADA	0,30	12,00	3,46	11,53	3,47
8	4	12	451,95	0,70	79	HÉLICE CONTÍNUA	0,50	30,00	2,39	4,78	12,55
9	4	12	133,00	0,25	30	PRÉ-MOLDADA	0,30	12,00	2,11	7,03	5,69
10	4	12	266,00	0,25	63	PRÉ-MOLDADA	0,30	12,00	2,05	6,83	5,85
11	4	12	413,82	0,35	42	AREIA E BRITA	0,30	9,50	3,14	10,47	3,03
12	4	12	224,00	0,30	174	ARGAMASSA	0,28	6,00	1,13	4,04	5,31
13	4	12	119,35	0,30	96	ARGAMASSA	0,28	6,00	1,12	4,00	5,36
14	4	12	477,84	0,20	41	PRÉ-MOLDADA	0,30	9,00	3,41	11,37	2,64
15	1	3	55,42	0,55	10	HÉLICE CONTÍNUA	0,40	19,00	2,35	5,88	8,09
16	8	24	497,23	0,35	108	HÉLICE CONTÍNUA	0,40	16,00	2,15	5,38	7,44
17	1	3	1029,32	0,20	231	ARGAMASSA	0,28	5,00	2,11	7,54	2,37
18	8	24	258,60	0,40	256	ARGAMASSA	0,28	6,00	1,01	3,61	5,94
19	4	12	531,88	0,30	268	ARGAMASSA	0,28	5,00	1,41	5,04	3,55
20	4	12	531,88	0,30	268	PRÉ-MOLDADA	0,28	8,00	1,41	5,04	5,67
21	8	24	475,62	0,60	613	AREIA E BRITA	0,30	3,00	0,88	2,93	3,41
22	8	24	420,00	0,35	108	PRÉ-MOLDADA	0,35	13,00	1,97	5,63	6,60
23	8	24	420,00	0,35	108	PRÉ-MOLDADA	0,35	13,00	1,97	5,63	6,60
24	4	12	120,00	0,26	30	ARGAMASSA	0,30	8,00	2,00	6,67	4,00
25	4	12	210,00	0,30	40	PRÉ-MOLDADA	0,35	6,00	2,29	6,54	2,62
26	4	12	210,00	0,30	40	PRÉ-MOLDADA	0,35	6,00	2,29	6,54	2,62
27	8	24	500,00	0,35	560	AREIA E BRITA	0,30	5,00	0,94	3,13	5,32
28	-	24,75	179,55	0,60	48	PRÉ-MOLDADA	0,40	28,00	1,93	4,83	14,51
29	-	-	246,38	0,30	44	ARGAMASSA	0,35	4,00	2,37	6,77	1,69
30	-	6,99	615,75	0,70	185	HÉLICE CONTÍNUA	0,40	25,00	1,82	4,55	13,74
31	-	7,55	615,75	0,70	185	HÉLICE CONTÍNUA	0,40	27,00	1,82	4,55	14,84
32	-	6,71	615,75	0,70	185	HÉLICE CONTÍNUA	0,40	24,00	1,82	4,55	13,19
33	-	5,87	615,75	0,70	185	HÉLICE CONTÍNUA	0,40	21,00	1,82	4,55	11,54
34	-	295	283,53	0,70	93	HÉLICE CONTÍNUA	0,40	21,00	1,75	4,38	12,00

IN	N. PAV	H (m)	A (m ²)	t (m)	N	TIPO	d (m)	L (m)	e (m)	e/d	L/e
35	-	3,10	283,53	0,70	93	HÉLICE CONTÍNUA	0,40	22,00	1,75	4,38	12,57
36	-	3,60	283,53	0,70	93	HÉLICE CONTÍNUA	0,40	25,00	1,75	4,38	14,29
37	-	-	246,38	0,30	93	AREIA E BRITA	0,35	3,00	1,21	3,46	2,48
38	-	-	246,38	0,30	168	AREIA E BRITA	0,35	4,00	1,21	3,46	3,31
39	-	-	246,38	0,30	168	ARGAMASSA	0,35	5,00	2,37	6,77	2,11
40	-	-	440,29	0,35	44	ARGAMASSA	0,30	6,50	1,09	3,63	5,96
41	-	-	440,29	0,35	372	ARGAMASSA	0,30	4,50	1,09	3,63	4,13
42	-	-	440,29	0,35	372	ARGAMASSA	0,30	2,50	1,09	3,63	2,29
43	-	-	440,29	0,35	372	ARGAMASSA	0,30	6,00	1,09	3,63	5,50
44	-	-	440,29	0,35	372	ARGAMASSA	0,30	5,00	1,09	3,63	4,59
45	-	-	440,29	0,35	372	ARGAMASSA	0,30	4,50	1,09	3,63	4,13
46	-	-	440,29	0,35	372	ARGAMASSA	0,30	6,50	1,09	3,63	5,96
47	-	-	500,00	0,35	108	PRÉ-MOLDADA	0,40	13,50	2,15	5,38	6,28
48	-	-	500,00	0,35	108	PRÉ-MOLDADA	0,40	13,00	2,15	5,38	6,05
49	-	-	500,00	0,35	108	PRÉ-MOLDADA	0,30	12,00	2,15	7,17	5,58
50	-	-	500,00	0,35	108	PRÉ-MOLDADA	0,30	13,00	2,15	7,17	6,05
51	-	-	500,00	0,35	108	PRÉ-MOLDADA	0,30	12,50	2,15	7,17	5,81
52	-	-	500,00	0,35	108	PRÉ-MOLDADA	0,30	15,50	2,15	7,17	7,21
53	-	-	500,00	0,35	108	PRÉ-MOLDADA	0,30	16,00	2,15	7,17	7,44
54	-	-	451,15	0,50	97	RAIZ	0,30	10,00	2,15	7,17	4,65
55	-	-	698,76	0,50	487	AREIA E BRITA	0,30	6,00	1,20	4,00	5,00
56	-	-	698,76	0,50	487	AREIA E BRITA	0,30	10,50	1,20	4,00	8,75
57	-	-	698,76	0,50	487	AREIA E BRITA	0,30	7,50	1,20	4,00	6,25
58	-	-	698,76	0,50	487	AREIA E BRITA	0,30	6,50	1,20	4,00	5,42
59	-	-	698,76	0,50	487	AREIA E BRITA	0,30	4,50	1,20	4,00	3,75
60	-	-	698,76	0,50	487	AREIA E BRITA	0,30	5,50	1,20	4,00	4,58

Legenda: IN – índice; N. Pav – Número de Pavimentos; H – Altura do edifício; A – Área; t – espessura; N – Número de Estacas; Tipo – Tipo de estaca; d – Diâmetro da estaca; L – Comprimento da Estaca; e – espaçamento entre estacas; e/d – espaçamento relativo; L/e – comprimento relativo.

Fonte: Costa et al (2019)

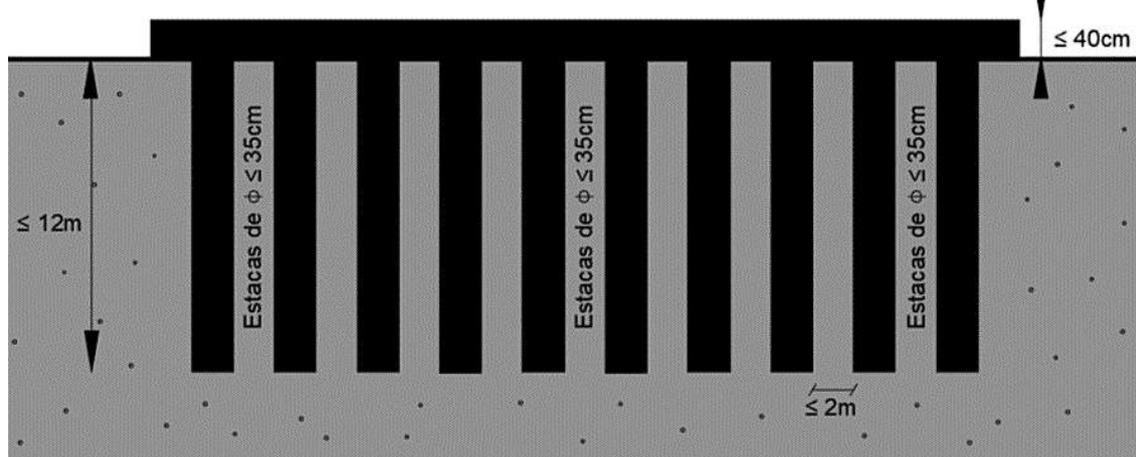
A partir da avaliação dos dados apresentados é possível observar que existe uma gama de soluções de estacas utilizadas para o sistema, estacas pré-moldadas de concreto, estacas hélice contínua, estacas do tipo raiz que juntas correspondem a 55% dos casos. E as colunas de melhoramento de solo representaram 45% do total de obras realizadas.

Foram avaliadas aplicações para edificações residenciais e tanques de armazenamento. Com alturas variando entre 3 e 25 m (alturas que contrastam com as alturas dos edifícios internacionais apresentados anteriormente). As espessuras das placas variaram entre 0,20 e 0,70 m, e a quantidade de estacas variou de 9 a 613. Com diâmetros no intervalo de 0,28 a 0,60 m e comprimentos variando entre 3 e 30

m. Os espaçamentos entre estacas variaram entre 0,88 e 4,14 m.

Essas informações foram importantes para montar o perfil construtivo da região, considerando os valores mais recorrentes para as dimensões básicas do sistema do radier estaqueado. Para elaboração do Perfil construtivo foram utilizados os valores médios obtidos. Essas informações são sintetizadas por meio da Figura 16. É possível construir um gráfico para fins de correlação entre altura das edificações e espessura adotada para as placas do radier, semelhantemente ao que foi realizado para a Figura 15. Os resultados são apresentados conforme Figura 17 e Tabela 7.

Figura 16 – Perfil Construtivo para Região Metropolitana do Recife.



Fonte: Costa et al (2019)

Tabela 7 – Correlações obtidas – valores encontrados e recomendados (mais conservadores)

Tipo de Edificação	Correlação	Coefficiente de Correlação (R ²)	Equação Recomendada
Alta	$t = 0,0202.H$	0,3766	$t = \frac{H}{50}$
Superalta	$t = 0,0087.H$	0,6664	$t = \frac{H}{100}$
Mega-alta	$t = 0,0046.H$	0,9416	$t = \frac{H}{200}$
Recife (RMR)	$t = 0,0189.H$	0,4795	$t = \frac{H}{50}$

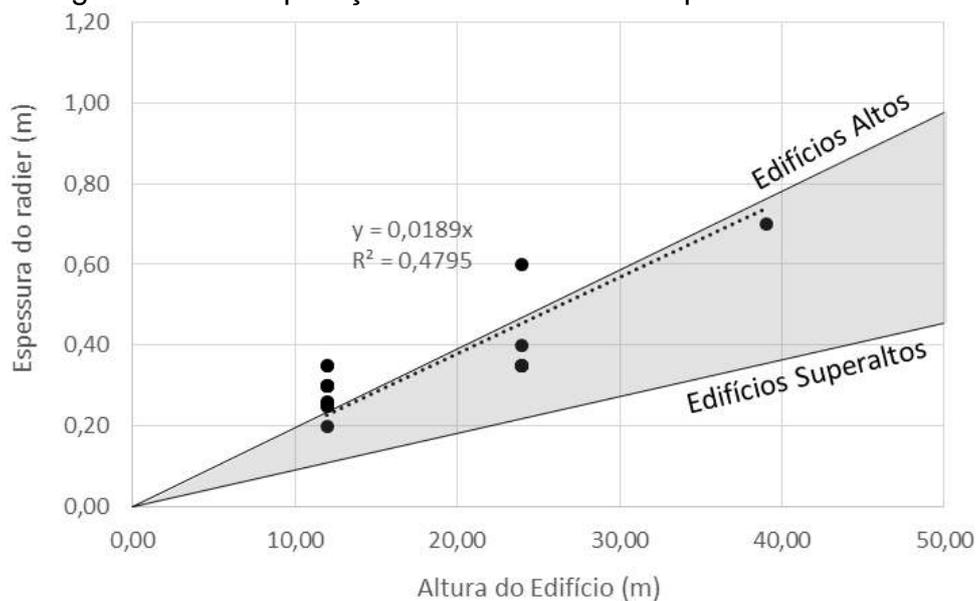
Onde: t = espessura do radier; H = altura do edifício.

Fonte: Autoria Própria, a partir de dados compilados para revisão da literatura.

A relação entre altura do edifício e espessura do radier, foi obtida, semelhante ao desenvolvido no item 2.3. Foi encontrada uma relação entre altura e espessura

para os prédios de Recife muito próxima a relação para os edifícios altos do banco de dados internacional, próximo a 2% (H/50), conforme Figura 17. Vale ressaltar que o coeficiente de correlação para esse universo de dados se mostrou muito baixo, indicando baixa correlação, o que implica que devem existir outras variáveis que estão influenciando na determinação da espessura do radier, além de altura/carga da edificação. De qualquer forma, o resultado obtido se mostrou superior ao encontrado para edifícios superaltos que apresentaram espessura da ordem de 1% (H/100).

Figura 17 – Comparação de Recife com a experiência mundial.



Fonte: Autoria Própria.

2.6 Recalque em grupo de estacas

Segundo Velloso e Lopes (2010), quando estacas de um grupo estão suficientemente distantes entre si, seu comportamento tende para o comportamento da superposição de efeitos de várias estacas analisadas como isoladas, isso acontece porque o aumento do espaçamento diminui a interação entre os elementos e o solo no entorno do grupo. À medida que o espaçamento diminui as estacas começam a interagir entre si de modo que a forma de transferência de carga é rearranjada. Os autores citando Whitaker (1957) afirmam que nesse caso as estacas da periferia tendem a absorver mais carga que as estacas do centro do estaqueamento.

Ainda segundo Velloso e Lopes (2010) existem várias classes de métodos para estimativa do recalque do grupo de estacas (i) métodos do radier fictício (ou radier

equivalente, também proposto por Poulos, 2006); (ii) métodos empíricos e os (iii) métodos elásticos. A norma brasileira NBR 6122/2019 (ABNT, 2019), reconhece o método do radier fictício. Os métodos empíricos tentam estimar um coeficiente (ξ) de aumento do recalque devido ao efeito do grupo. O coeficiente ξ , é dado pela razão entre o recalque do grupo e o recalque da estaca isolada, conforme Equação 4. Propostas de Skempton (1953), Meyerhof (1959), Vésic (1969) e Fleming et al (1985), bem como sugestões de alterações do método de Fleming et al (1985), propostas por Poulos (1989), são sintetizados na Tabela 8.

$$\xi = \frac{\text{Recalque do Grupo de Estacas}}{\text{Recalque da estaca isolada}} \quad (4)$$

Tabela 8 – Equações de estimativa de Efeito de Grupo

Referência	Equação	Observações
Skempton (1953)	$\xi = \left(\frac{4B_g + 3}{B_g + 4}\right)^2$	B_g é a dimensão transversal do grupo de estacas
Meyerhof (1959)	$\xi = \frac{\frac{e}{d}\left(5 - \frac{e}{3d}\right)}{\left(1 + \frac{1}{n_r}\right)^2}$	e/d é a razão entre o espaçamento (e) e o diâmetro (d) das estacas
Vésic (1969)	$\xi = \sqrt{\frac{B_g}{d}}$	B_g é a dimensão transversal do grupo e d o diâmetro das estacas.
Fleming et al (1985)	$\xi = N^\eta$	N é o número de estacas no grupo e η varia entre 0,4 e 0,60
Poulos (1989)	$\xi = N^\eta$	N é o número de estacas no grupo e η varia entre 0,33 e 0,50

Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Segundo Letizia; Iodice e Mandolini (2018), Viggiani (1998) incrementou 42 novos casos de obras a um banco de dados de 63 obras que continham medições de recalques e provas de carga disponíveis. O banco de dados foi iniciado e apresentado por Mandolini et al (1997) e por Mandolini e Viggiani (1997). Os dados contemplam uma vasta gama de contextos diferentes de grupos de estacas, como apresentado por meio da Tabela 9. Esses dados foram utilizados para diversas finalidades, inclusive estimativa da razão de efeito de grupo médio, e razão de efeito de grupo máximo. O autor chama essa razão de R_s , e $R_{s,máx}$, respectivamente. Nesse trabalho todos as razões de efeito de grupo serão simbolizadas pela letra grega ξ , seguindo nomenclatura adotada por Velloso e Lopes.

Tabela 9 – Parâmetros dos grupos de estacas, Mandolini et al (1997) e Viggiani (1998)

Parâmetro	Faixa de Valores
Configuração (Número de Estacas – N)	4 a 6.500
Espaçamento relativo (e/d)	2 a 8
Comprimento relativo (L/d)	13 a 126
Tipos de solos	Arenosos a Argilosos
Saturação	Não saturados e Saturados

Fonte: Letizia; Iodice e Mandolini (2018).

A partir desse banco de dados Mandolini et al (2005) e Mandolini (2012) desenvolveram equações de experimentais em função da razão de proporção introduzida por Clancy e Randolph (1993), conforme Equação 5. As funções de potência obtidas por Mandolini (2012) são apresentadas nas Equações 6 e 7, respectivamente.

$$R = \sqrt{\frac{N \cdot e}{L}} \quad (5)$$

$$\xi = 0,29 \cdot N \cdot R^{-1,35} \quad (6)$$

$$\xi_{Máx} = \frac{0,50}{R} \cdot \left(1 + \frac{1}{3 \cdot R}\right) \cdot N \quad (7)$$

onde: N = número de estacas; e = espaçamento; L = comprimento; ξ = Coeficiente de efeito de grupo; $\xi_{máx}$ = Coeficiente de efeito de grupo máximo; R = Razão de Proporção

2.6.1 Experiência de Recife e Região Metropolitana – Efeito de grupo

Entre os anos de 2005 e 2015 houve um grande aquecimento da economia pernambucana e conseqüente aumento de grandes obras com instrumentação e acompanhamento de recalques. Dessa forma, a começar desses anos foi iniciado um engajamento de compilação dos resultados de medição de recalques e ensaios de prova de carga, tanto estática quanto em placa. O que resultou em diversos estudos da região tais como:

- Oliveira (2018) - um banco de dados de obras monitoradas com medição de recalques;
- Amorim (2019) - efeito de grupo e a estimativa de recalques em obras realizadas com colunas de compactação;
- Santos et al (2020) - recalques medidos *versus* recalques estimados por diversos métodos para uma obra na Região;
- Almeida et al (2020) - banco de dados de obras em estacas hélice contínua e metálica, avaliando o efeito de grupo medido de fato;
- Oliveira et al (2018) - banco de dados de provas de carga estáticas (PCE) para estacas hélice contínua com 99 obras na zona sul do Recife.

Para este trabalho serão os descritos os estudos de Amorim (2019) e Almeida et al (2020), com a finalidade de encontrar valores de referência do coeficiente do efeito de grupo (ξ), e comparar com os resultados vindouros.

Amorim (2019), defendeu a possibilidade de estimar coeficientes de interação entre a placa e as colunas de melhoramento de solo por meio de ensaios de placa. O trabalho tem como premissa que a placa seja rígida, onde os recalques do elemento horizontal e das colunas são iguais, e busca encontrar os fatores de interação (α_h e α_v) entre o elemento horizontal e o elemento vertical sobre o recalque do grupo (S_{pr}^f), utilizando como ponto de partida o recalque da coluna isolada (S_p^0).

Os fatores de interação representam a influência do elemento sobre o recalque do grupo, assim o fator de interação horizontal (α_h) representa o acréscimo de recalque da estaca isolada (S_p^0) devido ao efeito da placa, e o fator de interação vertical (α_v) representa o acréscimo de recalque devido ao efeito dos elementos verticais, as estacas ou colunas.

A relação proposta é apresentada por meio da Equação 8, e da Figura 18. Dessa forma a relação entre S_{pr}^f e S_p^0 é igual ao coeficiente ξ , e pode ser escrito como uma função de α_h e α_v , conforme Equação 9.

Os valores obtidos para α_h e α_v são apresentados na Tabela 10, bem como os valores de ξ , obtidos para esse trabalho.

$$S_{pr}^f = S_p^o(1 + \alpha_h + \alpha_v) \quad (8)$$

$$\xi = \frac{S_{pr}^f}{S_p^o} = (1 + \alpha_h + \alpha_v) \quad (9)$$

onde:

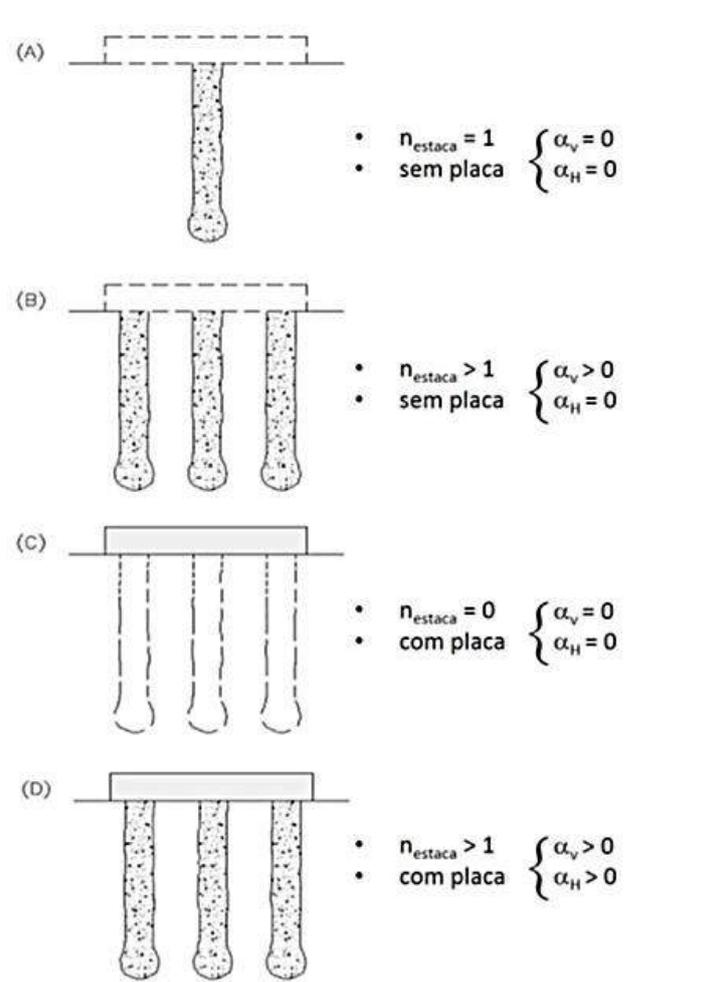
S_{pr}^f - recalque do grupo;

S_p^o - recalque da coluna isolada;

α_h - fator de interação horizontal;

α_v - fator de interação vertical.

Figura 18 – Valores de α_h e α_v , para diversos tipos de fundações



Fonte: Amorim (2019)

Através da dissertação de Amorim (2019) foi possível encontrar valores de ξ para fundações assentes sobre solos com colunas de melhoramento variando entre 1,35 a 3,50, com média igual a 2,23. Isso quer dizer que em termos médios, o recalque de um grupo de colunas desloca 123% mais que o de coluna de melhoramento isolada.

Tabela 10 – Valores de ξ obtidos a partir dos dados de Amorim (2019)

Obra	Tipo de Coluna	α_h	α_v	$\xi = (1+\alpha_h+\alpha_v)$
A	Argamassa	1,10	0,00	2,10
A	Argamassa	1,10	0,00	2,10
D	Resíduo de Construção	0,35	0,00	1,35
D	Resíduo de Construção	0,10	0,00	1,10
D	Areia e Brita	0,35	0,00	1,35
D	Areia e Brita	0,35	0,00	1,35
E	Argamassa	0,00	2,00	3,00
E	Argamassa	0,00	1,00	2,00
E	Argamassa	0,00	2,00	3,00
E	Argamassa	0,00	0,50	1,50
E	Argamassa	0,00	1,50	2,50
E	Argamassa	0,00	2,50	3,50
E	Argamassa	0,00	2,00	3,00
E	Argamassa	0,00	2,00	3,00
E	Argamassa	0,00	1,50	2,50
F	Areia e Brita	0,00	1,40	2,40
MÉDIA				2,23
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO				33,45%

Onde: α_h e α_v - fatores de interação horizontal e vertical; ξ Coeficiente de Efeito de Grupo

Fonte: Autoria Própria, a partir de Amorim (2019)

Já Almeida et al. (2020), estudou um banco de dados de obras em fundações profundas, 10 em estacas hélice contínua, e 6 em estacas metálicas. Os dados das edificações são apresentados pela da Tabela 11. A metodologia apresentada compara o resultado das medições de recalques com a curva carga/recalque obtida do ensaio de prova de carga estática (PCE). Segundo os autores o valor médio do coeficiente (ξ) de efeito de grupo encontrado para estacas hélice contínua foi de 5,97 e de 2,07 para as estacas metálicas, com coeficientes de variação de 55% e de 31% respectivamente, a partir dessas informações é possível se obter o intervalo de

confiança dos resultados. Para esse trabalho foi adotado um intervalo de 90%, como sintetizado na Tabela 12.

Ressalta-se que os resultados obtidos para as estacas metálicas (média de 2,07 e coeficiente de variação de 31%) estão muito próximos dos obtidos para as colunas de melhoramento (2,23 e coeficiente de variação de 33,45%). Já os resultados obtidos para estacas hélice contínua se mostraram muito superiores (5,97, coeficiente de variação de 55%), a Figura 19 apresenta esses resultados. Uma hipótese que pode vir a explicar essa tendência consiste em que tanto as estacas metálicas quanto as colunas são executadas por deslocamento lateral, sem desconfinamento do solo.

Tabela 11 – Banco de dados apresentado por Almeida et al (2020)

OBRA	TIPO	N. PAV.	CARGA		COMPRIMENTO DAS ESTACAS (m)
			TOTAL (kN)	N MÉDIA POR ESTACA (kN)	
0113	HÉLICE CONTÍNUA	31	146850	132	29
6213	HÉLICE CONTÍNUA	41	201650	118	20
12812A	HÉLICE CONTÍNUA	36	223920	122	23
12812B	HÉLICE CONTÍNUA	36	223920	121	23
12812C	HÉLICE CONTÍNUA	36	221590	121	23
13614	HÉLICE CONTÍNUA	26	170150	170	25
14313	HÉLICE CONTÍNUA	41	224490	121	24
18213	HÉLICE CONTÍNUA	38	154800	94	20
22513	HÉLICE CONTÍNUA	34	144100	113	16
24213	HÉLICE CONTÍNUA	31	107500	101	24
4314	METÁLICA	38	282050	207	22
5015	METÁLICA	15	46780	47	36
7213	METÁLICA	32	79780	66	44
3113	METÁLICA	39	163030	110	45
7914	METÁLICA	39	171330	115	50
14014	METÁLICA	35	241380	143	50

Fonte: Almeida et al (2020)

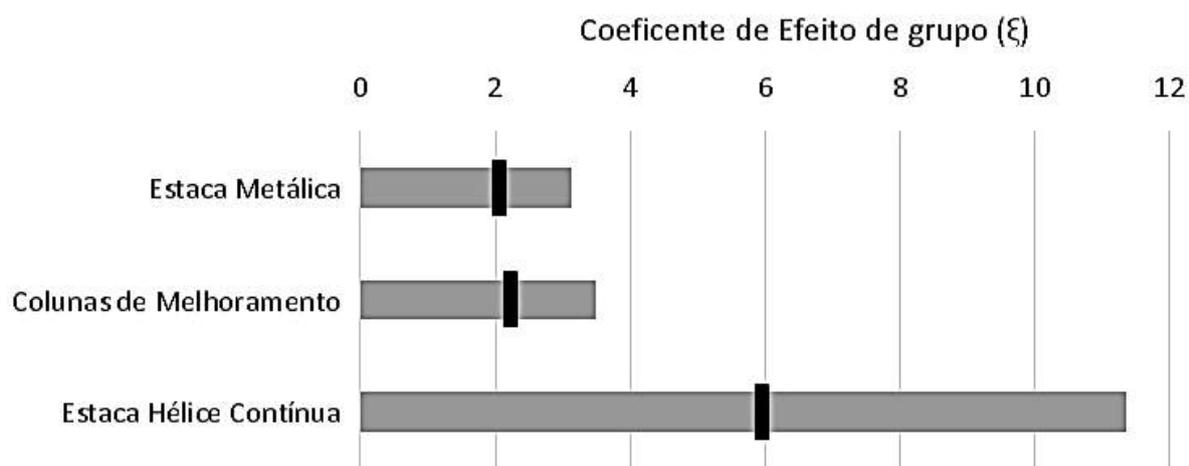
Tabela 12 – Resultados apresentados por Almeida et al (2020)

Tipo de Estaca	ξ médio	Coefficiente de Variação	Intervalo de Confiança
Hélice Contínua	5,97	55%	1* a 11,37
Metálica	2,07	31%	1,01 a 3,13

* O valor encontrado foi de 0,57, o que não é coerente, então foi adotado o valor da unidade.

Fonte: Autoria própria, a partir de Almeida et al (2020).

Figura 19 – Coeficiente de efeito de grupo, a partir de Amorim (2019) e Almeida et al (2019).



Fonte: Autoria Própria.

3. PROPOSTA DE MÉTODO DE ESTIMATIVA DE RECALQUES DE RADIER ESTAQUEADO

É apresentada a metodologia que procura estimar os recalques médios de radier estaqueado. A metodologia se baseia na premissa de evolução do comportamento do sistema de fundações à medida que transiciona do comportamento diretamente assente sobre o terreno natural (fundação direta) para o comportamento de fundação totalmente profunda (grupo de estacas). Os estágios intermediários entre os extremos de fundação direta e profunda, podem ser descritos pelo raciocínio apresentado por Poulos (2001), no primeiro parágrafo de seu artigo para a Geotechnique:

“In situations where a raft foundation alone does not satisfy the design requirements, it may be possible to enhance the performance of the raft by the addition of piles”.

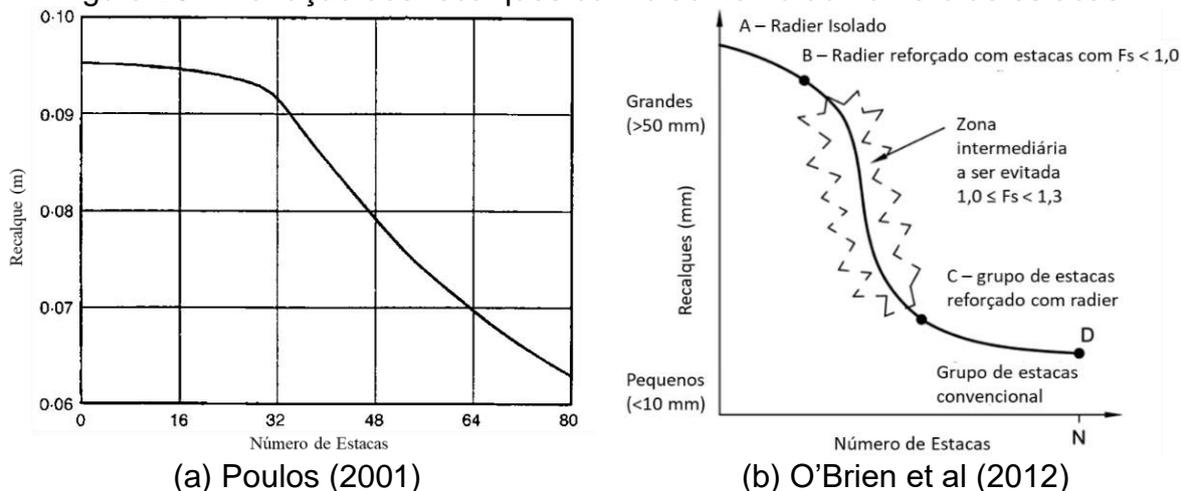
“Em situações em que uma fundação de radier por si só não satisfaça os requisitos de projeto, pode ser possível melhorar a desempenho do radier pela adição de estacas”.

A premissa física se baseia na citação de Poulos (2001), onde as estacas são pensadas como elementos de redução de recalque e melhoramento do desempenho do sistema de radier estaqueado. O que é apresentado a seguir consiste em um aparato físico matemático, de aplicação expedita com finalidade de prever a variação dos recalques médios com o aumento do número de estacas. Mas as variáveis do sistema de fundações são mantidas. Ou seja, é abstraída uma evolução do sistema de fundação, partindo do radier isolado (número N de estacas nulo – $N = 0$) em direção ao radier estaqueado ($N > 0$), acrescentando-se estacas, porém se mantendo: as propriedades do solo, geometria da placa, e o carregamento imposto.

Dessa forma, é esperado que a medida que o número de estacas aumente o recalque do sistema diminua. Essa tendência será chamada de Melhoramento neste trabalho, e o fator que mede essa evolução é chamado de Fator de Melhoramento (F).

O comportamento esperado é apresentado por Poulos (2001) bem como por O'Brien et al (2012), conforme Figura 20a e 20b respectivamente.

Figura 20 – Variação dos recalques com o aumento do número de estacas.



Segundo Poulos (2001) este tipo de avaliação é importante para o estágio inicial de projeto que busca avaliar o número de estacas que soluciona a fundação, e avalia o recalque e a rigidez dos elementos envolvidos.

3.1 Formulação desenvolvida para estimativa do recalque médio

Para o desenvolvimento da formulação matemática para estimativa do recalque médio do sistema de fundação em radier estaqueado (aqui se entende radier estaqueado no sentido amplo, que varia de $N = 0$ – fundação direta – e grupo de estacas onde a carga é praticamente toda distribuída para as estacas e a parcela de resistência do solo é considerada insignificante) é assumida a hipótese simplificadora a seguir:

- (i) A distribuição de cargas no estaqueamento pode ser representada por sua média. Então para se obter a parcela de reação das estacas, basta somar a carga média (R_e) N vezes, onde N é o número de estacas do sistema ($\sum R_{e,i} = N \cdot R_e$, conforme Equação 11);

Então em decorrência da Equação 10 apresentada por Katzenbach e Reul (1997), aplicando as hipóteses citadas anteriormente, e adotando os índices e nomenclaturas:

- R – Reação;
- N – Número de estacas;
- S – Recalque;
- S_N – recalque do grupo de N estacas
- t – Total;
- e – Estaca;
- p – Placa (radier);
- k – Rigidez (carga/recalque).
- 0 – Índice que representa variáveis sem a consideração do efeito de grupo.

$$R_t = \sum R_{e,i} + R_p \quad (10)$$

$$\sum R_{e,i} = N \cdot R_e \quad (11)$$

Ao se substituir 11 em 10, e derivar-se toda a equação resultante em relação aos recalques vem a Equação 12. Essa diferenciação foi realizada com o intuito de se obter relações entre cargas e recalques.

$$\frac{dR_t}{dS} = \frac{dR_e}{dS} N + \frac{dR_p}{dS} \quad (12)$$

As relações dR/dS que surgiram em todos os membros da Equação representam a rigidez variacional (Oliveira, 2013) do sistema ($k = dR_t/dS$); a rigidez da estaca ($k_e = dR_e/dS$); e a rigidez da placa apoiada sobre o solo ($k_p = dR_p/dS$), Simplificando a apresentação da Equação 12 para a Equação 13.

$$k = N \cdot k_e + k_p \quad (13)$$

Em busca de uma relação adimensional que possa representar o sistema estaca-solo em si mesmo, e assim diminuir o número de variáveis a serem estimadas/retro-analisadas para fins práticos ou de pesquisa, toda a Equação 13 foi

dividida pela rigidez variacional da placa (k_p). As relações resultantes k/k_p e k_e/k_p , foram chamadas de Fator de Melhoramento (F) e rigidez relativa estaca-placa (λ), respectivamente, conforme as Equações 14 e 15.

$$\frac{k}{k_p} = \frac{N.k_e}{k_p} + \frac{k_p}{k_p} \quad (14)$$

$$F = 1 + \lambda.N \quad (15)$$

onde:

F = Fator de melhoramento;

λ = Rigidez Relativa Estaca-Placa

N = Número de estacas

A Equação 15, resultante, representa o princípio de entendimento físico do método, onde F significa quanto o sistema aumenta sua rigidez variacional com o aumento do número de estacas N, aqui chamado de demanda por estacas. A rigidez relativa estaca-placa representada por λ significa a relação de rigidez variacional média de uma estaca e a rigidez variacional do solo sob a placa. Com a Equação 8 é possível reduzir o caráter não linear esperado para uma análise de grau inferior, linear, entre Fator de Melhoramento (F) e Número de estacas (N). Porém foram inseridas 3 diferenciais no problema que carecem de aprofundamento, como é explicitado a seguir.

3.1.1 Considerações sobre a Rigidez Variacional

Oliveira (2013) definiu que a rigidez variacional consiste na taxa de variação entre cargas e recalques, e se utilizou dos recursos do cálculo de diferencial, bem como das diferenças finitas para aproximar a sua solução, conforme Equação 16.

$$k_V = \frac{dR}{dS} \quad (16)$$

Para que seja possível se utilizar da equação 9 para resolver as diferenciais que aparecem no método, seria necessário que os diagramas obtidos entre cargas e recalques na realidade da engenharia fossem contínuos para o intervalo de cargas inicial (0) até o maior estágio de carga dos ensaios ($R_{m\acute{a}x}$), $[0, R_{m\acute{a}x}]$. Porém os ensaios de verificação e aferição das cargas e comportamentos das fundações são realizados em estágios e, portanto, tendem a apresentar medições discretas, não contínuas. Para resolver esse problema pode-se utilizar do artifício matemático das derivadas numéricas a exemplo das diferenças finitas que se baseiam na aplicação da série de Taylor, para seus dois primeiros termos. Em vias gerais essa série é dada pela Equação 17, e tem objetivo de aproximar funções em torno de um ponto definido de $x = a$.

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)(x-a)^n}{n!} = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots \quad (17)$$

Aplicando-se a série para aproximar uma função $R(S+\Delta S)$, em torno de S , e desprezando-se o erro cometido a partir do segundo termo, vem:

$$R(S + \Delta S) = R(S) + R'(S)(S + \Delta S - S) + \dots \quad (18)$$

$$R(S + \Delta S) = R(S) + R'(S)\Delta S + \dots \quad (19)$$

$$R'(S) \approx \frac{R(S+\Delta S) - R(S)}{\Delta S} \quad (20)$$

$$\frac{dR}{dS} \approx \frac{\Delta R}{\Delta S} \quad (21)$$

A Equação 21 apresenta uma aproximação para a rigidez variacional e conseqüentemente para os diferenciais que estão implícitos na Equação 12, e a Equação 21 pode ser reescrita pela equação 22.

$$k_V = \frac{dR}{dS} \approx \frac{\Delta R}{\Delta S} \quad (22)$$

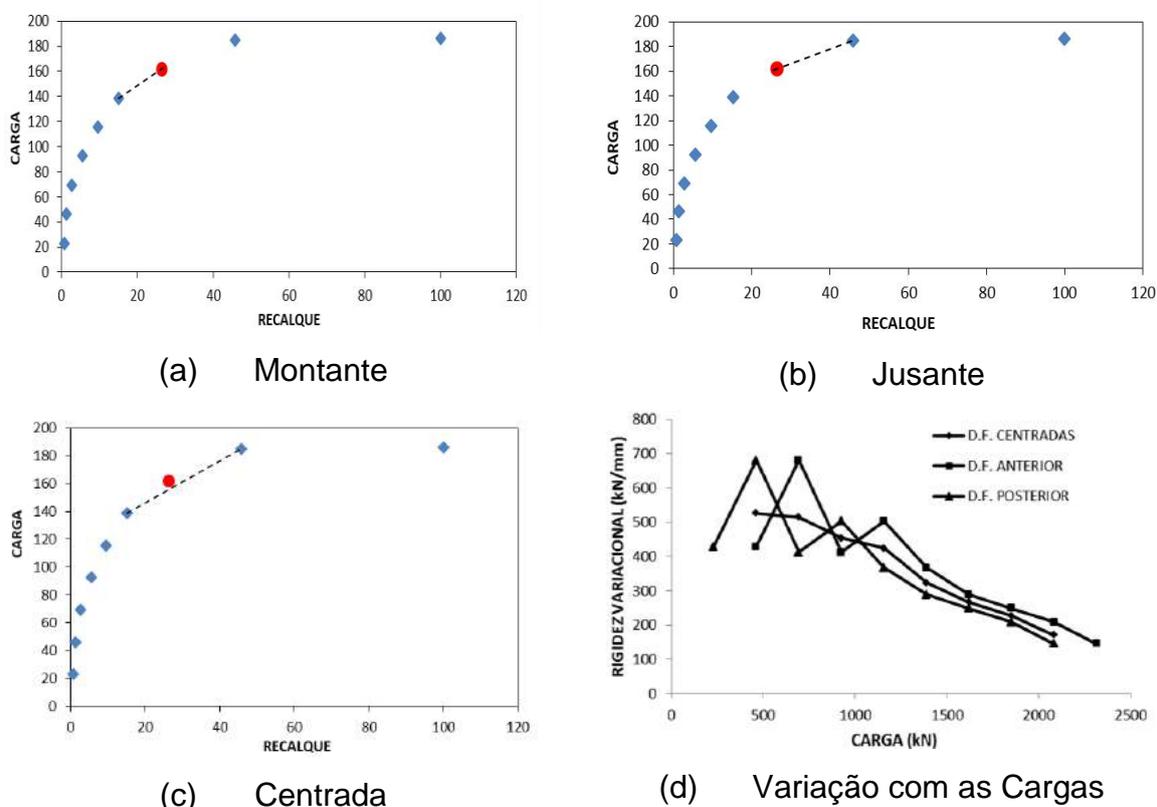
Segundo Oliveira (2013), se a variação for tomada em relação ao estágio

anterior de carga é chamada de Diferença Finita a Montante, Anterior ou Implícita, Figura 21a. Se for tomada em relação ao estágio de carga seguinte, é chamada de Diferença Finita a Jusante, Posterior ou Explícita, Figura 21b. Ainda existe um terceiro caso chamado de Diferença Finita Centrada, que consiste em se utilizar o estágio a frente em relação ao estágio anterior ao ponto que se está trabalhando Figura 21c.

Oliveira 2013 apresenta que para provas de cargas de estacas que se aproximam da ruptura os valores da rigidez variacional tomadas por qualquer método tendem a se aproximar e convergir para 0 no momento em que a ruptura ocorre, conforme Figura 21d.

É importante observar que essa aproximação é relevante para casos onde as curvas obtidas dos diagramas de cargas e recalques não apresentam comportamento linear, uma vez que para uma reta a relação $\Delta R/\Delta S$ é constante independentemente do nível de carga a que seja obtida. É tecido um comentário sobre a premissa da hipótese elástica no item a seguir.

Figura 21 – Diferenças Finitas a (a) Montante, a (b) Jusante, (c) centrada, (d) variação com carregamento

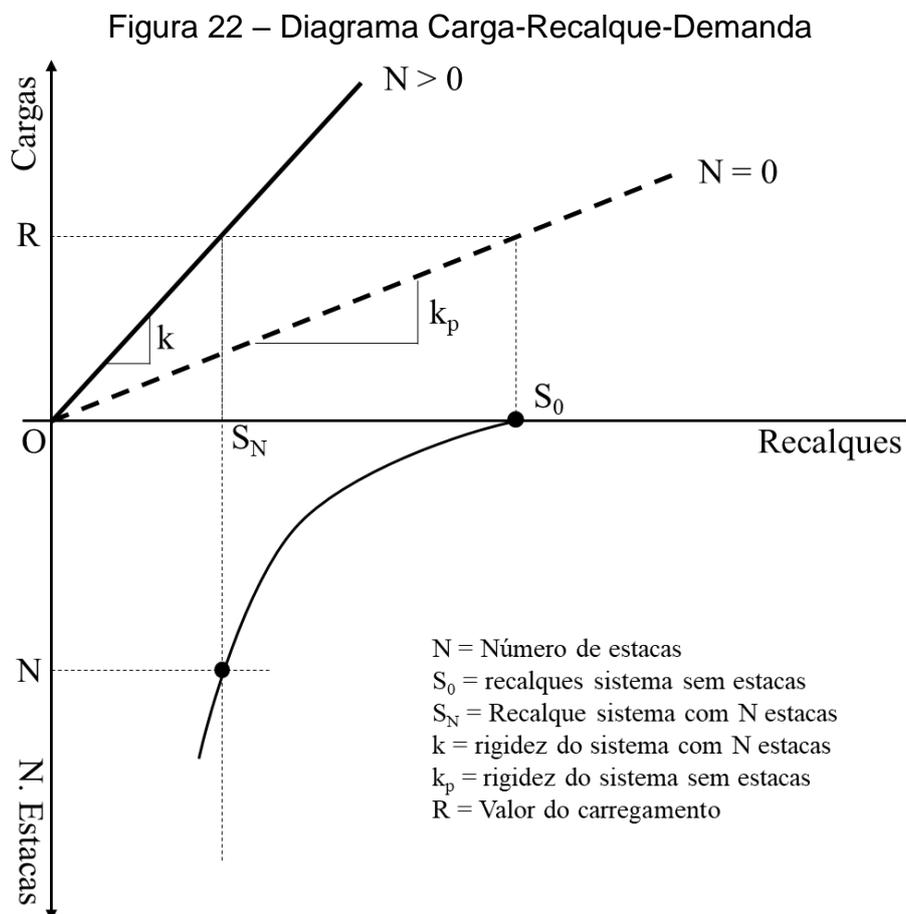


Fonte: Oliveira, 2013

3.1.2 A hipótese da proporcionalidade e a hipótese de Winkler

Se, for admitido que existe proporcionalidade entre as cargas e os recalques do sistema de fundações, o diagrama carga recalque se aproximaria de uma reta, Figura 22. E, por consequência a rigidez variacional se torna um valor constante, podendo ser obtida para qualquer estágio de carregamento, indiferentemente do estado de tensões em que o sistema, o solo, ou as estacas estejam submetidos, uma vez que essa rigidez é constante para qualquer estágio de cargas conforme Equação 23 (que consiste em um caso particular da diferença finita a Montante partindo da origem).

$$k_v = \frac{dR}{dS} \approx \frac{R}{S} \quad (23)$$



Fonte: Autoria Própria

Essa hipótese se mostra interessante para o trabalho uma vez que diminui uma variável do problema, que consiste em conhecer qual a parcela de carga do sistema que é de fato transferida para o solo. Uma vez que para resolução da Equação 15 é

necessário apenas o conhecimento da rigidez do sistema e do solo. No momento que a rigidez do solo é assumida como constante pode ser obtida para qualquer estágio de carga arbitrário. Convenientemente o estágio de carga adotado para obtenção da rigidez do solo consiste na carga final atuante sobre o sistema de fundações. Como o fator de melhoramento é composto por uma relação entre a rigidez do sistema e do solo, o valor desse carregamento (R) será simplificado da equação, como pode ser apresentado por meio da Figura 22, que para esse trabalho é definido como diagrama Carga-Recalque-Demanda.

Então, ao se adotar a hipótese de linearidade do diagrama carga-recalque, é possível se obter o Fator de Melhoramento a partir da relação entre a rigidez do sistema (k) e a rigidez do solo sob a placa (k_p), ambas admitidas como constantes. Se essa relação for obtida de forma conveniente para o mesmo carregamento ($R_t = R_p = R$), e admitindo o recalque da placa (sem estacas) seja o recalque inicial da evolução (S_0), é possível escrever a Equação 24.

$$F = \frac{k}{k_p} = \frac{R/S_N}{R/S_0} = \frac{S_0}{S_N} \quad (24)$$

Observa-se que o Fator de Melhoramento F pode ser escrito como a relação de recalques do radier sem estacas pelo recalque do grupo, exatamente o inverso do fator ($\xi_s = S_{pf}/S_{sf}$) apresentado por Katzenbach e Reul (1997) e Reul (2005).

Esse fator de melhoramento que consiste na relação entre o recalque sem colunas sobre o recalque do sistema também foi apresentado por Almeida e Marques (2010), quando tratam da estimativa de recalques para aterros sobre estacas e colunas, a partir do método de Priebe (1995), para essa publicação a relação entre os recalques é chamada de Fator de Redução de Recalques β .

Dessa forma o recalque do grupo é dado pela relação $S_N = S_0/F$, onde F é dado pela Equação 15. Assim é possível escrever a Equação 25 que representa o recalque do grupo, em função do número de estacas, tendo o recalque da placa S_0 e a rigidez estaca-solo como variáveis do método.

$$S_N = \frac{S_0}{(1+\lambda.N)} \quad (25)$$

Onde:

S_N = Recalque do Sistema com N estacas

S_0 = Recalque do Sistema para N = 0 estacas (fundação direta)

λ = Rigidez Relativa Estaca-Placa

N = Número de estacas

A Equação 25 expressa o recalque do grupo (S_N) como uma redução do recalque da fundação sem estacas, e depende apenas de um parâmetro λ (chamado de rigidez relativa estaca-placa) que em si mesmo representa os estados de rigidez da estaca e do solo simplificando os processos de retro análise.

3.1.2.1 Consideração das áreas, definição de Eficiência e o Erro Associado

A hipótese de Winkler considera princípios da teoria da elasticidade, porém com respostas diferentes as obtidas pelo modelo de meio Elástico Contínuo. A premissa da hipótese se baseia na proporcionalidade entre as pressões (q) de contato e os recalques (S). A proporcionalidade acontece por meio de uma constante chamada de coeficiente de reação vertical (ver Equação 26), também chamada de coeficiente de recalque ou módulo de reação (Velloso e Lopes, 2011). Para esse trabalho será chamado de módulo de reação e representado pela sigla MR. Também é possível escrever a constante MR em função da rigidez obtida por meio da hipótese elástica, conforme Equação 29, onde A é a área de projeção em análise.

$$q = MR.S \quad (26)$$

$$\frac{R}{A} = MR.S \quad (27)$$

$$R = MR.A.S \quad (28)$$

$$k = MR \cdot A \quad (29)$$

Onde:

q = tensões aplicadas

MR = Módulo de Reação do Subgreide

A = Área de projeção

S = Recalque

R = Carga Aplicada

A equação 29 representa a rigidez para o sistema de fundações. Para obtenção da rigidez do solo sob a placa (k_p) é necessário levar em consideração a área efetiva de solo que é numericamente igual a diferença entre a área total e a soma das áreas das estacas/colunas. Assim, dessa forma, a rigidez do solo sob a placa é dada pela Equação 30, onde MR_p é o módulo de reação do solo sob a placa e A_e representa a área de uma estaca/coluna. Substituindo as Equações 29 e 30 na Equação 13, é possível encontrar a Equação 32, que analogamente a Equação 14 apresenta relações entre parâmetros do sistema de fundações e da fundação direta.

$$k_p = MR_p \cdot (A - N \cdot A_e) \quad \therefore \text{Equação obtida considerando as estacas } (N \neq 0) \quad (30)$$

$$k = N \cdot k_e + k_p \quad (31)$$

$$MR \cdot A = N \cdot k_e + MR_p \cdot (A - N \cdot A_e) \quad \therefore (\div MR_p \cdot A) \quad (32)$$

$$\frac{MR}{MR_p} = \frac{N \cdot k_e}{MR_p \cdot A} + \frac{(A - N \cdot A_e)}{A} \quad (33)$$

$$\frac{MR}{MR_p} = \frac{N \cdot k_e}{MR_p \cdot A} + 1 - \frac{A_e}{A} N \quad (34)$$

A Equação 34 pode ser simplificada. O termo $MR_p \cdot A$ que surgiu no denominador do segundo termo da equação representa a rigidez elástica da placa sobre o solo sem estacas, que por ser constante é igual a rigidez do solo sob a placa (teoria da elasticidade - k_p – Equação 35), dessa forma esse termo $k_e/MR_p \cdot A$, é igual a k_e/k_p que é a definição da rigidez relativa estaca-placa (λ , Equação 36). A relação

A_e/A , será chamada para esse trabalho de razão de áreas ρ (Equação 30), e representa a relação entre a área de uma estaca por toda a área do sistema de fundações (A).

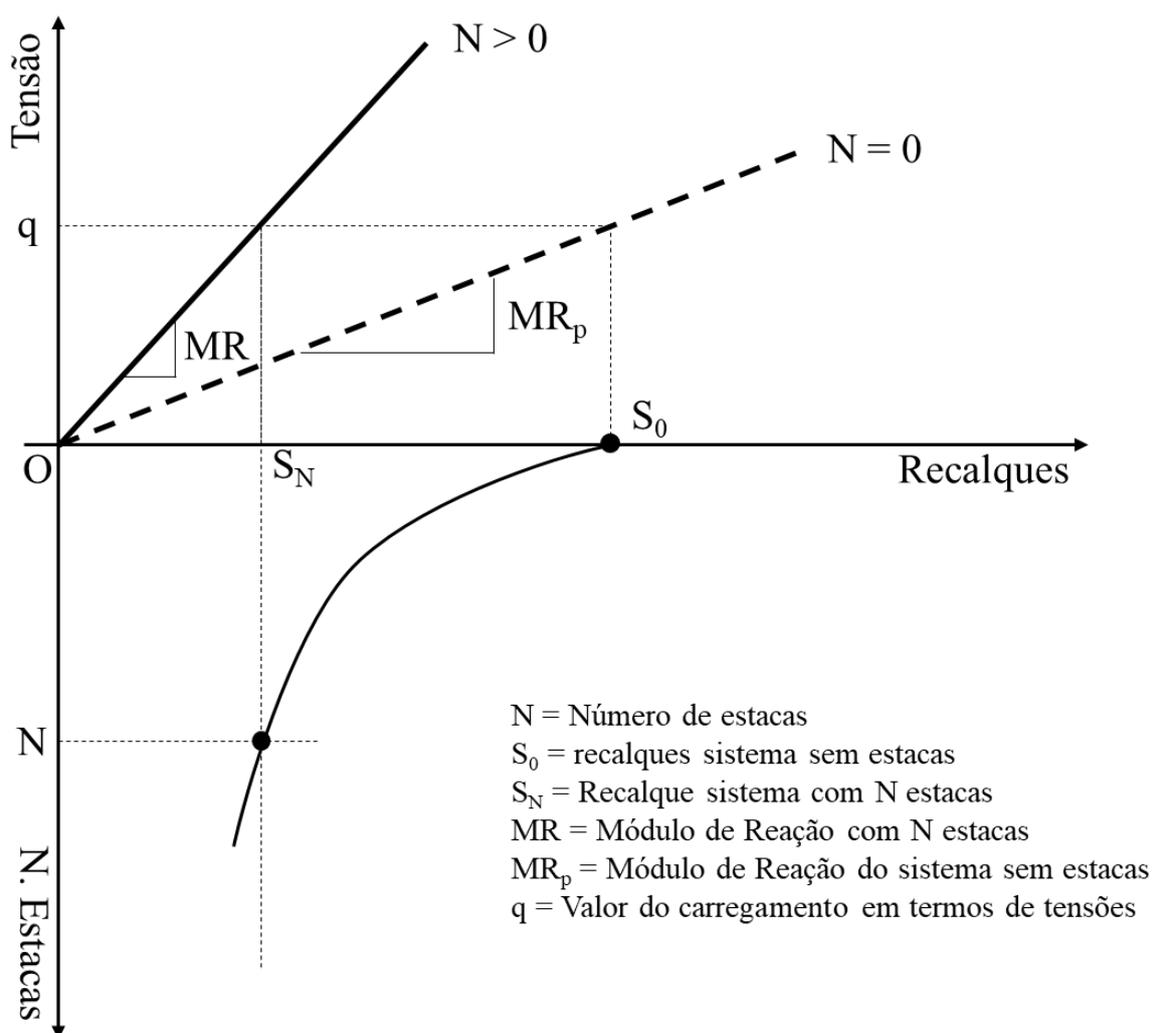
Analogamente à Figura 22, MR e MR_p são admitidos como constantes, ver Figura 23, a partir do qual pode-se escrever a Equação 38. Substituindo-se 35, 36, 37 e 38 em 34, é possível escrever a Equação 38, que leva em consideração a influência das áreas sobre o fator de melhoramento.

$$MR_p \cdot A = k_p \quad \therefore \text{Equação obtida para o sistema sem estacas } (N = 0) \quad (35)$$

$$\frac{k_e}{MR_p \cdot A} = \frac{k_e}{k_p} = \lambda \quad (36)$$

$$\frac{A_e}{A} = \rho \quad (37)$$

Figura 23 – Diagrama Pressão-Recalque-Demanda



Fonte: Autoria Própria

$$\frac{MR}{MR_p} = \frac{\frac{q}{S_N}}{\frac{q}{S_0}} = \frac{S_0}{S_N} = F \quad (38)$$

$$F = 1 + (\lambda - \rho) \cdot N \quad (39)$$

Onde:

F = Fator de Melhoramento

λ = Rigidez Relativa Estaca-Placa

ρ = Razão de Áreas (Área da estaca sobre área da placa)

A equação 39 deixa claro que só haverá melhoramento se o terceiro termo da equação for não nulo, e maior que 0, caso contrário o melhoramento será igual a unidade e não haverá melhoramento efetivo no sistema. Isso acontece para a situação em que $N=0$, cenário sem estacas/colunas. Também pode acontecer para o cenário em que a rigidez relativa estaca-placa (λ) for igual a razão de áreas (ρ). Então uma condição para que haja melhoramento é que λ seja superior a ρ , conforme apresentado em 40, e complementado em 41.

$$F > 1 \quad \therefore \quad N > 0 \quad e \quad \lambda - \rho > 0 \quad (40)$$

$$F > 1 \quad \therefore \quad N > 0 \quad e \quad \frac{\lambda}{\rho} > 1 \quad (41)$$

Com base nessa premissa é definido um conceito de Eficiência do Melhoramento que mede o quanto o sistema é influenciado pela área de uma estaca isolada. A Eficiência E é definida como a relação entre a rigidez relativa estaca-placa (λ) e a razão de áreas (ρ), conforme Equação 42, e tem valor esperado superior a unidade para que o melhoramento faça sentido.

$$E = \frac{\lambda}{\rho} \quad (42)$$

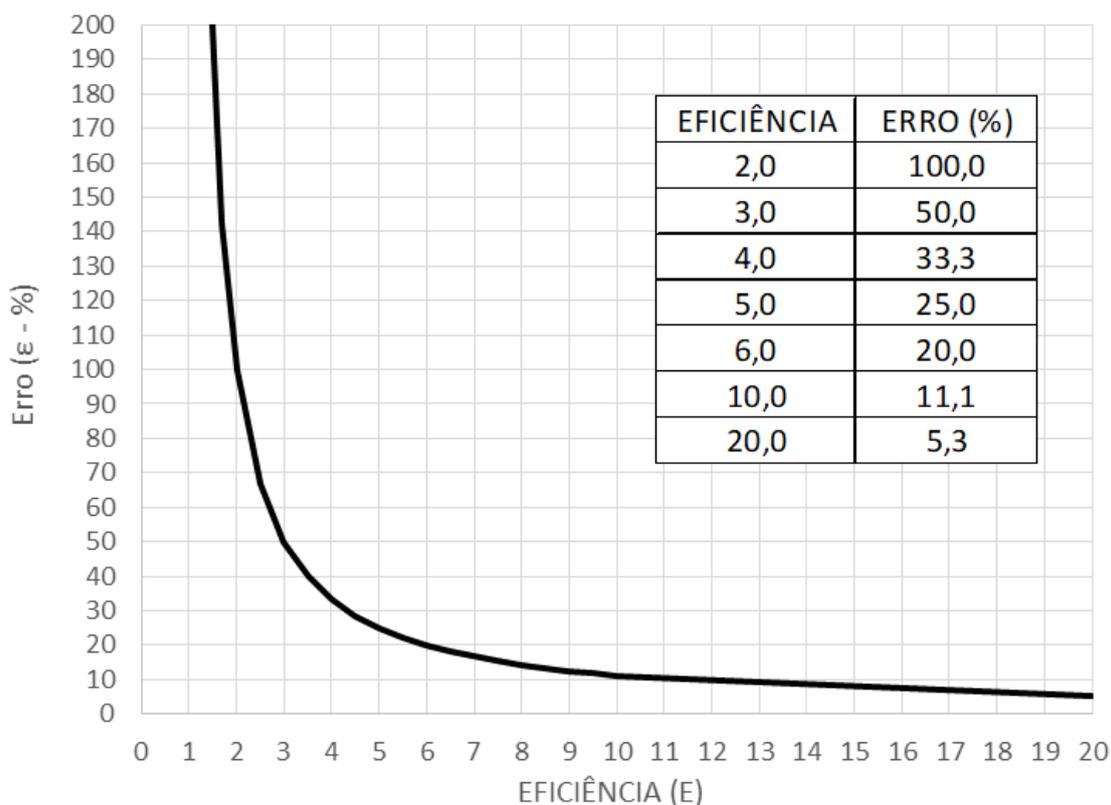
Onde: E = Eficiência;

Para eficiências elevadas, a Equação 39 praticamente não depende das áreas

e conseqüentemente de ρ , e converge para a Equação 15, com erro absoluto ε para a estimativa da rigidez relativa estaca-placa dado pela Equação 43. A Figura 24 apresenta a variação do Erro com a Eficiência.

$$\varepsilon = \left| \frac{(\lambda - \rho) - \lambda}{\lambda - \rho} \right| = \left| \frac{\rho}{\rho - \lambda} \right| = \left| \frac{\rho}{\rho - \rho \cdot E} \right| = \left| \frac{1}{1 - E} \right| \quad (43)$$

Figura 24 – Erro versus Eficiência.



Fonte: Aatoria Própria

Isso quer dizer que para edifícios com grandes áreas de projeção (A), a área de uma única estaca (A_e) tende a não ser relevante para o sistema, aumentando a Eficiência do sistema e diminuindo o erro da estimativa. Para situações desse tipo a Equação 39 converge para a Equação 15. Em termos numéricos o erro na estimativa da rigidez relativa estaca-placa tende a diminuir com o aumento da eficiência, se mostrando inferior a 10% para eficiências superiores a $E > 10$, onde λ se torna muito maior que ρ ($\lambda \gg \rho$). Deve-se manter atenção para a ocasião em que as áreas forem importantes para o sistema e, ao mesmo tempo, a rigidez estaca-solo obtida apresentar valor próximo a razão de áreas ($\lambda \sim \rho$).

3.1.3 A hipótese não linear

Para o caso de o diagrama carga recalque do sistema, com ou sem estacas, apresentar comportamento não linear a Equação 15 pode ser aplicada, porém com algumas ressalvas que devem ser observadas:

- A demonstração da Equação 15 se utiliza de diferenciais, logo não necessita que o sistema seja linear;
- Deve se obter a rigidez por meio do método das diferenças finitas, como já vêm sendo realizado. A Equação 23 aplicada para a hipótese elástica consiste em uma diferença finita a montante partindo da origem. Que, embora seja uma relação direta entre cargas e recalques, não parte de pressupostos da teoria da elasticidade e ainda consistem em aproximações para qualquer geometria que as relações constitutivas apresentem. É possível que para situações onde a não linearidade seja muito acentuada a propagação de erros a partir da aproximação das diferenças finitas se mostre muito evidente. Para os casos onde o resultado não seja satisfatório, é possível que a diferença finita centrada se mostre mais aderente aos resultados. Essa afirmativa não será averiguada durante o presente trabalho, e consiste em uma sugestão para um possível trabalho futuro;
- Ao final das análises deve ser avaliada a Eficiência e o Erro estimado, a fim de confirmar as premissas de ajuste.

3.2 Avaliação paramétrica da influência da rigidez relativa estaca-placa sobre a diminuição de recalques com o aumento de estacas N

Com a finalidade de ilustrar o efeito da variação da rigidez relativa estaca-placa (λ) sobre a diminuição dos recalques, foi realizada uma análise paramétrica da Equação 25, onde foi admitido um recalque inicial de 50 mm, admitido por O'Brien et al (2012) como um valor de ordem de grandeza elevada, e fez-se variar o parâmetro λ entre os valores de 0,01 e 0,50.

A Equação 25 foi desenvolvida para o intervalo de $N = \{0, 1, 2, \dots, 100\}$, com a finalidade de se obter a demanda por estacas necessária para reduzir o recalque

inicial para o valor de 10 mm, considerado pelo mesmo autor como um valor representativo da ordem de grandeza de recalques ditos baixos. Conforme ilustrado por meio da Figura 25.

A partir disso verificou-se que seriam necessárias 8 estacas para reduzir o recalque do grupo para essa magnitude caso a rigidez estaca solo fosse de 0,50. Para um valor de λ dez vezes inferior, e igual a 0,05, seriam necessárias 80 estacas, conforme apresentado por meio da Figura 25. Ou seja, uma diminuição de 10 vezes na rigidez relativa estaca-placa aumenta em 10 vezes a demanda de estacas do sistema para se obter um dado recalque. Os valores de demanda de estacas em função da rigidez estaca-placa adotada são apresentados por meio da Tabela 13.

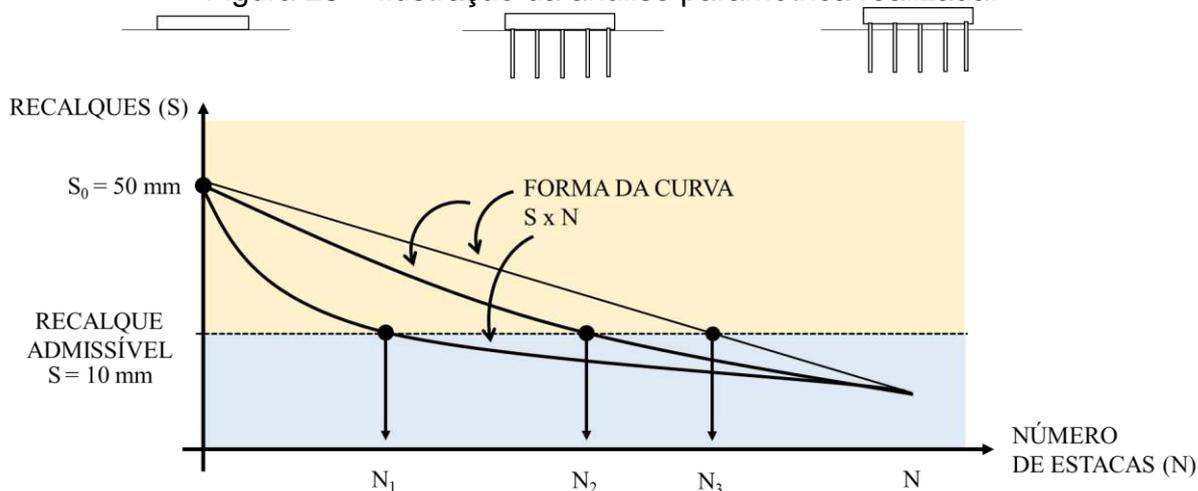
Tabela 13 – Demanda de estacas em função da rigidez estaca-placa adotada

Demanda de Estacas (N)	Rigidez Relativa Estaca-Placa (λ)
400*	0,01
80	0,05
40	0,10
20	0,20
8	0,50

* Não aparece no gráfico da Figura 26, mas pode ser obtido matematicamente.

Fonte: Aatoria Própria

Figura 25 – Ilustração da análise paramétrica realizada.

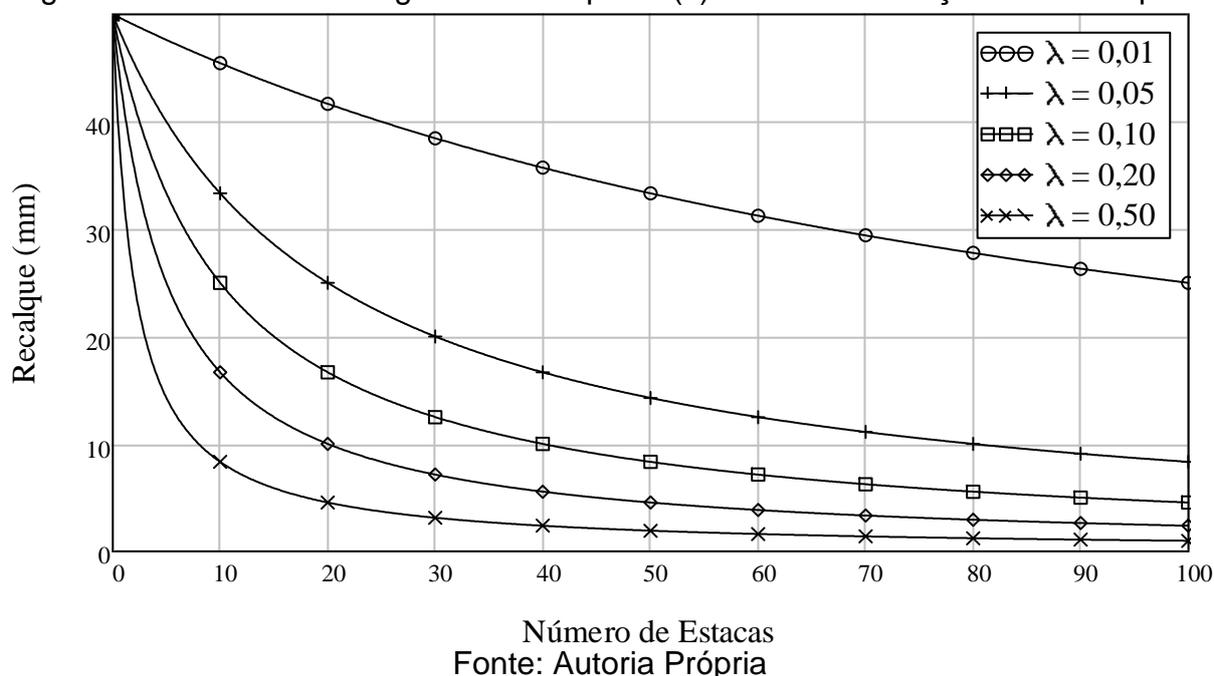


Fonte: Aatoria Própria

Outra conclusão obtida, consiste em que o resultado da variação do recalque com o número de estacas se processa de forma não linear (Equação 25), porém a definição da relação rigidez relativa estaca-placa influencia de forma linear a demanda por estacas de um sistema, sob mesmo carregamento com finalidade de se obter um dado recalque admissível.

Em outras palavras, isso quer dizer que este entendimento reduz o comportamento não linear típico entre Recalque e número de estacas para uma compreensão linear entre Rigidez Relativa estaca-placa e demanda por estacas (número de estacas necessário para se obter um dado recalque admissível).

Figura 26 – Influência da rigidez estaca-placa (λ) sobre a diminuição dos recalques.



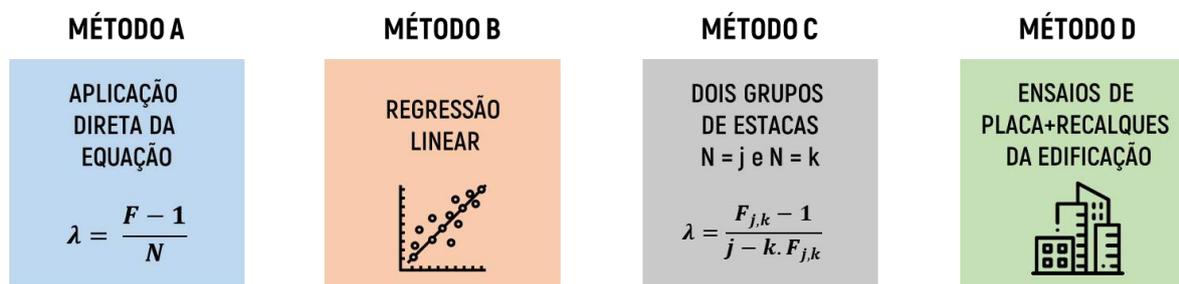
3.3 Alternativas para a obtenção da Rigidez-Relativa Estaca-Solo

A Equação 15 ($F=1+\lambda.N$) consiste na equação base para aplicação do método. Porém existem propriedades e desdobramentos a partir de cada possibilidade de aplicação referente à cada contexto em específico. Alguns desses contextos serão apresentados nesse item. É possível se obter a rigidez relativa, a partir de retro análises de resultados de diversas combinações de ensaios de placa, estimativa de recalques ou medição de recalques da edificação. Para sintetização de algumas dessas possibilidades e simplificação das referências que se seguirão, as marchas de

cálculo são enumeradas de A a D (conforme Figura 27):

- Método A - a partir de ensaios de placa com a aplicação direta da Equação 15;
- Método B - Regressão linear com vários resultados de ensaios (ou estimativas de recalques) para diferentes configurações de número de estacas; também pode ser utilizado para análises numéricas, onde os recalques são estimados para diversas configurações;
- Método C - Ensaios/Estimativas para apenas 2 configurações de grupo de estacas (para a ocasião onde são privados os dados do solo natural. Utiliza-se de desdobramentos da Equação 15);
- Método D - Combinação de ensaios de placa e medições de recalques da edificação.

Figura 27 – Métodos de estimativa de λ
FORMAS DE OBTENÇÃO DA RIGIDEZ RELATIVA ESTACA-PLACA



Fonte: Aatoria Própria

3.3.1 Método A - Aplicação direta

São necessários o ensaio da placa sobre o solo para se obter o recalque sem estacas S_0 , e o ensaio de placa sobre solo + N estacas, para se obter o recalque do grupo de N estacas (S_N). Para a prática de Recife, N normalmente assume o valor de 1 ou de 4, são raros os casos onde ambos os ensaios são realizados. Para esse cenário o valor de F será encontrado diretamente a partir da relação $F = S_0/S_N$. Com o uso da Equação 44.

$$\lambda = \frac{F-1}{N} \quad (44)$$

3.3.1.1 Efeito de Grupo

Se o objetivo for avaliar o efeito de grupo, então se faz necessário também a realização do ensaio de placa sobre a estaca isolada. A partir dos resultados dos ensaios é possível se obter a rigidez do solo sob a placa (k_p) para o terreno melhorado, e a rigidez das colunas (k_e) para o ensaio de placa sobre a coluna isolada. Dessa forma é possível comparar os resultados obtidos para ensaios em placas que tem mesma dimensão da coluna e não carregam o solo circundante com ensaios que carregam simultaneamente o solo e a coluna.

É possível então encontrar dois valores para a rigidez relativa estaca-placa, com a consideração do efeito de grupo, aqui chamada de λ ; e sem a consideração do efeito de grupo, aqui simbolizada por λ_0 . Ambas são encontradas a partir da relação k_e/k_p . Mas diferem pela forma em que são obtidas.

Assim, espera-se que o valor de λ_0 seja superior ao valor de λ , e esse seja o principal reflexo do efeito de grupo.

3.3.1.2 Via medição ou estimativa de recalques

Ainda é possível obter a rigidez relativa, a partir de medição, ou estimativa de recalques. Por exemplo para o caso de uso de um software em que se pretende estimar recalques:

- É possível se estimar o recalque do sistema para a situação sem estacas ($N=0$) e para a configuração do grupo de estacas ($N > 0$);
- Calcular-se o fator de melhoramento pela relação entre os recalques obtidos;
- E pela aplicação direta da Equação 15, obter o valor de λ .

3.3.2 Método B - Aplicação a partir de regressão linear

Quando existe a disponibilidade resultados (de prova de carga em placa) para mais de uma configuração de grupo de estacas, é possível realizar uma regressão linear desses resultados obtendo uma rigidez relativa estaca-placa ajustada a todas as configurações. Espera-se que para essa metodologia o valor da rigidez relativa se apresente mais aderente a massa de resultados, de forma que é possível que seja mais representativa da edificação como um todo, uma vez que são dirimidos os erros associados a geometria, espaçamentos variáveis (à medida que se incrementa o número de estacas, para a mesma placa radier, o espaçamento médio diminui).

Essa forma de obtenção se baseia no princípio que a Equação 8 representa uma relação linear entre $F \times N$. Dessa forma, se F for pensado como uma função de N , $F = f(N)$, é possível traçar um gráfico entre as variáveis, onde o esperado é que seja encontrada uma reta com intercepto igual a unidade e inclinação numericamente igual a rigidez relativa estaca-placa.

Assim, pode-se utilizar de uma regressão linear para obtenção do intercepto e da inclinação da reta entre $F \times N$. Esse diagrama é chamado de Plano de Melhoramento.

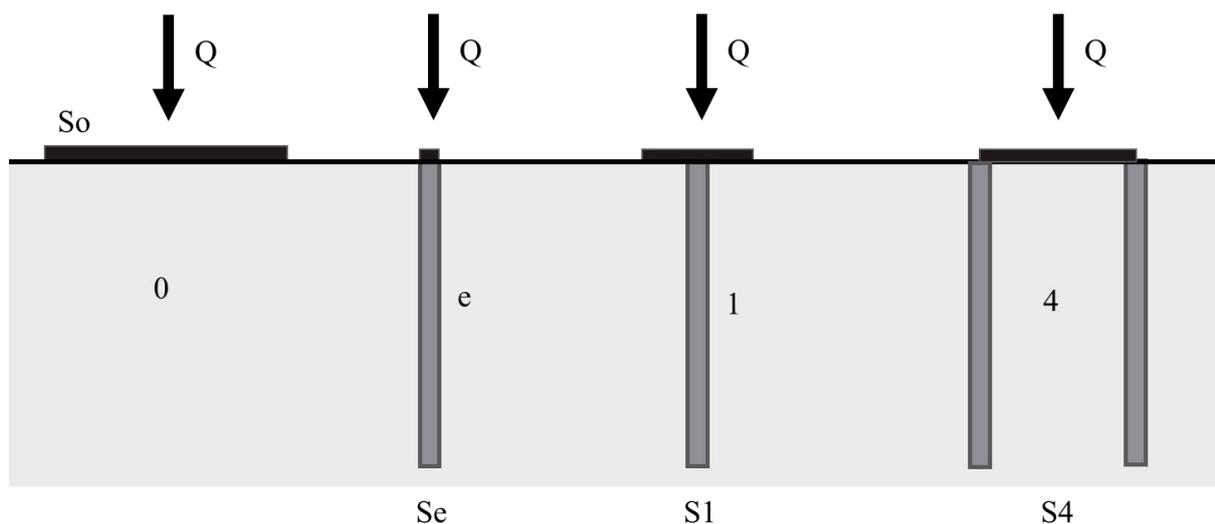
O Plano de melhoramento pode ser utilizado tanto para a situação onde estão disponíveis ensaios para várias configurações de grupos de estacas, bem como para simulações.

Para o caso de campanhas de ensaios com várias geometrias pode-se citar o exemplo dos trabalhos de Amorim (2019) onde são apresentadas diversas obras, com ensaios de placa para construção da curva carga-recalque dos elementos envolvidos no sistema de fundação. Essa prática é comum, principalmente para verificação de desempenho de obras realizadas sobre solos melhorados. Ainda segundo a autora, são realizados ensaios de 4 naturezas (ver Figura 22):

- a) Coluna isolada com placa circular metálica de 300 mm de diâmetro;
- b) Solo melhorado entre colunas com placa circular metálica de 600 a 800 mm de diâmetro;
- c) Coluna + solo com placa circular metálica de 800 mm de diâmetro;
- d) 4 colunas + Solo entre colunas com placa quadrada de 1.000 x 1.000 mm².

Vale salientar que, não necessariamente todas as obras estudadas pela autora apresentam o conjunto dos 4 tipos de ensaios. Sendo composto por combinações dos ensaios ditos anteriormente. As dimensões das placas também podem variar. Um exemplo de disposição dos ensaios é apresentado pela Figura 23.

Figura 28 – Conjunto típico de ensaios de placa em Recife.



Variável	Descrição
Q	Carregamento, deve ser usado o mesmo valor de carregamento para as análises
S ₀	Recalque do solo sob a placa sem estacas (N=0)
e	Prova de carga em placa sobre estaca (diâmetro da placa igual ao da estaca)
S _e	Recalque da estaca para a carga Q
S ₁	Recalque do sistema solo+1 Estaca
S ₄	Recalque do sistema solo + 4 estacas

Fonte: Autoria Própria

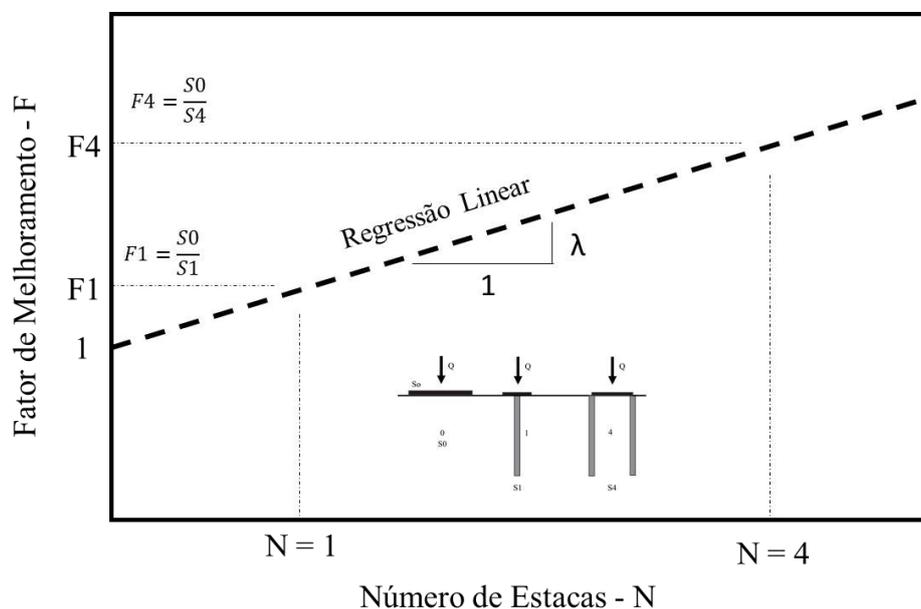
O método para se obter a rigidez relativa consiste em, escolhido um estágio (qualquer) de carregamento, obter o recalque do solo sem colunas (S₀), e compará-lo com o recalque do ensaio para placas sobre solo + N colunas.

Por exemplo, para a prática de Recife, compara-se o recalque do solo sem colunas (S_0) com o recalque da placa sobre solo + 1 coluna (S_1) e o recalque da placa sobre solo + 4 colunas (S_4). A partir desses recalques é possível calcular o Fator de Melhoria F ao utilizar a Equação 24 para cada número de estacas, ou seja, F_1 é encontrado pela relação S_0/S_1 , e F_4 por S_0/S_4 . De posse de F_1 e F_4 é possível plotar um gráfico de Fator de Melhoria F versus o número de estacas N (chamado para este trabalho de plano de melhoramento – $F \times N$). Esse gráfico tende a se aproximar de uma reta, segundo a Equação 15. E a partir de uma regressão linear, a inclinação dessa reta representa a rigidez estaca solo.

É importante notar, que para esse exemplo são encontrados três pares de pontos para a regressão linear, a saber (ver Figura 29):

- $F=1$; $N=0$, para o caso de placa sobre terreno sem estacas;
- $F=F_1$; $N=1$, para o caso de placa sobre terreno melhorado + 1 coluna;
- $F=F_4$; $N=4$, para o caso de placa sobre terreno melhorado + 4 colunas.

Figura 29 –Obtenção da Rigidez relativa estaca-placa (λ) – Plano de Melhoramento.



Fonte: Autoria Própria

3.3.3 Método C - Aplicação a partir de dois ensaios (sem o solo natural)

Da pesquisa de outras obras que tenham realizado ensaios de placa, um caso chamou atenção. Foram realizados ensaios de placa de 1,00 x 1,00 m x m sobre solo + 1 coluna e sobre solo + 4 colunas. Para esse caso de obra, não foi realizada a prova de carga em placa sobre o solo isolado. Para a formulação apresentada até o momento não seria possível aplicação da metodologia. Então esse item é dedicado ao desenvolvimento de formulação para esse caso em específico (premissa de que não sejam cedidos os recalques para a placa sem estaca – S_0).

Partindo-se do princípio que o estaqueamento tem N estacas, onde N pode assumir qualquer valor dentre o domínio dos números inteiros não negativos, pode-se escrever $N = \{0, 1, 2, 3, \dots, k, \dots, j, \dots\}$, para manter a generalização, são utilizadas as letras k e j para valores de N quaisquer, onde j é maior do que k ($j > k$). Dessa forma o fator de melhoramento F, pode ser escrito como uma função da rigidez relativa estaca-placa, e assume valores como apresentado a seguir (os fatores F são escritos com o índice relativo ao número de estacas N, espera-se que à medida que N aumente, o valor de F aumente conjuntamente):

- De forma genérica, já foi apresentado anteriormente que: $F_N = 1 + \lambda \cdot N$;
- Assim para $N = 0$, $F = 1$;
- $N = 1$; $F_1 = 1 + \lambda$;
- $N = 2$; $F_2 = 1 + 2 \cdot \lambda$;
- $N = 3$; $F_3 = 1 + 3 \cdot \lambda$;
- $N = 4$; $F_4 = 1 + 4 \cdot \lambda$;
- $N = k$; $F_j = 1 + k \cdot \lambda$;
- $N = j$; $F_j = 1 + j \cdot \lambda$;

Porém, por definição o Fator de Melhoramento F é a relação entre a rigidez do grupo (k) dividida pela rigidez do sistema sem estacas (k_p). Mantido o carregamento, essa relação é simplificada para a relação entre o recalque sem estacas (S_0) e o recalque para o grupo de estacas (S_N), conforme apresentado na Equação 45.

$$F_N = \frac{k}{k_p} = \frac{\frac{R}{S_N}}{\frac{R}{S_0}} = \frac{S_0}{S_N} \quad (45)$$

Uma vez que se pretende avaliar os desdobramentos da Equação 15 que permitam sua utilização para o caso onde não foram realizados ensaios sobre o solo, ou seja não são dados os valores de S_0 , foram realizadas etapas de desenvolvimento das equações, como demonstrado a seguir. Primeiramente foram relacionados os Fatores de melhoramento F_j e F_k , essa relação será chamada de fator de melhoramento entre configurações ($F_{j,k}$). Esse fator mede quanto um grupo de j estacas é mais rígido do que um grupo de k estacas, Equação 46. Substituindo-se o que foi obtido a partir da Equação 45 é possível escrever a equação 47.

$$F_{j,k} = \frac{F_j}{F_k} \quad (46)$$

$$F_{j,k} = \frac{F_j}{F_k} = \frac{\frac{S_0}{S_j}}{\frac{S_0}{S_k}} = \frac{S_k}{S_j} \quad (47)$$

Da mesma forma que é possível escrever o fator de melhoramento entre configuração $F_{j,k}$ em função dos recalques do grupo, também é possível escrever em função da rigidez relativa estaca-placa ($F_j = 1 + j.\lambda$, e $F_k = 1 + k.\lambda$). Assim a Equação 46 pode ser escrita na forma da Equação 48.

$$F_{j,k} = \frac{F_j}{F_k} = \frac{1+j.\lambda}{1+k.\lambda} \quad (48)$$

Então, foram obtidas duas equações para $F_{j,k}$. Ao se igualar as duas, é possível escrever a Equação 49 que correlaciona os recalques para diferentes configurações de estaqueamento ($N = j$ e $N = k$) com a rigidez relativa estaca-placa.

$$F_{j,k} = \frac{F_j}{F_k} = \frac{S_k}{S_j} = \frac{1+j.\lambda}{1+k.\lambda} \quad (49)$$

Como S_k e S_j são conhecidos a partir dos ensaios de placa, j e k são o número de estacas para os respectivos ensaios, é possível determinar-se o valor de λ , Equação 50.

$$\lambda = \frac{F_{j,k} - 1}{j - k \cdot F_{j,k}} \quad (50)$$

Onde: $F_{j,k}$ = fator de melhoramento de um sistema com j estacas em relação ao fator de melhoramento de um sistema com k estacas (sendo $j > k$).

Para que a divisão seja possível, o denominador $j - k \cdot F_{j,k}$ precisa ser diferente de 0. Porém como λ é necessariamente um número positivo, pois pelo contrário as estacas piorariam o comportamento do sistema, aumentando recalque, pode-se dizer também que o denominador é um número maior positivo. Assim é possível escrever as inequações 51 e 52.

$$j - k \cdot F_{j,k} > 0 \quad (51)$$

$$F_{j,k} < \frac{j}{k} \quad (52)$$

Da inequação 52 é possível inferir que o fator de melhoramento necessariamente é um valor positivo, maior do que zero, e menor do que a relação j/k . Por exemplo, para uma campanha de 2 ensaios, onde o primeiro seja realizado para uma placa sobre solo + 1 estaca ($N = k = 1$) e o segundo seja realizado para uma placa sobre solo + 4 estacas ($N = j = 4$), encontra-se uma relação $j/k = 4$, e um fator de melhoramento ($F_{j,k}$) menor do que 4. Como o fator de melhoramento é a relação entre a rigidez do sistema com 4 estacas e o sistema com 1 estaca, pode-se afirmar que ao aumentar de 1 para 4 estacas a rigidez não aumenta proporcionalmente, aumentando menos do que 4 vezes. O que representa o caráter não linear da variação dos recalques com o aumento do número de estacas.

De posse da rigidez relativa estaca-placa (λ) é possível se reconstruir a curva carga x recalque (S_0) para a configuração do sistema sem estacas (fundação direta $N = 0$, que por premissa não foram realizados ensaios de placa sobre solo), e se obter o gráfico entre recalques *versus* número de estacas, a partir da aplicação da Equação 10, conforme Equação 24.

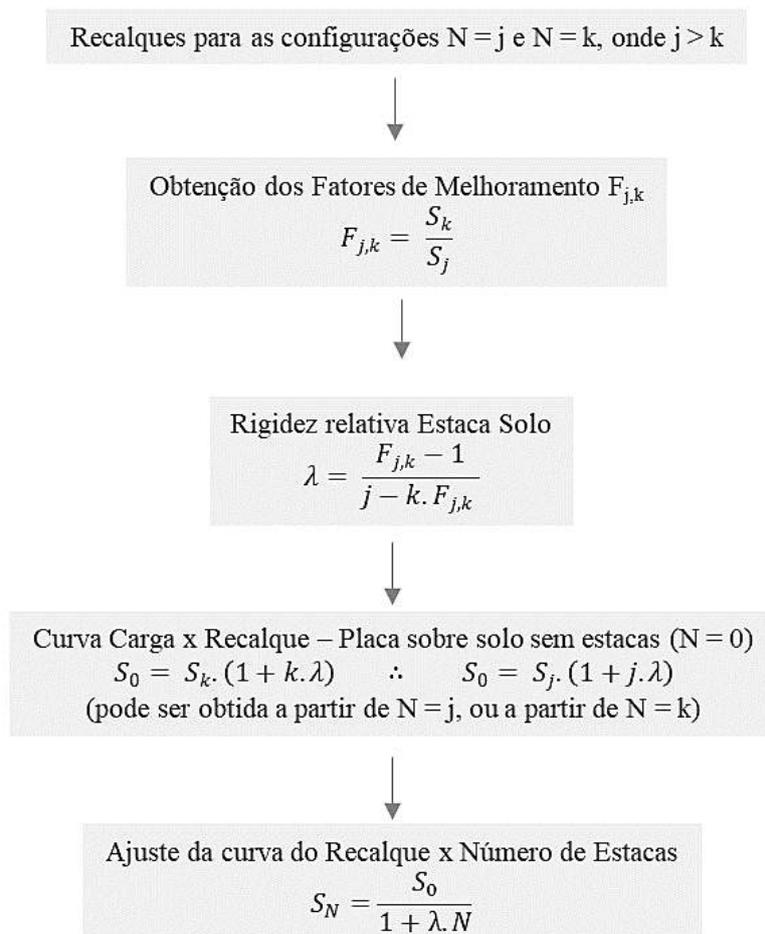
$$S_0 = S_k \cdot (1 + k \cdot \lambda) \quad \therefore \quad S_0 = S_j \cdot (1 + j \cdot \lambda) \quad (53)$$

3.3.3.1 Rotina para cálculo

Então, pode-se resumir a marcha de cálculo da seguinte forma (ver Figura 30):

1. Primeiro são obtidos os recalques para configurações distintas de ensaio sobre colunas;
2. Depois são obtidos os fatores de melhoramento;
3. Em seguida se obtém a rigidez relativa estaca-placa;
4. De posse da rigidez estaca solo é possível se reconstruir a curva carga x recalque para uma placa assente sobre o solo sem estacas (caso de fundação direta e $N = 0$);
5. Por fim é possível se ajustar as curvas de recalque versus o número de estacas.

Figura 30 – Rotina para cálculo a partir de 2 ensaios.



Fonte: Autoria Própria

3.3.4 Método D - Estimativa de recalques de edificação

Após desenvolver a metodologia, aplica-la para grupo de 3 ensaios (a partir da regressão linear) para colunas de melhoramento e para estacas escavadas, prosseguiu-se para, a partir de campanha de ensaios realizados, estimar o recalque de uma edificação. Esse item é dedicado a desenvolver um método simplificado para estimativa dos recalques de uma edificação partindo de resultados de ensaios de placa.

Foi demonstrado que para os ensaios em placa é possível se estimar o recalque médio do grupo de N estacas conforme Equação 25, onde são necessários o recalque do sistema considerado como fundação direta (S_0 - sem estacas) e a rigidez relativa estaca-placa (λ). A rigidez relativa pode ser obtida por meio do conjunto de resultados de ensaios de prova de carga em placa. Para a estimativa do recalque de uma edificação seria necessário ainda se obter o recalque do edifício caso não houvesse nenhuma estaca (S_0). Um método simplificado para se obter o recalque do edifício se construído como uma fundação direta, sem estacas, pode se basear na teoria da elasticidade onde o recalque é encontrado em fundação do nível de carregamento (R_t) e da rigidez da placa sobre o solo (k_p), Equação 54. Para obtenção dessa Equação foram consideradas as seguintes premissas:

1. Resposta linear do solo quando carregado ($R_t = k_p \cdot S_0$);
2. O sistema rígido (com recalques diferenciais não computáveis e muito próximos ao médio);
3. A rigidez obtida no ensaio de placa para o solo é representativa da rigidez do solo quando carregado pela edificação;
4. Velocidade de carregamento (v_c) constante;
5. Que os recalques (S) são proporcionais ao carregamento, que ao ser assumido com velocidade constante resulta em velocidade de recalques (v) também constante.

$$S_0 = \frac{R_t}{k_p} \quad (54)$$

Substituindo-se a Equação 54 na Equação 25, se obtém a equação 55 que permite estimar o recalque do grupo de estacas (S_N) a partir da carga total (R_t) e da rigidez do solo obtida no ensaio de placa (k_p).

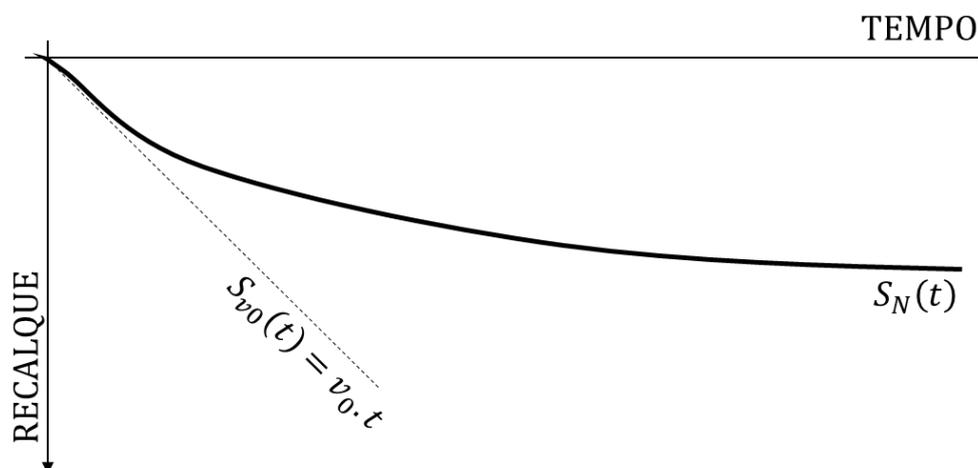
$$S_N = \frac{R_t}{k_p \cdot (1 + \lambda \cdot N)} \quad (55)$$

onde: S_N = Recalque do sistema com N estacas; R_t = Carga total; k_p = rigidez do solo sob a placa; λ = rigidez relativa estaca placa e N = número de estacas do sistema.

Com base na Equação 55 é possível encontrar a expressão numérica para a velocidade inicial de recalques. Ao se adotar que a mesma é dada por $S_N(t) = v_0 \cdot t$, onde $S_N(t)$ é o recalque em um dado instante de tempo, v_0 é a velocidade de recalque e t é o tempo. A relação R/t pode ser chamada de velocidade média de carregamento, aqui escrita como v_c (pois relaciona a carga com o tempo). Assim é possível escrever a Equação 56. A velocidade inicial corresponde a uma aproximação da taxa de variação (derivada) para o instante inicial ($t=0$). Por essa razão o seu formato é o de uma reta, com inclinação dada pela velocidade inicial de recalque. Um exemplo dessa hipótese, é apresentado na Figura 31. A velocidade de carregamento pode ser obtida por medição do estágio de execução de cada elemento da edificação. Gusmão (2000) apresenta uma distribuição de cargas na edificação para essa finalidade, Tabela 14.

$$v_0 = \frac{v_c}{k_p \cdot (1 + \lambda \cdot N)} \quad (56)$$

Figura 31 – Velocidade Inicial de Recalques.



Fonte: Autorial Própria

Tabela 14 – Distribuição dos carregamentos na edificação.

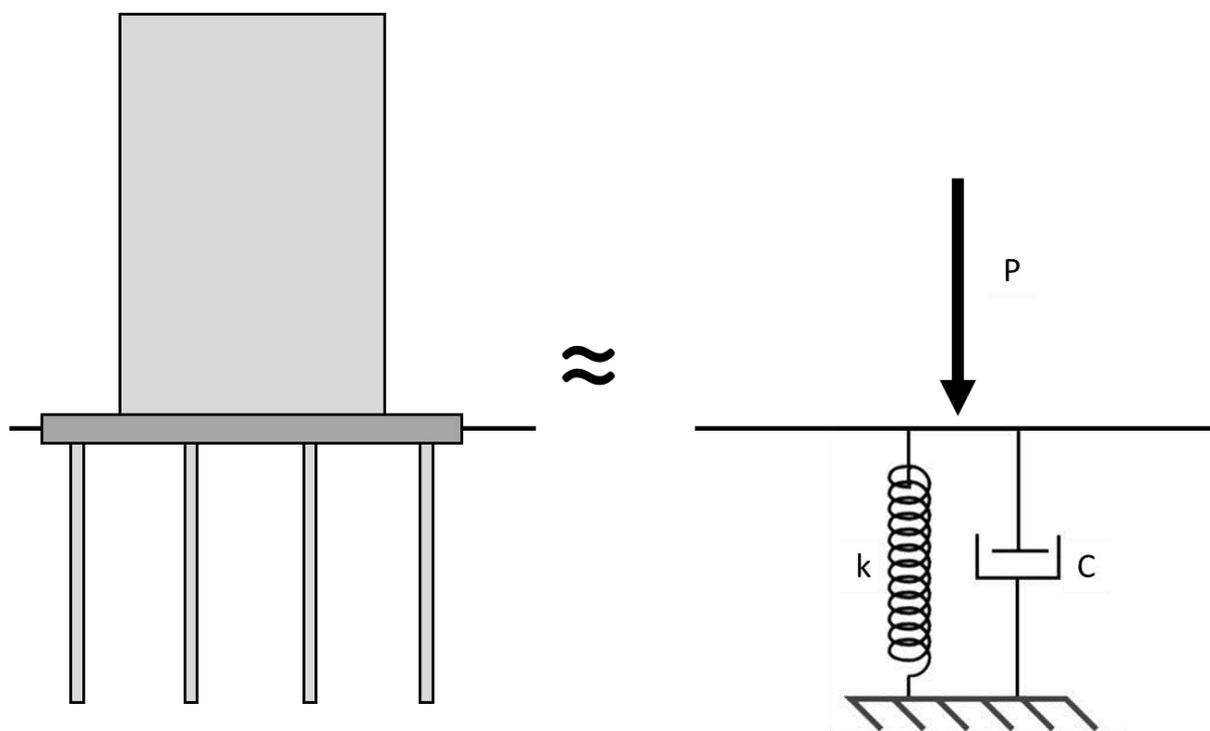
Tipo	Carregamento Parcial (%)*
Estrutura de Concreto Armado	40,00
Alvenarias	20,00
Revestimento Externo	7,50
Revestimento Interno	7,50
Pisos	10,00
Sobrecarga	15,00

Fonte: Gusmão (2000)

3.3.4.1 Correlação com o Coeficiente de Amortecimento (C) - Lord Kelvin.

O modelo reológico de Kelvin considera que o deslocamento de um corpo sob ação de uma força P , pode ser representado pela associação em paralelo de uma mola, com comportamento previsto pela lei de Hooke, e por um êmbolo, com comportamento previsto pela lei de Newton para fluídos viscosos, ver Figura 32.

Figura 32 – Modelo Mola-Amortecedor, ou Modelo de Kelvin.



Fonte: Adaptado de Chamecki (1958) e de (PUC-Rio, 2023).

Ao aplicar-se o esforço P , a deformação da mola será retardada pelo êmbolo, de mesma forma se o esforço P for cessado, a recuperação da mola será igualmente retardada (CHAMECKI, 1958). A equação constitutiva da mola é dada por $F_m = k \cdot x$ (onde k é a constante de mola e x os deslocamentos), e do êmbolo/amortecedor é dada por $F_a = C \cdot v$ (onde C é a constante de amortecimento e v a velocidade de deslocamento, que também pode ser escrita no formato mecânico como \dot{x} , ou no formato de diferenciais dx/dt). Para que a força P deforme o sistema mola/amortecedor e ocorra o equilíbrio, as reações $F_m + F_a$ devem convergir para o valor do esforço P atuante. Dessa forma, para o equilíbrio é possível escrever a Equação 57. Que pode ser escrita sob a forma diferencial em 58. Ao se resolver a Equação diferencial (por separação de variáveis e integração, 59 a 62), encontra-se uma equação de correlação entre os deslocamentos x como uma função do tempo $x = x(t)$, a depender das constantes k e C .

$$P = F_m + F_a = k \cdot x + C \cdot v \quad (57)$$

$$P = k \cdot x + C \cdot \frac{dx}{dt} \quad (58)$$

$$\frac{C}{P - k \cdot x} \cdot dx = dt \quad (59)$$

$$\int \frac{C}{P - k \cdot x} \cdot dx = \int dt \quad (60)$$

$$-\frac{C}{k} \cdot \ln(P - kx) = t + CI \quad \therefore \quad CI = \text{Constante de integração} \quad (61)$$

$$x = \frac{P}{k} - \frac{1}{k} \left[e^{-\frac{k}{C}(t+CI)} \right] \quad (62)$$

Para simplificar a equação, pode-se utilizar das condições de contorno. Por exemplo, quando o tempo assumir $t=0$, o deslocamento ainda não terá se processado devido ao amortecimento promovido pelo êmbolo. Assim para $t=0$, espera-se que $x=0$. Ao se substituir esses valores em 62, se obtém 63. De onde se conclui a Equação 64. Assim a Equação 62, é simplificada para a Equação 65.

$$0 = \frac{P}{k} - \frac{1}{k} \left[e^{-\frac{k}{C}(CI)} \right] \quad (63)$$

$$e^{-\frac{k}{c}CI} = P \quad (64)$$

$$x = \frac{P}{k} - \frac{P}{k} \left[e^{-\frac{k}{c}(t)} \right] \quad (65)$$

Ao se aplicar a Equação 65 para o um grupo de estacas, com a finalidades de ajustar, estimar ou retro analisar os recalques no tempo ($S = S(t)$), o valor de k representa a rigidez do sistema, e a relação P/k , o deslocamento S_N , recalque final do sistema/grupo de estacas (Equação 66). Fato que conduz a versão final da Equação 65, a Equação 67.

$$\frac{P}{k} = S_N \quad (66)$$

$$SN(t) = S_N \cdot (1 - e^{-\frac{k}{c}t}) \quad (67)$$

Onde: $SN(t)$ = recalque do sistema de N estacas em um dado instante de tempo t ; k = rigidez do sistema; C = coeficiente de amortecimento do sistema; t = tempo.

O valor de S_N pode ser calculado pela Equação 55, onde R_t assume o valor de $R_t = P$. Também é possível obter-se o valor de k , Equação 68, por meio do princípio fundamental do método $F = 1 + \lambda \cdot N$.

$$k = k_p \cdot (1 + \lambda \cdot N) \quad (68)$$

Dessa forma, só resta encontrar a expressão para o coeficiente de amortecimento C . Que pode ser obtido a partir da Equação 57 (equilíbrio). Inicialmente escreve-se a Equação 69 das velocidades em função dos parâmetros C e k .

$$C = \frac{P - k \cdot S}{v} \quad (69)$$

Então aplica-se a mesma condição de contorno, em que $t=0$ e $S=0$, resultando na Equação 70. Note-se que para esse caso, v assume o valor da velocidade inicial $v_0=v(t=0)$, aproximadamente tangente a curva do diagrama recalque x tempo.

$$C = \frac{P}{v_0} \quad (70)$$

Assim o problema de ajuste dos recalques no tempo $S(t)$ fica resolvido, com um equação temporal exponencial, em função dos valores de S_N , k e C , todos explicitados anteriormente. Com a finalidade de resumir as Equações que serão utilizadas para ajuste do diagrama recalque x tempo, é apresentada a Tabela 15.

Tabela 15 – Distribuição dos carregamentos na edificação.

Grandeza	Equação
Recalque no tempo $S(t)$	$SN(t) = S_N \cdot (1 - e^{-\frac{k}{c}t})$
Rigidez do Grupo de estacas k	$k = k_p \cdot (1 + \lambda \cdot N)$
Recalque Final do Grupo de Estacas S_N	$S_N = \frac{P}{k_p \cdot (1 + \lambda \cdot N)}$ ou $S_N = \frac{P}{k}$
Velocidade inicial de recalques v_0	$v_0 = \frac{v_c}{k_p \cdot (1 + \lambda \cdot N)}$ ou $v_0 = \frac{v_c}{k}$
Coefficiente de Amortecimento inicial C	$C = \frac{P}{v_0}$

Fonte: Autoria Própria

Assim, sabendo-se o valor da rigidez relativa estaca-placa λ , pode-se a partir do conhecimento do carregamento da edificação (P), calcular-se o recalque final do sistema S_N , bem como o recalque da edificação ao longo do tempo $SN(t)$. Como parâmetros intermediários no cálculo, são obtidos o coeficiente de amortecimento do sistema e a velocidade inicial de recalques.

Vale salientar que o modelo de Kelvin considera o carregamento (P) final da edificação. O efeito construtivo é inserido no modelo por meio da velocidade inicial de recalque v_0 que é função da velocidade de carregamento v_c .

O recalque S_N será atingido, em tese, quando o tempo tender ao infinito, e é função do valor da rigidez do sistema k . Já o coeficiente de amortecimento C está relacionado com a velocidade de recalques, ou seja quão rápido a curva de recalques se aproxima do recalque máximo (S_N).

Dessa forma, a velocidade de carregamento influencia no coeficiente de amortecimento e conseqüentemente na velocidade dos recalques, assim, por essa modelagem espera-se que edificações construídas em ritmos mais acelerados também apresentem recalques que ocorrem mais rapidamente.

Para esse problema não foi avaliada a possibilidade de o aumento na velocidade de carregamento, aumentar a rigidez k do sistema.

3.4 Partição de Carga e Efeito de Grupo

Uma das consequências diretas encontradas a partir do desenvolvimento da equação proposta é a representação das parcelas de carga que são transmitidas para o solo abaixo da placa (para esse trabalho o símbolo β será utilizado para a parcela de cargas transmitida para o solo), e para as estacas (α). Se o grupo de estacas se desloca com um valor de recalque de S_N , é possível escrever a carga absorvida pelo solo (R_p) abaixo da placa a partir da utilização da aproximação da rigidez variacional obtida por diferença finita a Montante com $R_0 = 0$ e $S_0 = 0$. O resultado dessas considerações é escrito por meio da Equação 71. De forma análoga a carga total no sistema, R , pode ser escrita pelo produto de $k.S_N$, conforme Equação 72. Então a parcela de carga β , absorvida pelo solo (a relação entre a carga no solo e a carga total $\beta = R_p/R$) pode ser escrita conforme a Equação 73.

$$R_p = k_p \cdot S_N \quad (71)$$

$$R = k \cdot S_N \quad (72)$$

$$\beta = \frac{R_p}{R} = \frac{k_p \cdot S_N}{k \cdot S_N} = \frac{k_p}{k} = \frac{1}{F} \quad (73)$$

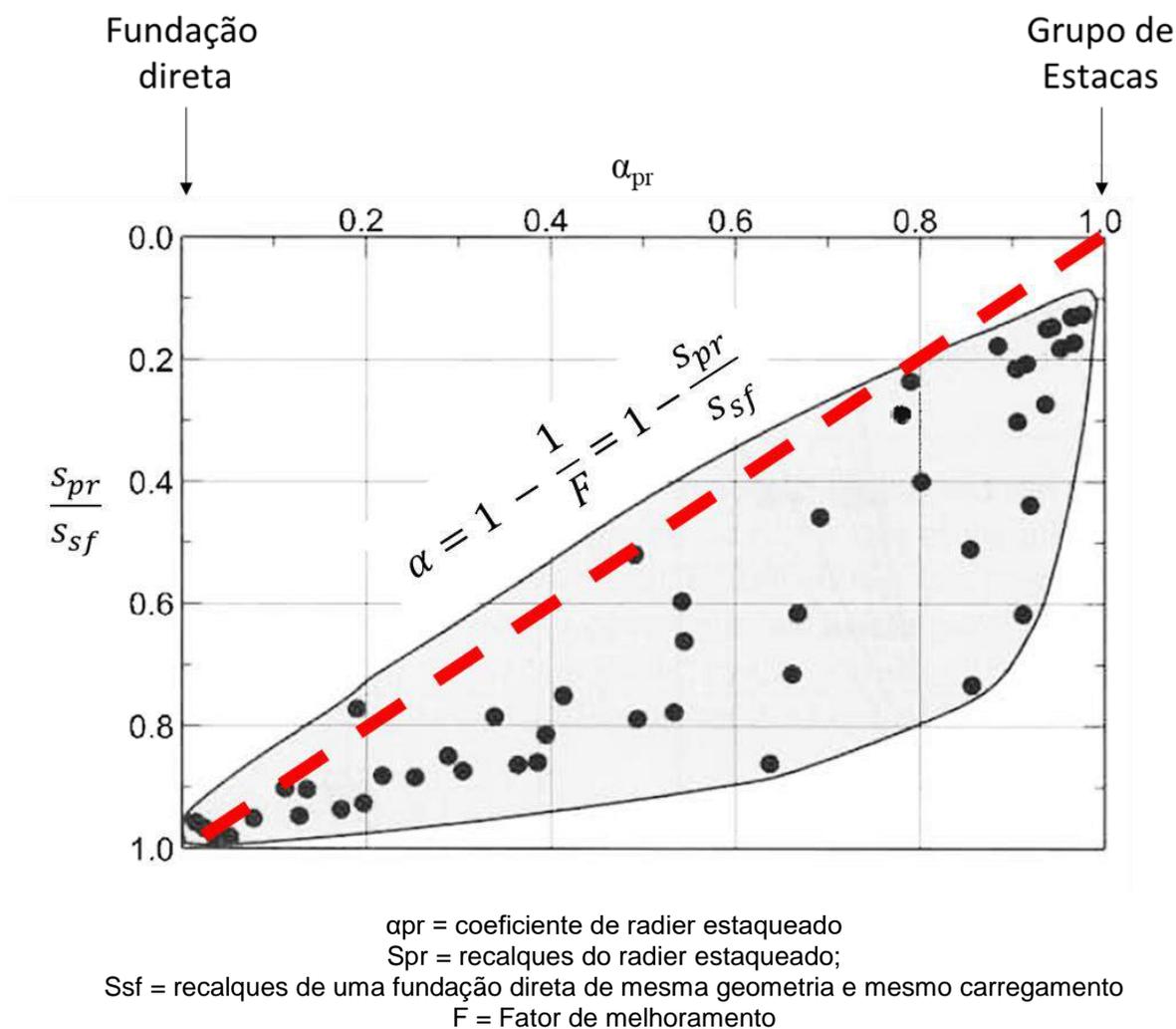
A Equação 73 apresenta a relação entre a parcela de carga transferida para o solo e o fator de melhoramento. É possível então escrever β em função da rigidez relativa estaca-placa λ , conforme Equação 74. Como a soma entre β e α necessariamente precisa ser igual a unidade, é possível escrever α (parcela de carga transferida para as estacas) em função de F e de λ , Equação 75.

$$\beta = \frac{1}{F} = \frac{1}{1 + \lambda \cdot N} \quad (74)$$

$$\alpha = 1 - \frac{1}{F} = \frac{\lambda \cdot N}{1 + \lambda \cdot N} \quad (75)$$

Onde: α = parcela de cargas nas estacas; β = parcela de carga no solo.

Como dito anteriormente, a fração $1/F$ é igual ao índice S_{pr}/S_{sf} de Katzenbach e Moorman (1998). A partir da Equação 75, é possível plotar o lugar geométrico da equação supracitada para o diagrama apresentado pelos autores, conforme Figura 33.

Figura 33 – Diagrama α versus S_{pr}/S_{sf} ($1/F$).

Fonte: Adaptado de Katzenbach e Moorman (1998).

3.4.1 Efeito de Grupo

Até o momento, a base de todo o desenvolvimento das formulações reside na obtenção dos parâmetros de deformabilidade do solo ou do grupo de estacas a partir de ensaios de placa (Métodos A, B e C). Para o caso em que a placa utilizada no ensaio apresenta o mesmo diâmetro da estaca/coluna a ser ensaiada, é de se esperar que a rigidez obtida seja superior à obtida para o caso de uma placa de diâmetro maior, onde a parcela referente a rigidez do solo sob a placa também influenciaria na rigidez do sistema em avaliação. Dessa forma é de esperar que a rigidez estaca-placa obtida para o caso em que o solo não é carregado (sem efeitos de interação entre solo e estaca – λ_0) seja superior à rigidez relativa estaca-placa (com interações entre solo

e estaca – λ) obtida para o cenário onde o solo também é carregado.

Assumida essa premissa, é possível então descrever o recalque do sistema de fundações para duas situações distintas:

- A primeira, ao se considerar a rigidez relativa sem efeitos de interação – λ_0 , onde são esperados recalques reduzidos, uma vez que apenas a estaca isolada seria considerada para a estimativa dos recalques do sistema (S_i). A Equação 76 realiza essa estimativa, considerando a rigidez da estaca isolada;
- A segunda, ao se considerar a rigidez relativa com efeitos de interação – λ . Dessa forma os recalques seriam mais elevados uma vez que existe contribuição do solo para a rigidez do sistema. A estimativa dos recalques considerando a rigidez com efeitos de interação é apresentada através da Equação 77.

$$S_i = \frac{S_0}{1+\lambda_0.N} \quad (76)$$

$$S_N = \frac{S_0}{1+\lambda.N} \quad (77)$$

Velloso e Lopes (2010) definiram a razão de efeito de grupo (ξ) como sendo a relação entre “os recalques de um grupo de estacas e aquele de uma única estaca sob sua parcela de carga no grupo”. Dessa forma, a razão de efeito grupo pode ser apresentada por meio da Equação 78, ao se utilizar as Equações 76 e 77.

$$\xi = \frac{S_N}{S_i} = \frac{\frac{S_0}{1+\lambda.N}}{\frac{S_0}{1+\lambda_0.N}} = \frac{1+\lambda_0.N}{1+\lambda.N} \quad (78)$$

Uma outra questão que vale a pena ser debatida é a convergência da equação obtida. Uma vez que, a razão de efeito de grupo deve, ao menos espera-se, que pare de crescer com o aumento do número de estacas. Não seria coerente imaginar que para sistemas com cada vez mais estacas esse valor não parasse de crescer. Portanto, foi avaliado qual seria a razão de efeito de grupo máxima ($\xi_{\text{máx}}$). Para tanto foi encontrado o limite da Equação 40 quando o número de estacas N tende ao infinito ($N \rightarrow \infty$, $\xi \rightarrow \xi_{\text{máx}}$), o resultado é apresentado na Equação 79.

$$\xi_{\text{Máx}} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1+\lambda_0.N}{1+\lambda.N} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (79)$$

Com o objetivo de correlacionar os valores de da razão de efeito de grupo e seu valor máximo, algumas modificações foram realizadas na Equação 78, a partir da Equação 79, onde se pode escrever o valor de λ_0 em função de ξ_{\max} , e posteriormente inserir na Equação 78, conforme Equação 80.

$$\lambda_0 = \xi_{M\acute{a}x} \cdot \lambda \quad (79)$$

$$\xi = \frac{1+\lambda_0.N}{1+\lambda.N} = \frac{1}{1+\lambda.N} + \frac{\lambda_0.N}{1+\lambda.N} = \frac{1}{1+\lambda.N} + \xi_{M\acute{a}x} \frac{\lambda.N}{1+\lambda.N} \quad (80)$$

O primeiro termo da Equação resultante equivale a parcela de carga transmitida para o solo (β), bem como parte do segundo termo representa a parcela de carga transferida para as estacas (α). Assim, a Equação 80 assume a forma final da Equação 81.

$$\xi = \beta + \xi_{M\acute{a}x} \cdot \alpha \quad (81)$$

Também é possível obter a Rigidez Relativa Estaca-Placa (λ) em função das razões de efeito de grupo (ξ) e efeito de grupo máximo (ξ_{\max}), conforme é apresentado na Equação 82 (a partir da Equação 80).

$$\lambda = \frac{\xi - 1}{(\xi_{M\acute{a}x} - \xi) \cdot N} \quad (82)$$

onde: λ = rigidez relativa Estaca-placa; ξ = Efeito de grupo; ξ_{\max} = Efeito de grupo máximo.

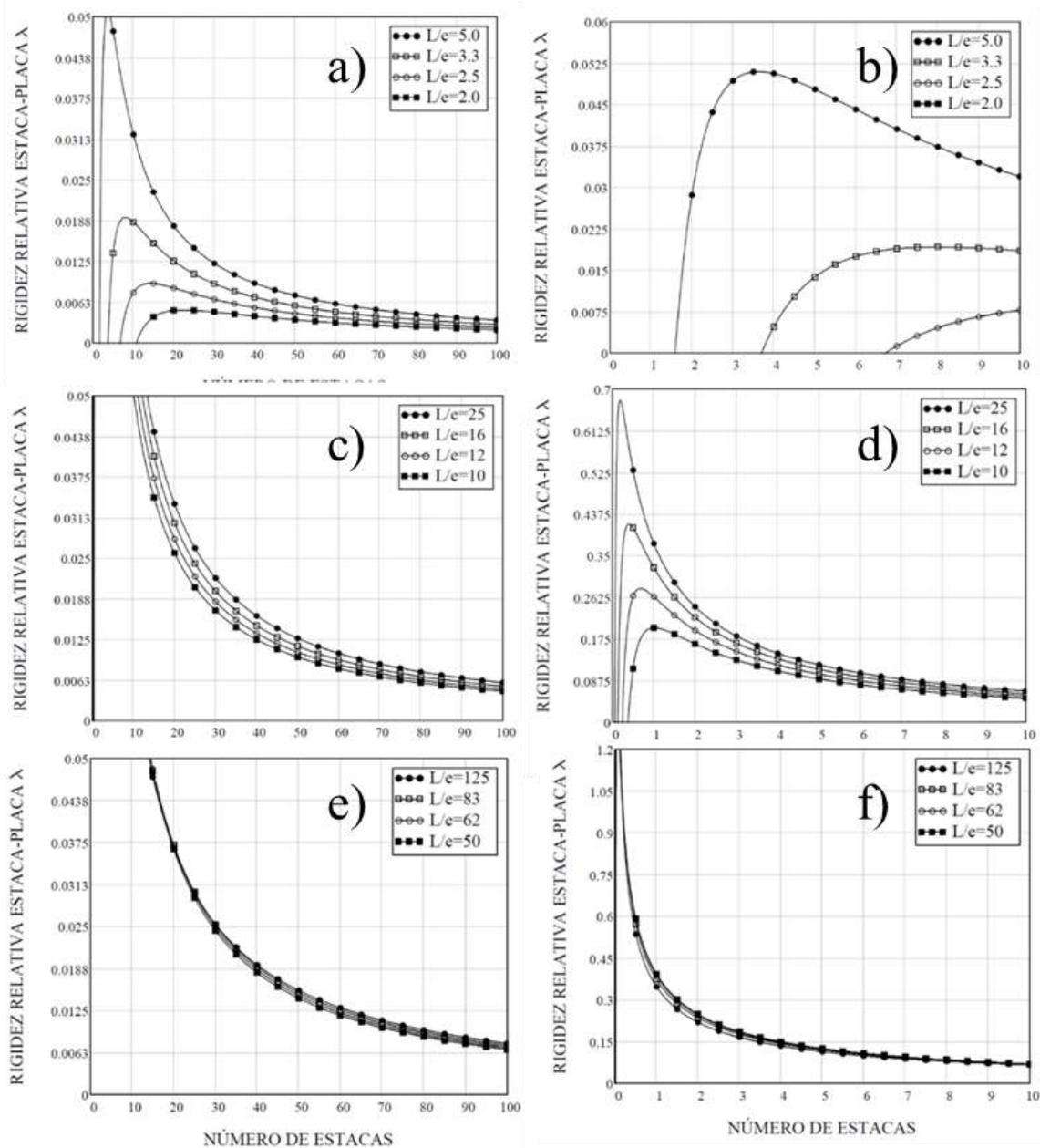
3.4.2 Correlação com Mandolini (2012)

A partir da Equação 82 é possível encontrar a rigidez relativa estaca-placa em função das razões de efeito de grupo.

Uma estimativa experimental dessas razões de efeito de grupo é apresentada por Mandolini et al (2005) e por Mandolini (2012), como já foi apresentado em capítulo anterior (Item 2.6). Portanto, a partir do apresentado pelo autor é possível estimar valores de λ , em função do número de Estacas N e em função da relação entre comprimento (L) e espaçamento (e) do grupo de estacas (L/e).

As Figuras 34, 35 e 36 apresentam os gráficos obtidos para valores de L/e variando entre 2 a 125 e N entre 0 e 100. Vale salientar que esses gráficos apresentados representam o cruzamento da experiência acumulada de Mandolini (2005 e 2012) com as equações deduzidas até aqui. Mas não fazem parte das deduções analíticas desse trabalho, sendo portanto apenas um produto da extrapolação de equações empíricas obtidas para um contexto italiano. Toda e qualquer utilização dessas figuras tem fim apenas de estimativa e ordem de grandeza dos valores esperados para a Rigidez relativa estaca-placa.

Figura 34 – Rigidez relativa estaca-placa a partir de equações empíricas de Mandolini et al. (2005) e Mandolini (2012) – visualização em gráficos 2D



Fonte: Autoria Própria

Embora não sejam resultados de fato, os gráficos apresentados são fruto de dados experimentais retro-analisadas a partir de Equação deduzida. E adotando essas ilustrações como bons indicadores do que se esperar dos resultados de rigidez relativa estaca-placa é possível avaliar que:

- Para relações de L/e superiores a 10 o valor de λ tende a decrescer com o aumento do número de estacas, se aproximando a uma hipérbole.
- Já considerando-se o mesmo número de estacas o valor de λ tende a convergir e apresentar comportamento de assíntota para valores de L/e acima de 10.
- Os valores de λ se mostraram inferiores a unidade ($\lambda < 1$), para a faixa de valores estudados ($N \leq 100$ e $L/e \leq 125$).

4. VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Com o objetivo de testar a robustez física e a compatibilidade do método com a realidade é realizada uma modelagem numérica em softwares de elementos finitos especializado em análise de radier e radier estaqueado.

Inicialmente foram realizadas 48 análises em software híbrido (Método dos Elementos finitos - MEF + modelos do solo) chamado ELPLA (foi utilizada versão estável 11.4), que se utiliza de hipóteses do solo como meio elástico contínuo ou da hipótese de Winkler.

Em segunda fase foram realizadas 8 modelagens em software Plaxis 3D, versão introdutória com limite de uso de materiais e de número de estacas (esta versão do software se limita a 8 estacas).

4.1 Hipótese Elástica

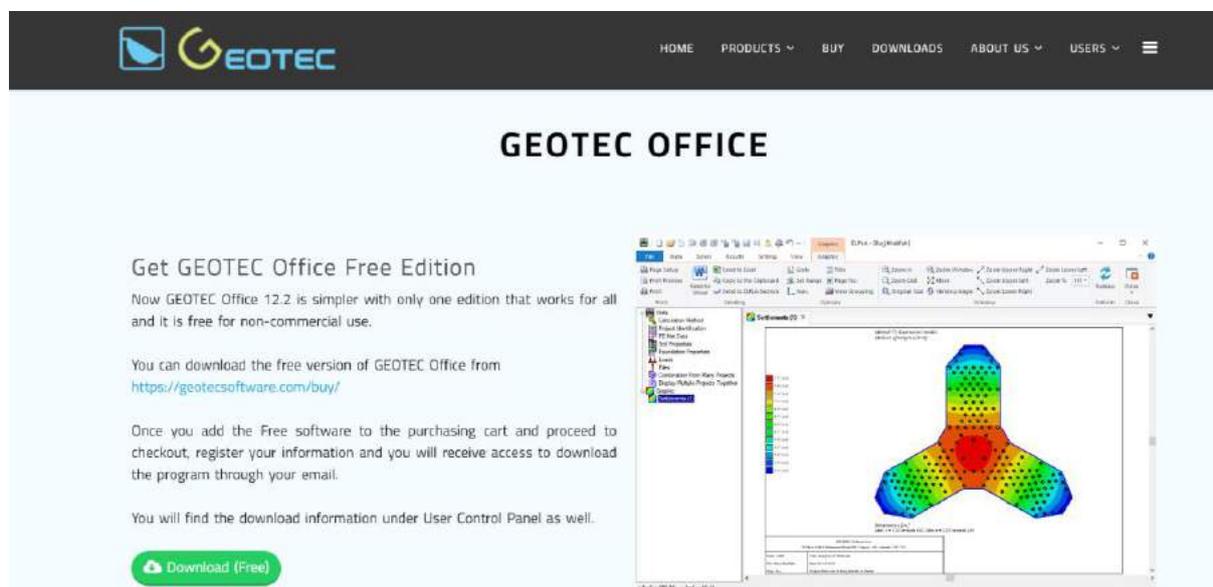
O software analisa os recalques do sistema com base na teoria da elasticidade, e por essa razão é chamado de ELPLA que é a junção das iniciais de *Elastic Plate*. Em versões recentes o software passou a aceitar a entrada não linear para o comportamento das estacas.

O programa foi desenvolvido pelo então estudante de doutorado Mohammed El Gendy sob a supervisão do professor do Instituto Geotécnico de Nuremberg Manfred Keny, e tem download gratuito para uso não comercial com limitação do número de nós a serem utilizados na malha de elementos finitos – 300 nós.

A tela de abertura do site da empresa que distribui o software é apresentada por meio da Figura 37.

Vale salientar que o software tem interface com aplicações BIM e faz parte da suíte Geotec Office, empresa fundada após a aposentadoria do professor Manfred Kany. Dentro da suíte existem ainda aplicativos de análise de tensões no solo, pórticos planos e interpolação de sondagens.

Figura 37 –Tela de abertura do site da suíte Geotec Office – software gratuito com limitações.



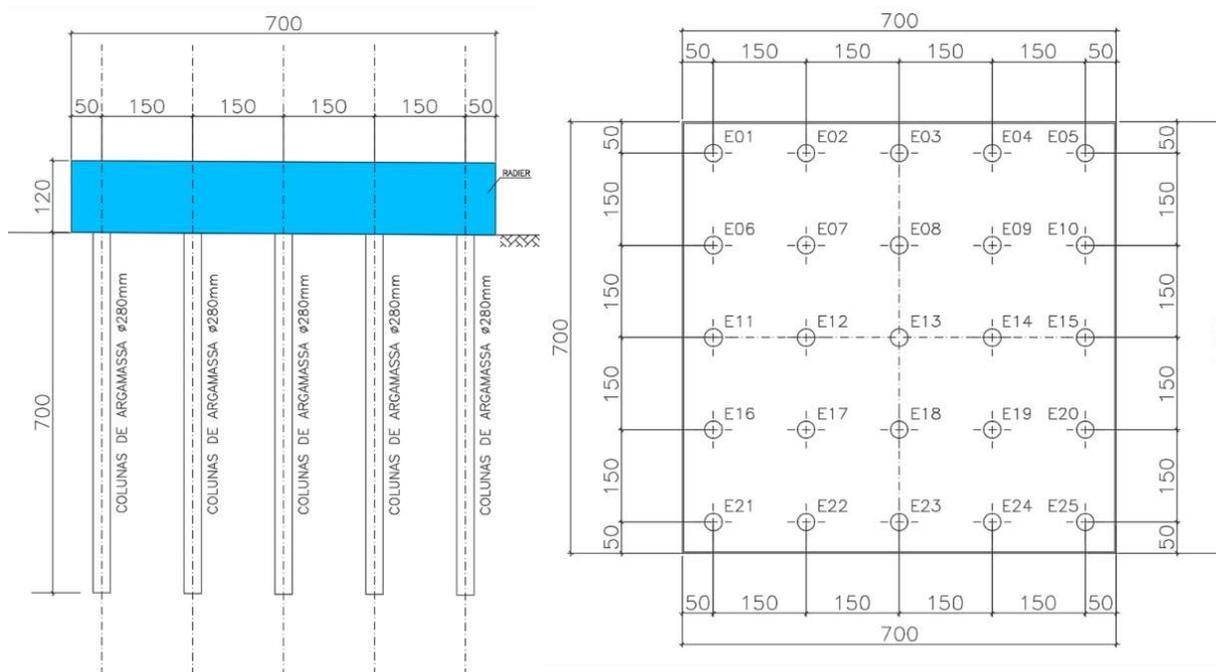
Fonte: Site Geotec Office acessado em 18/09/2022

Para a validação numérica foi proposto um radier com dimensões em planta de 7,00 x 7,00 m², com 25 colunas de melhoramento com 280 mm (diâmetro mais utilizado nas pesquisas de Amorim, 2019 para o Recife), e 7,00 m de comprimento, imersas em camada de solo homogêneo (com uma única camada de mesma densidade e parâmetros). Foram simulados 4 cenários de carregamento variando entre 60, 120, 360 e 640 kPa, o que representam aproximadamente 6, 12, 36 e 64 pavimentos.

Foi utilizado um radier com espessura de 1,20 m e o espaçamento entre estacas foi adotado de 1,50 m (em torno de cinco vezes o diâmetro D da estaca – $e > 5.d$ – conforme Figura 38). O solo de fundação é admitido como elástico, linear, homogêneo e isotrópico, com módulo de Elasticidade de 5 MPa, Figura 40. Com profundidade (Z) de 21,00 m (três vezes o comprimento das estacas – $Z = 3.L$). A Figura 41 apresenta o sistema de carregamento do radier, e o modelo gerado.

Vale salientar que a relação B/L proposta por Randolph (2003), para essa validação numérica, foi intencionalmente adotada de exatamente igual a unidade (valor crítico para o critério). O detalhamento das dimensões do radier e do sistema de fundações proposto para a análise são apresentados na Figura 38, 39 e 40.

Figura 38 – Modelo proposto para análise de Elementos Finitos, (a) corte, (b) planta.

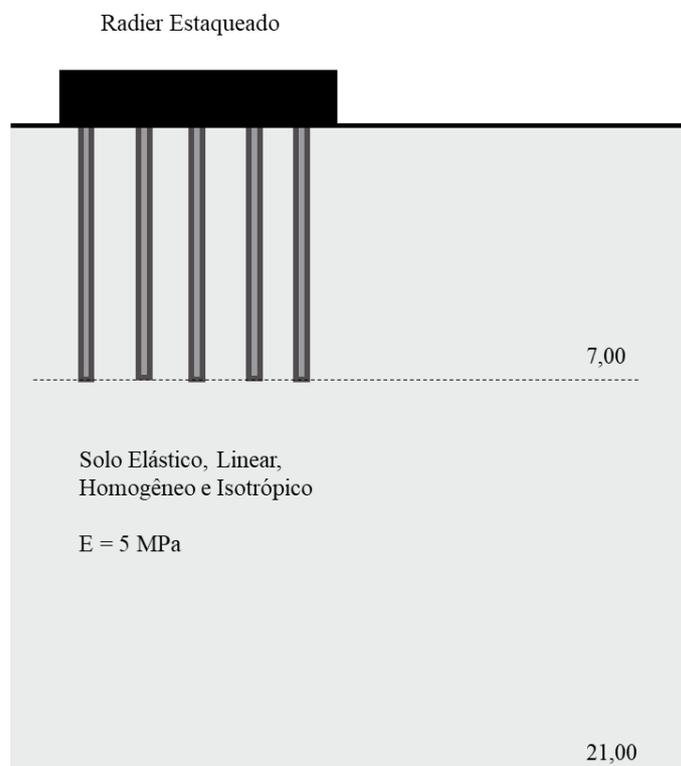


(a) Corte

(b) Planta

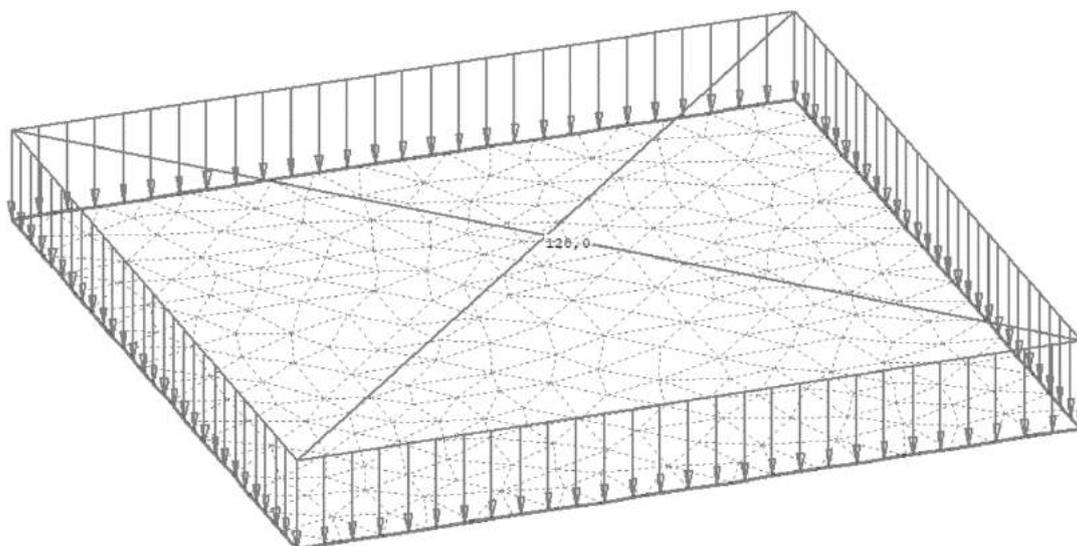
Fonte: Autoria Própria.

Figura 39 – Sistema de carregamento e modelo em planta e perspectiva.

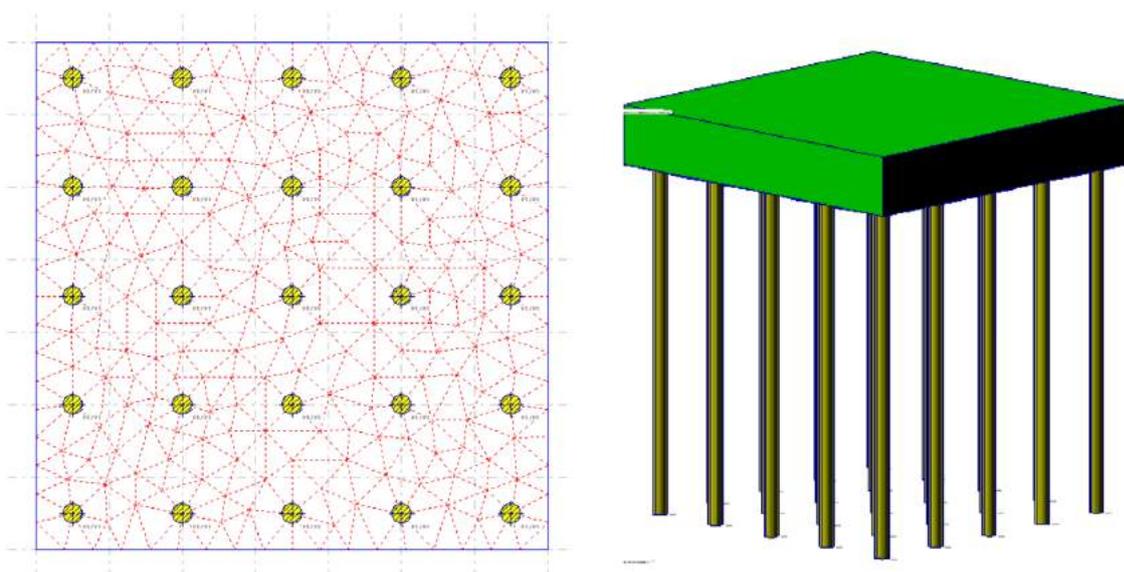


Fonte: Autoria Própria

Figura 40 – Sistema de carregamento e modelo em planta e perspectiva.



(a) Exemplo do Sistema de Carregamento – 120 kPa



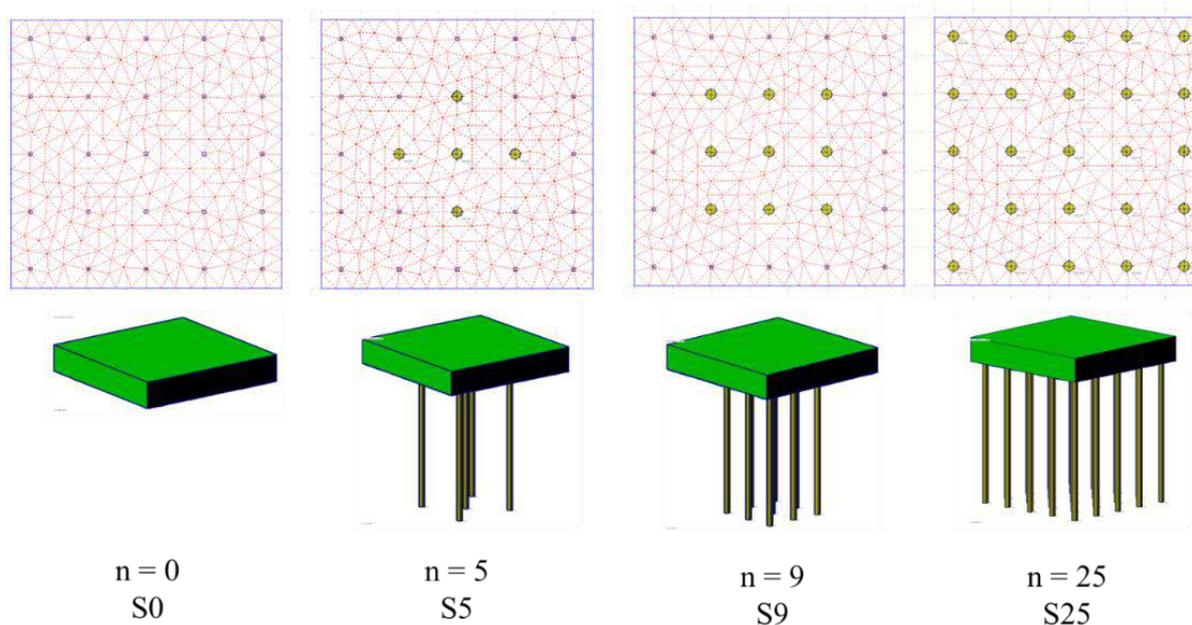
(b) Modelo e malha de elementos finitos, em planta (esquerda) e em perspectiva (direita).

Fonte: Autoria Própria, a partir de modelagem no software ELPLA 11.4

Para que a modelagem faça sentido dentro do escopo da metodologia proposta é necessário que haja variação do número N de estacas. Dessa forma a proposta dessa validação é inicialmente calculado o recalque da mesma placa, sobre o mesmo solo, porém sem o uso de estacas (fundação superficial) com o propósito de se obter o valor do recalque S_0 .

Doravante fez-se variar o número de estacas entre 1, 4, 5, 8, 9, 13, 15, 16, 17, 21 e 25 estacas. Perfazendo o total de 12 pontos para a construção do Plano de Melhoramento (F x D) para cada cenário de carregamento. Como foram propostos 4 cenários de cargas, foram realizadas ao todo 48 modelos no software para reproduzir a diminuição dos recalques com o aumento do número de estacas. Quatro modelos são apresentados por meio da Figura 41.

Figura 41 – Modelos para $N = \{0, 5, 9, 25\}$.



Fonte: Autoria própria a partir de modelagem no ELPLA 11.4

Os resultados obtidos a partir da modelagem e da variação do número N de estacas são apresentados na Tabela 16. A Figura 42 apresenta a distribuição de recalques para a placa sem estacas.

Também é possível observar a partir da Tabela 15 a confirmação do comportamento de redução de recalques com o aumento do número de estacas N, e o conseqüente aumento do Fator de Melhoramento. A partir dessa etapa, foram plotados respectivamente, o Plano de Melhoramento e a curva de recalques com o aumento do número de estacas, conforme Figuras 43 e 44. A rigidez relativa estaca-placa obtida variou entre 0,0235 e 0,0265, e o coeficiente de correlação variou entre 0,96 a 0,98.

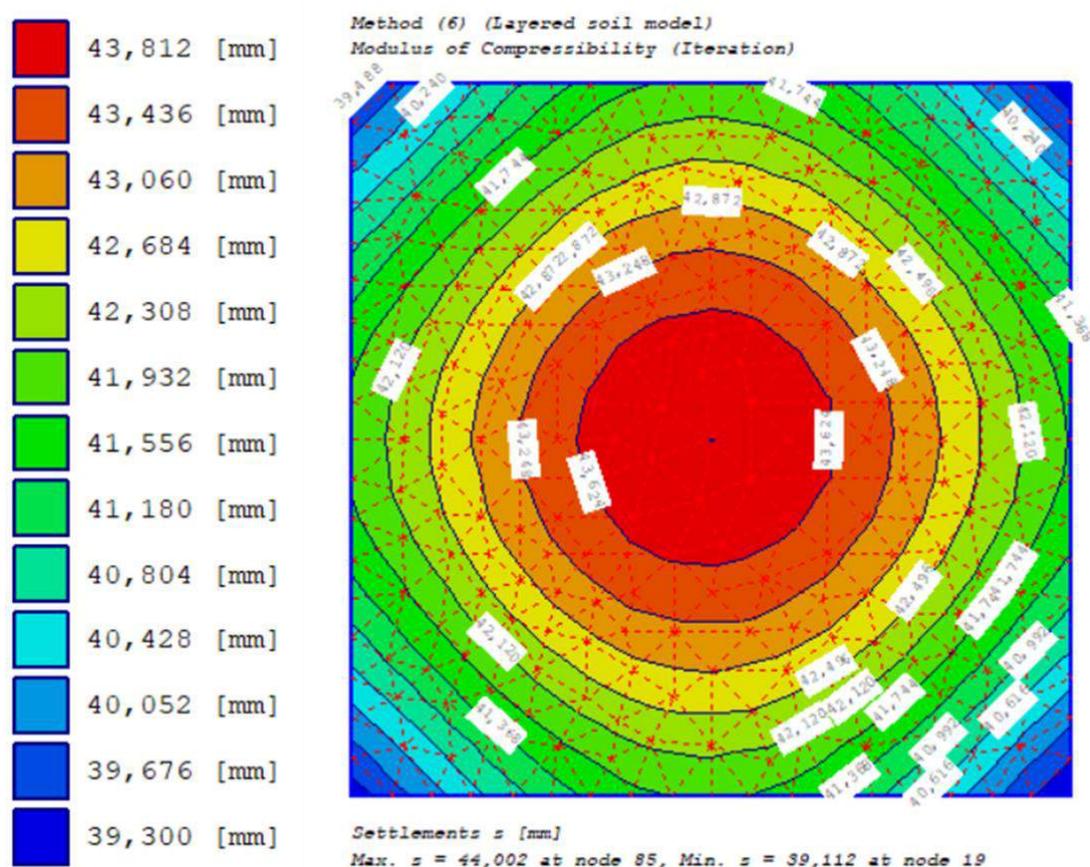
Tabela 16 – Recalques médios* em função do número de estacas do radier

N	RECALQUES (mm)			
	60 kPa	120 kPa	360 kPa	640 kPa
0	62,96	105,00	272,83	468,71
1	60,53	100,79	261,84	449,73
4	56,71	93,52	242,32	415,93
5	56,66	93,00	243,36	417,60
8	51,63	85,42	220,57	378,25
9	52,62	86,00	224,40	384,73
13	48,30	79,54	204,54	350,36
15	46,12	75,74	194,62	333,28
16	44,41	72,87	187,23	320,43
17	42,77	70,19	179,88	307,84
21	40,79	66,70	171,03	292,43
25	41,25	66,00	171,13	292,34
λ	0,0235	0,0253	0,0261	0,0265

*Os recalques médios foram obtidos ao se calcular a média dos recalques de todos os nós da malha de elementos finitos da placa.

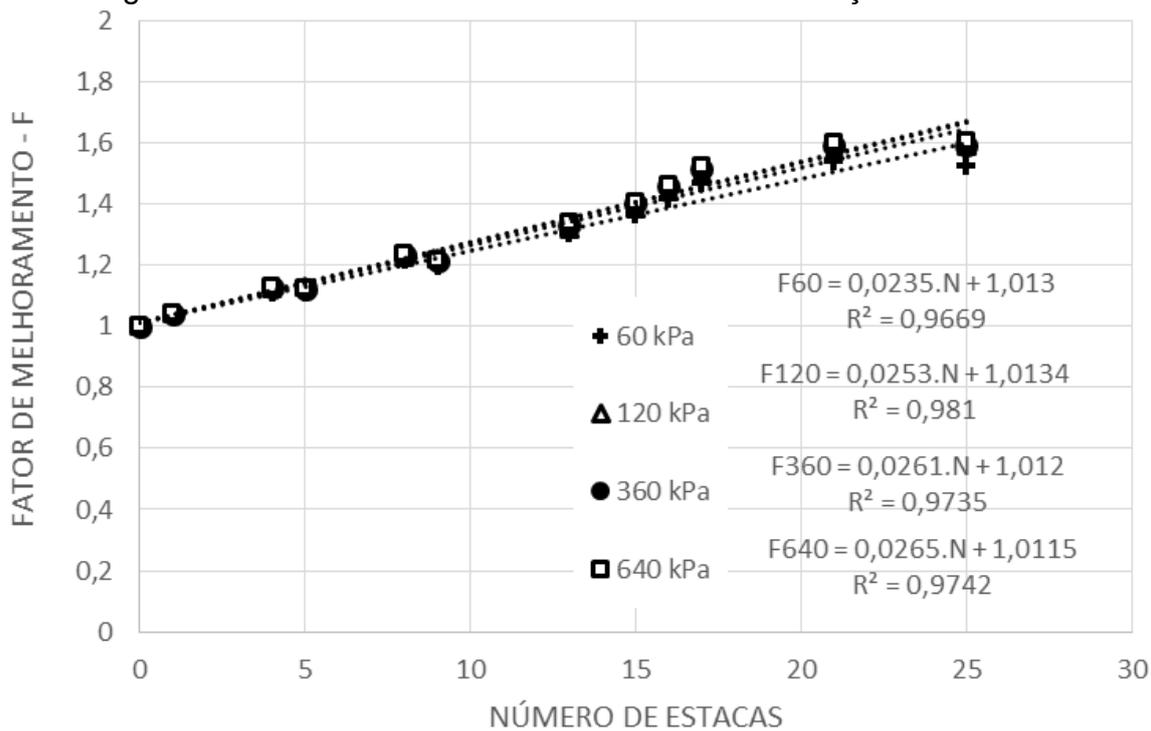
Fonte: Aatoria Própria

Figura 42 – Distribuição de Recalques para 60 kPa e N = 25.



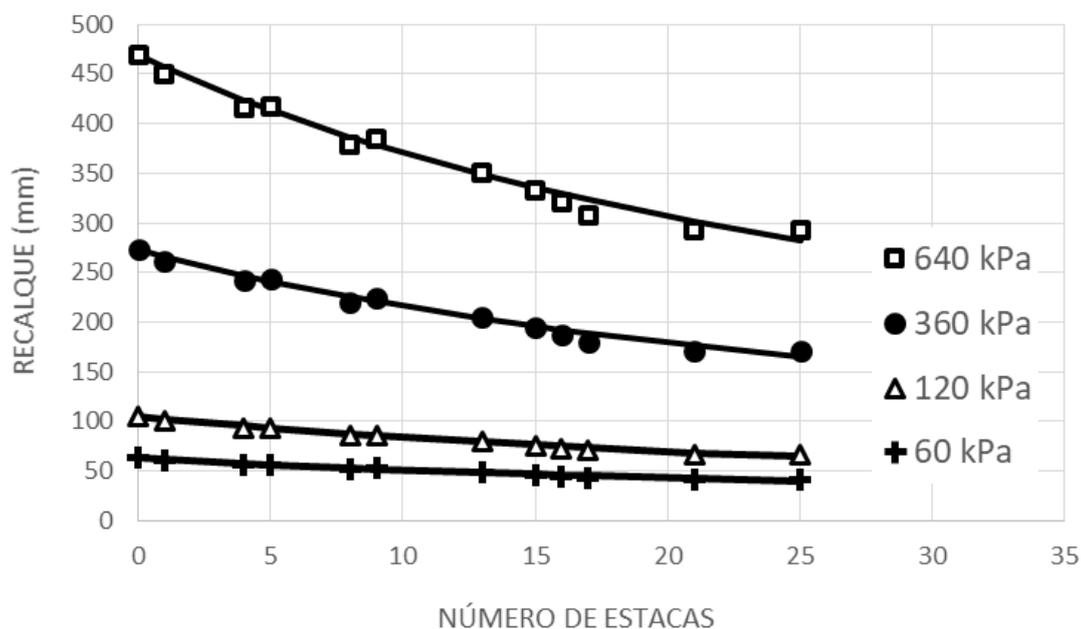
Fonte: Aatoria Própria

Figura 43 – Plano de Melhoramento – F x N – Validação Numérica.



Fonte: Autoria Própria

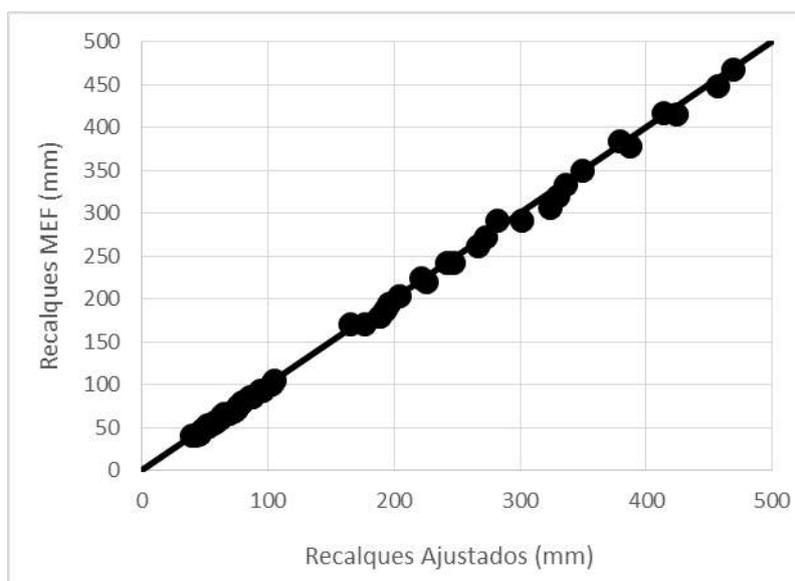
Figura 44 – Recalque versus Número de Estacas.



Fonte: Autoria Própria.

De posse dos resultados obtidos, é possível traçar o gráfico de correlação entre os recalques calculados por meio do método híbrido (MEF + solo – Elpla) e ajustados através da metodologia proposta. A Figura 45 apresenta esse resultado.

Figura 45 – Recalque Calculado Híbrido - ELPLA versus Recalques Ajustados.



Fonte: Autoria Própria.

4.1.1 Avaliação da Influência do Espaçamento relativo

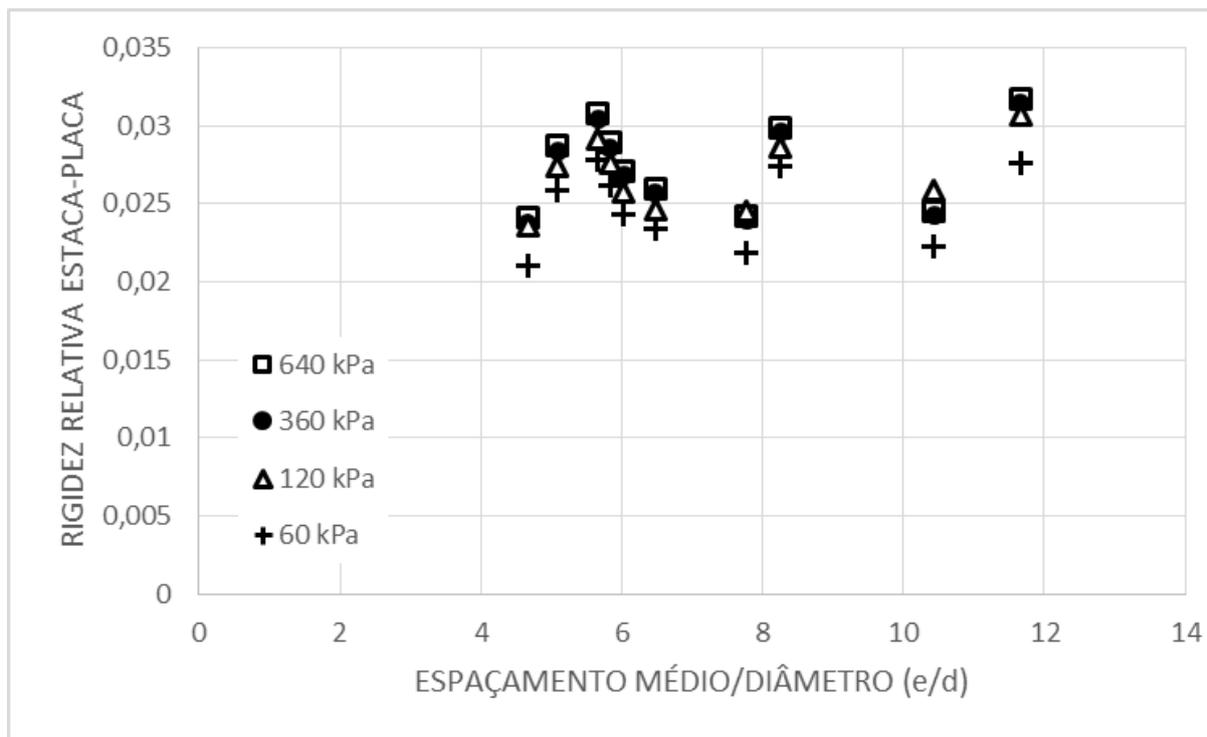
Espera-se que a área de carregamento influencie sobre os resultados dos recalques. Foi demonstrado analiticamente que essa área tende a ser menos influente à medida que a Eficiência E do sistema aumenta (relação entre rigidez relativa e razão de áreas). Com a finalidade de demonstrar essa tendência também a partir das análises numéricas, a rigidez relativa estaca-placa foi calculada de forma direta a partir da Equação 6 e comparada com o espaçamento médio relativo (relação entre o espaçamento médio e o diâmetro d das estacas), dado pela Equação 83. Os resultados obtidos são apresentados por meio da Figura 46.

É possível observar que a rigidez relativa estaca-placa praticamente não é influenciada pela diminuição do espaçamento médio, à medida que são incorporadas estacas ao sistema de fundações. Os valores de rigidez relativa variaram entre 0,021 e 0,032, com média 0,0266 (desvio padrão de 0,0027 e coeficiente de variação de 10%), valores de mesma ordem de grandeza dos obtidos por meio da metodologia de interpolação.

$$\frac{e}{d} = \frac{1}{d} \cdot \sqrt{\frac{A}{N}} \quad (83)$$

Onde e = espaçamento; d = diâmetro; A = área e N = número de estacas.

Figura 46 – Espaçamento relativo e Rigidez Relativa.



Fonte: Autoria Própria

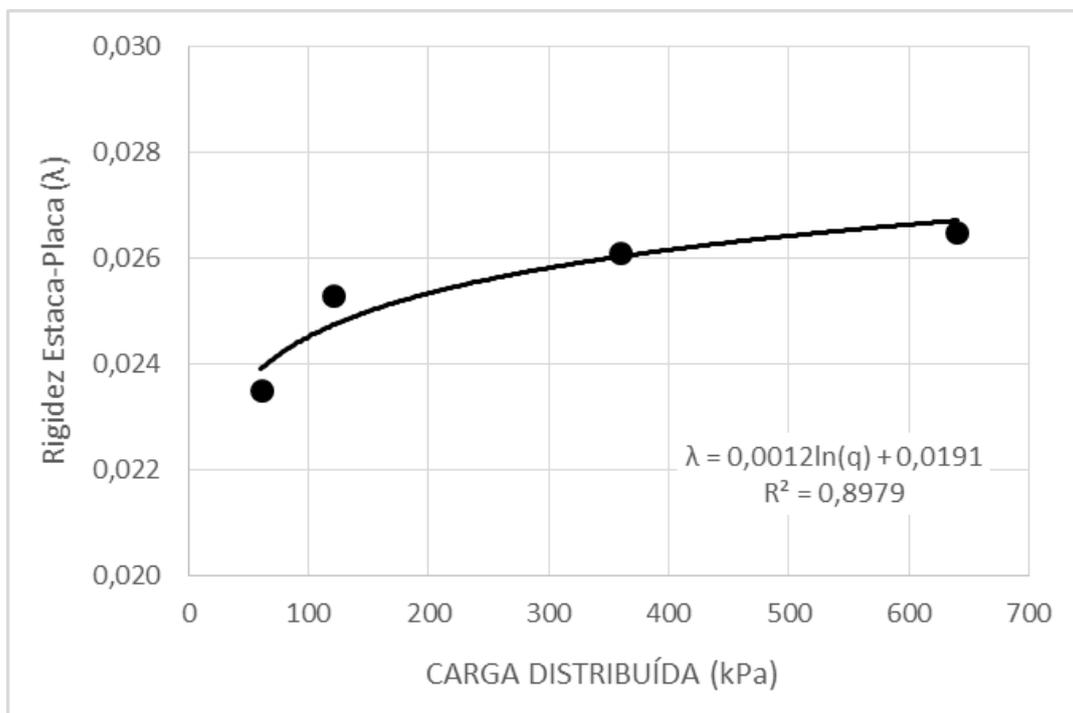
4.1.2 Influência do Carregamento

À medida que o carregamento aumenta, é de se esperar que a resposta, tanto das estacas quanto do solo sob a placa sejam diferentes. O que impactaria diretamente no resultado da rigidez relativa estaca-placa. Com o objetivo de avaliar essa influência foi traçado um gráfico de Rigidez relativa x Carregamento utilizado na modelagem numérica, conforme apresentado na Figura 47 (foram utilizados os valores de λ obtidos por meio da regressão linear da Figura 43).

É possível observar que houve um pequeno aumento da rigidez relativa estaca-placa com o aumento do carregamento. Ajustando-se aproximadamente a um crescimento exponencial. É verificado um crescimento de 12,7% na rigidez relativa, para um acréscimo de 10,66x no carregamento (640 kPa em relação a 60 kPa).

Essa observação é importante uma vez que não são esperadas grandes variações da rigidez relativa para variações de carregamento, o que reduz o erro associado às estimativas de recalques.

Figura 47 – Espaçamento relativo e Rigidez Relativa para o caso modelado.



Fonte: Autoria Própria.

4.1.3 Principais conclusões acerca Hipótese Elástica

A fim de confirmar a robustez das premissas e hipóteses assumidas e bem como a validade da equação proposta de correlação entre os recalques e o aumento do número de estacas, é proposta uma modelagem numérica em software comercial de elementos finitos desenvolvido no laboratório de Geotecnia de Nuremberg. O software ELPLA é especializado e voltado para análise de radier e grupo de estacas.

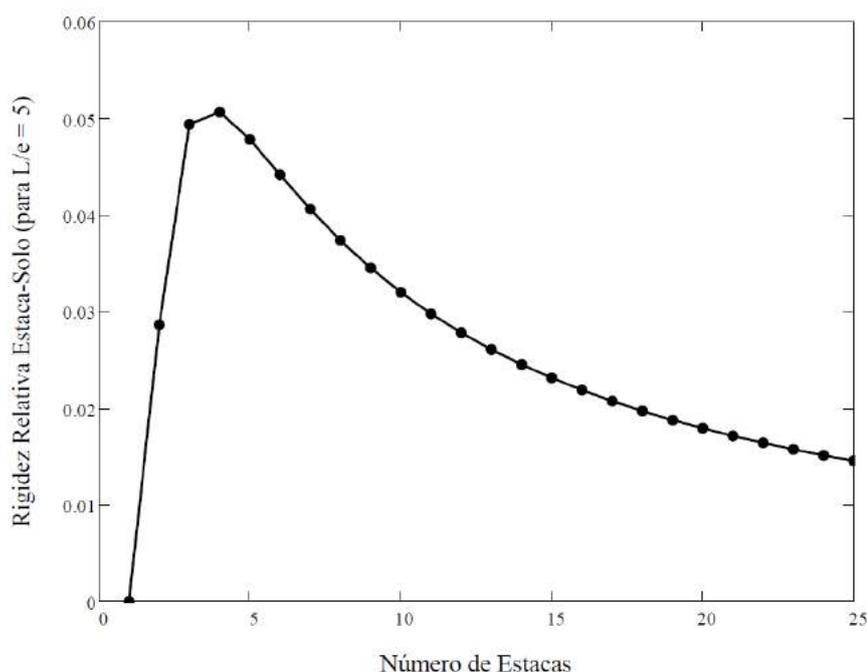
A geometria de radier estaqueado considerado tem 7 x 7 m², com espessura de 1,20 m, e colunas de argamassa de 280 mm (característica da região) com carregamentos de 60, 120, 360 e 640 kPa. O solo foi considerado como um meio elástico linear de módulo de deformação de 5 MPa. Ainda são propostas 12 geometrias distintas: o radier sem estacas (N=0), e o radier estaqueado com 1, 4, 5, 8, 9, 13, 15, 16, 17, 21 e 25 estacas. O que perfaz um total de 48 modelos analisados.

Os recalques médios encontrados variaram de 40,79 a 468,71 mm, diminuindo com o aumento do número de estacas. Foi possível se encontrar os fatores de melhoramento – F e a partir do Plano de Melhoramento, encontrar a rigidez estaca-

solo variando entre 0,0235 e 0,0265, e o coeficiente de correlação variou entre 0,96 a 0,98. O que indica aderência da equação proposta e os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos.

Quando a rigidez relativa estaca-placa é calculada de forma direta, ponto a ponto, a partir da equação 6, é possível observar que seus valores variam entre 0,021 e 0,032, com média 0,0266 se mostrando da mesma ordem de grandeza da encontrada por meio das interpolações. Vale ressaltar que a modelagem procedida apresenta $L/e \approx 5$ quando $N = 25$ estacas. Para esse cenário os valores de λ são da ordem de 0,015 a 0,051, com média de 0,026, quando estimados a partir das Equações empíricas de Mandolini et al. (2005) e da Equação 82, conforme Figura 48.

Figura 48 – Rigidez relativa estaca-placa, função do número de estacas para $L/e = 5$.



É possível notar também que não há tendência de variação do parâmetro com a variação do espaçamento relativo, fato que confirma a hipótese analiticamente demonstrada que para sistemas com Eficiência E elevada, a não consideração das áreas conduz a erros diminutos.

4.2 Hipótese Elasto-Plástica

As análises realizadas consideraram o solo como um meio elástico, linear e isotrópico, caracterizado por suas constantes elásticas como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Com o intuito de aprofundar a análise e de aproximar ainda mais os modelos ao comportamento real dos materiais, foi realizada campanha de modelagem numérica em software de amplo conhecimento do meio técnico de Geotecnia, o Plaxis. O qual pode utilizar vários modelos para o solo, dentre os quais o Elasto-plástico linear, onde se pode considerar a plastificação do material. Para o presente trabalho foi considerado o modelo de Mohr-Coulomb como critério de ruptura.

Para essa análise foi utilizada uma versão introdutória, que foi distribuída gratuitamente até o ano de 2017. Nessa versão, que é disponibilizada para grupos interessados em aprender sobre as potencialidades do software e que apresenta limitações quanto ao número de materiais envolvidos na análise, bem como o número de fases construtivas a serem analisadas. A versão introdutória disponibiliza o uso de apenas um tipo de solo, um tipo de estrutura e grupo de até 8 estacas. Baseado nessas limitações foi desenvolvido o planejamento das análises.

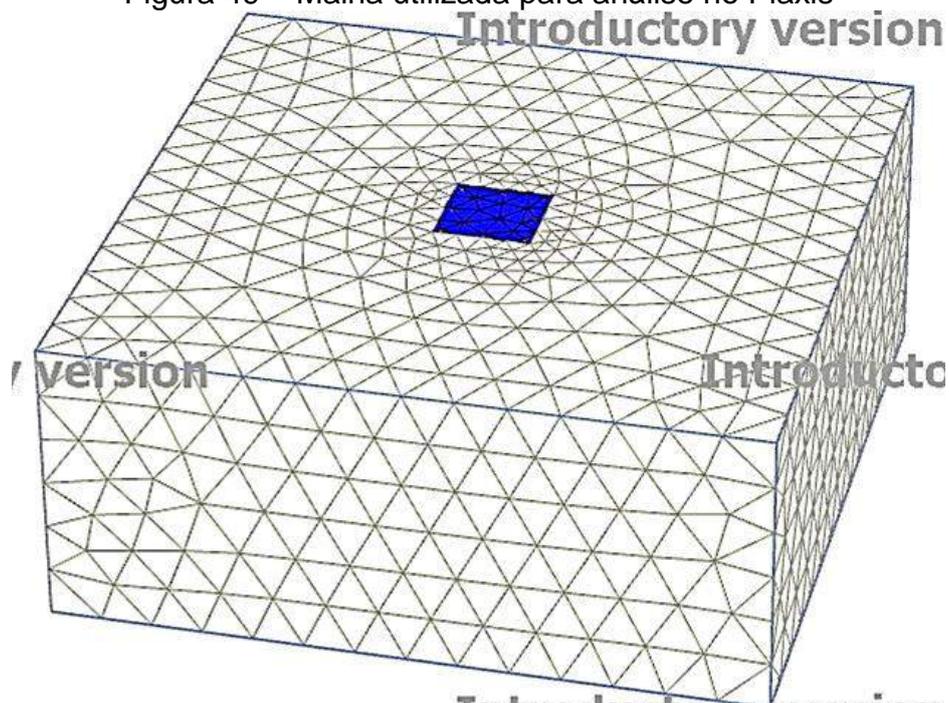
Analogamente a análise elástica desenvolvida no ELPLA, foi modelado um radier de 7 x 7 m² em planta e espessura de 1,20 m, com carregamento de 120 kPa. Sobre o solo com módulo de Elasticidade de 5 MPa, coeficiente de Poisson de 0,30, e parâmetros de resistência ao cisalhamento: coesão nula e ângulo de atrito de 30°, os quais compõe o critério de Mohr-Coulomb. A Figura 49 ilustra o processo de modelagem do radier, os parâmetros adotados para a análise são apresentados por meio da Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros do solo, utilizados para análise no Plaxis

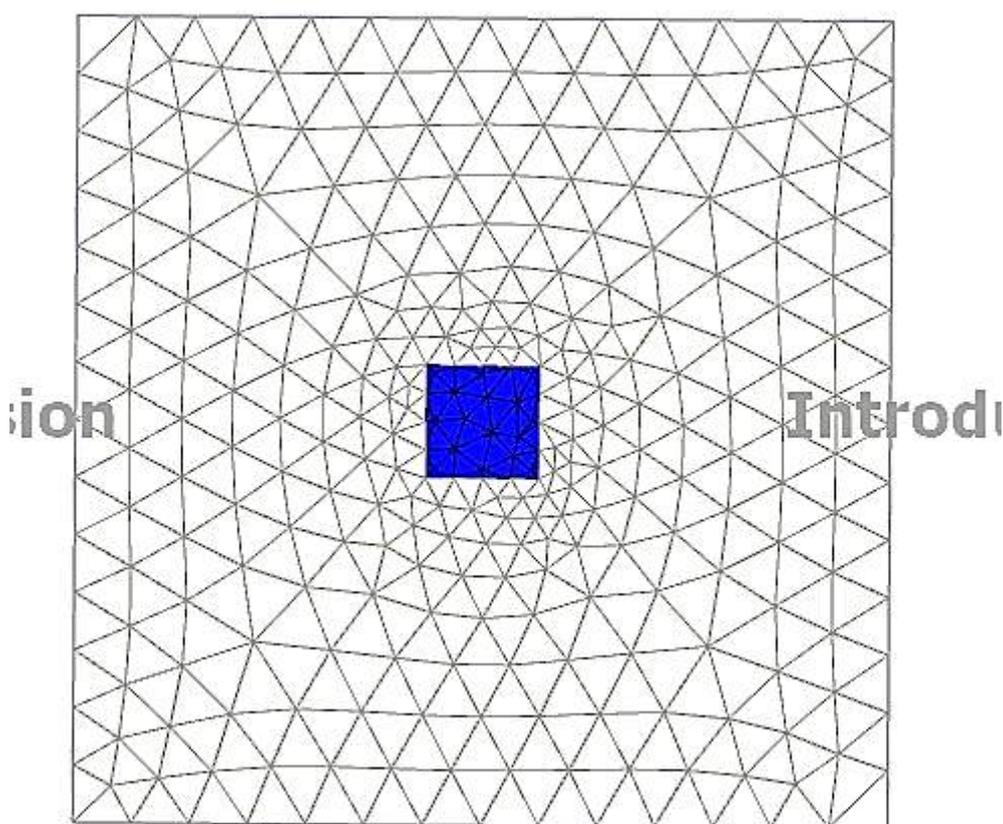
Parâmetro	Valor
Área do Radier	7 x 7 = 49 m ²
Espessura	1,20 m
Carregamento	Distribuído de 120 kPa
Módulo de Elasticidade	5 MPa
Coeficiente de Poisson	0,30
Coesão	0
Ângulo de Atrito	30°

Fonte: Autoria Própria

Figura 49 – Malha utilizada para análise no Plaxis



(a) Malha em perspectiva



(b) Malha vista de cima

Fonte: Autoria Própria, a partir de software Plaxis.

Fez-se variar o número de estacas de $N = 0$ até $N = 8$ (limitação do software), e foram calculados os recalques para cada configuração, os resultados dos recalques calculados é apresentado por meio da Tabela 18. Um resultado típico da modelagem é apresentado por meio das Figuras 50 e 51. Foram calculados os fatores de melhoramento F por meio da relação entre os recalques (S_0/S_N), e foi traçado o plano de melhoramento a partir dos resultados (Plano de melhoramento: $F \times N$, Figura 51).

De posse do plano de melhoramento, foi possível encontrar uma rigidez estaca-placa de 0,0188, com coeficiente de correlação acima de 0,89, o que demonstra a correlação da metodologia proposta com a modelagem procedida no Plaxis considerando o solo como meio Elasto-plástico e contínuo. Vale salientar que o intercepto obtido foi de 0,9948, mais um fato que confirma a veracidade da premissa do plano de melhoramento e da Equação principal do método, onde o intercepto deve ser igual a unidade.

A Figura 52 apresenta a interpolação dos recalques *versus* o número de estacas, são plotados os dados obtidos a partir da modelagem no Plaxis em comparação à curva obtida a partir da Equação da metodologia (com os parâmetros obtidos no plano de melhoramento). É possível notar uma ótima aderência, que é expressa pelo coeficiente de correlação também elevado.

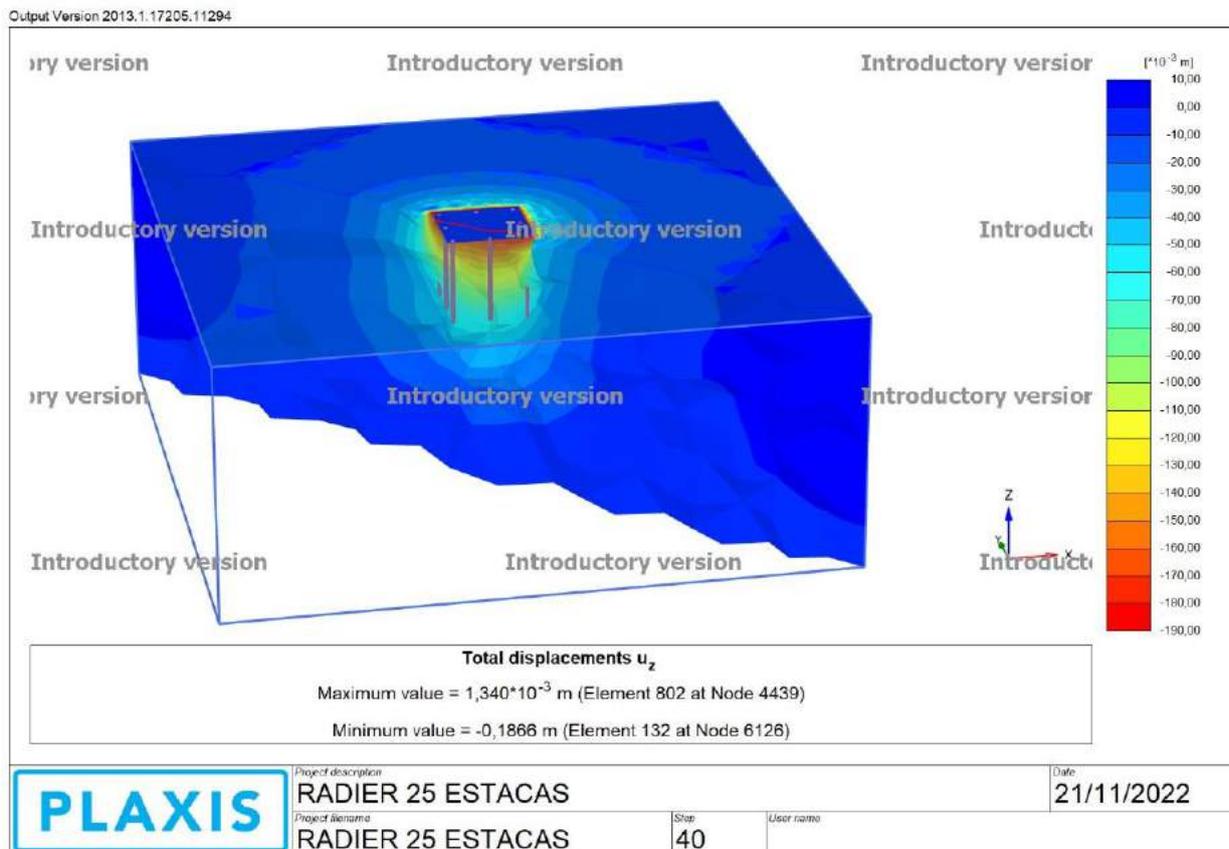
Por fim é realizada a comparação entre os recalques medidos via MEF (tanto do ELPLA, quanto do Plaxis) e os recalques estimados/ajustados a partir da metodologia, e são apresentados por meio da Figura 54.

Tabela 18 – Recalques e Fatores de Melhoramento *versus* o número de estacas

Número de Estacas	Recalque (mm)	Fator de Melhoramento
0	213,8	1,000
1	212,8	1,005
2	209,2	1,022
3	203,6	1,050
4	194,4	1,100
5	194,8	1,098
6	192,3	1,112
7	193,9	1,103
8	186,5	1,146

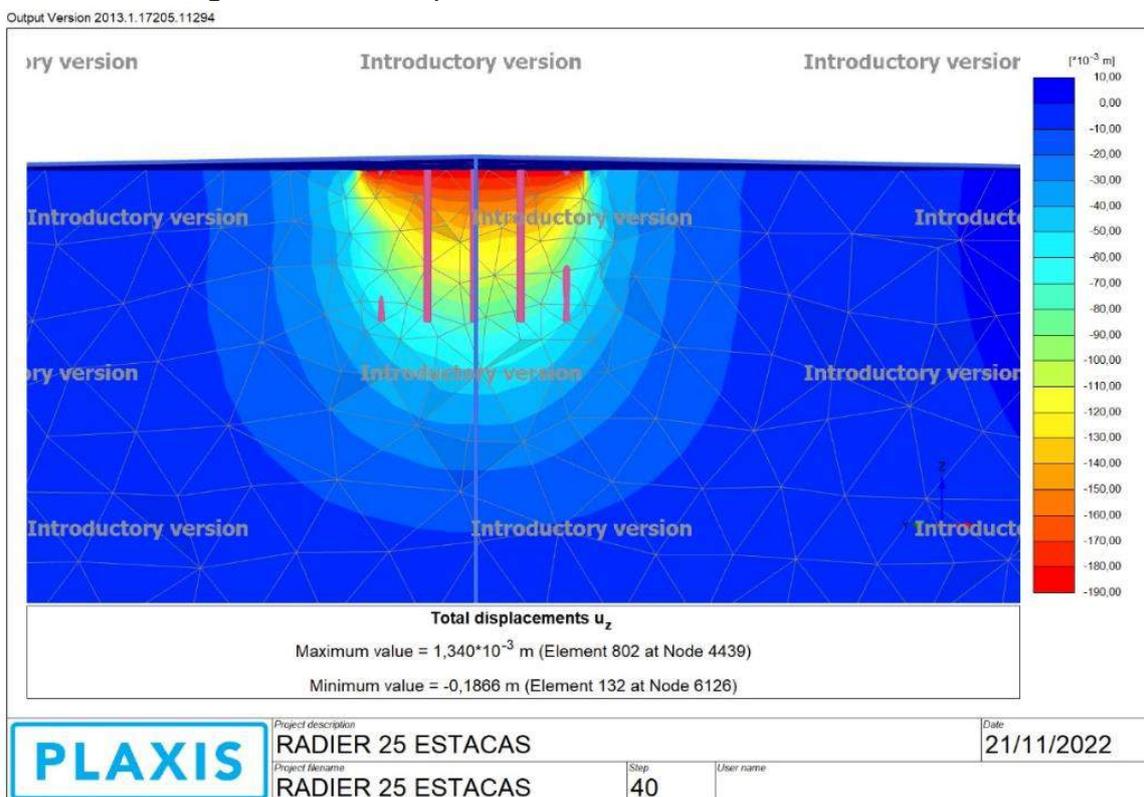
Fonte: Autoria Própria, compilados a partir de Plaxis

Figura 50 – Exemplo de Resultado de Análise no Plaxis.



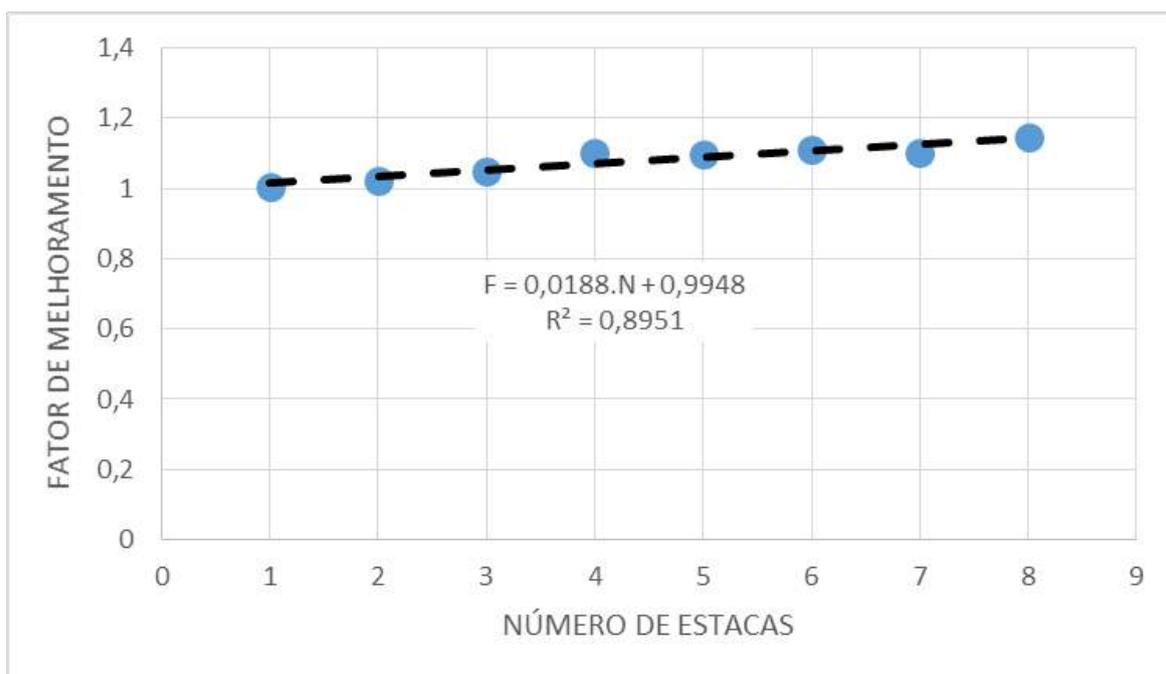
Fonte: Autoria Própria, a partir do software Plaxis

Figura 51 – Exemplo de Resultado de Análise no Plaxis.



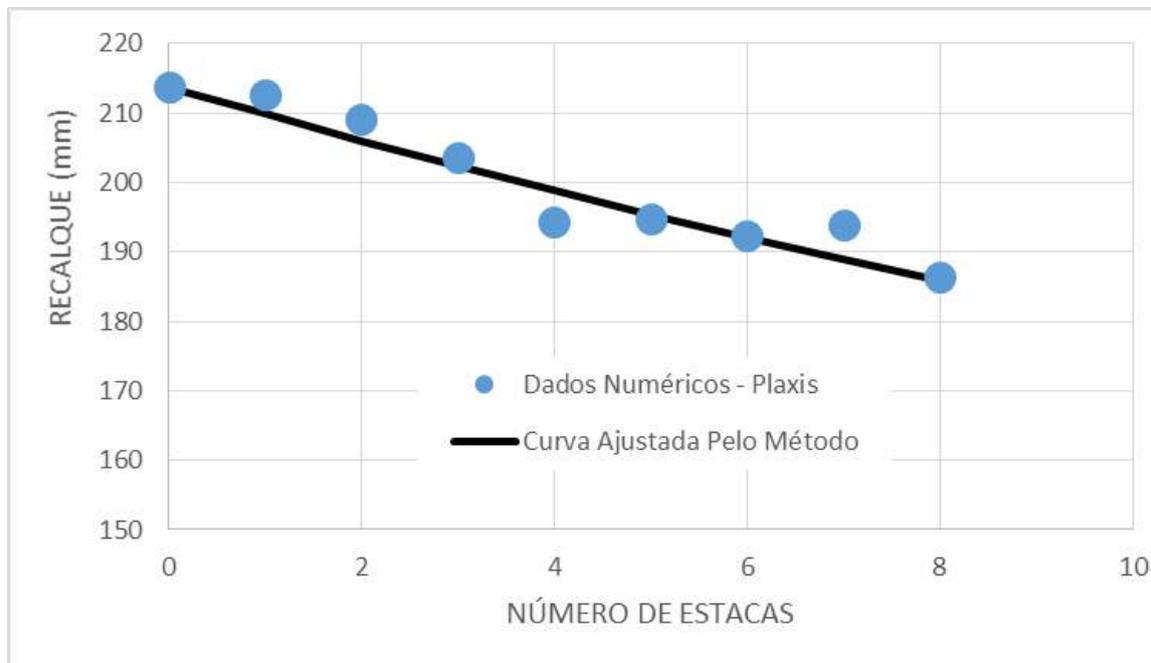
Fonte: Autoria Própria, a partir do software Plaxis

Figura 52 – Plano de Melhoramento.



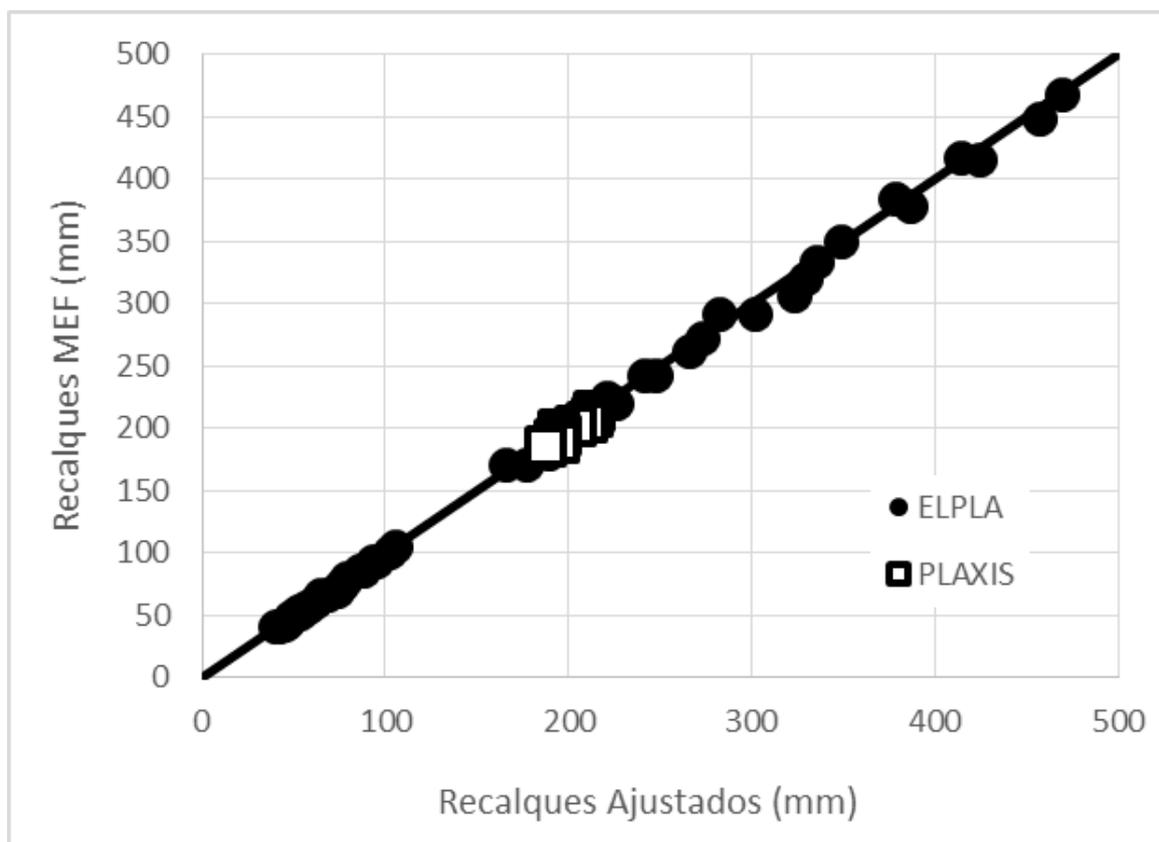
Fonte: Autoria Própria

Figura 53 – Ajuste dos recalques com o aumento do Número de Estacas.



Fonte: Autoria Própria

Figura 54 – Recalques Calculados via Plaxis x Recalques Ajustados.



Fonte: Autoria Própria

5. RESULTADOS E APLICAÇÕES

Para esse capítulo são apresentadas aplicações onde foi possível verificar a Equação proposta, bem como as marchas de cálculo sugeridas (Métodos A a D). Em alguns casos mais de uma marcha de cálculo foi utilizada para fins de comparações. As aplicações são divididas em 3 grupos (Figura 55):

1. Casos de obras estudadas por autores internacionais;
2. Modelos experimentais de fundações conduzidos em escala real, em campo experimental brasileiro (UNB);
3. Casos de obras de Pernambuco (já estudados ou inéditos).

Figura 55 – Grupos de aplicações e resultados estudados.



Fonte: Autoria Própria

Durante o processo de desenvolvimento de cada aplicação dois princípios norteadores foram considerados, (i) retro analisar os resultados dos ensaios de campo com a finalidade de confirmar a Equação proposta, e o (ii) segundo de comparar os resultados obtidos para a rigidez relativa estaca-placa com os valores estimados a

partir das correlações com a metodologia empírica apresentada por Mandolini (2012), com a finalidade de avaliar a possibilidade de estimativa de λ a partir do contexto geométrico do sistema de fundações.

Do ponto de vista de concepção e contexto geométrico os casos são bastante diversificados, são avaliadas fundações de obras reais de edifícios altos e de alturas convencionais, bem como tipos de fundações que variaram entre cravadas e escavadas. Ainda foram analisados dois estudos experimentais desenvolvidos na Universidade de Brasília (UNB). Com a finalidade de condensar os dados referentes a cada caso em específico foi elaborado o Quadro da Figura 56. A figura 57 apresenta os casos e os métodos aplicados.

Figura 56 – Quadro resumo dos dados dos casos estudados.

IN	Citação	Referência	Coluna	d (mm)	L (m)	e/d	L/e
1	Poulos (2001)	Poulos (2001)	-	-	-	-	-
2	Poulos (2000)	Akasaka	Pré-moldada	520	12,0	2,79 a 5,44	4,24 a 8,33
3	Katzenbach (2015)	Treptowers	Escavada	880	12,5 a 16,0	5,73	2,48 a 3,16
4	Sales (2000)	UNB1	Escavada	150	5,0	5,00	6,67
5	Passos (2005)	UNB2	Compactação	100	1,4	3,00	4,67
6	Pacheco (2002)	Residencial no Parnamirim	Compactação	300	7,0	2,67	8,75
7	Inédito	Residencial no Cupe	Compactação	300	4,0 a 6,0	2,67	5,00
8	Amorim (2019)	Duas torres no Rosarinho	Compactação	300	6,0	2,67	7,50
9	Amorim (2019)	Tanques de Suape	Compactação	300	7,0	3,67	6,36

Onde: IN – Índice; d – diâmetro; L – comprimento; e – espaçamento; e/d – espaçamento relativo; L/e – comprimento relativo.

Fonte: Autoria Própria

Figura 57 – Quadro resumo dos dados dos casos estudados.

Índice	Citação	MÉTODOS			
		A	B	C	D
1	Poulos (2001)		X		
2	Poulos (2000)		X		
3	Katzenbach (2015)				X
4	Sales (2000)	X	X		
5	Passos (2005)		X		
6	Pacheco (2002)		X		
7	Inédito			X	
8	Amorim (2019)				X
9	Amorim (2019)	X			X

Fonte: Aatoria Própria

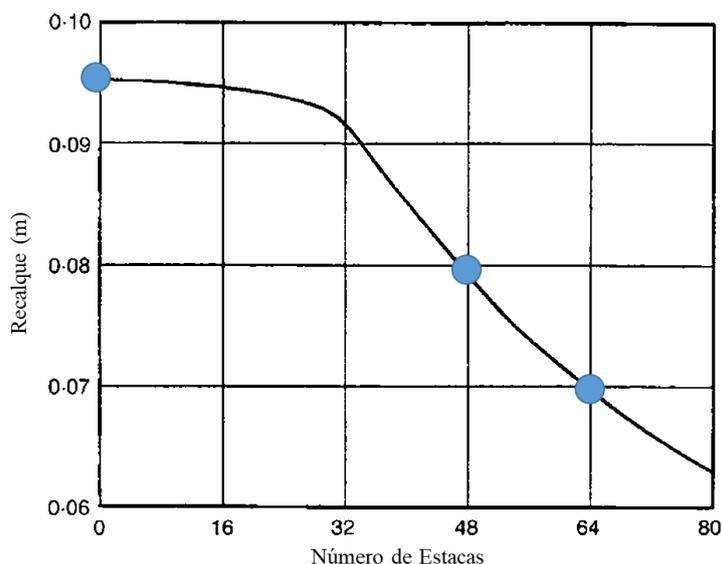
5.1 Primeira aplicação – Poulos (2001)

Para introdução, a aplicação da metodologia será desenvolvida para o gráfico apresentado por Poulos (2001), que está presente na Figura 20a. Em seu artigo, Poulos não cita o contexto da edificação nem tampouco do subsolo em questão. As informações do contexto geotécnico foram omitidas. Porém, devido a simplicidade, esse caso foi escolhido como o primeiro para apresentar a metodologia antes de partir para outros casos.

É possível observar a partir da Figura 58, que o recalque inicial S_0 é da ordem de 0,095 m (para a fundação direta com $N=0$), e alguns pontos notáveis podem ser observados como o recalque para 48 estacas ($N=48$) em torno de 0,080 m e o recalque para 64 estacas ($N=64$) em torno de 0,070 m. Esses pontos estão assinalados na Figura 58. Então é construída a Tabela 19, que correlaciona o Número de Estacas com o Recalque encontrado, e onde calcula-se o Fator de Melhoramento F .

A partir da regressão linear dos dados de $F \times N$, é possível encontrar o parâmetro λ (Figura 59). Por fim, utilizando-se da Equação 25 é possível encontrar a curva de Recalque *versus* o número de estacas (Figura 60 e Tabela 20).

Figura 58 –Exemplo apresentado por Poulos (2001).



Fonte: Poulos (2001), adaptado

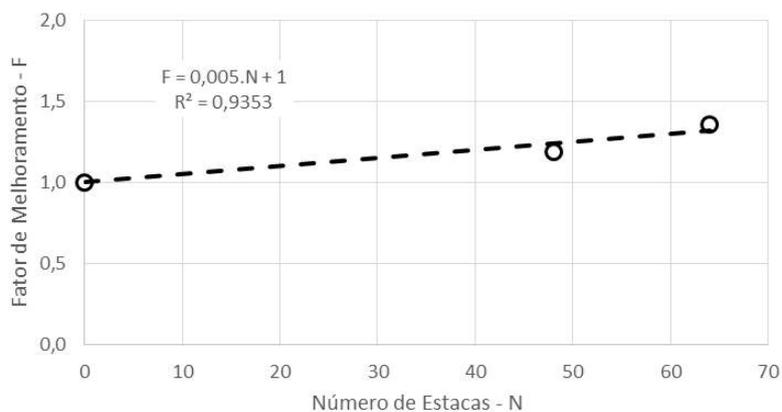
Tabela 19 – Recalques e Fatores de Melhoramento obtidos

Número de Estacas - N	Recalque (m)	Fator de Melhoramento $F = S_0/S_N$
0	0,095	1,0000
48	0,080	1,1875
64	0,070	1,3571

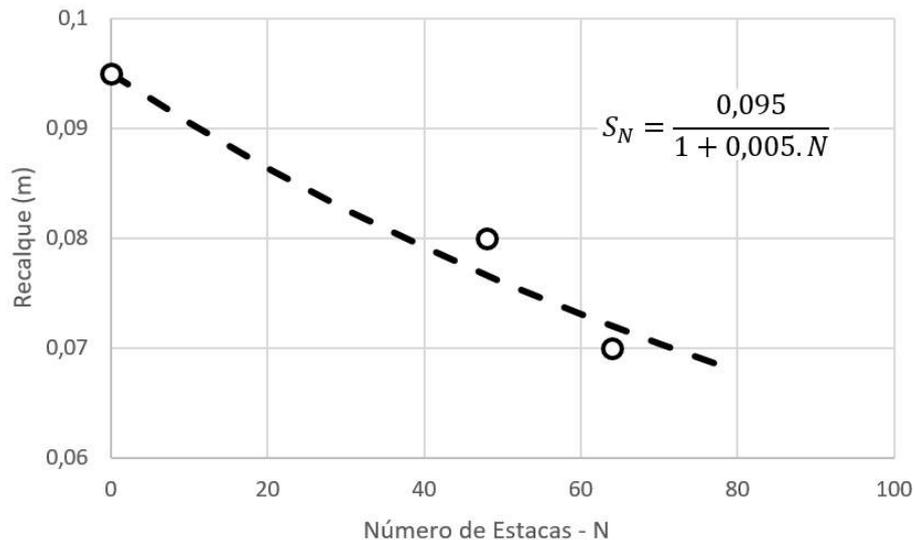
Fonte: Autoria Própria, a partir de Poulos (2001)

Figura 59 – Obtenção da Rigidez relativa estaca-placa, via regressão linear.

Plano de Melhoramento



Fonte: Autoria Própria.

Figura 60 – Curva de Recalque *versus* o aumento do número de estacas.

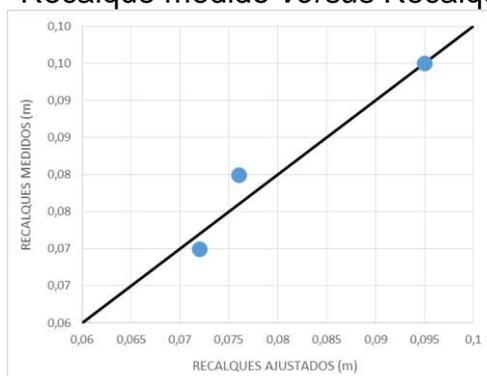
Fonte: Autoria Própria, dados estimados a partir de Poulos (2001).

Tabela 20 – Recalques Medidos e Ajustados

Número de Estacas - N	Recalques medidos (m)	Recalques ajustados (m)
0	0,095	0,095
48	0,080	0,076 (erro = 5%)
64	0,070	0,072 (erro = 2,85%)

Fonte: Autoria Própria.

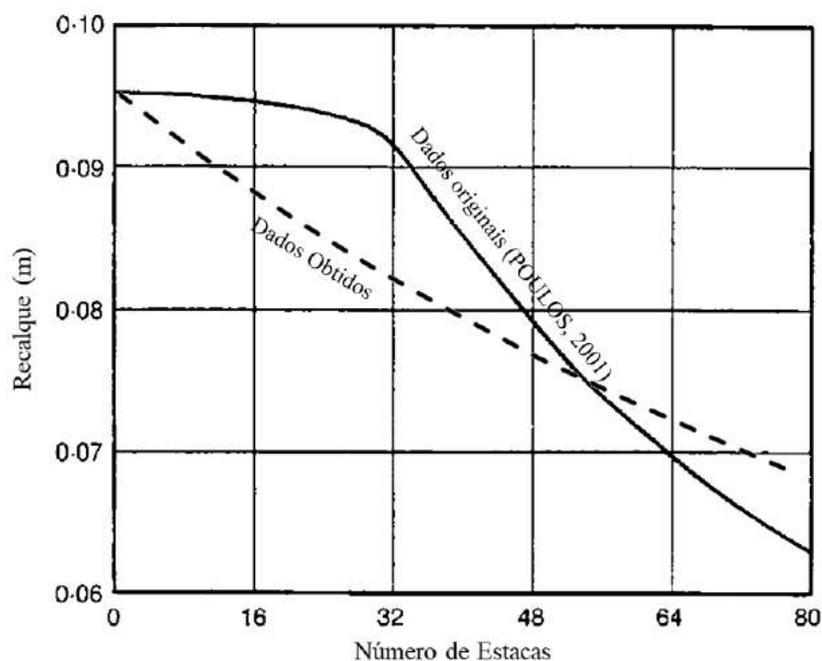
Foram calculados recalques próximos aos medidos por meio do gráfico apresentado por Poulos (2001), com erro máximo de 5% para $N = 48$ estacas. A Rigidez relativa estaca solo encontrada foi de 0,005. De posse desses resultados é possível traçar um gráfico de comparação entre os recalques medidos e os recalques ajustados pelo método, conforme apresentado na Figura 61.

Figura 61 – Recalque medido *versus* Recalque ajustado.

Fonte: Autoria Própria

Por fim, apresenta-se uma comparação entre os resultados obtidos com a curva original de Poulos (2001), na Figura 62.

Figura 62 – Recalque *versus* o número de estacas, comparativo de metodologias.

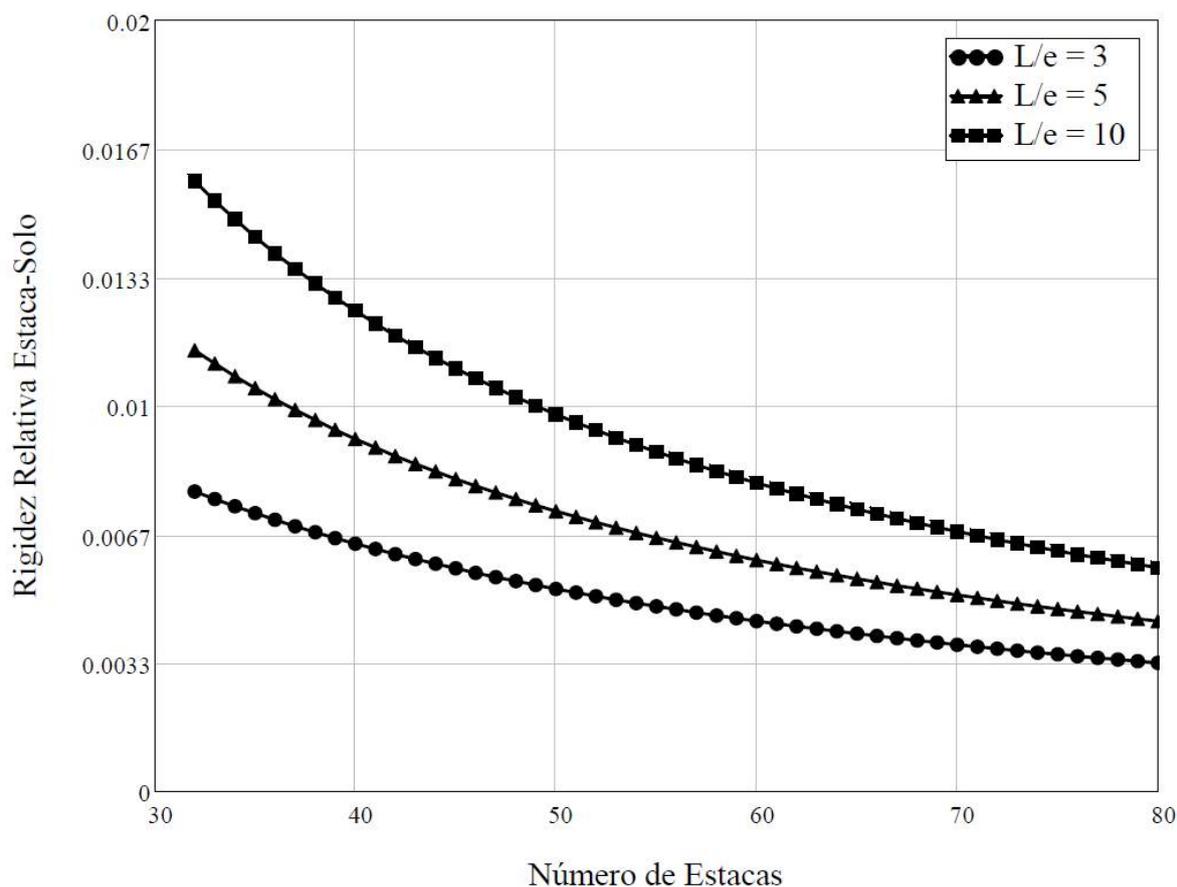


Fonte: Autoria Própria, adaptado de Poulos (2001)

Uma conclusão interessante consiste na comparação com os resultados obtidos a partir da junção das equações empíricas de Mandolini et al (2005) com a Equação 82 derivada da metodologia. Por não se ter informações acerca de comprimento e espaçamento das estacas foi realizada análise para valores de L/e de 3, 5 e 10. E foram encontrados valores de λ médios de 0,0030, 0,0042 e 0,0056, respectivamente, conforme Figura 63.

Os valores médios encontrados são da mesma ordem de grandeza dos obtidos por Poulos (2001) em seu trabalho, embora o contexto geométrico e geotécnico não tenha sido explicitado por Poulos, os dados apresentados demonstram a potencialidade do uso da metodologia. Bem como do uso das equações obtidas a partir de Mandolini et al (2005). Nos casos e aplicações que se seguirão os detalhes acerca da estrutura e do subsolo das obras serão melhor explorados.

Figura 63 – Rigidez Estaca-placa e N. de Estacas (a partir de MANDOLINI 2012)

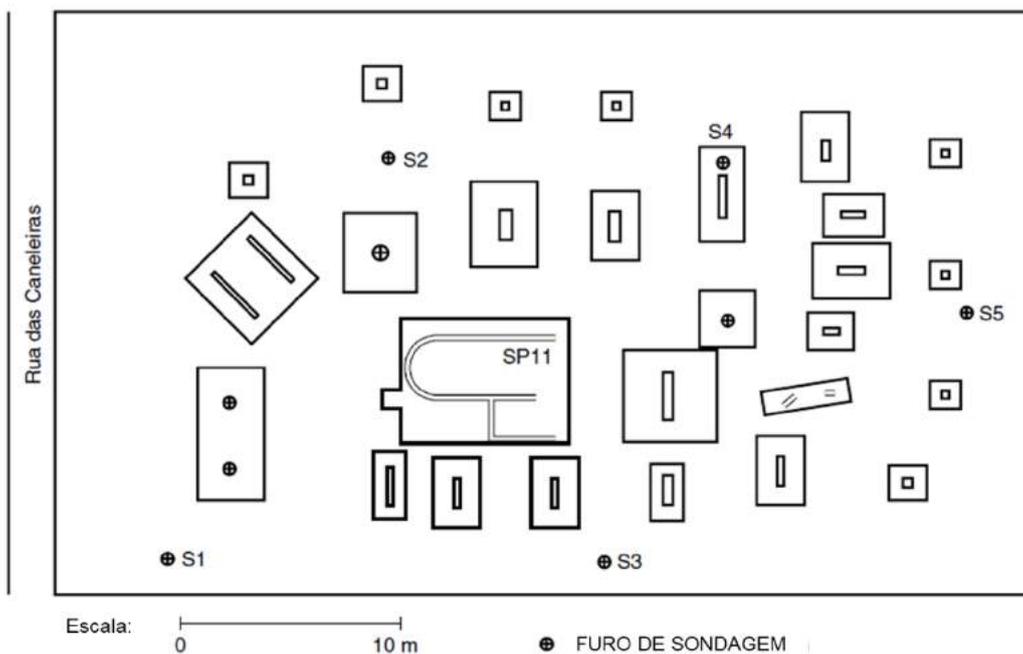


5.2 Edifício Akasaka em São Paulo, (POULOS, 2000)

Poulos (2000) descreve o caso do edifício Akasaka em São Paulo, com fundações em sapatas onde foram prescritas para os pilares mais carregados a associação com estacas pré-moldadas de concreto armado com 520 mm de diâmetro, com 12 m de comprimento e capacidade de carga estimada em torno de 2.500 kN. A planta de fundações é apresentada por meio da Figura 64, bem como o perfil geotécnico é apresentado na Figura 65.

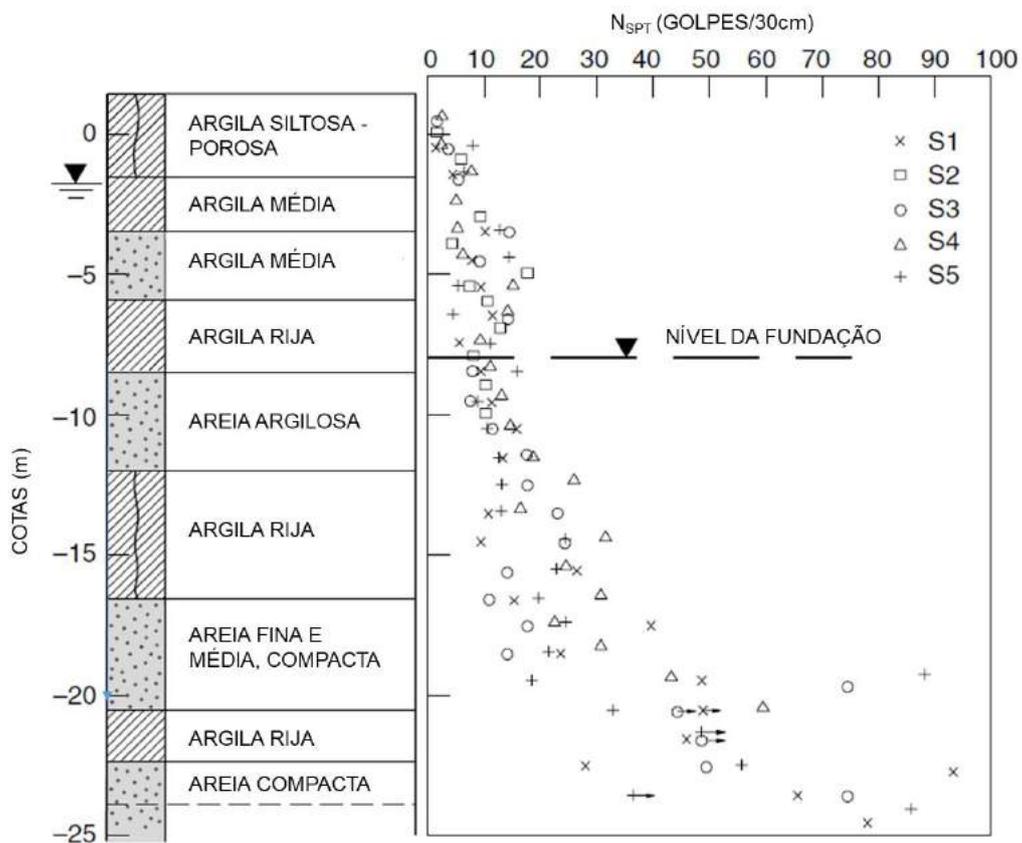
O autor procedeu avaliações acerca do estado limite de serviço do bloco SP11. Que apresentava 50 mm de recalque para uma fundação sem estacas, sendo reduzido para 20 mm com aproximadamente 10 estacas. Essa estrutura apresentava um recalque máximo admissível de 30 mm, o qual demandava 6 estacas para ser obtido, conforme Figura 63. Ainda é possível observar que em torno de 15 estacas o recalque calculado é da ordem de 16 a 18 mm (foi adotado 17 mm).

Figura 64 – Planta baixa da locação das peças de fundação



Fonte: Poulos (2000)

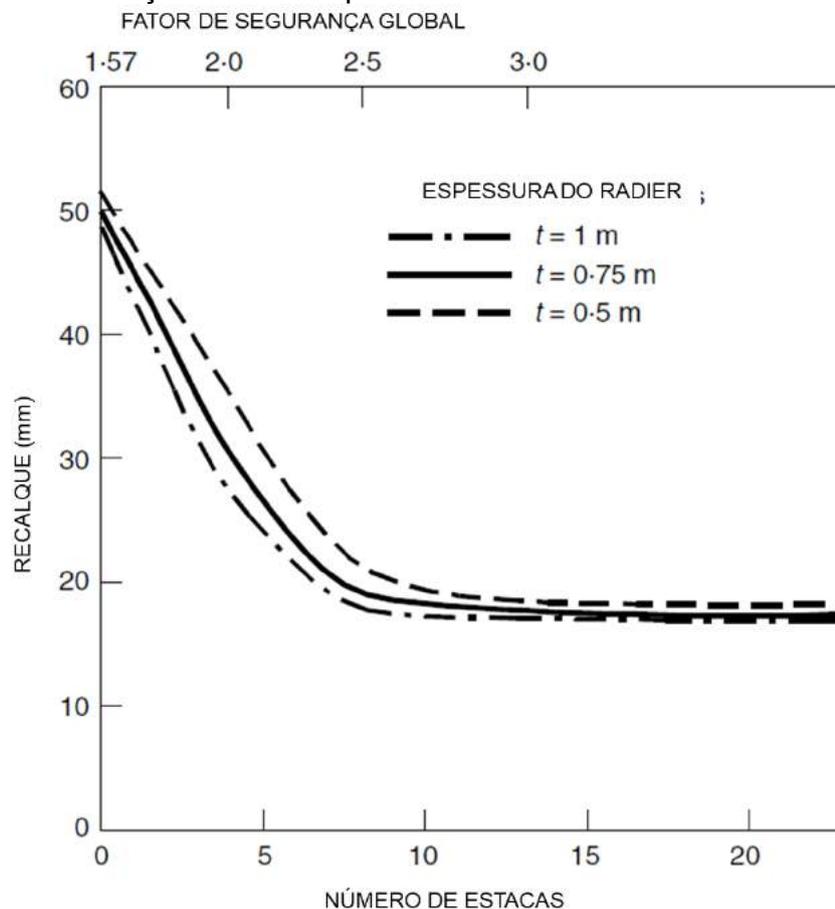
Figura 65 – Perfil Geotécnico



Fonte: Adaptado de Poulos (2000)

Com base nos valores de recalques em função de número de estacas apresentados na Figura 66, foi possível calcular os fatores de melhoramento – F para a sapata SP11 do edf. Akasaka, como é apresentado por meio da Tabela 21.

Figura 66 –Variação dos recalques com o aumento do número de estacas



Fonte: Poulos, 2000.

Tabela 21 – Fatores de Melhoramento obtidos

Número de Estacas	Recalque (mm)	Fator de Melhoramento - F
0	50	1,00
6	30	1,67
10	20	2,50
15	17	2,94

Fonte: Autoria Própria

Em seguida foram plotados os gráficos de Plano de Melhoramento ($F \times N$), onde é possível obter a rigidez relativa estaca-placa a partir da inclinação da reta de regressão, e também foi plotado o gráfico de recalque versus o número de estacas, conforme Figuras 67 e 68, respectivamente. Foi encontrada uma rigidez relativa $\lambda = 0,1348$ com R^2 de 0,9784.

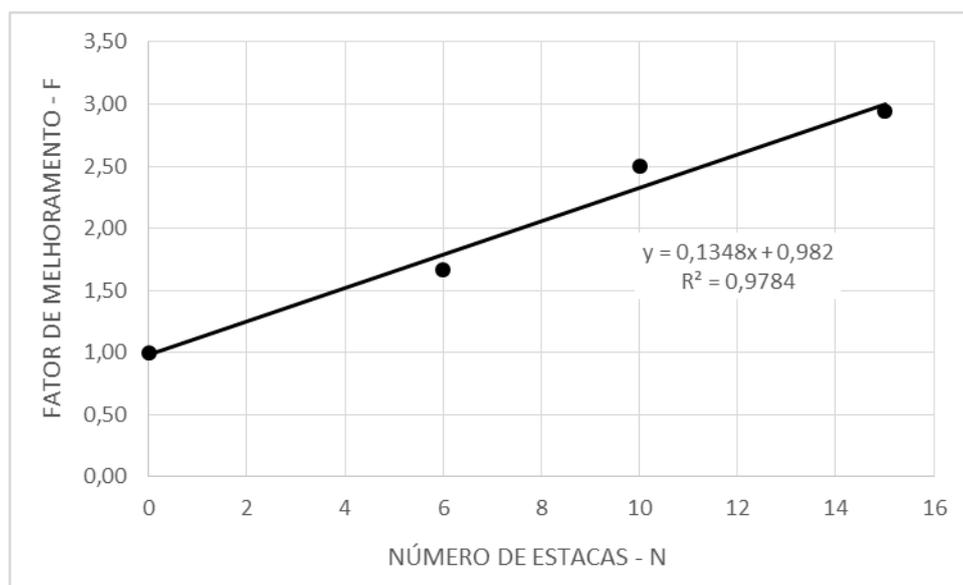
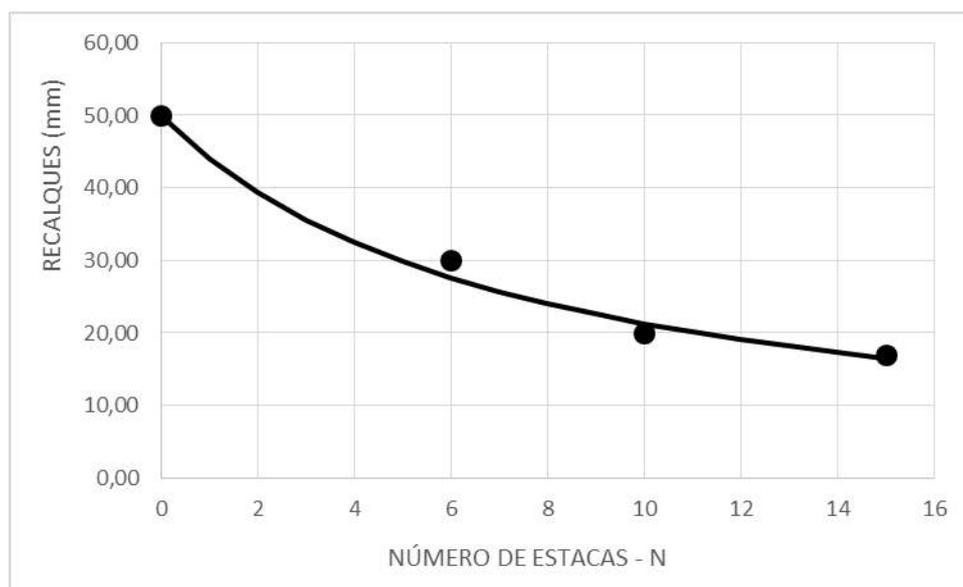
Figura 67 – Plano de Melhoramento obtido com $\lambda = 0,1348$ 

Figura 68 – Ajuste dos recalques



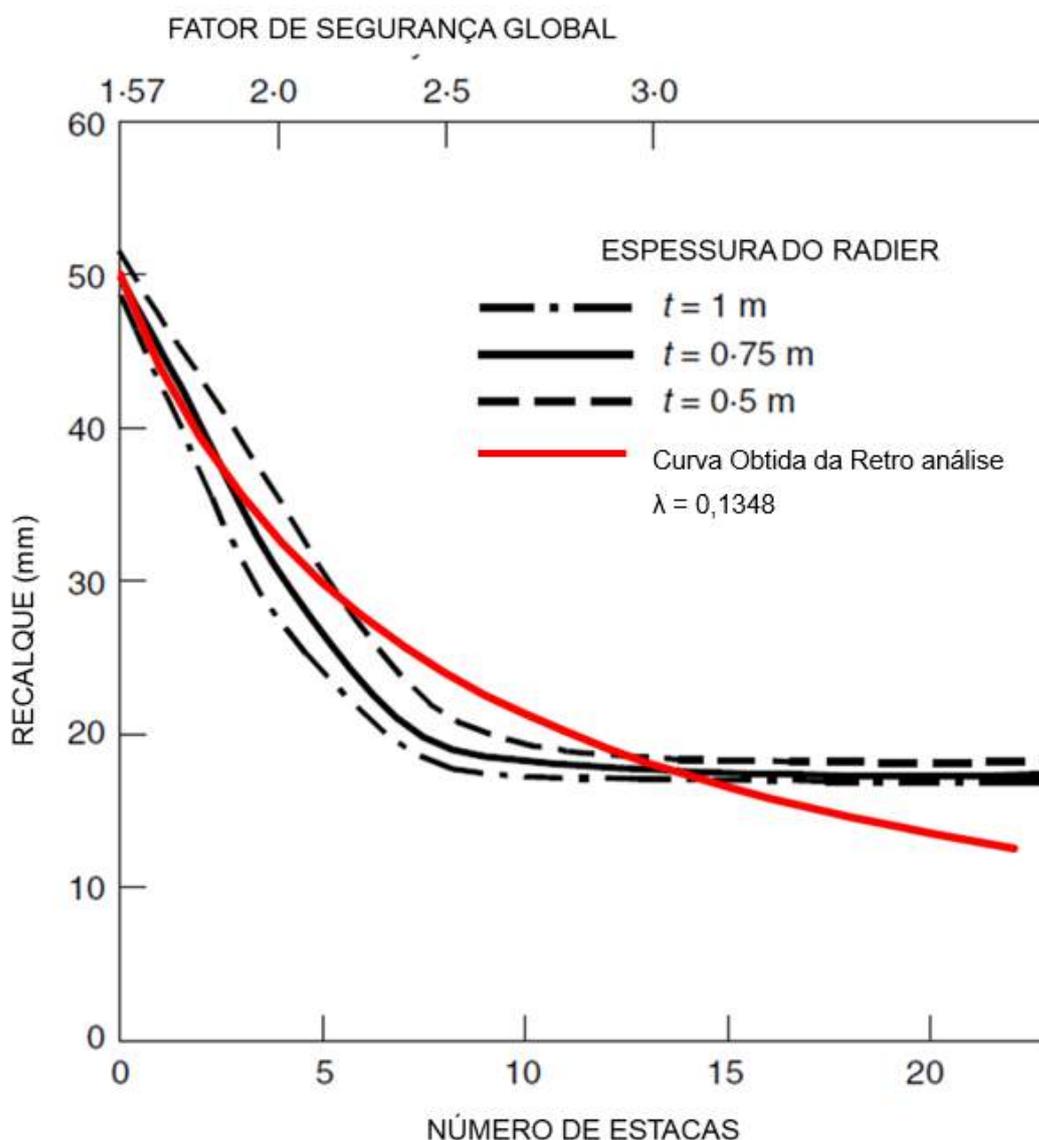
Então, é possível sobrepor as curvas obtidas por Poulos (2000) com a curva obtida a partir da retro análise por meio da rigidez relativa estaca-placa. Essa sobreposição foi realizada para a Figura 69.

Nota-se que as curvas de Poulos (2000) tem congruência entre si, mesmo variando a espessura do radier, e tendem a decrescer o valor do recalque com o aumento do número de estacas, porém esse decréscimo é verificado até $N = 10$, onde, a partir desse valor, as curvas tendem a se estabilizar. Para o caso da curva extrapolada a partir da retro análise via rigidez relativa estaca-placa (λ), o

comportamento é semelhante com exceção de dois pontos, a curva tende a apresentar valores de recalque mais elevados em trecho inicial até $N = 15$, e a partir desse valor os recalques são subestimados pela curva, quando comparada às curvas de Poulos. Como, de fato o trecho de interesse e de tomada de decisão sobre o Estado Limite de serviço da Sapata SP11 reside entre o número de estacas de 6 a 10, o método se mostra coerente e tende a apresentar valores mais conservadores.

Ou seja, uma conclusão importante é o que o método expedito tende a apresentar valores mais conservadores do que o método iterativo apresentado e utilizado por Poulos (2000).

Figura 69 – Sobreposição das curvas de Poulos (2000) com a curva obtida via retro análise da rigidez relativa estaca-placa.



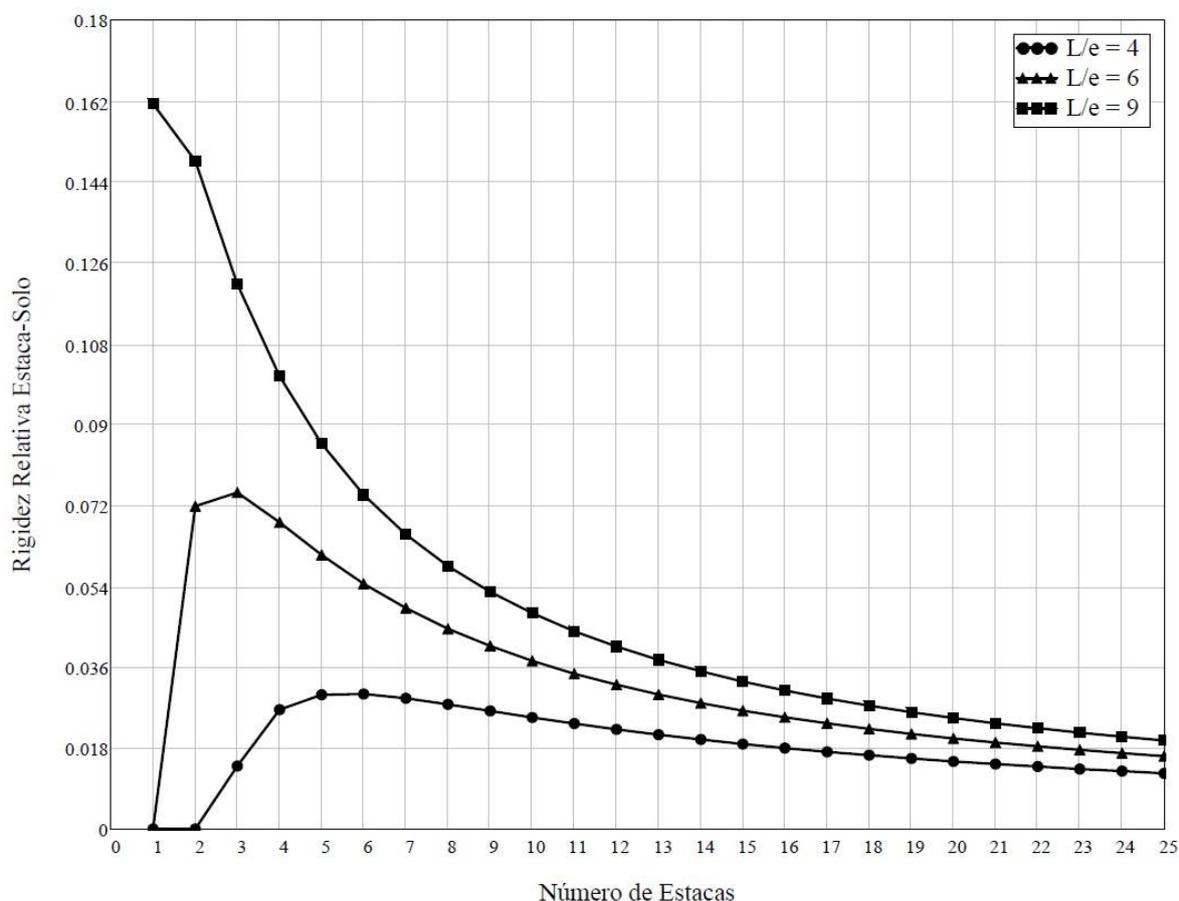
Fonte: Autoria Própria, adaptado de Poulos (2000)

Não é possível medir com exatidão o tamanho da sapata SP11, mas ao se utilizar da escala gráfica cedida, é possível estimar que essa sapata tenha dimensões em torno de 8 x 6 ou 48 m². Como o estaqueamento foi avaliado para 6 a 23 estacas, o espaçamento médio estimado entre estacas varia de 2,83 a 1,44 m, respectivamente. Como o comprimento adotado das estacas foi de 12 m, a relação L/e , varia entre 4,24 e 8,33.

Então foram analisados os valores de λ estimados segundo a Equação 45 que correlaciona a rigidez estaca-placa λ com as equações empíricas de Mandolini (2013), para relações L/e de 4, 6 e 9, conforme apresentado por meio da Figura 70. Os valores médios de λ obtidos são de 0,018, 0,033 e 0,052 respectivamente, com valor máximo de 0,169 para o caso de $L/e = 9$ e $N = 1$.

Caso esses valores fossem utilizados como estimativa, os recalques esperados seriam superiores aos estimados por Poulos (2000), para a sapata em análise.

Figura 70 – Rigidez Estaca-placa, (MANDOLINI, 2013).



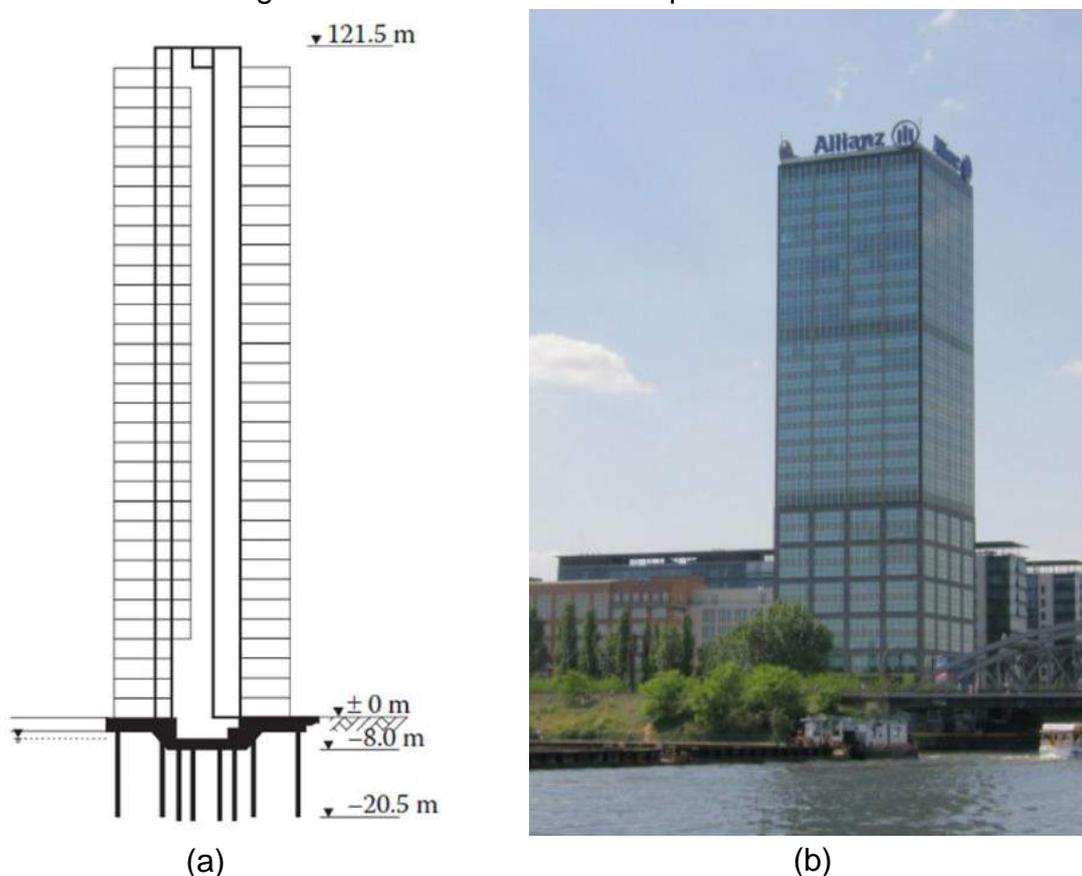
Fonte: Autoria Própria

Para esse caso, os valores estimados pela Equação 82 (com base em MANDOLINI, 2013) se mostraram 75% inferiores ao valor aferido a partir do estudo de Poulos (2000) para o edifício Akasaka. Fato que ratifica a necessidade de criação e análise de bancos de dados locais, e desenvolvimento de equações empíricas próprias para o contexto brasileiro. Outra conclusão importante é que a estimativa de λ pela Equação 82, é conservadora, e caso seja utilizada como valor inicial, são esperados recalques superiores aos estimados por metodologias mais pormenorizadas e robustas.

5.3 O caso do Treptowers, Alemanha, (Katzenbach, 2015)

Às margens do rio Spree, em Berlin na Alemanha, está situado o edifício Hochhaus Treptowers, também conhecido como a sede da seguradora Allianz (Figura 71). Apresenta estrutura com 121 m de altura e segundo o CBTUH é considerado o edifício mais alto de Berlin.

Figura 71 – Edf. Hochhaus Treptowers.



(a) (b)
Fonte: (a) Katzenbach (2015) e (b) CBTUH

O perfil de subsolo é composto por um aterro até os 3 m de profundidade, seguido de sobreposições de camadas de areias soltas até os 40 m de profundidade (KATZENBACH, 2015).

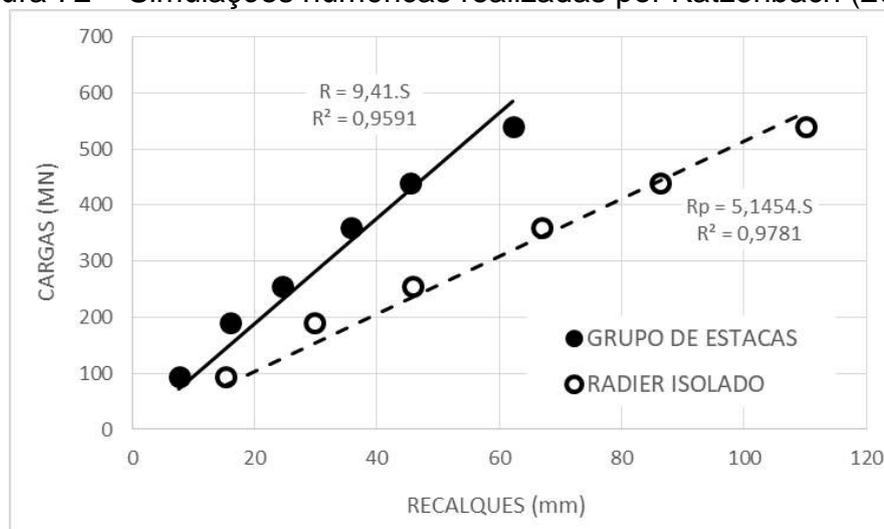
Segundo Reul (2005), até 10 m de profundidade as camadas de areias são fofas, e a partir e 22 m baixo da superfície do terreno as camadas aumentam de compacidade. Ainda existe uma camada representativa da deriva glacial, com 1,5 m de espessura de consistência rija e média plasticidade, assente sobre outra camada de areia densa. O nível de água foi encontrado entre as profundidades de 3 a 4 m.

Segundo Katzenbach (2015) a fundação foi realizada em radier estaqueado com dimensões em planta de 37,1 x 37,1 m² (1.376 m²), e espessura variando entre 2 e 3 m, associado a 54 estacas escavadas de 880 mm de diâmetro, com comprimentos de 12,5 a 16,0 m. Essas informações conduzem a um espaçamento médio de aproximadamente 5 m, com $e/d \approx 5,73$ e relação $L/e \approx 2,48$ a 3,16.

Para análise do desempenho do radier o autor (KATZENBACH, 2015) procedeu uma modelagem numérica, tanto do radier sem estacas (caso de $N = 0$) quanto para o radier estaqueado com $N = 54$, como é apresentado pela Figura 72, e Tabela 22. Também foi realizada medição de recalques por 18 meses.

Com a finalidade de desenvolvimento e retro análise da rigidez estaca placa para o edifício, foi utilizada o Método D apresentado no capítulo 3. Para tanto foi obtida a rigidez do sistema sem estacas (k_p) e a rigidez do sistema com estacas (k), e a partir desses valores foi calculado o Fator de Melhoramento $F = k/k_p$.

Figura 72 – Simulações numéricas realizadas por Katzenbach (2015).



Fonte: Autoria Própria, adaptado de Katzenbach (2015).

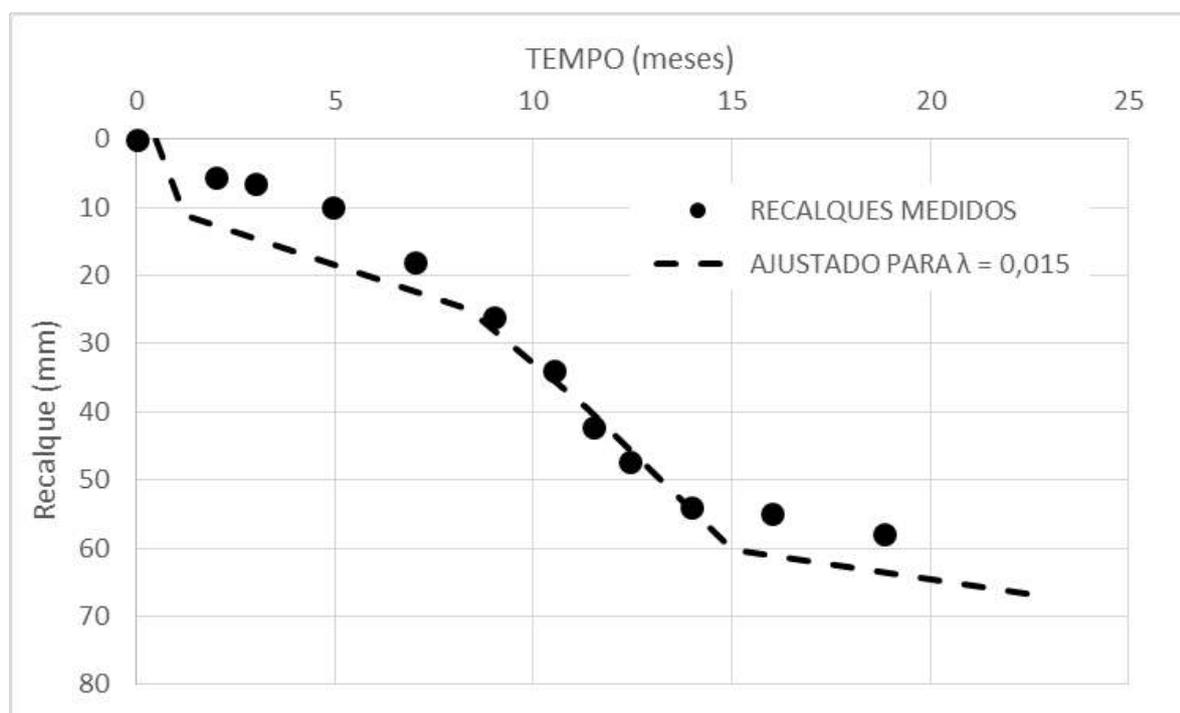
Tabela 22 – Resultados obtidos

Simulação	Equação Regressão	Coefficiente Correlação (R^2)	Rigidez (MN/mm)	Fator de Melhoria $F = k/k_p$	Rigidez Relativa $\lambda = (F - 1)/N$
Radier Isolado	$R_p = 5,14.S$	0,9781	5,14	1,835	0,0155
Grupo de Estacas	$R = 9,41.S$	0,9591	9,41		

Fonte: Autoria Própria

De posse do valor de λ , pode-se estimar o recalque da edificação em função do nível de carregamento referente ao instante da medição de recalques, por meio da Equação 55. Dessa forma foi possível construir a curva recalque no tempo para a edificação em análise como é apresentado por meio da Figura 73.

Figura 73 – Recalque no tempo, medido e ajustado.



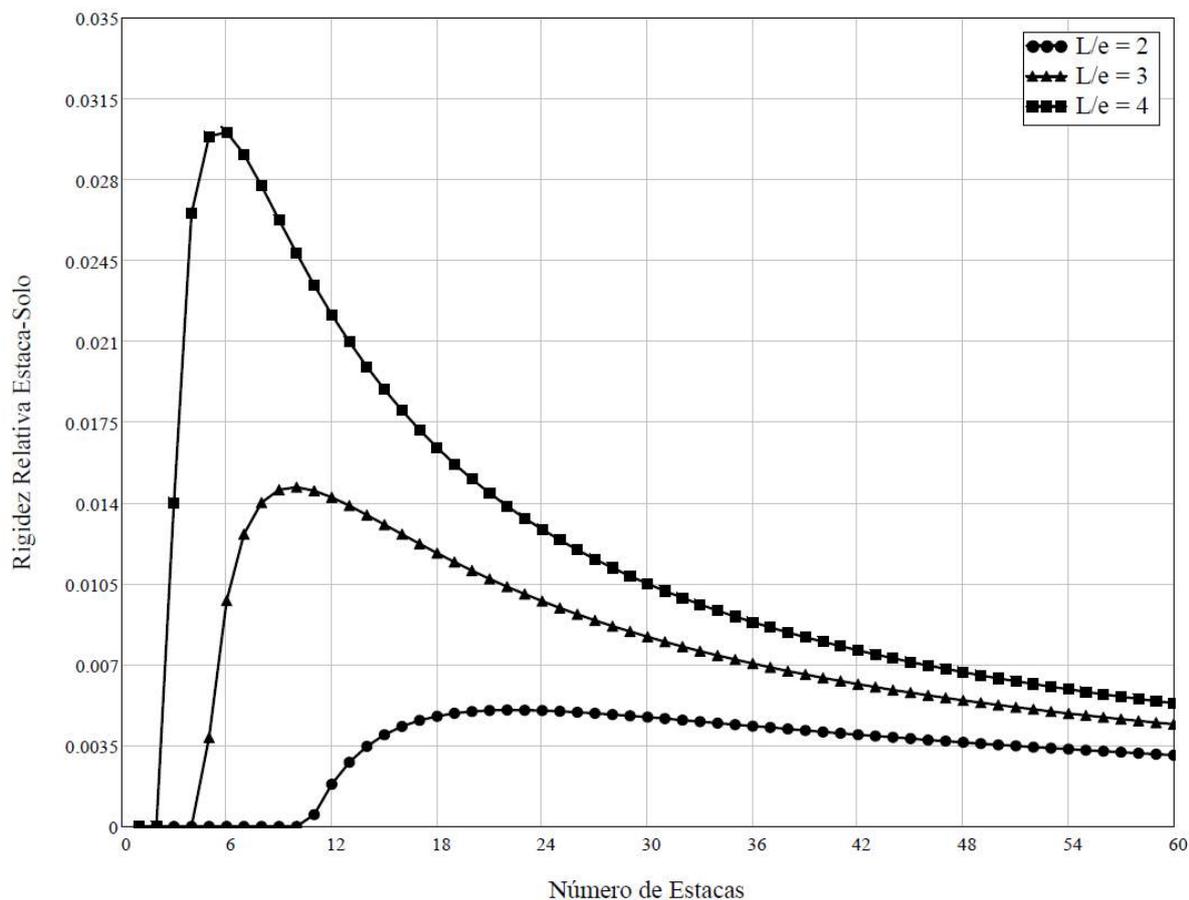
Fonte: Autoria Própria

Para fins, de comparação, mais uma vez, foram elaborados os gráficos de variação da rigidez relativa estaca-placa (λ) em função de N , a partir da Equação 82,

que faz correlação com os resultados empíricos apresentados por Mandolini (2013). Os gráficos foram plotados para valores de L/e de 2, 3 e 4 como é apresentado por meio da Figura 74. Foram encontrados valores médios de λ de 0,0033, 0,0077 e 0,012 respectivamente. O que representa 20, 49 e 77% do valor de rigidez ajustado a partir das modelagens numéricas de Katzenbach (2015). Mais uma vez indicando que a estimativa de Mandolini (2013) tende a ser conservadora na estimativa da rigidez estaca solo, o que conseqüentemente estimaria recalques mais elevados do que os medidos e observados.

Vale ressaltar que para o valor de $N = 54$, os valores de λ estimados estão variando entre 0,0035 e 0,007, menos de 45% do valor medido.

Figura 74 – Valores de Rigidez Relativa estaca-placa.



Fonte: Autorial Própria

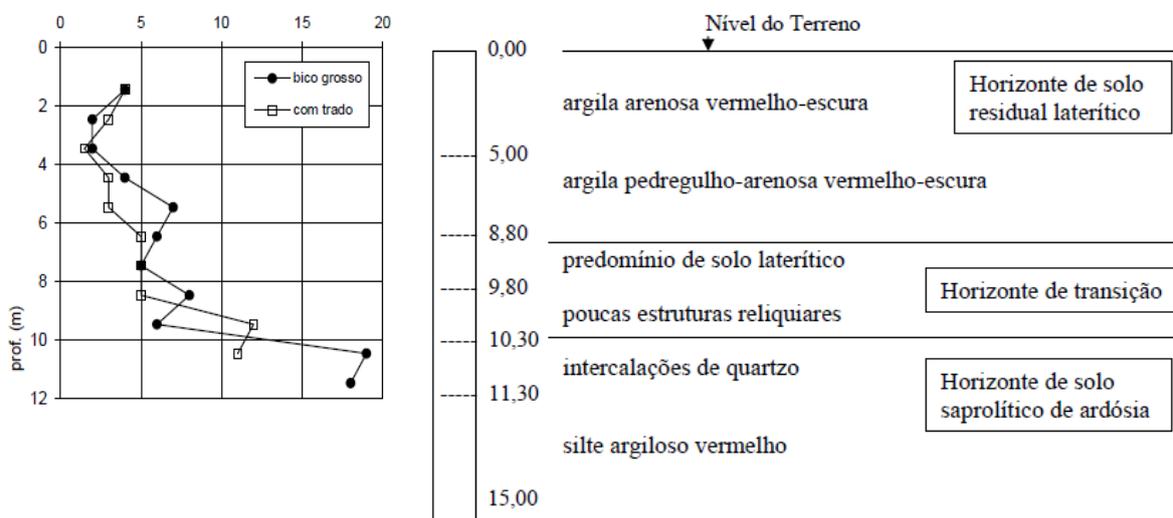
5.4 Campo Experimental da UNB

São comentadas as provas de carga realizadas no campo experimental da UnB, situado no Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília/DF.

Devido as características climáticas do planalto central, encontra-se um relevo residual e de aplainamento, composto por solos de cobertura de lateritas e Latossolos. Os processos de precipitação da região favorecem a formação de espessas camadas de coberturas silto-argilosas, vermelhas, com alto índice de vazios e baixo peso específico, portanto chamadas de argilas porosas. Esse material normalmente se apresenta com baixos índices de umidade, e são instáveis quando submetida a variações do estado de tensões. Por isso são comumente classificadas como condicionalmente colapsáveis (SALES, 2000).

O perfil geotécnico condensado do campo experimental da UnB, contendo a classificação do material, bem como os resultados da sondagem SPT são apresentados por meio da Figura 75.

Figura 75 – Perfil Geotécnico do Campus Experimental da UnB.



Fonte: adaptado de Sales, 2000

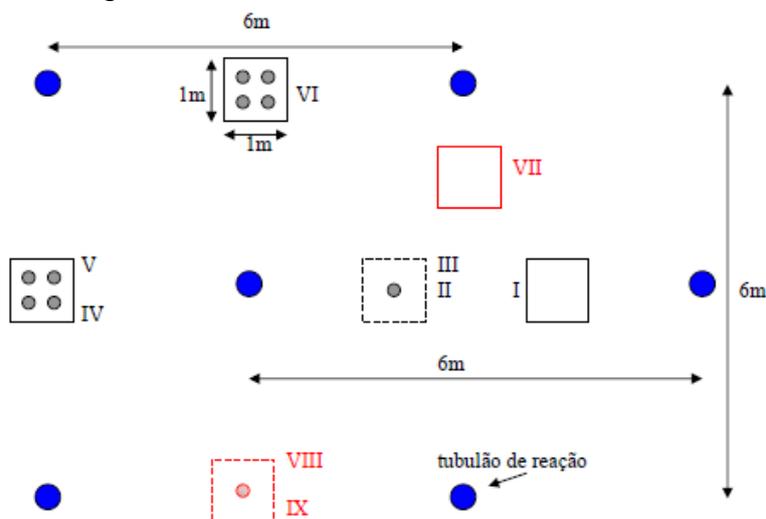
5.4.1 Estudo UNB1 – Sales 2000

Segundo Sales (2000) os ensaios de placa (1,00 x 1,00 m x m) foram realizados ao lado do prédio de Sismologia e próximo ao SG-12, onde está locado o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB. Foram realizados 9 ensaios nomeados em algarismos romanos, a síntese dos ensaios realizados é apresentada por meio da Figura 76. A lista dos ensaios é descrita abaixo:

1. Em solo natural:
 - a. Placa Isolada (I);
 - b. Estaca Isolada (II) – estaca escavada – tipo broca com 150 mm de diâmetro (Ver Figuras 77 e 78);
 - c. Placa sobre uma estaca já testada (III);
 - d. Grupo de 4 estacas (Sem contato placa – solo, ver Figura 77) (IV);
 - e. Placa sobre quatro estacas já ensaiadas (V);
 - f. Placa sobre quatro estacas (VI).

2. Em solo pré-inundado:
 - a. Placa Isolada (VII);
 - b. Estaca Isolada (VIII);
 - c. Placa sobre uma estaca já testada (IX).

Figura 76 – Resumo dos ensaios realizados.



Fonte: Sales, 2000

Foram executadas estacas escavadas de concreto, com diâmetro de 150 mm de diâmetro e comprimentos de 5 m. O espaçamento entre as colunas era de 750 mm (5 diâmetros). Essa fato conduz a relação de $L/e = 6,66$.

Para aplicação do método, inicialmente é avaliado a forma de obtenção da rigidez relativa estaca-placa a partir do Método B (regressão linear). Para tanto são necessários 3 pontos, e nesse exemplo são utilizados a partir de $N=0$, $N=1$ e $N=4$, que representam os ensaios I, III e IV respectivamente.

Em seguida, é avaliada a variação da rigidez estaca relativa estaca-solo entre o solo natural e analisada em comparação com a mesma variação para o solo inundado. Como para o solo inundado não foi realizado o ensaio de placa sobre 4 estacas, essa análise é realizada para ambos os cenários a partir $N=0$ e $N=1$. Então, para o solo natural são utilizados os ensaios I e III, e para o solo pré-inundado são utilizados os ensaios VII e IX.

Figura 77 – Exumação de grupo de 4 estacas escavadas.



Fonte: Sales, 2000

Figura 78 – Detalhe de superfície e diâmetro de estaca escavada.



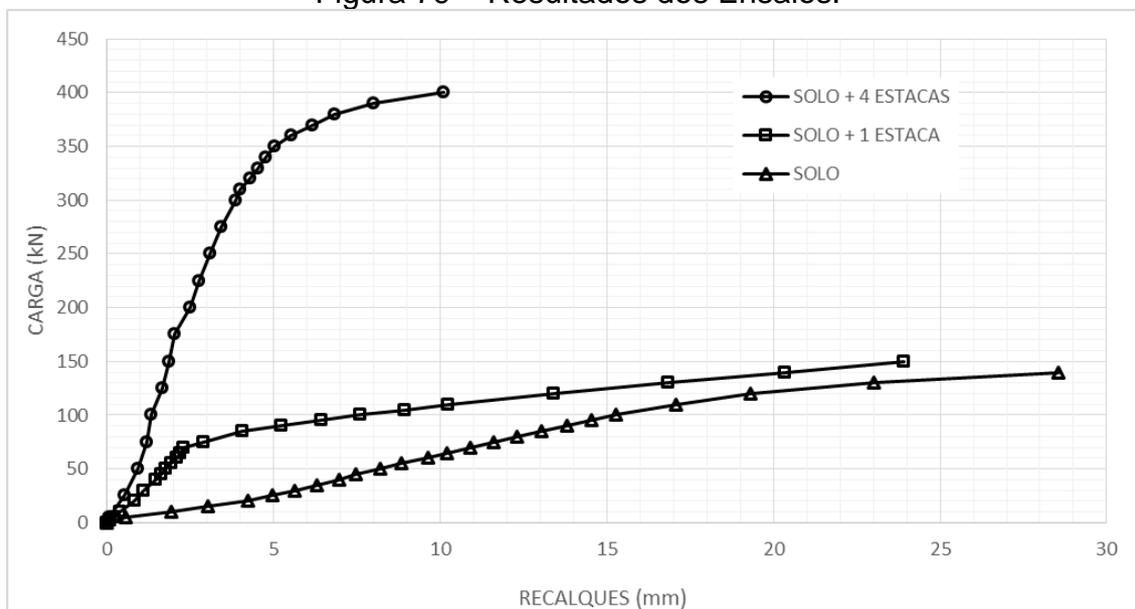
Fonte: Sales, 2000

5.4.1.1 Análise para o solo natural a partir da regressão linear $N = \{0; 1; 4\}$

A partir dos recalques medidos para as configurações de $N = 0$ (ensaio I), $N = 1$ (ensaio III) e $N = 4$ (ensaio IV) é possível se obter os fatores de melhoramento F_1 e F_4 . Como já foi apresentado em capítulos anteriores, a partir da metodologia B.

Dessa forma é possível construir o plano de melhoramento $F \times N$, e a partir de regressão linear encontrar o coeficiente angular da reta de regressão que é numericamente igual à rigidez relativa estaca-placa (λ). O resultado dos ensaios foi obtido a partir da tese de Sales (2000), e são apresentados por meio da Tabela 23 e da Figura 79.

Figura 79 – Resultados dos Ensaios.



Fonte: Autoria própria, adaptado de Sales (2000)

Tabela 23 – Resultados dos ensaios em Placa, a partir de Sales (2000)

ESTÁGIO DE CARGAS	TESTE I		TESTE III		TESTE IV	
	N = 0		N = 1		N = 4	
	R (kN)	S (mm)	R (kN)	S (mm)	R (kN)	S (mm)
1	0	0,000	0	0,000	0	0,000
2	5	0,545	2	0,095	5	0,060
3	10	1,925	5	0,215	25	0,510
4	15	3,040	10	0,390	50	0,930
5	20	4,235	20	0,835	75	1,180
6	25	4,960	30	1,090	100	1,330
7	30	5,640	40	1,445	125	1,650
8	35	6,310	45	1,610	150	1,860
9	40	6,980	50	1,745	175	2,040
10	45	7,475	55	1,910	200	2,485
11	50	8,210	60	2,080	225	2,775
12	55	8,835	65	2,205	250	3,105
13	60	9,625	70	2,300	275	3,425
14	65	10,185	75	2,895	300	3,865
15	70	10,885	85	4,050	310	3,990
16	75	11,605	90	5,215	320	4,290
17	80	12,290	95	6,420	330	4,515
18	85	13,030	100	7,610	340	4,775
19	90	13,795	105	8,930	350	5,035
20	95	14,525	110	10,220	360	5,545
21	100	15,285	120	13,415	370	6,165
22	110	17,065	130	16,835	380	6,845
23	120	19,325	140	20,355	390	7,995
24	130	23,015	150	23,905	400	10,105
25	140	28,550	-	-	-	-

Fonte: Sales (2000)

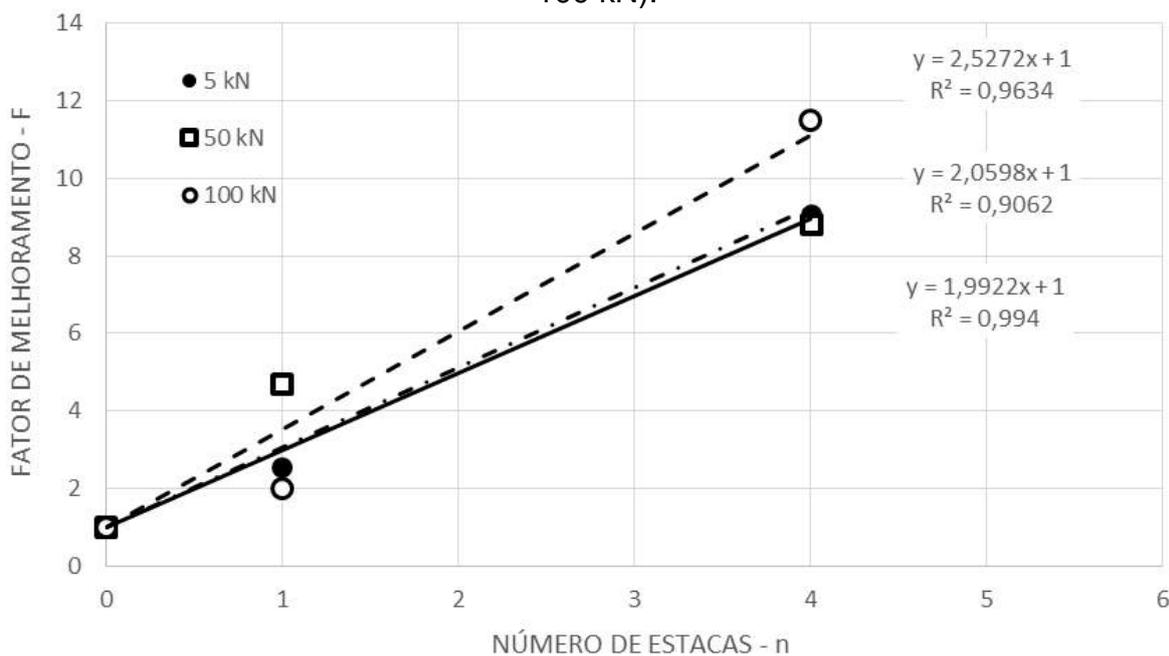
Devido os ensaios não apresentarem o mesmo nível de carga para todos os ensaios e os testes para o solo sem estacas ter se encerrado com carregamento de 140 kN, apenas os estágios referentes a 5, 50 e 100 kN podem ser utilizados para a construção do plano de melhoramento. Portanto a Tabela 24 apresenta o resultado dos fatores de melhoramento obtidos. A Figura 80 apresenta os planos de melhoramento obtidos, bem como as retas de regressão linear.

Tabela 24 – Fatores de Melhoramento obtidos.

CARGA (kN)	FATOR DE MELHORAMENTO			RIGIDEZ RELATIVA ESTACA-SOLO (λ)
	N = 0	N = 1	N = 4	
5	1,00	2,53	9,08	1,99
50	1,00	4,70	8,83	2,06
100	1,00	2,01	11,49	2,53

Fonte: Autoria Própria.

Figura 80 – Plano de Melhoria obtido para os três estágios de cargas (5, 50 e 100 kN).



Fonte: Autoria Própria

É possível observar que os valores do coeficiente de correlação R^2 encontrado se mostra sempre superior a 0,9, o que indica forte correlação entre os dados empíricos encontrados e a equação teórica.

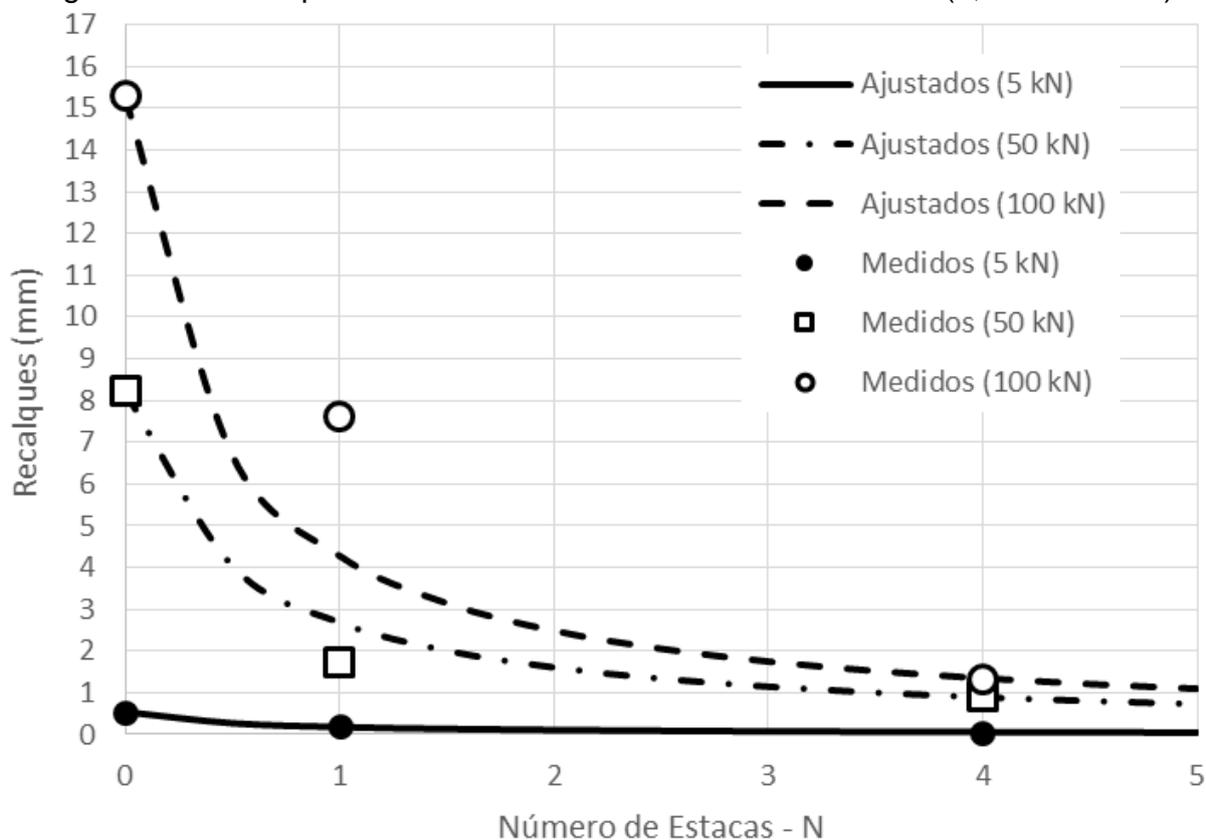
Porém é possível notar que o ajuste é mais aderente para o caso de 4 estacas e se mostra menos assertivo para os recalques encontrados para a configuração do solo + 1 estaca. Provavelmente o motivo dessa discrepância está associado ao fato de que para o conjunto de solo + 1 estacas o diagrama carga x recalque se mostra aproximadamente como bi linear, de forma que o a relação de melhoria para cargas no trecho de recalques em torno de 2 mm apresenta uma rigidez inicial superior a rigidez encontrada para recalques superiores a esse valor.

Ainda assim foi possível construir o diagrama de recalques *versus* o número de estacas para os três níveis de carregamentos (5, 50 e 100 kN) como apresentado por meio da Figura 81.

A mesma tendência apresentada na Figura 80, acerca da não aderência para os resultados de recalques para número de estacas igual a 1 (N=1) é observado na Figura 81. Esse efeito é mais pronunciado para o cenário de carregamentos de 100 kN. Mostrando-se menos expressivo para os outros estágios de cargas e para os demais recalques. Os ajustes se mostraram muito aderentes aos recalques

encontrados para as configurações de solo + 4 estacas.

Figura 81 – Recalque *versus* o aumento do número de estacas (5, 50 e 100 kN).



Fonte: Autoria Própria.

5.4.1.2 Comparação Solo Natural x Solo Pré-Inundado para $N = \{0, 1\}$

Para a pesquisa conduzida por Sales (2000), não foram realizados ensaios para o solo pré-inundado com placa sobre solo + 4 estacas, dessa forma foi conduzida uma análise comparativa entre o estado natural e o estado inundado a partir dos ensaios de placa sobre o solo sem estacas e sobre o solo + 1 estaca.

Segundo Sales et al (2015) para ensaios de placa realizados no campus da UnB, foi verificado um aumento da rigidez do solo pré-inundado quando comparado ao solo natural, que podem ter ocorrido devido a dois fatores:

- Variabilidade natural do solo;
- Ou mais provavelmente, a pré-inundação promoveu o colapso, diminuindo os vazios do sistema e aumentando a compacidade do solo pós-inundação, aumentando sua rigidez.

Independente da razão pela qual o fenômeno se processou, espera-se que, a partir desse comportamento, a rigidez relativa diminua com a pré-inundação. Uma vez que a rigidez do solo faz parte da relação e com seu aumento a rigidez relativa estaca-placa diminui.

Portanto é realizada retro análise da rigidez relativa (λ), a partir da aplicação direta do Método A, com a finalidade de se avaliar o impacto da inundação e provável colapso do solo sobre essa relação. Então a partir dos recalques para o solo sem estacas (S_0) e dos recalques para solo + 1 estaca (S_1) é possível se obter o fator de melhoramento ($F_1 = S_0/S_1$) e rigidez relativa estaca-placa, conforme Equação 84. As Tabelas 25 e 26 apresentam os resultados obtidos para $N = 0$ e $N = 1$, respectivamente, bem como a Figura 82.

$$\lambda = \frac{F-1}{N} \quad \therefore \quad N = 1 \quad \therefore \quad \lambda = F - 1 \quad (84)$$

Tabela 25 – Fatores de Melhoramento obtidos para o solo com umidade natural.

CARGA (kN)	RECALQUE		F = S ₀ / S ₁	λ = F - 1
	S ₀ (mm)	S ₁ (mm)		
5	0,545	0,215	2,5	1,5
10	1,925	0,390	4,9	3,9
20	4,235	0,835	5,1	4,1
30	5,640	1,090	5,2	4,2
40	6,980	1,445	4,8	3,8
45	7,475	1,610	4,6	3,6
50	8,210	1,745	4,7	3,7
55	8,835	1,910	4,6	3,6
60	9,625	2,080	4,6	3,6
65	10,185	2,205	4,6	3,6
70	10,885	2,300	4,7	3,7
75	11,605	2,895	4,0	3,0
85	13,030	4,050	3,2	2,2
95	14,525	6,420	2,3	1,3
100	15,285	7,610	2,0	1,0
110	17,065	10,220	1,7	0,7
120	19,325	13,415	1,4	0,4
130	23,015	16,835	1,4	0,4
140	28,550	20,355	1,4	0,4

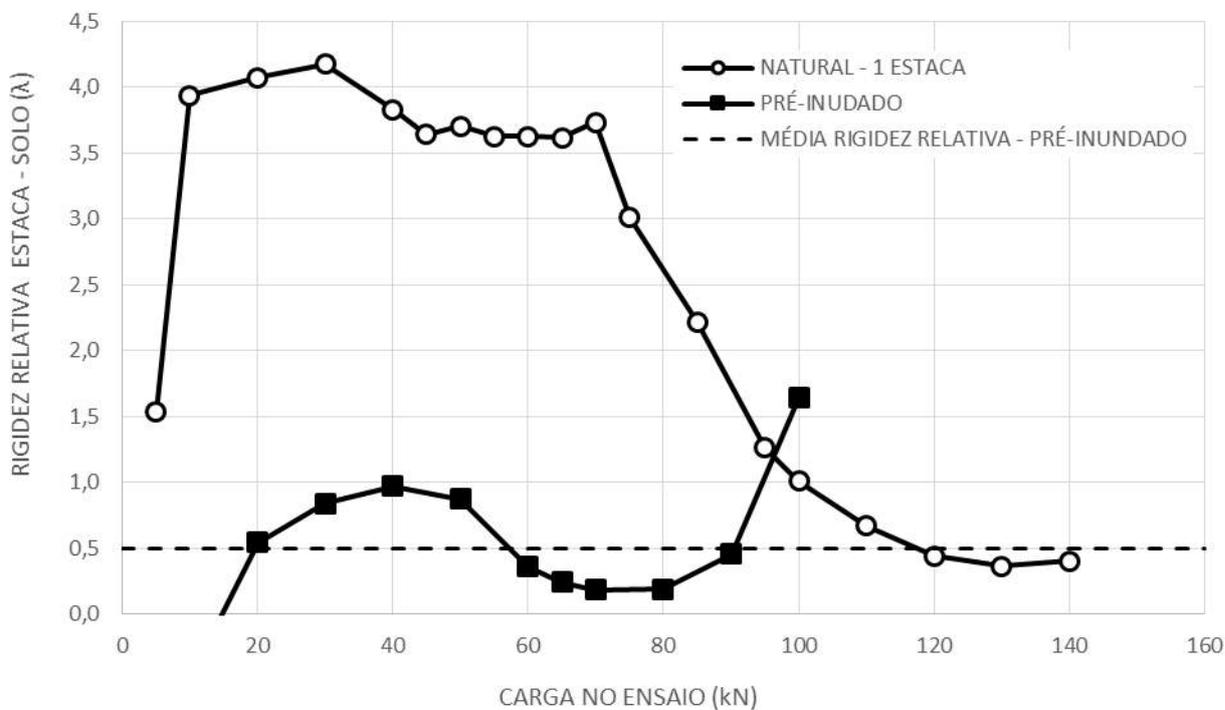
Fonte: Autoria Própria

Tabela 26 – Fatores de Melhoramento obtidos para o solo pré-inundado.

CARGA (kN)	RECALQUE		$F = S_0 / S_1$	$\lambda = F - 1$
	S_0 (mm)	S_1 (mm)		
10	0,255	0,495	0,52	-0,48
20	1,515	0,980	1,55	0,55
30	2,485	1,350	1,84	0,84
40	3,290	1,670	1,97	0,97
50	4,120	2,195	1,88	0,88
60	5,050	3,710	1,36	0,36
65	5,605	4,500	1,25	0,25
70	6,225	5,260	1,18	0,18
80	8,210	6,885	1,19	0,19
90	13,185	9,060	1,46	0,46
100	32,530	12,325	2,64	1,64

Fonte: Autoria Própria

Figura 82 – Rigidez Relativa estaca solo, para o solo com umidade natural e pré-inundado.



Da análise dos resultados é possível observar que a rigidez relativa para o solo inundado se mostrou variando entre 0,19 e 1,64 (excluindo-se o valor negativo obtido

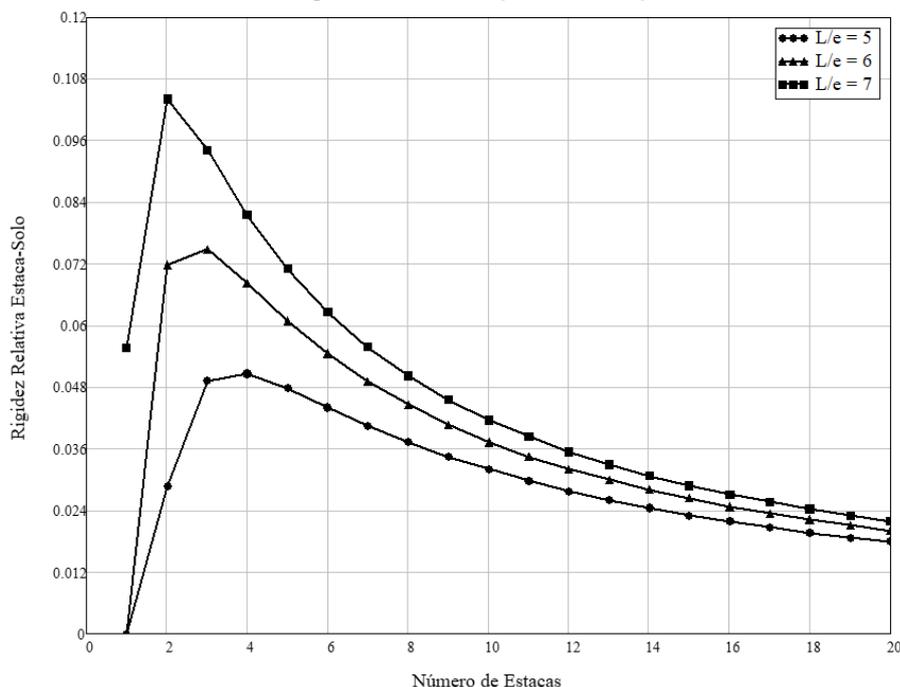
para carga de 10 kN) com média igual a 0,50. Já para o caso da rigidez relativa para o solo em umidade natural, foram observados três intervalos de valores, o primeiro em torno de 3,5 a 4,0 para cargas inferiores a 70 kN, o segundo com valores decrescentes com o aumento das cargas variando entre 3,00 e 1,00 para o intervalo de cargas entre 70 e 100 kN, e o terceiro para cargas superiores a 100 kN com valores variando entre 0,4 e 0,7. Para o trecho de cargas superiores a 100 kN a ordem de grandeza da rigidez relativa é semelhante a ordem de grandeza do solo inundado.

Isso quer dizer que, a rigidez relativa para o solo pré inundado (média em torno de 0,5), para valores de cargas inferiores a 70 kN se mostrou muito inferior (86%) a rigidez relativa do solo natural (média em torno de 3,8). Isso demonstra o potencial da metodologia de avaliar o efeito da inundação e colapso sobre o sistema. Por outro lado, a progressiva diminuição da rigidez relativa do solo natural para cargas superiores a 70 kN indica que a partir desse carregamento o sistema colapsa devido incremento de cargas. Podendo-se afirmar existe colapso mesmo sem inundação para cargas superiores a 70 kN. Já entre 70 e 100 kN a rigidez relativa ainda é superior aos valores encontrados para o solo pré-inundado e só a partir de 100 kN a rigidez relativa estaca-placa para umidade natural converge para o valor basal da configuração pré-inundada. Vale salientar que para o carregamento de 70 kN o diagrama carga x recalque da prova de carga em placa sobre solo + estaca apresenta ponto de mudança de rigidez, onde, por outro lado, pode-se imaginar a possibilidade de uma ruptura da estaca (ponto que encerra o primeiro trecho da curva, com maior inclinação em relação ao eixo horizontal, entrando em um segundo trecho de menor inclinação). A título de registro foi verificado um comportamento de oscilação rigidez relativa estaca-placa para o solo pré-inundado semelhante a uma variação senoidal.

Com a finalidade de manter o protocolo de avaliação de cada obra, foi realizada comparação dos resultados obtidos da rigidez estaca-placa com as previsões apresentadas na metodologia que correlacionam as equações empíricas de Mandolini com a equações e premissas da metodologia apresentada. Para o presente estudo de Sales (2000), a relação $L/e = 6,66$ (como dito anteriormente), dessa forma foram realizadas análises para os valores de L/e variando entre 5, 6 e 7, conforme Figura 83. Os valores médios encontrados (até $N = 4$) foram de 0,026, 0,043 e 0,067, com valor máximo de 0,104 encontrado para $L/e = 7$, com $N = 2$. Valores muito inferiores aos encontrados, o que confirma a necessidade de elaboração de banco de dados

nacional, que considere as características locais.

Figura 83 – Estimativa da Rigidez estaca-placa – a partir de Mandolini (2012)



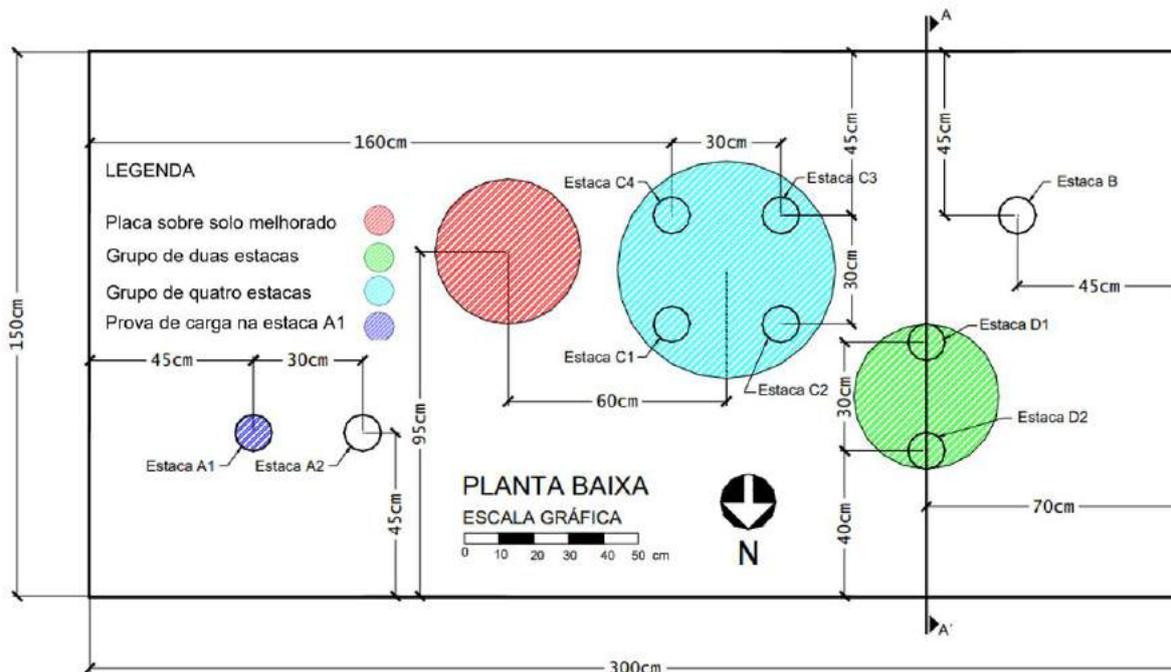
Fonte: Autoria Própria

5.4.2 Estudo UNB2 – Passos 2005

Ainda no mesmo local, do campo experimental da UNB, segundo Passos (2005) foram confeccionadas estacas de melhoramento em areia e brita, com 100 mm de diâmetro e 1,40 m de comprimento, com espaçamento entre estacas de 300 mm (3 diâmetros), o que conduz a relação de $L/e = 4,66$. Foram realizados ensaios de placa sobre:

- Solo melhorado, sem estacas.
- Estaca Isolada (Geometria A - A1)
- 2 estacas (Geometria D - D1 e D2)
- 4 estacas (Geometria C - C1, C2, C3, e C4), conforme pode ser visto na Figura 84.

Figura 84 – Locação dos ensaios realizados no campo experimental da UnB.



Fonte: Passos (2005)

Para a realização dos ensaios foi escavada uma vala de 1,50 m x 3,00 m de área e profundidade de 2,20 m, onde foi depositada areia fofa por processo de pluviação. Em seguida foram executadas as estacas e realizada campanha de ensaios de caracterização do material antes e após o estaqueamento. Vários ensaios foram realizados como por exemplo os de classificação do material, a saber, umidade, granulometria, peso específico, bem como ensaios de campo como SPT, CPT e DMT, e por fim os ensaios de prova de carga. Como esse trabalho tem objetivo de avaliar os resultados das provas de carga em placa a discussão acerca da elaboração das estacas e realização dos ensaios não são abordadas. As Figuras 85, 86 e 87 apresentam os ensaios de prova de carga em placa durante sua execução.

Para a prova de carga realizada sobre o solo melhorado foi possível observar fissuras no terreno em torno da placa, conforme Figura 85. Foram utilizados dois extensômetros para leitura dos recalques com os estágios de carregamento.

Já para os ensaios realizados sobre solo mais estacas foram utilizadas duas células de carga que podem ser vistas nas Figuras 86 e 87. Foram utilizados 4 extensômetros para ambos os ensaios.

Para a apresentação dos resultados são utilizados os recalques médios

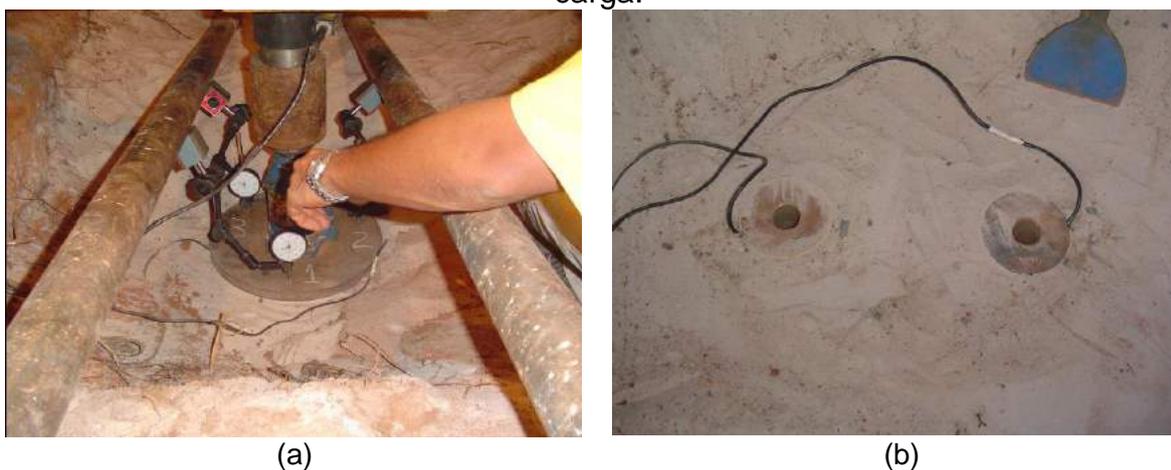
medidos, conforme Figura 88.

Figura 85 – Ensaio de placa sobre solo melhorado (a) configuração (b) fissuras no entorno.



Fonte: Passos (2005)

Figura 86 – Ensaio de placa sobre solo + 2 estacas (a) configuração (b) células de carga.



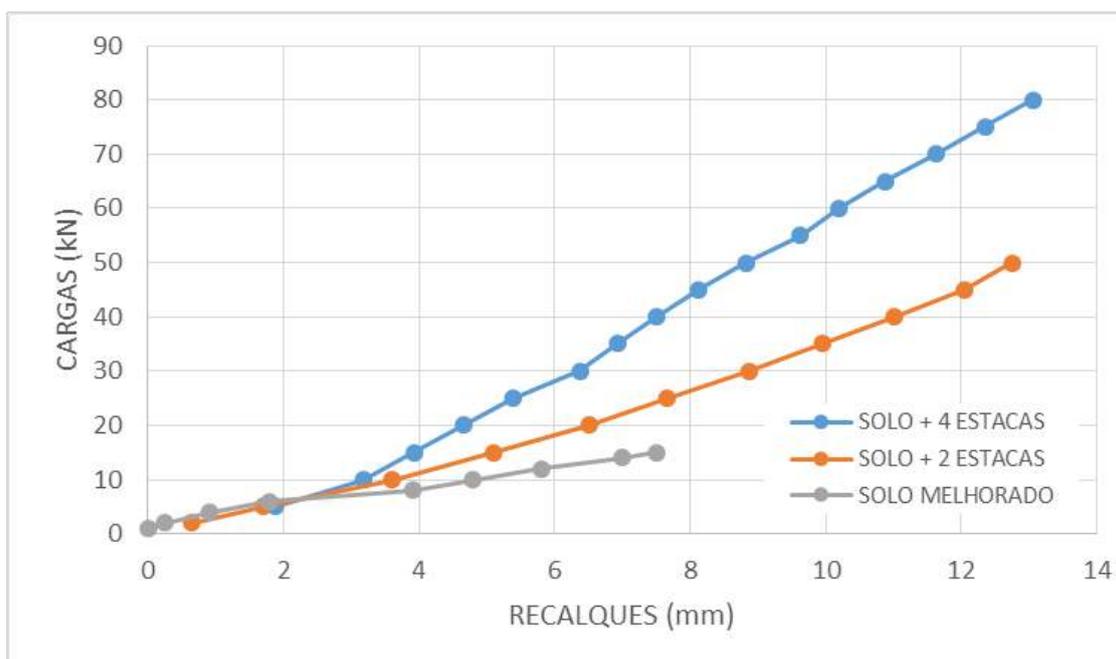
Fonte: Passos (2005)

Figura 87 – Ensaio de placa sobre solo + 4 estacas (a) configuração (b) células de carga.



Fonte: Passos (2005)

Figura 88 – Diagrama Carga x Recalque para os ensaios realizados.



Fonte: Autoria Própria

Após a obtenção dos dados dos ensaios os resultados foram compilados e foi possível observar que só apresentavam 2 cargas comuns aos três ensaios, as cargas de 10 e 15 kN. Porém, a partir dos resultados obtidos foi possível aplicar o método proposto nesse trabalho com coeficientes de correlação (R^2) superiores a 0,96. Então foi plotado o plano de melhoramento que correlaciona o Fator de Melhoramento F com o Número de Estacas N, conforme apresentado por meio da Figura 89. Então foi possível encontrar a rigidez relativa estaca-placa para as cargas de 10 e 15 kN, de 0,1357 e 0,2292, respectivamente, conforme apresentados em Tabela 27.

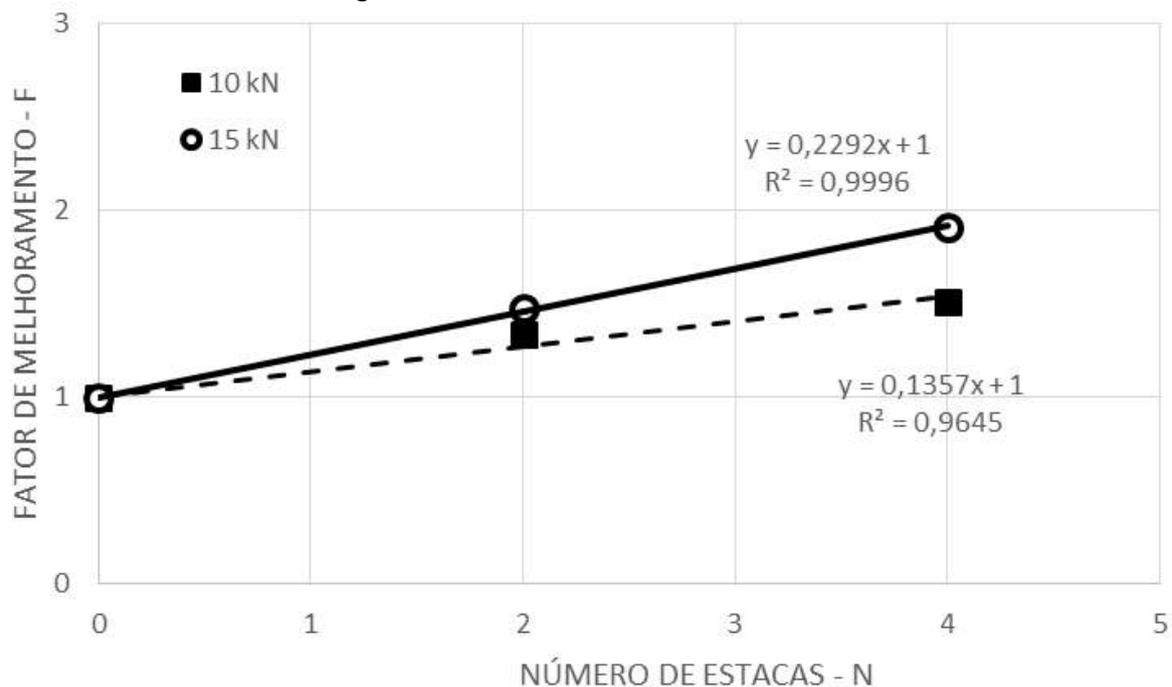
A partir desses resultados é possível plotar a curva de variação do recalque com o incremento do número de estacas para os pontos de $N = 0$, $N = 2$ e $N = 4$, utilizando-se de Equação 25, como pode ser visto na Figura 90.

Tabela 27 – Rigidez relativa estaca-placa obtida.

Carga (kN)	Rigidez relativa estaca-placa (λ)	Coefficiente de Correlação (R^2)
10	0,1357	0,9645
15	0,2292	0,9996

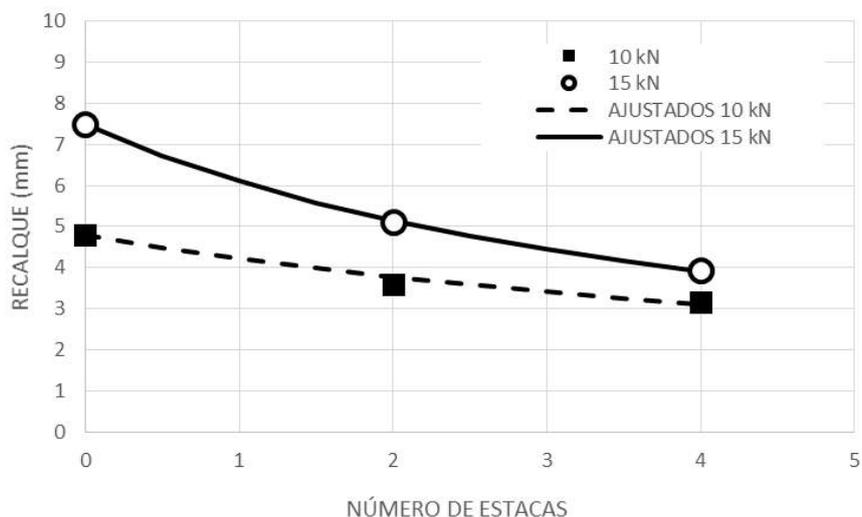
Fonte: Autoria Própria

Figura 89 – Plano de melhoramento.



Fonte: Autoria Própria

Figura 90 – Plano de melhoramento.



Fonte: Autoria Própria

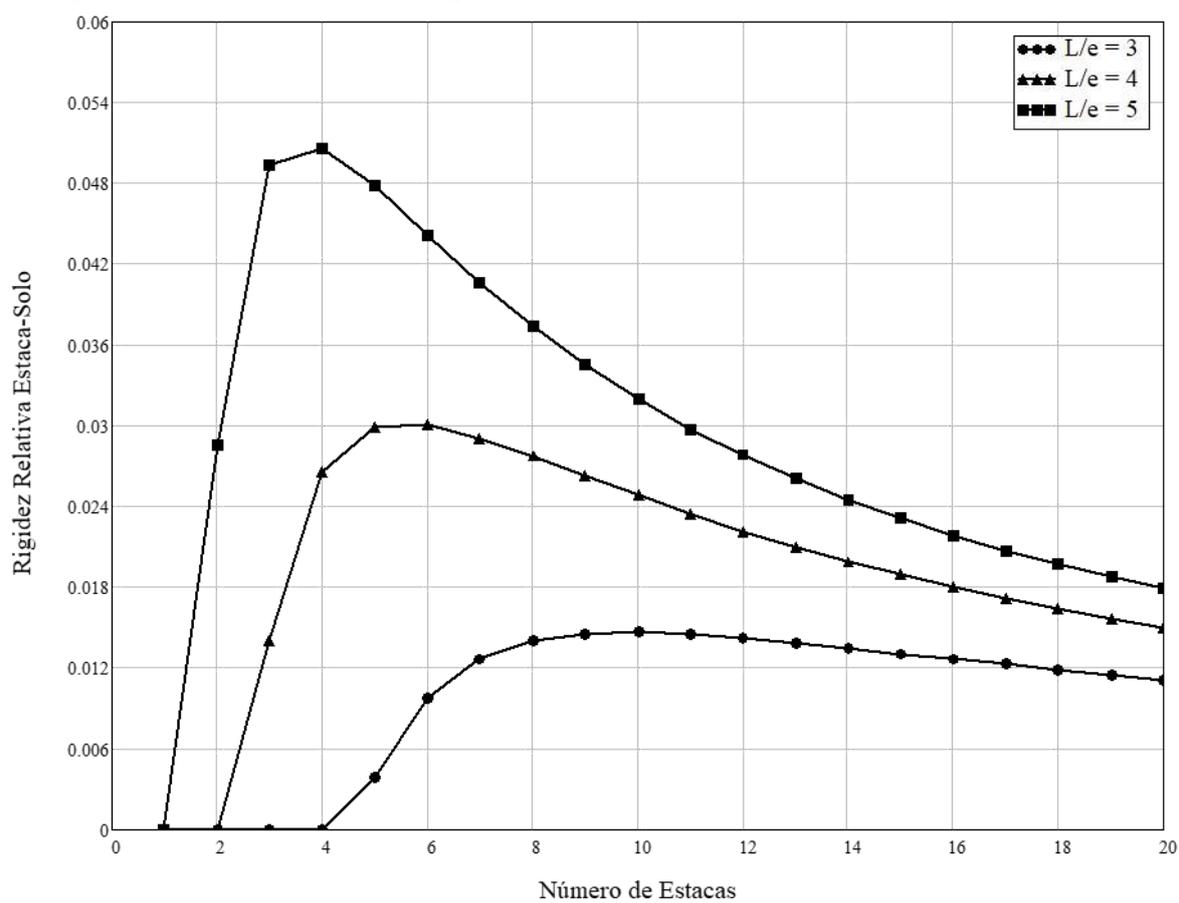
De forma análoga ao caso de Sales (2000), foi realizada comparação com as equações derivadas do método empírico de Mandolini (2012), utilizando-se das equações sugeridas.

Como os valores de $L/e = 4,66$, foram realizadas análises para $L/e = \{3, 4, 5\}$, conforme Figura 91.

Os valores médios encontrados (até $N = 4$) foram de 0,0044, 0,017 e 0,033,

com valor máximo de 0,051 encontrado para $L/e = 5$, com $N = 4$. Os valores apresentados pelas equações que correlacionam o método a proposta empírica de Mandolini (2012) se mostraram muito inferiores aos encontrados, fato que mais uma vez ratifica a necessidade de elaboração de banco de dados nacional.

Figura 91 – Estimativa da Rigidez estaca-placa – a partir de Mandolini (2012)

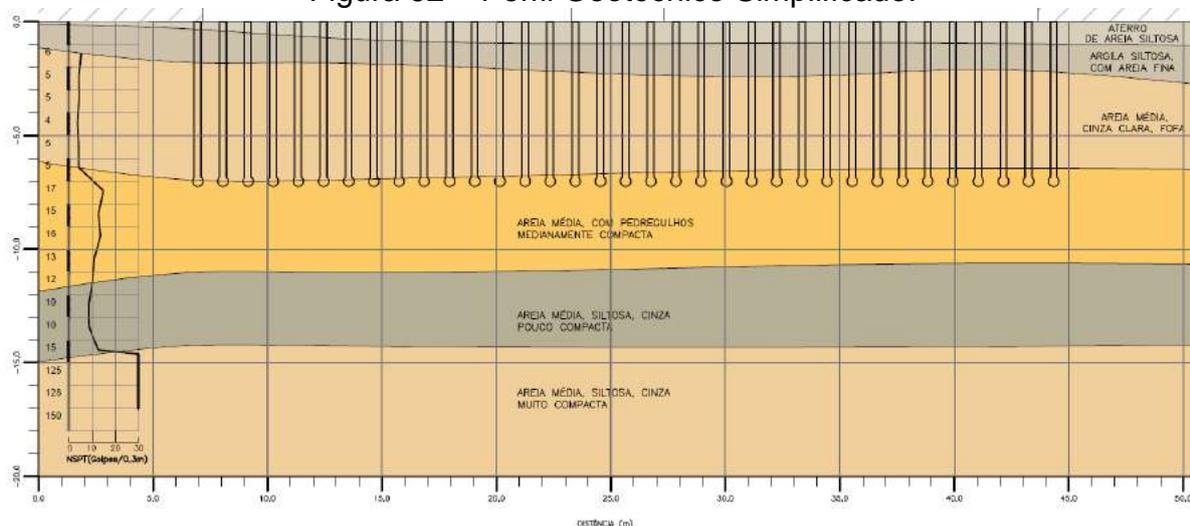


Fonte: Autoria Própria

5.5 Edificação no bairro do Parnamirim, Recife/PE

A edificação em análise foi primeiramente estudada por Pacheco (2002) e revisitada por Amorim (2019). Situada no bairro do Parnamirim em Recife/PE corresponde a um edifício residencial com 20 lajes construído em estrutura aporticada de concreto armado. Atualmente o edifício apresenta tempo de utilização em torno de 20 anos (durante a realização do trabalho de Pacheco, 2002, o edifício estava em construção). A partir do material levantado foi possível elaborar o perfil geotécnico apresentado na Figura 92.

Figura 92 – Perfil Geotécnico Simplificado.



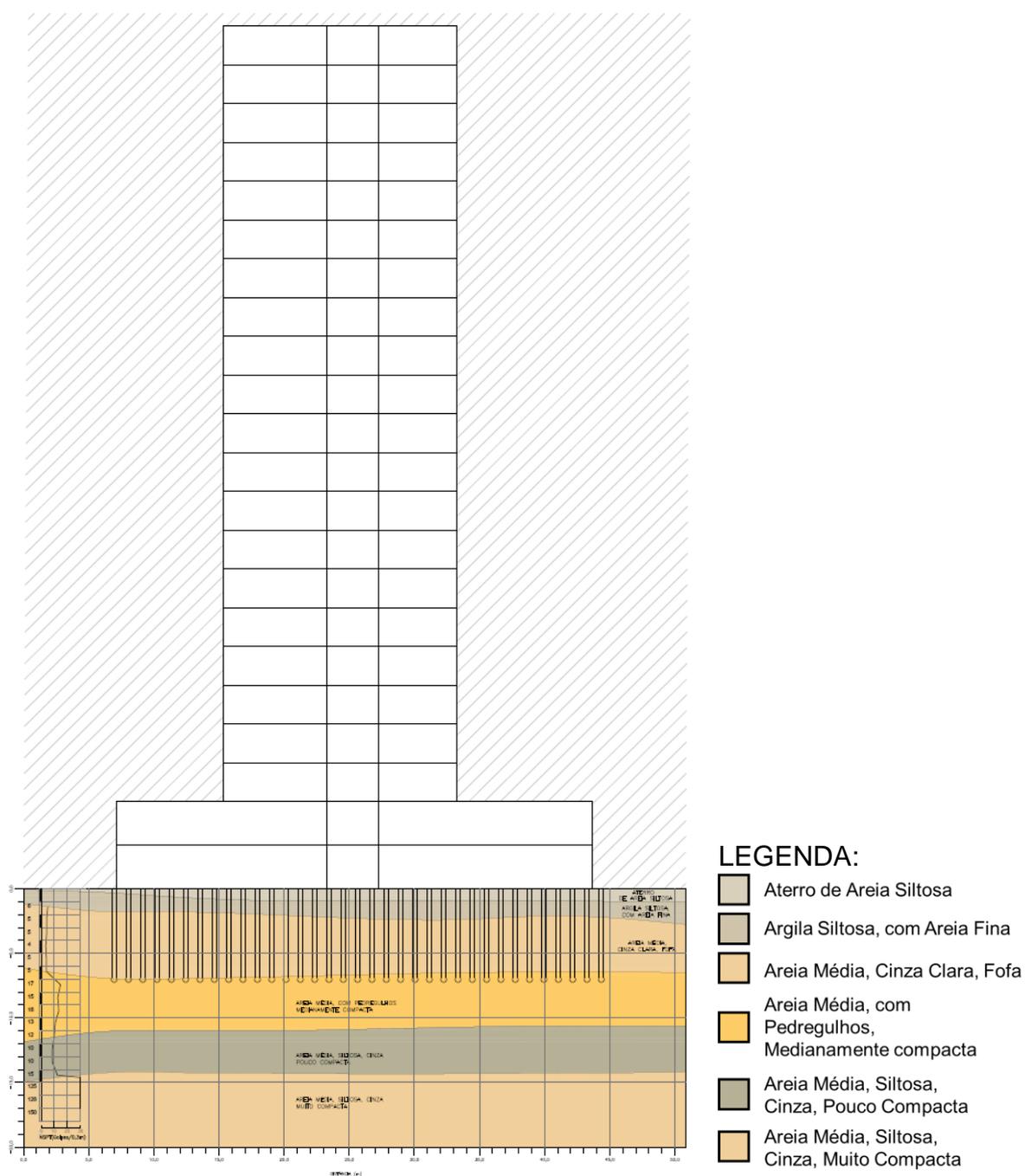
Fonte: Autoria Própria, a partir de sondagem apresentada por Amorim (2019)

O perfil de subsolo é composto por uma camada inicial de aterro encontrada para as primeiras profundidades, seguido por camada de argila siltosa até 2,00 m de profundidade. A seguir encontra-se uma camada de areia fofa até 7,00 m. Logo em seguida é verificada uma camada de areia média com pedregulhos, medianamente compacta, até a profundidade de 11,00 m. Após a camada medianamente compacta supracitada encontra-se uma camada de areia siltosa, cinza, pouco compacta, até a profundidade de 15,00 m. Por fim encontra-se uma camada de areia muito compacta encontrada até o limite das sondagens, na profundidade de 18,00 m, conforme apresentado em Figura 92 e 93.

A solução de fundação para o edifício foi realizada em fundação direta, por sapatas, assentes sobre colunas de melhoramento em argamassa, com traço de 1:8:4

(cimento: areia: brita), diâmetro de 300 mm, e comprimento de 7,00 m. As colunas estão diretamente apoiadas sobre a camada de areia com pedregulhos, medianamente compacta, atravessando a camada de argila siltosa e de areia fofa encontradas até os 7,00 m de profundidade (dados obtidos a partir dos autores citados – Pacheco, 2002 e Amorim, 2019), o resumo de todas as informações é apresentado por meio da Figura 93.

Figura 93 – Edificação, Sondagem e Solução de Fundação.

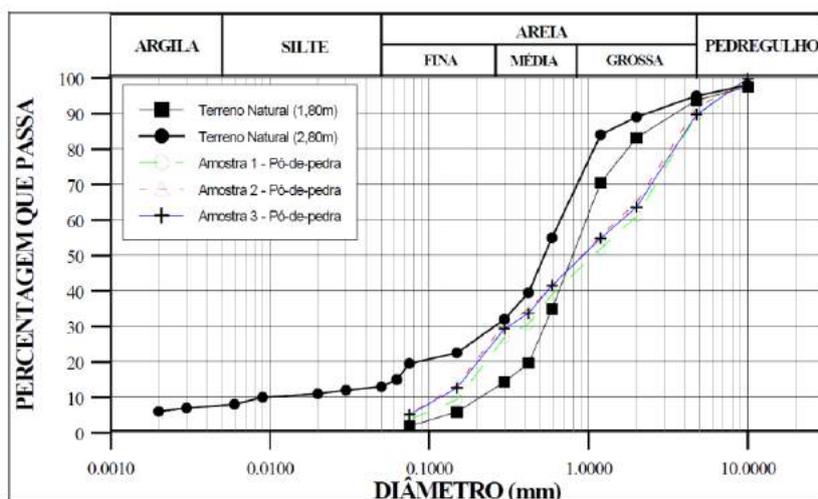


Fonte: Autoria Própria

5.5.1 Ensaios de Caracterização

Com a finalidade e complementar o conhecimento acerca da técnica de melhoramento e das propriedades dos materiais envolvidos, Pacheco (2002) desenvolveu campanha de ensaios de caracterização. Foram realizados ensaios de granulometria no solo natural para as profundidades de 1,80 m e de 2,80 m, bem como foram retirados testemunhos das colunas de compactação e ensaiados a compressão axial simples. A Figura 94 apresenta o resultado das curvas granulométricas obtidas e a Figura 95 e 96 apresentam a coluna de compactação no campo e os corpos de prova obtidos após processo de extração.

Figura 94 – Curvas de granulometria dos materiais envolvidos.



Fonte: Pacheco (2002)

Figura 95 – Coluna de argamassa em campo – Ano 2000.



Fonte: Pacheco (2002)

Figura 96 – Corpos de prova obtidos.



Fonte: Pacheco (2002)

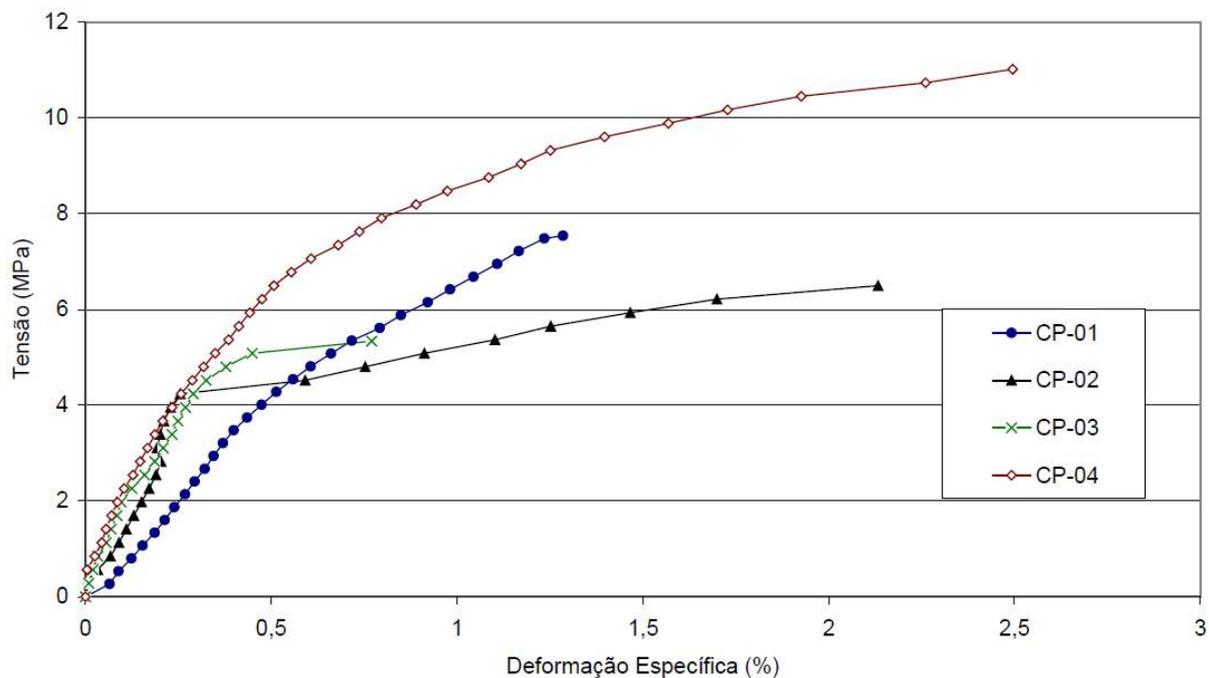
Após a extração dos testemunhos, foram realizados ensaios de compressão axial simples nos copos de prova obtidos. O resultado dos ensaios é apresentado por meio da Figura 97. A partir da observação dos resultados encontrados, é possível observar que para a ordem de grandeza das tensões em que as colunas estão submetidas (da ordem de 4 MPa, segundo Pacheco, 2002) o módulo de deformação encontrado é da ordem de 1.500 MPa.

A partir dos resultados encontrados para o módulo de deformação (E_e) pode-se estimar valores de coeficiente de mola para as colunas da ordem de 20.000 kN/m (pela teoria da elasticidade - $k_e = E_e \cdot A/L$, considerando o diâmetro da estaca de 300 mm e o comprimento de 7,00 m). Esse valor não é representativo do comportamento da coluna em seu funcionamento real, uma vez que não considera os efeitos de confinamento.

Porém, como o confinamento lateral tende a aumentar o coeficiente de deformabilidade, esse valor pode ser considerado como um limite inferior, onde não

se esperam coeficientes de deformabilidade de campo inferiores a essa ordem de grandeza.

Figura 97 – Resultado dos Ensaio de Compressão Axial



Fonte: Pacheco (2002)

5.5.2 Ensaio de Placa

Após a execução das fundações, procedeu-se com campanha de ensaios de placa com a finalidade de averiguar o comportamento carga x deslocamento do sistema de fundações. Os ensaios foram realizados com sistema de reação implementado apenas para essa finalidade, em torno da sapata do Pilar 11 da edificação. A sapata em questão tem dimensões de 2,90 x 3,60 e conta com 20 colunas de compactação em argamassa.

Portanto foram realizados quatro ensaios de prova de carga em placa, com diversas configurações, a saber (ver Figura 98):

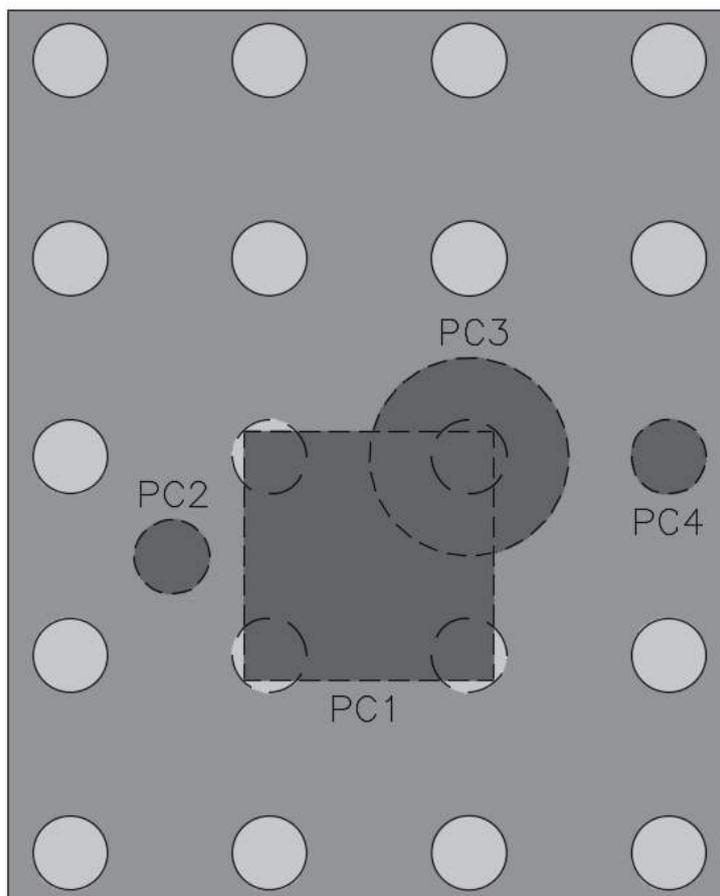
- Placa de 300 mm sobre o solo melhorado (PC2);
- Placa de 300 mm sobre a coluna de melhoramento (PC4 - diâmetro da placa coincidente ao da coluna);
- Placa de 800 mm sobre o solo + 1 colunas (PC3)

- Placa de 1.000 x 1.000 mm x mm sobre solo + 4 colunas (PC1).

Os resultados dos ensaios são detalhados e apresentados no Quadro da Figura 99 e no gráfico carga x recalque da Figura 100.

Figura 98 – Disposição dos ensaios de Placa Executados

SP11 – 2,90 x 3,60



Legenda: SP = Sapata do pilar; PC = Ensaio de Placa;

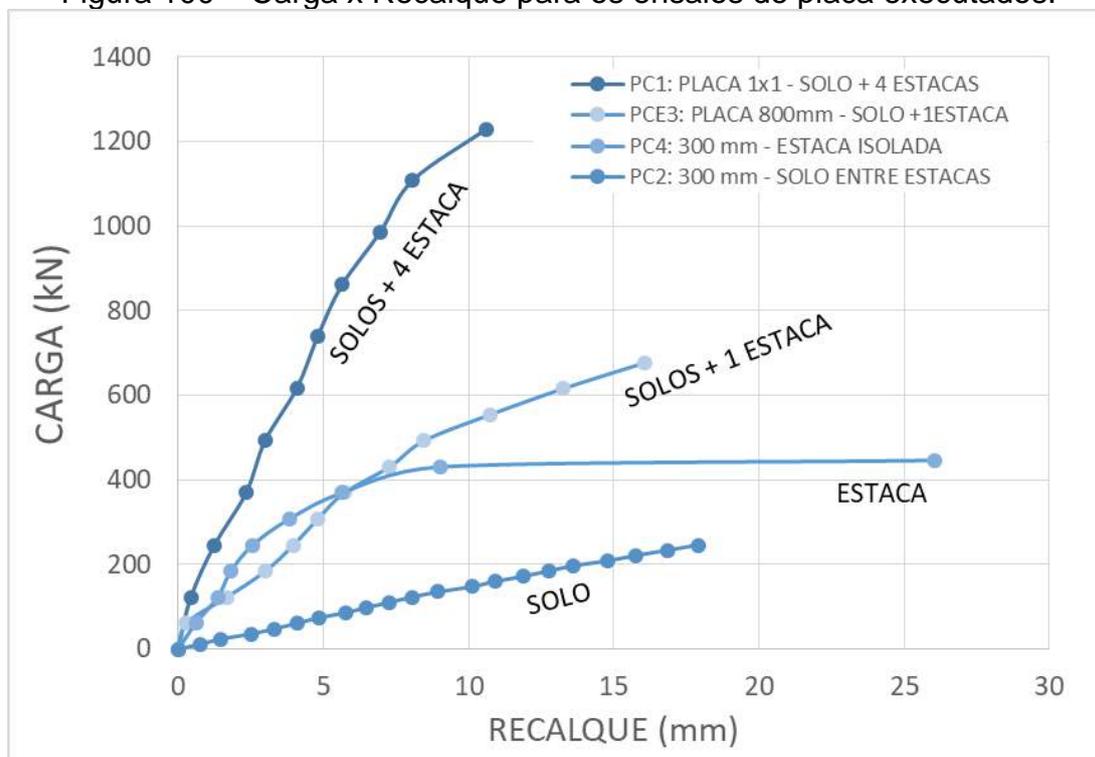
Fonte: Autoria Própria, a partir de relatório de ensaios de prova de carga em placa

Figura 99 – Quadro dos Resultados Ensaio de Placa, por número de Estacas N.

ESTÁGIO DE CARGA	N = 0		N = 1		N = 4		PC4 - ESTACA ISOLADA	
	PC2 - SOLO ENTRE		PC3 - SOLO+1 ESTACA		PC1 - SOLO + 4		CARGA (kN)	RECALQUE (mm)
	CARGA (kN)	RECALQUE (mm)	CARGA (kN)	RECALQUE (mm)	CARGA (kN)	RECALQUE (mm)		
1	12	0,77	61,5	0,29	123,1	0,44	61,5	0,61
2	24	1,48	123	1,68	246,2	1,25	123	1,36
3	36	2,5	184,7	3,01	369,5	2,34	184,7	1,82
4	48	3,31	246,3	3,97	492,6	2,99	246,3	2,57
5	61,6	4,12	307,9	4,81	617,5	4,09	307,9	3,83
6	74	4,84	369,4	5,72	738,9	4,8	369,4	5,65
7	86,2	5,76	431	7,28	862	5,65	431	9,02
8	98,5	6,49	492,6	8,47	985,2	6,95	446,4	26,04
9	110,8	7,29	554,2	10,73	1108,3	8,07		
10	123,1	8,05	615,8	13,25	1230	10,61		
11	135,4	8,94	677,3	16,07				
12	147,8	10,12						
13	160	10,9						
14	172,4	11,89						
15	184,7	12,75						
16	197	13,6						
17	209,3	14,8						
18	221,7	15,77						
19	234	16,85						
20	246,3	17,9						

Fonte: Autoria Própria

Figura 100 – Carga x Recalque para os ensaios de placa executados.



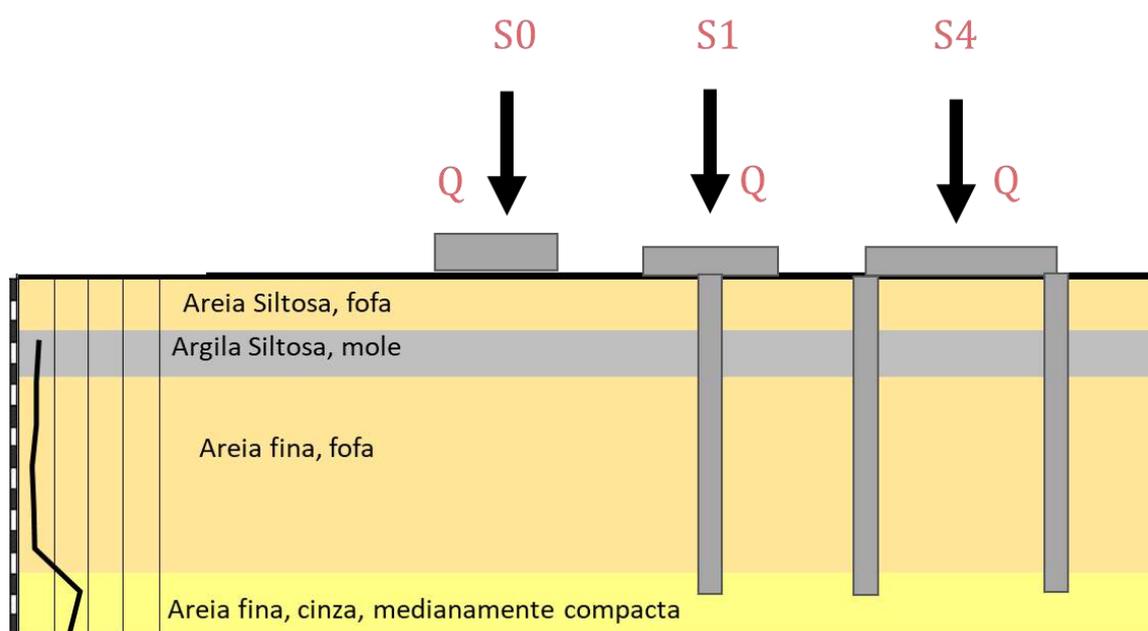
Fonte: Autoria Própria

5.5.3 Aplicação da Metodologia Proposta

Para aplicação da metodologia que foi proposta no Capítulo 3, são necessários ensaios onde se obtenham recalques para número diferentes de estacas. Os ensaios realizados foram para configurações de número de estacas variando entre 0, 1 e 4. Assim, é possível se obter o Plano de Melhoramento, ao se correlacionar os fatores de melhoramento e o respectivo número de estacas (o fator de melhoramento F definido em 3 é igual a relação entre os recalques, e é necessariamente maior do que a unidade).

Os ensaios de prova de carga podem ser resumidos segundo a Figura 101. O fator de melhoramento pode ser calculado para dois cenários, o primeiro a partir do melhoramento que o sistema sofreu com a inserção de 1 estaca ($N=1$, $F_1 = S_0/S_1$); e segundo para o melhoramento que o sistema sofreu com a inserção de 4 estacas ($N=4$, $F_4 = S_0/S_4$). Para aplicação da metodologia os recalques devem ser obtidos para o mesmo nível de carregamento. Para o estudo de caso em análise é desenvolvido para as cargas de 123 kN e de 246 kN por serem os únicos estágios de carga a estarem presentes em todos os ensaios. Os resultados obtidos para o fator de melhoramento são apresentados na Tabela 28.

Figura 101 – Resumo dos ensaios – aplicação da metodologia.



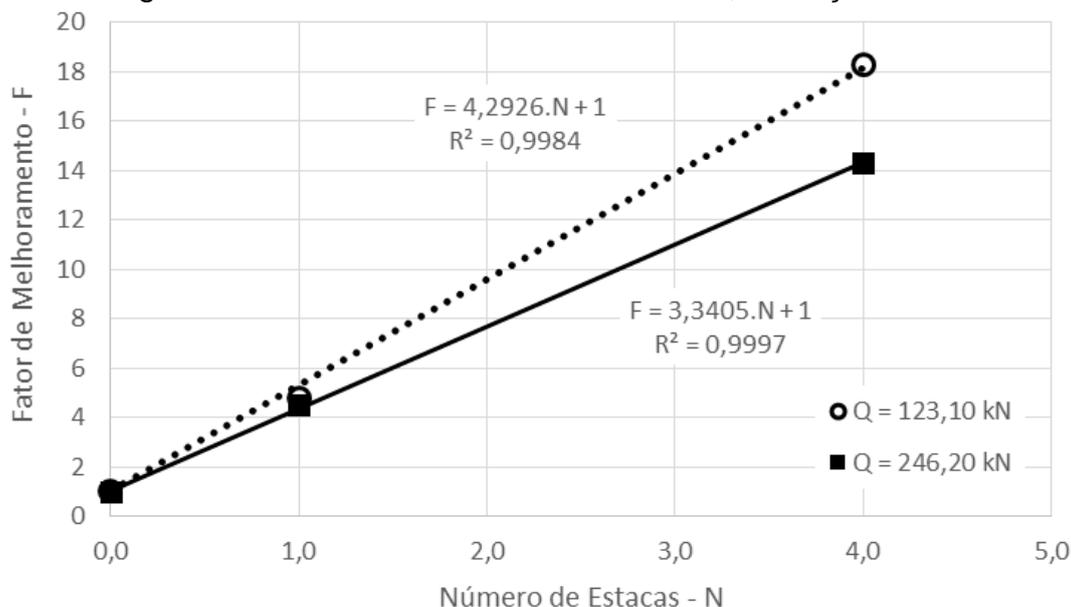
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 28 – Recalques médios e Fator de Melhoramento

Carga de Ensaio	Recalques (mm)			Fator de Melhoramento - F		
	N = 0	N = 1	N = 4	N = 0	N = 1	N = 4
Q = 123,10 kN	8,05	1,68	0,44	1	4,79	18,29
Q = 246,20 kN	17,90	3,97	1,25	1	4,51	14,32

Fonte: Aatoria Própria

A partir dos resultados apresentados na Tabela 28, é possível construir o Plano de Melhoramento, que correlaciona o fator de Melhoramento F e o número de estacas N (Figura 102). Ao se realizar uma regressão linear entre os pontos obtidos; a inclinação da regressão representa a Rigidez relativa estaca-placa λ ($F = 1 + \lambda.N$). A Tabela 29 apresenta os resultados obtidos.

Figura 102 – Plano de Melhoramento F x N; obtenção de λ .

Fonte: Aatoria Própria

É possível notar uma elevada aderência do modelo aos dados reais encontrados a partir de ensaios de placa (como pode ser observado pelo elevado R^2). Os valores de Rigidez relativa estão situados entre 3,34 e 4,29, e apresentaram diminuição com o aumento da carga aplicada.

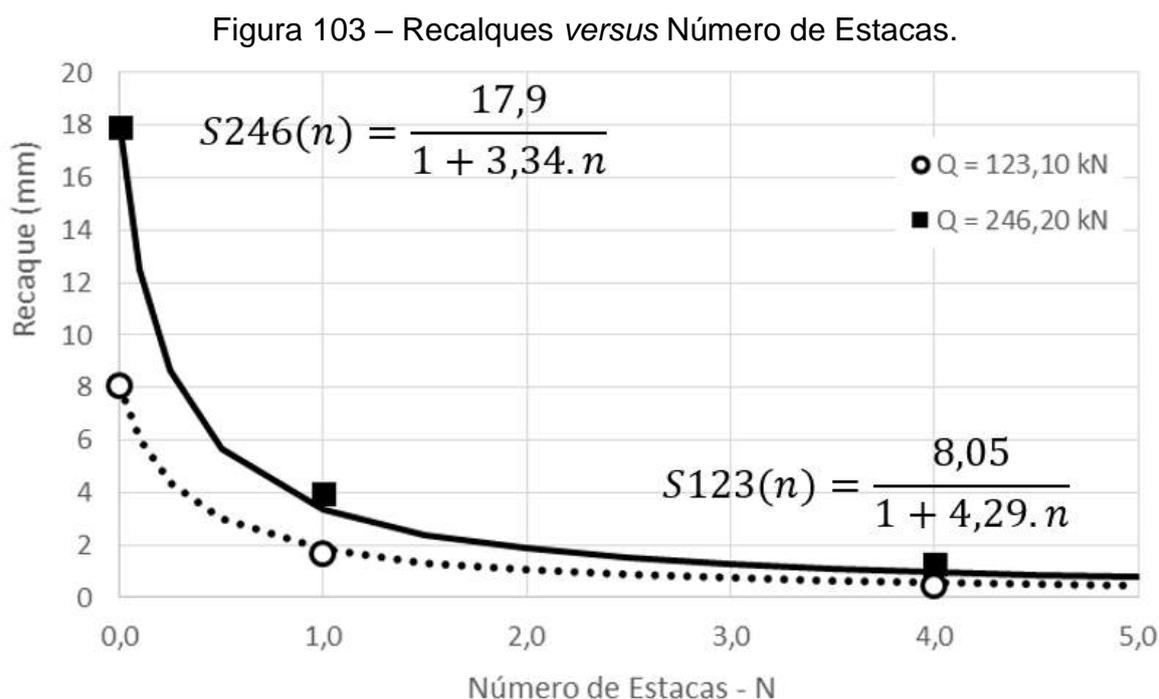
Tabela 29 – Recalques médios e Fator de Melhoramento

Carga de Ensaio	Rigidez Relativa Estaca Solo	Coefficiente de Correlação
-----------------	------------------------------	----------------------------

(kN)	(λ)	(R ²)
123,10	4,2926	0,9984
246,20	3,3405	0,9997

Fonte: Autorial Própria

Após a obtenção da rigidez relativa estaca-placa, é possível construir o gráfico de decaimento do recalque com o número de estacas. Em função da utilização da equação 25 - $S_N = S_0/(1 + \lambda.N)$. São plotados os dados experimentais e a curva obtida a partir da metodologia, ver Figura 50. É possível observar que a aderência entre os dados e a curva se mostrou muito elevada, da mesma forma que a reta de regressão apresentada pelo plano de melhoramento.



Legenda: S246 = Recalques para a carga de 246 kN e S123 = Recalque para a carga de 123 kN

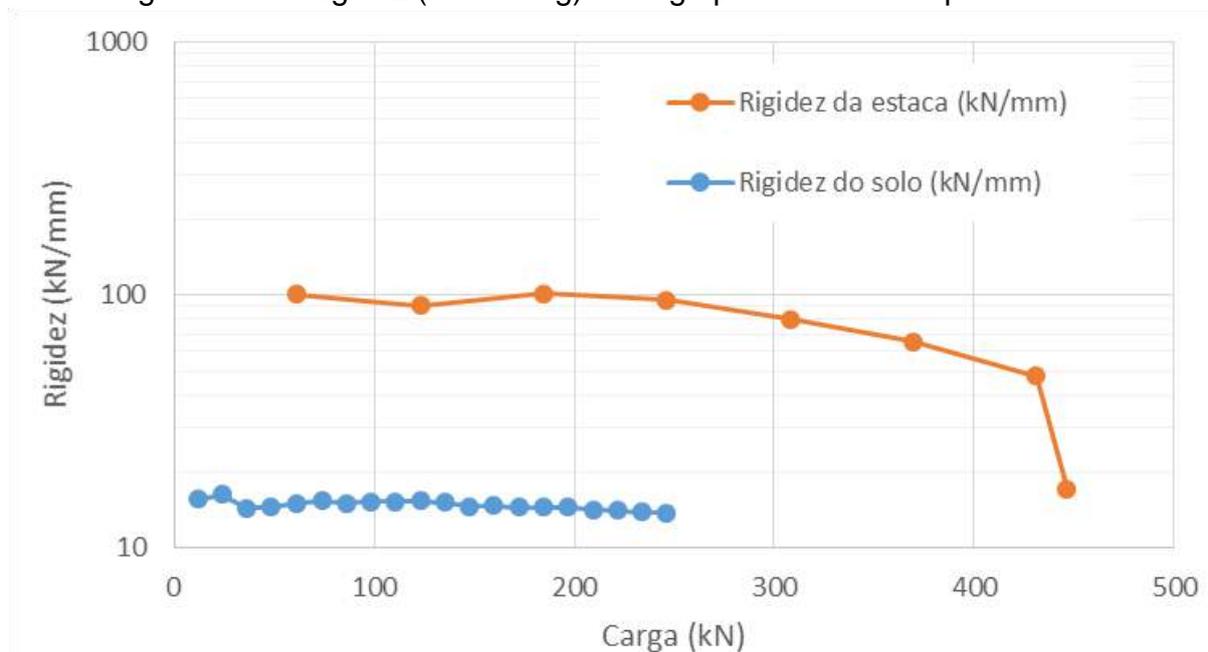
Fonte: Autorial Própria

5.5.3.1.1 Obtenção da Rigidez Relativa por meio do ensaio na estaca isolada

Como citado no capítulo anterior, além da obtenção da rigidez relativa via reta de regressão existe a opção de obter seu valor de forma direta a partir dos resultados dos ensaios de prova de carga em placa. Uma vez que seu valor é obtido entre a relação entre a rigidez da estaca e da rigidez do solo, para o mesmo nível de carregamento ($\lambda = k_e/k_p$). A rigidez da estaca e do solo são obtidas imaginando o material elástico linear, então é dada pela relação entre carga e recalque ($k = R/S$).

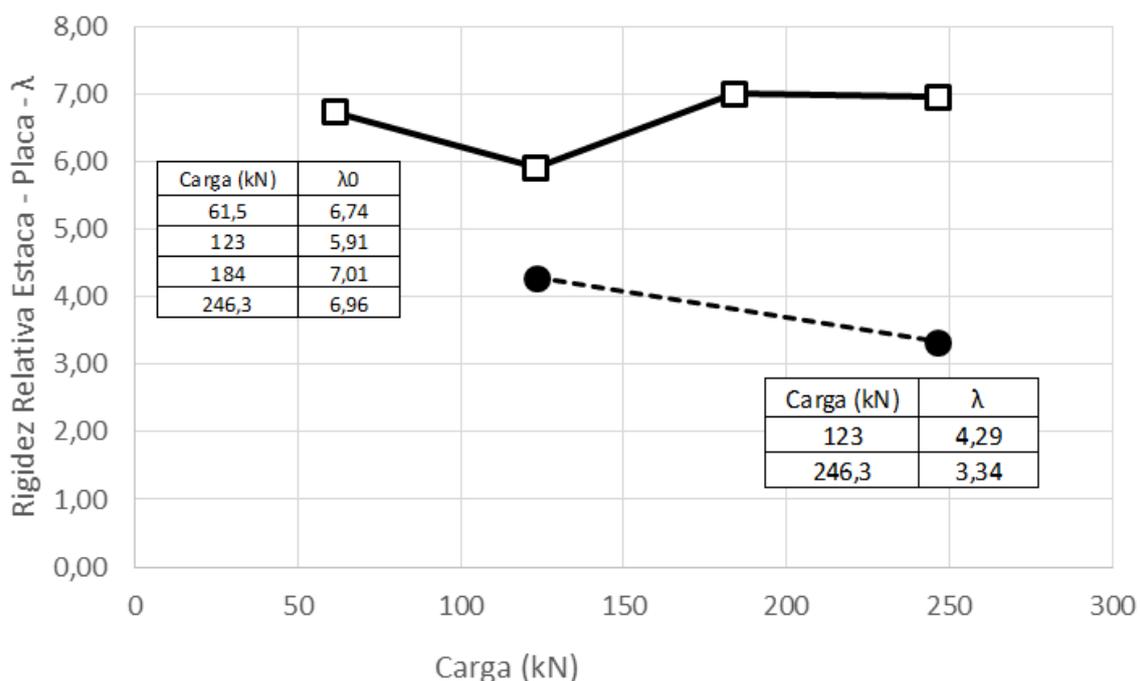
Então a partir dos dados das provas de carga apresentados por meio da Figura 100, foram obtidas as curvas de rigidez para as estacas e para o solo (Figura 104), bem como a rigidez estaca solo obtida de forma direta. Vale salientar que para essa forma alternativa de obtenção da relação λ , não são considerados os efeitos de interação entre placa, solo e coluna, uma vez que as provas de carga são realizadas com o mesmo diâmetro da coluna. Por essa razão, espera-se valores de λ superiores ao encontrados para a metodologia que se baseia na regressão linear. Para diferenciar os dois valores encontrados, para esse método a rigidez estaca-solo será apresentada como λ_0 . A Figura 105 apresenta a rigidez estaca-solo, obtida pelos dois métodos.

Figura 104 – Rigidez (escala log) x Carga para a coluna e para o solo.



Fonte: Autoria Própria

Figura 105 – Rigidez estaca solo para ambos os métodos versus o carregamento.

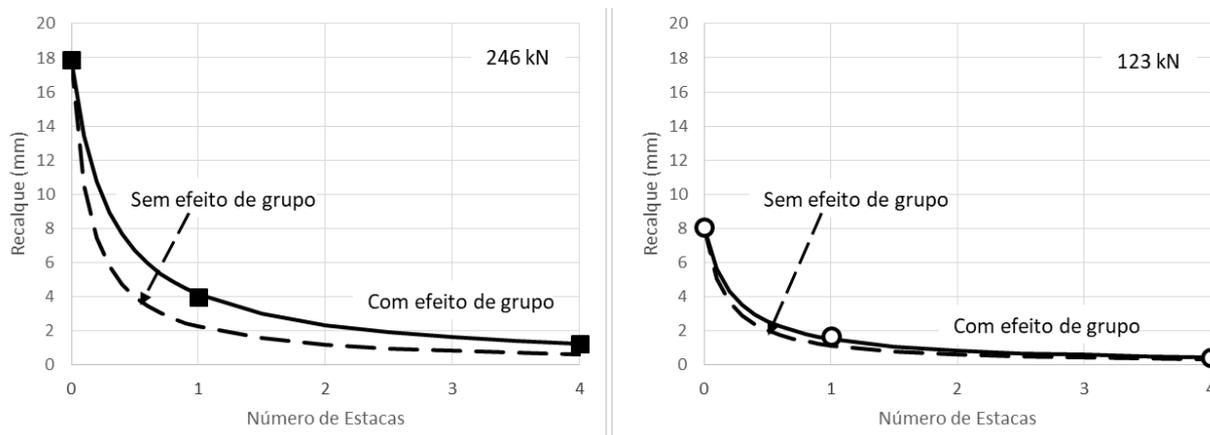


Fonte: Autoria Própria.

Até a carga de 246 kN, que é o limite de carregamento do ensaio no solo, a rigidez da coluna variou entre 90 a 101 kN/mm, com média de 97 kN/mm. É interessante observar que a rigidez estimada a partir dos ensaios de compressão axial se mostrou da ordem de 20.000 kN/m, ou 20 kN/mm. De fato o efeito do confinamento aumentou em cinco vezes a rigidez da coluna.

Para o mesmo intervalo o solo apresentou rigidez variando entre 13 e 16 kN/mm, com média de 14 kN/mm. Dessa forma, em termos médios a rigidez obtida de forma direta em termos médios é igual a $\lambda_0 = 6,92$. O que representa 60 a 100% superior a o λ encontrado a partir da regressão linear. Como esperado os valores de λ_0 são superiores aos valores de λ , uma vez que não levam em consideração o efeito de interação ou efeito de grupo. Dessa forma os recalques sem a consideração do efeito de grupo podem ser calculados a partir de λ_0 se utilizando da Equação 12 novamente, $S_N = S_0 / (1 + \lambda_0 \cdot N)$. Os recalques estimados a partir de λ se mostraram superiores aos estimados por meio de λ_0 , e mais próximos dos valores medidos, conforme apresentado por meio da Figura 106. Para a carga de 123 kN, o recalque com efeito de grupo se mostrou 35% do que o recalque sem efeito de grupo ($\xi = 1,35$). Para a carga de 246 kN o valor encontrado foi de 93% ($\xi = 1,93$).

Figura 106 – Recalque *versus* Número de estacas para ambos os métodos e ambas as cargas.

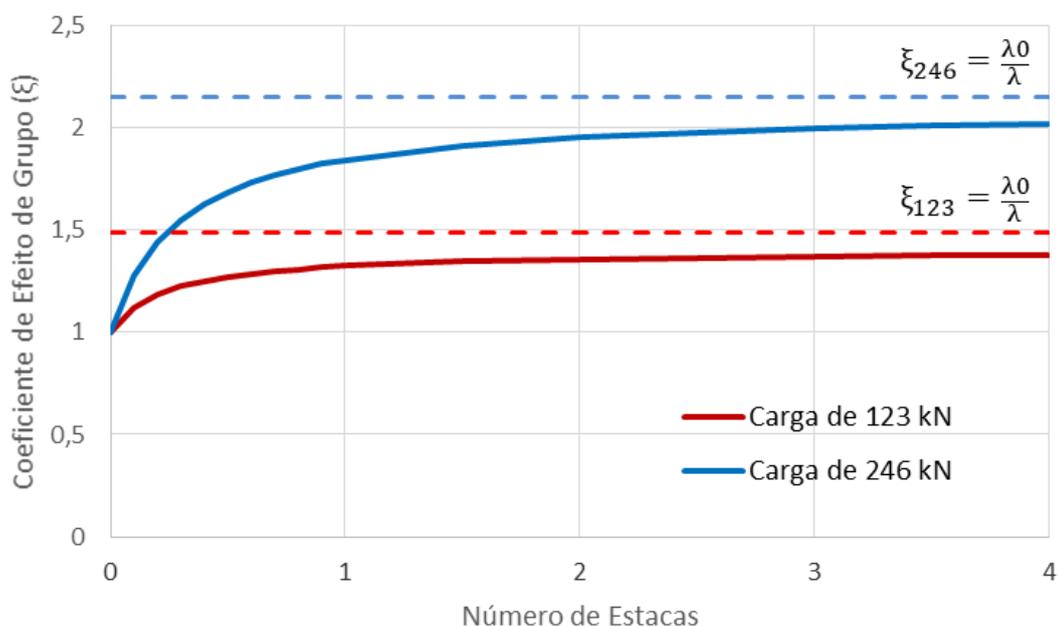


Fonte: Autoria Própria

Então, a partir do apresentado anteriormente, fica claro que o coeficiente de efeito de grupo (ξ) pode ser obtido a partir da relação entre o recalque com a consideração dos efeitos de interação (S_N) sobre o recalque sem a consideração dos efeitos de interação (S_i), o que resulta na Equação 76, para qualquer número de estacas N .

Ao se utilizar as Equações de efeito de grupo apresentadas na metodologia, é possível construir o gráfico da Figura 107, que apresenta o crescimento do efeito de grupo com o aumento do número de estacas, em que assintota o valor de $\xi_{\text{Máximo}}$. Para obtenção da Figura 107 é necessário atribuir valores para o número de estacas N , e calcular-se os coeficientes de efeito de grupo.

Uma resposta interessante do método é que, para a carga de 123 kN o $\xi_{\text{Máximo}}$ encontrado foi de 1,49, já para a carga de 246 kN o ξ encontrado foi de 2,15. Para o trabalho de Amorim (2019) a ordem de grandeza das cargas nas estacas é em torno de 250 kN, com efeito de grupo médio medido pela autora de 2,23. Assim, dessa forma, o efeito de grupo medido a partir da metodologia proposta converge para o valor previamente conhecido.

Figura 107 – Efeito de grupo *versus* o Número de estacas.

Fonte: Autoria Própria

5.5.3.1.2 Extrapolação da curva carga x recalque por Van der Veen (1953) e Efeito de Grupo

Os resultados obtidos foram baseados em estágios de carregamento que fossem comuns a todos os ensaios de placas analisados. O que diminui bastante o espaço amostral, e as regressões são baseadas em poucos pontos, dificultando a análise de forma contínua e holística. Com o objetivo de expandir essa análise, foram realizados extrapolações e ajustes da curva carga x recalque a partir da equação de Van der Veen (1953). A equação de Van der Veen é amplamente utilizada e conhecida no Brasil, e para mais informações sobre o método sugere-se o estudo de Oliveira (2013) e o artigo de Oliveira et al (2018), onde a explicação física dos parâmetros envolvidos na extrapolação são detalhados, mas de forma sucinta, o método se utiliza de uma equação exponencial (não linear) para correlacionar Carga e Recalques, a partir de um processo iterativo onde são encontradas 3 constantes Q_u , a e b . O valor de Q_u normalmente é associado a carga de ruptura do sistema, pois representa uma assíntota vertical para a equação proposta no método. O parâmetro “ a ” está diretamente ligado a taxa de decaimento da rigidez à medida que há incremento de cargas e o parâmetro “ b ” está relacionado com a carga Inicial extrapolada (carga intrínseca do sistema encontrada para deslocamentos nulos), conforme Equação 85. Q_u é dado em unidades de força, na mesma unidade das cargas utilizadas, a é dado

em unidades inversas do deslocamento (ex.: mm⁻¹) e b é um fator adimensional. As curvas obtidas nos ensaios de prova de carga em placa foram ajustadas segundo esse método. Os resultados obtidos de Qu, a, b e R² são apresentados na Tabela 30.

$$Q = Qu \cdot (1 - e^{-a \cdot S - b}) \quad (85)$$

Onde: Q = carregamento; Qu = carga máxima; a e b constantes do ajuste.

Tabela 30 – Resultados das extrapolações pelo Método de Van der Veen (1953)

Ensaio	Referência	Qu (kN)	a (mm ⁻¹)	b (-)	R ²
PC1	Solo + 4 (N = 4)	3.391	0,048	0,013	0,9976
PC2	Solo entre estacas (N = 0)	1.004	0,015	0,006	0,9990
PC3	Solo + 1 estaca (N=1)	860	0,096	-0,005	0,9940
PC4	Estaca Isolada	446	0,416	-0,265	0,9971

Fonte: Autoria Própria

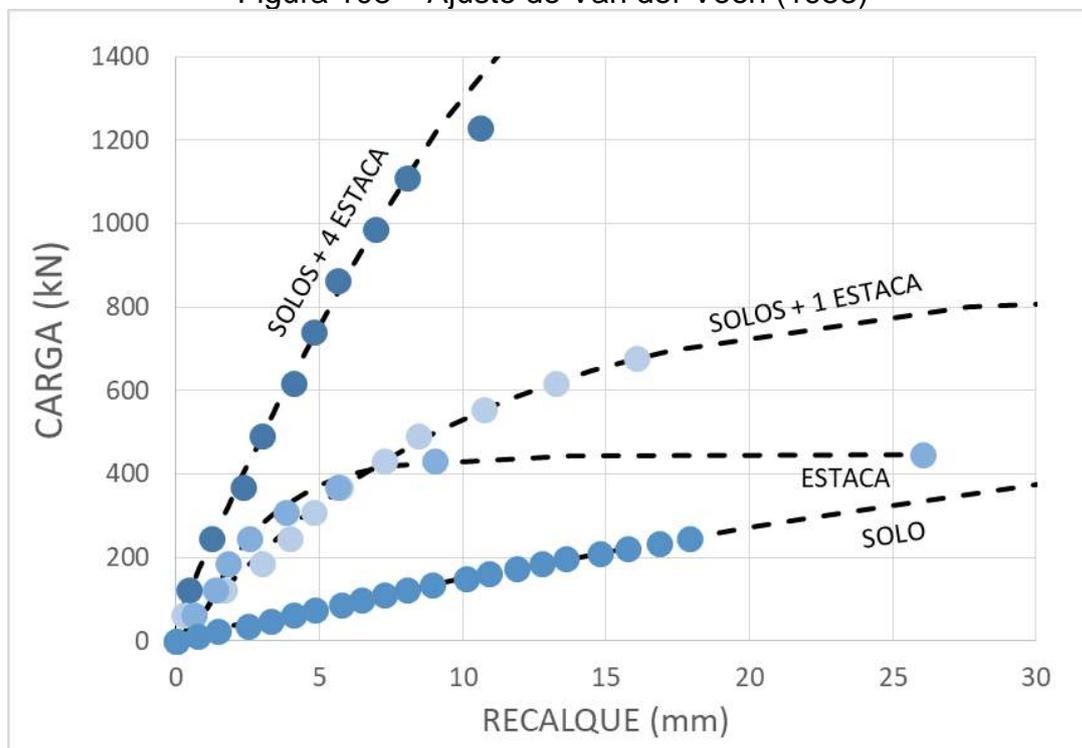
Os resultados apontam alta fidelidade da curva obtida pelo método de Van der Veen e os dados de campo, uma vez que o coeficiente de correlação R² se apresenta muito próximo a unidade e não inferior a 0,9940. O resultado das extrapolações é apresentado na Figura 108.

É interessante ressaltar um comportamento verificado entre a prova de carga realizada sobre o solo e a prova de carga realizada sobre o sistema de 1 estaca e solo. Para deslocamentos superiores a 10 mm (que representa a ruptura da estaca – a partir da PC4), observa-se uma tendência de paralelismo entre as PC2 e PC3, que representam solo isolado e solo+1 estaca. O que confirma que provavelmente a estaca rompeu, e o sistema a partir desse momento apresenta rigidez semelhante a do solo, que continuar a ter sua carga mobilizada. Porém, o nível de carregamento para o sistema solo + 1 estaca é superior em 200 a 300% devido a contribuição inicial da estaca no sistema.

Já para o caso de 4 estacas, o nível de deslocamento obtido no ensaio foi da ordem de 10 mm, onde provavelmente não foram verificadas a ruptura da estaca, e,

portanto, a rigidez do conjunto continua muitas vezes superior ao do solo sem estacas. É possível que em uma hipótese do ensaio para o sistema de 4 estacas ser continuado a partir desse nível de deformação o sistema se aproximasse para a rigidez do solo isolado.

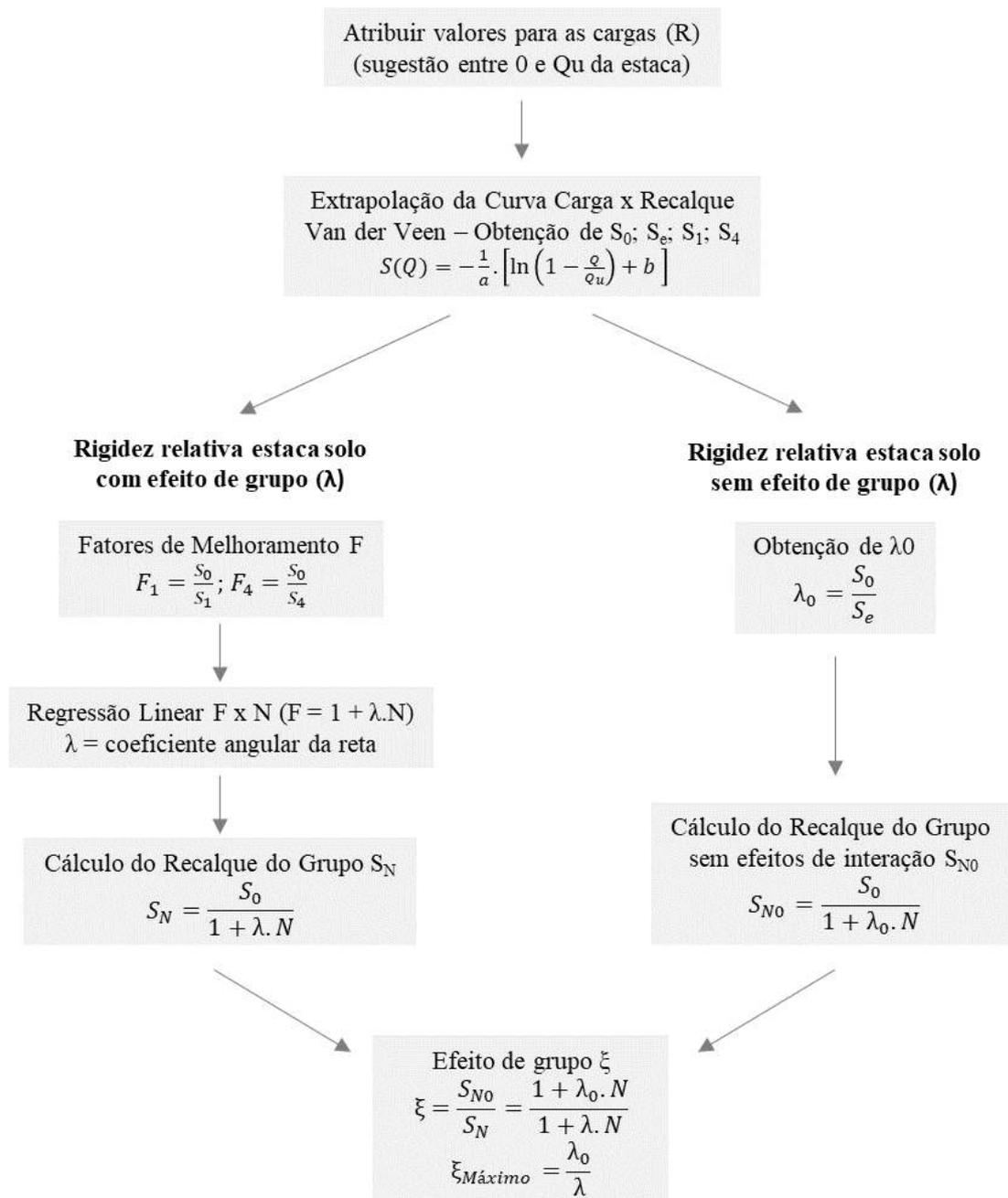
Figura 108 – Ajuste de Van der Veen (1953)



Fonte: Autoria Própria

Então, partindo do resultado das curvas obtidas, é possível se calcular a rigidez estaca solo, para vários pontos. O fluxograma que explica o algoritmo de aplicação das equações de Van der Veen junto ao método é apresentado na Figura 109. Tanto considerando o efeito de grupo (λ), como sem a consideração do efeito de grupo (λ_0). Ajustando assim os resultados obtidos na Figura 105, conforme é apresentado na Figura 110. Essa Figura apresenta a variação da rigidez relativa para a metodologia que a obtém de forma direta, a partir da rigidez obtida do ensaio de prova de carga em placa, e a partir da reta de regressão linear obtida no Plano de Melhoramento $F \times N$.

Figura 109 – Aplicação de Van der Veen até obtenção do Efeito de Grupo



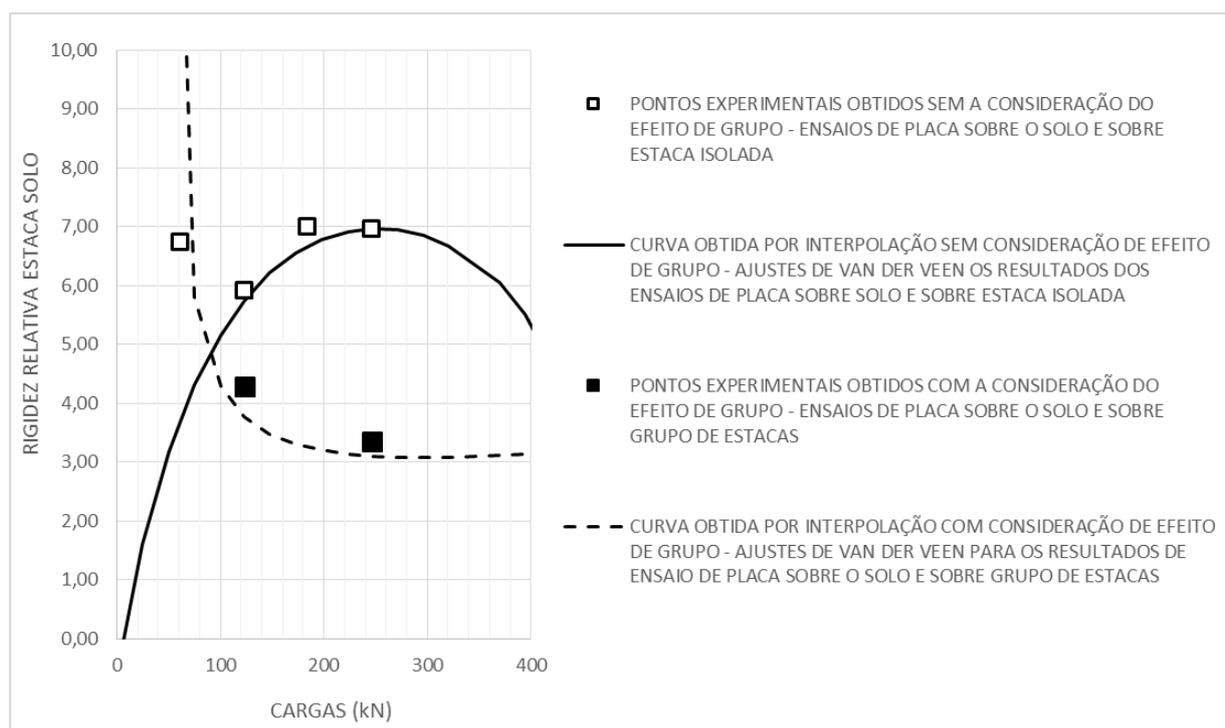
Fonte: Autoria Própria

É interessante observar que o resultado obtido a partir dos ajustes de Van der Veen (as curvas contínuas) convergiram para os resultados experimentais já apresentados. Com exceção do ponto de rigidez relativa sem efeito de interação para carga de 61,5 kN. É importante observar que para cargas inferiores a 100 kN os resultados das curvas são contrários e de variação muito acelerada. Uma possível explicação para esse fenômeno consiste no fato que o método de Van der Veen tende a não se ajustar bem para trechos do ensaio com deslocamentos inferiores a 2% do

diâmetro da coluna ensaiada (OLIVEIRA, 2013), que nesse caso seria da ordem de 6 mm. Para a carga de 100 kN, nenhuma das provas de carga deslocou mais de 6 mm.

Também vale salientar que para cargas acima de 100 kN, a rigidez relativa com efeitos de interação tendeu a apresentar valores entre 3 e 4, com pouca variação até a carga de 700 kN.

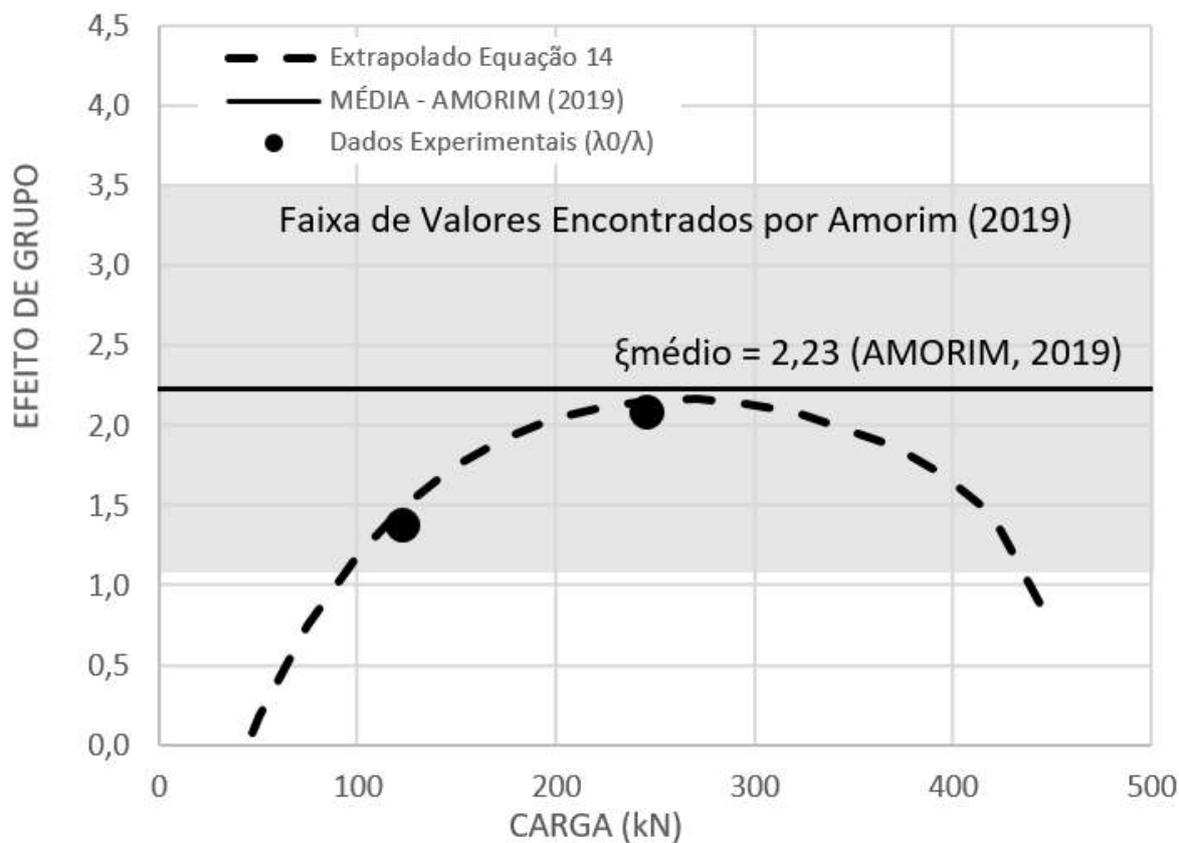
Figura 110 – Comparação entre a Rigidez Relativa experimental e extrapolada.



Fonte: Autoria Própria

Como definido anteriormente que o coeficiente de efeito de grupo $\xi_{\text{Máximo}}$ é dado pela relação entre λ_0/λ , é possível se construir o gráfico extrapolado do fator $\xi_{\text{Máximo}}$, em comparação com os valores obtidos experimentalmente (através da comparação direta entre o recalque do ensaio para a placa sobre o solo + N estacas e o recalque da estaca isolada), conforme Figura 111.

Figura 111 – Comparação entre o coeficiente de efeito de grupo experimental e extrapolado e encontrado por Amorim (2019).



Fonte: Autoria Própria.

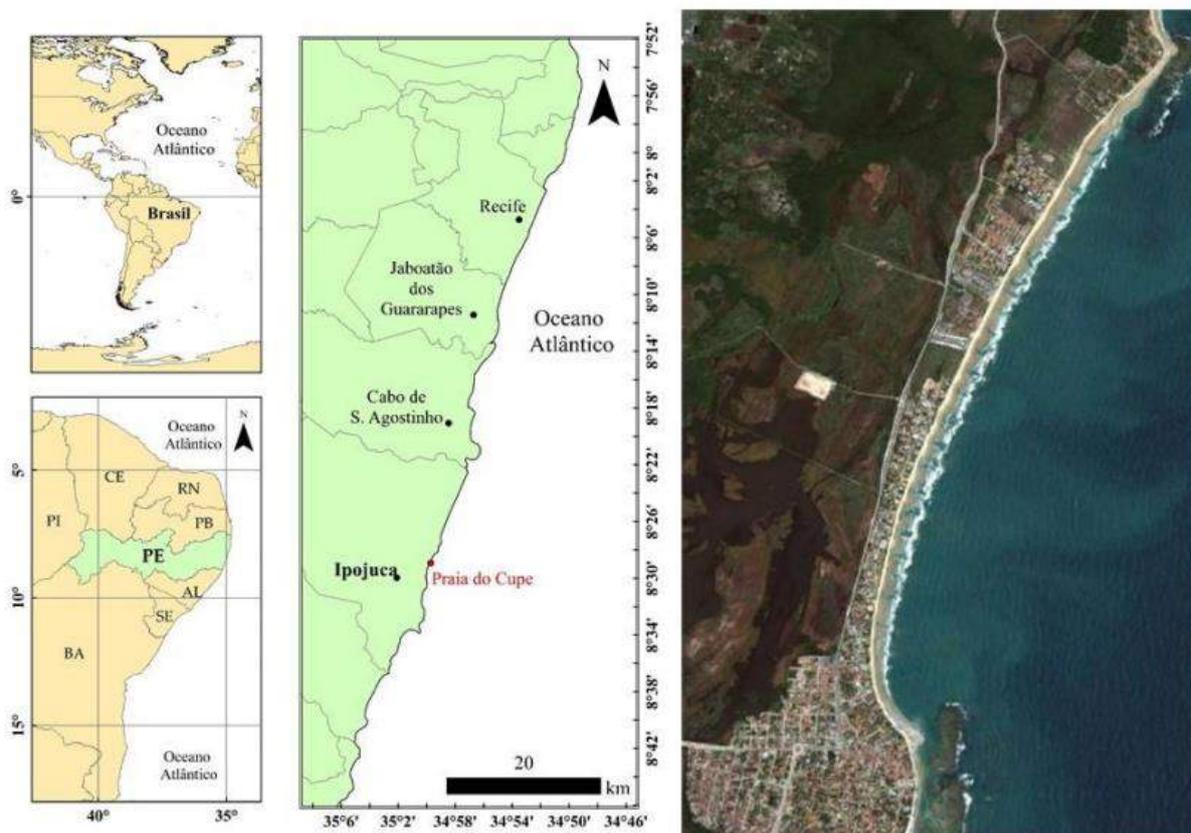
É possível observar que os valores obtidos por meio da Equação (λ_0/λ) variam de forma crescente até o intervalo de carga compreendido entre 200 e 300 kN (246 kN). Após esse valor de pico, inicia-se um decaimento. E se mostraram compreendidos entre as faixas de valores apresentadas por Amorim (2019), calculados de forma iterativa. Comprovadamente é possível construir uma curva contínua do coeficiente de efeito de grupo em função das cargas a partir da Equação 78, ao assumir que tanto λ_0 quanto λ são funções dos recalques, obtidas a partir de manipulações da extrapolação de Van der Veen. Também é possível observar que o pico da curva tendeu para o valor médio encontrado a partir de Amorim (2019).

5.6 Residencial na Praia do Cupe, Ipojuca/PE

O segundo caso de obra que será descrito consiste em um conjunto de flats com tipologia construtiva de 4 pavimentos (térreo + 3 pavimentos), construído à beira mar do município de Ipojuca na praia do Cupe (entre as praias de muro alto e porto de galinhas), ao sul da capital Recife, conforme Figura 112.

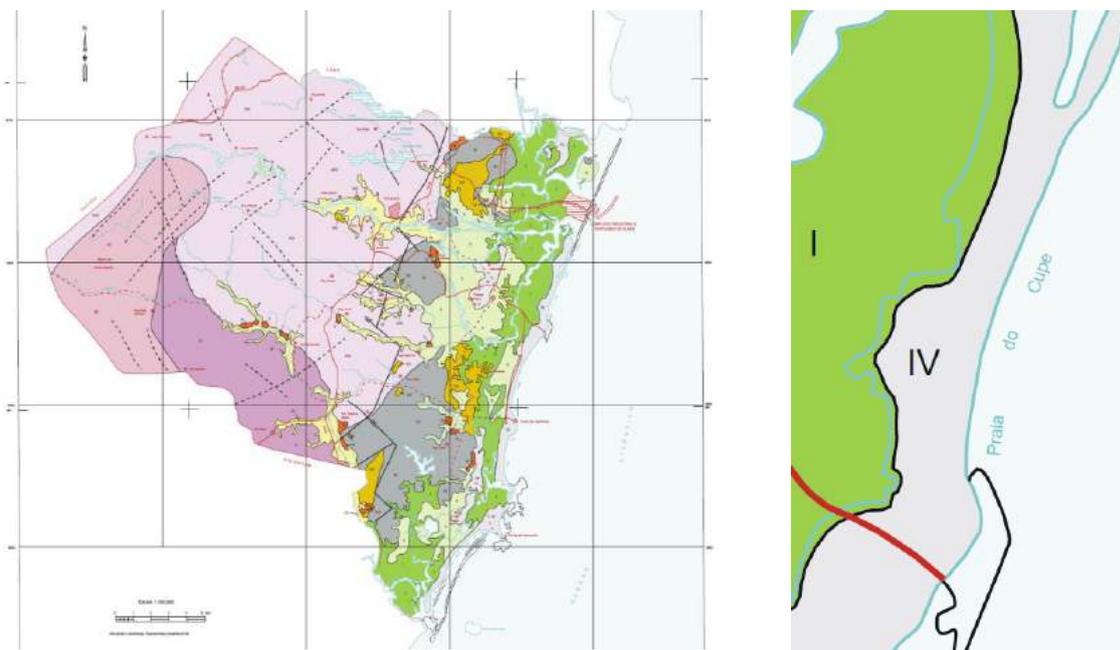
Segundo CPRM (2012), o terreno está localizado no terraço marinho holocênico, apresentando areias sedimentares de origem marinha (Figura 113), com nível freático raso (até 3,00 m). Segundo Mallmann (2014) apresenta granulometria composta por areia média.

Figura 112 – Praia do Cupe, no litoral Sul de Pernambuco.



Fonte: Galvão, 2018.

Figura 113 – Carta Geotécnica de Ipojuca e ênfase para a Praia do Cupe.



I	Áreas com substrato formado por sedimentos de mangues (areias finas, siltes, argilas e matéria orgânica), presença de camadas de argila orgânica com baixa capacidade de carga, declividade < 2%, periodicamente inundável. Áreas de preservação, com possível utilização para o turismo ecológico nas áreas com cobertura vegetal preservada.
II	Área formada por sedimentos recentes (areias, argilas e siltes), de origem flúvio-lagunar, com camadas de argila com baixa capacidade de carga e depósitos de turfas, declividade < 2%, nível freático raso e sujeita a inundações. Uso possível para agricultura.
III	Área formada por sedimentos aluviais (areias, siltes, argilas e cascalhos), substrato com razoável capacidade de carga, nível freático raso, declividade < 2%, pouco sujeita a inundações. Uso possível para agricultura e ocupação urbana planejada.
IV	Área formada por sedimentos marinhos (areias), boa capacidade de carga, nível freático raso (em torno de 3 metros), declividade < 2% e remotas possibilidades de inundações. Uso indicado para ocupação urbana planejada e projetos de interesse turístico.
V	Áreas com depósitos de talus ou colúvio, declividade entre 2 e 5%, sujeita a processos de erosão e instabilidade. Áreas de preservação.
VI	Áreas com substrato arenoso/areno-argiloso, nível freático em torno de 5 metros, boa capacidade de carga, declividade em torno de 5 a 10%, susceptível a erosão. Uso agrícola planejado.
VII	Áreas com substrato predominantemente argiloso (origem vulcânica), boa capacidade de carga e declividade entre 10 e 20%. Uso agrícola planejado.

Fonte: CPRM, 1999

Segundo Bourotte (2022), as areias encontradas na praia do cupê são médias e finas, sub arredondadas, com presença de fragmentos de rocha (quartzo) e fragmentos de concha, fotos de amostras ampliadas são apresentadas por meio da Figura 114.

Figura 114 – Amostra de areia da praia do Cupe ampliada em Microscopia óptica.



(a) Ampliação de 6x



(b) Ampliação de 12x



(c) Ampliação de 25x



(d) Ampliação de 50x

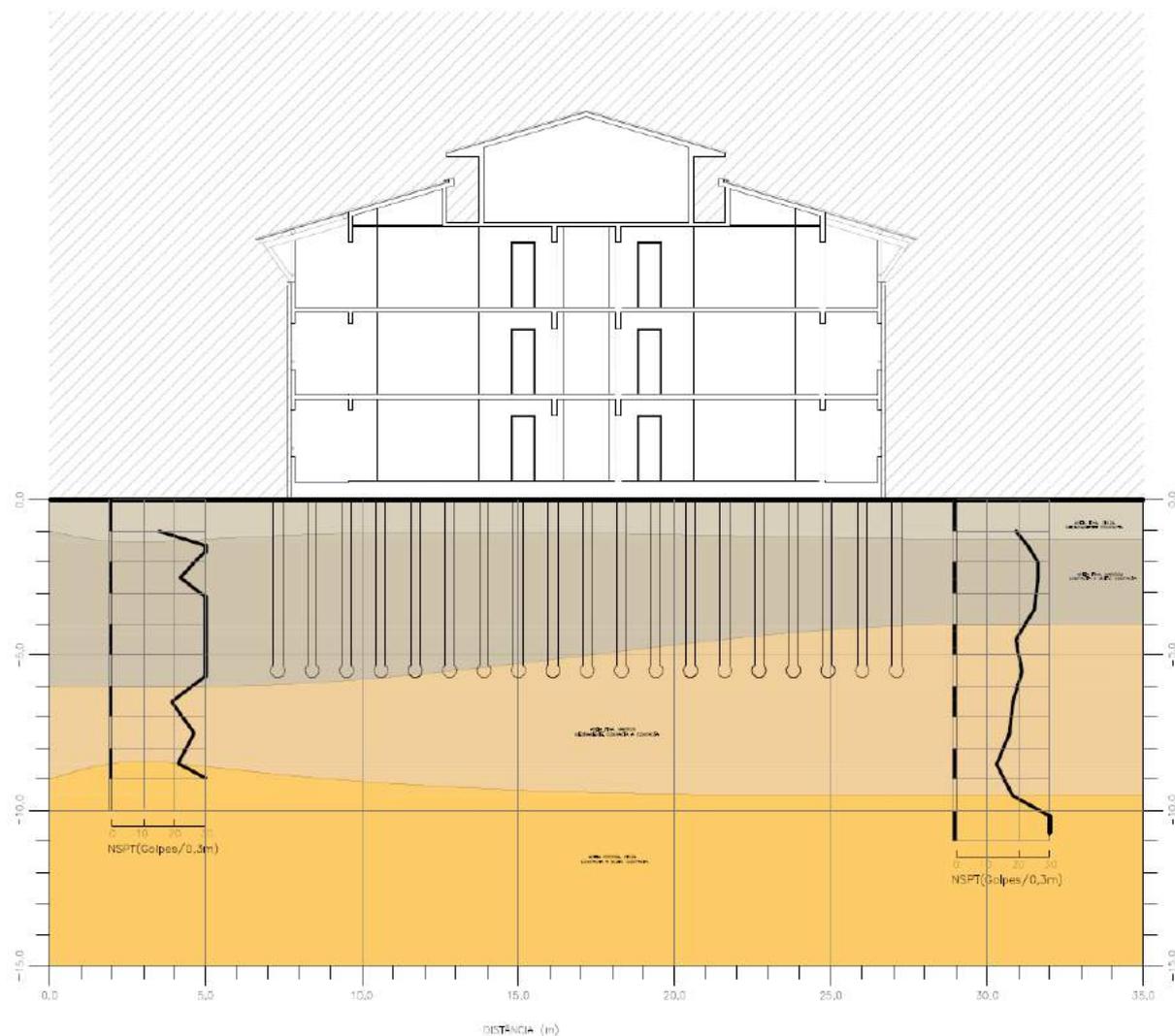
Fonte: Amostras de Sedimentos (Areias), Bourotte (2022).

Foram disponibilizadas 02 sondagens para caracterização do terreno de fundação o qual é composto por camadas de areia medianamente compactas a compactas (o perfil simplificado do solo é apresentado por meio da Figura 115).

A solução de fundação foi realizada em colunas de melhoramento em areia e brita com comprimentos variando entre 4 e 6 m e diâmetro de 300 mm, com 800 mm de espaçamento (o que conduz a L/e variando entre 5 a 7,5). Foi realizada campanha de ensaios de placa composta por 2 ensaios. Ambos com placa de 1,00 x 1,00 m x m, sobre solo + 1 estaca e sobre solo + 4 estacas, respectivamente (ver detalhe na Figura 116). Os ensaios foram realizados por empresa de fundações da região e cedidos para a elaboração do trabalho. Foi montado sistema de reação com conjunto de quatro

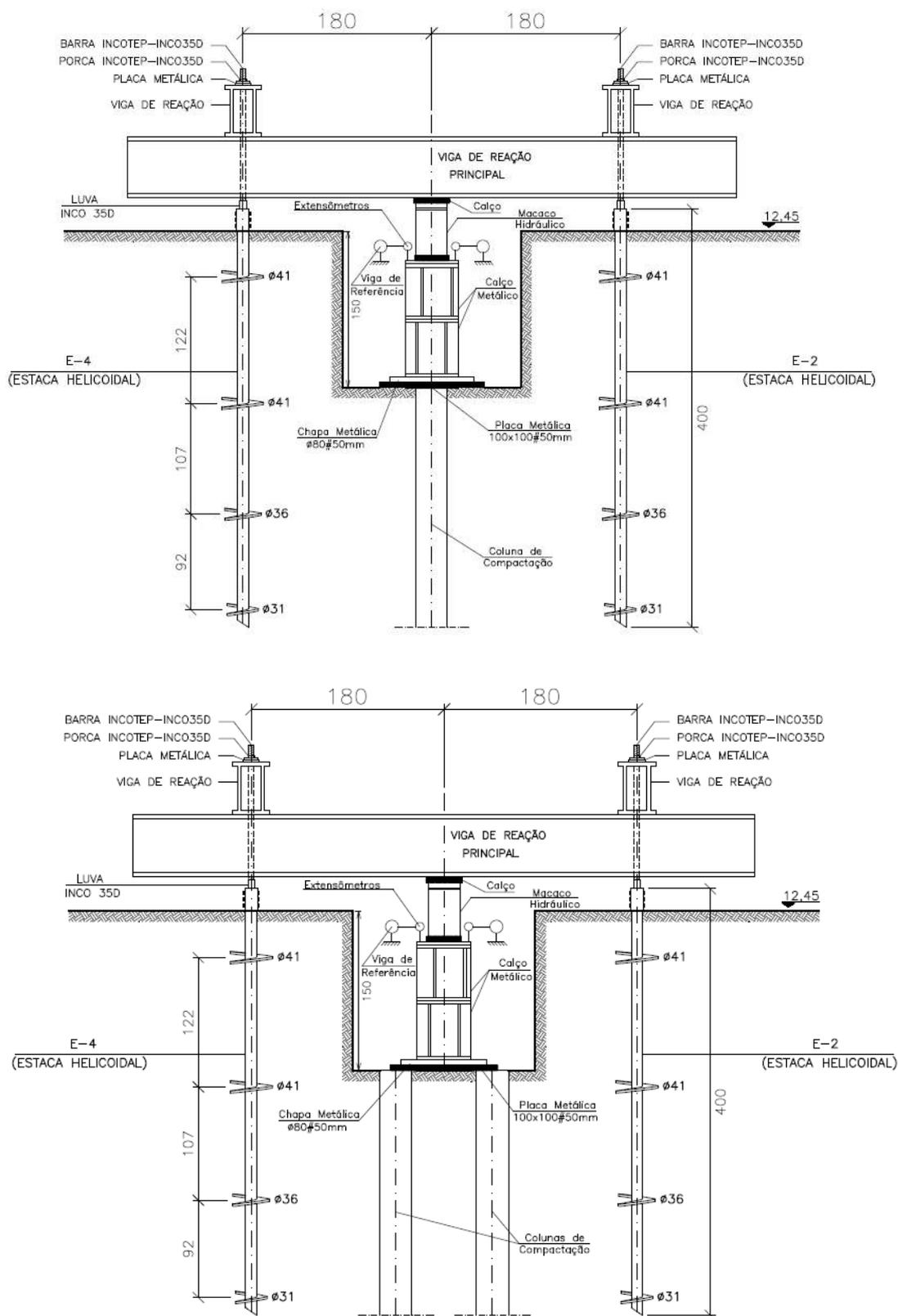
estacas helicoidais e vigas de reação. As estacas helicoidais têm comprimento de 4 m e quatro hélices variando entre 410 mm e 310 mm de diâmetro. As estacas foram instaladas a 1,80 m do centro da placa de ensaio, o que confere distância superior a seis vezes o diâmetro das colunas ensaiadas.

Figura 115 – Perfil típico.



Fonte: Autoria Própria

Figura 116 – Esquema dos ensaios realizados, placa sobre solo+1 coluna (superior), placa sobre solo + 4 estacas (inferior)



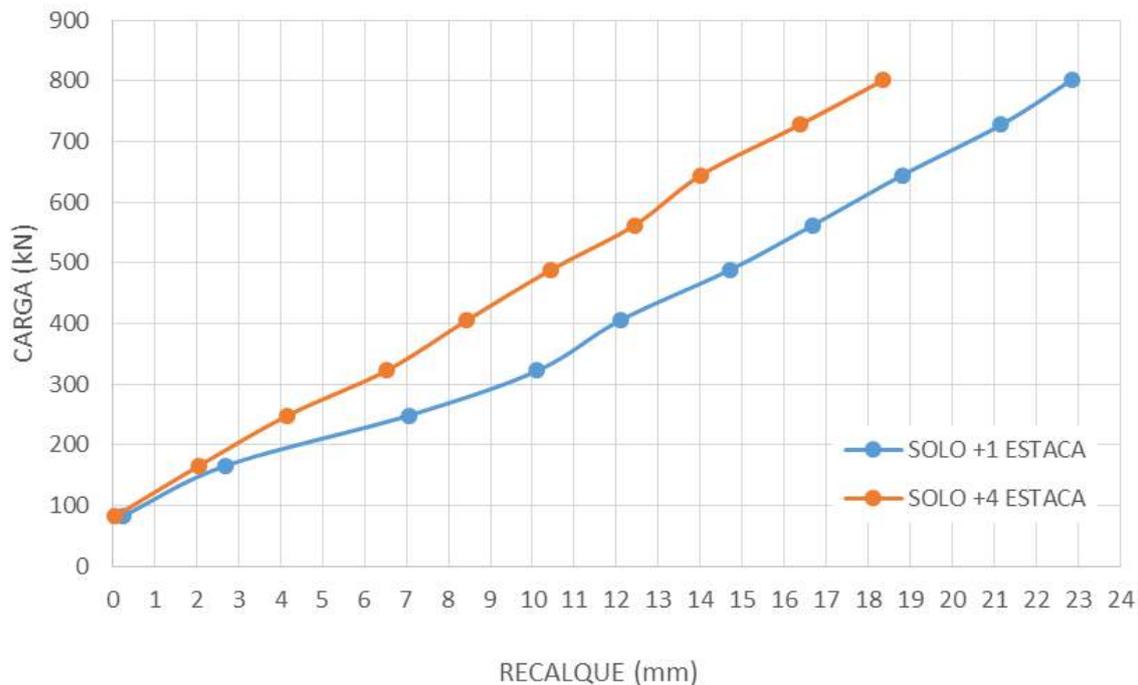
Fonte: Empresa responsável pelos ensaios em placa.

Os ensaios foram do tipo rápido, com 10 estágios de carga variando entre 82,92 kN a 801,61 kN, alternados a cada 10 min. Foram obtidos recalques entre 0,07 a 22,84 mm. A Tabela 31 e a Figura 117 apresentam os resultados encontrados.

Carga (kN)	SOLO + 1 ESTACA	SOLO + 4 ESTACA
	Recalque (mm)	Recalque (mm)
82,92	0,252	0,070
165,85	2,700	2,062
248,77	7,062	4,172
322,49	10,115	6,522
405,41	12,090	8,437
488,34	14,695	10,430
562,05	16,670	12,427
644,98	18,815	14,017
727,90	21,160	16,365
801,61	22,840	18,360

Fonte: Autoria Própria

Figura 117 – Resultados dos Ensaios em Placa



Fonte: Autoria Própria

Para aplicação da rotina de cálculo para esse caso é necessário encontrar o fator de melhoramento $F_{j,k}$. Para esse caso de obra em específico foram realizados ensaios de placa sobre o solo + 1 coluna e sobre o solo + 4 colunas. Então como j e

k são o número de estacas dos ensaios, e $j > k$, pode-se admitir $j = 4$ e $k = 1$, logo procura-se por um fator de melhoramento $F_{4,1}$, encontrado a partir da relação entre os recalques S_1 e S_4 (Equação 86). A rigidez relativa estaca-placa é obtida a partir da Equação 50, e para $j = 4$ e $k = 1$ é dada pela Equação 87. Pela Equação 52 já se pode observar que $F_{j,k}$ necessariamente está compreendido entre o intervalo de 0 e $j/k = 4$.

$$F_{4,1} = \frac{S_1}{S_4} \quad (86)$$

$$\lambda = \frac{F_{4,1} - 1}{4 - F_{4,1}} \quad (87)$$

onde: $F_{4,1}$ = fator de melhoramento entre as configurações de 4 e 1 estacas; S_1 = recalque para sistema placa + 1 estaca; S_4 = recalque para sistema de placa + 4 estacas;

De posse desses dados é possível calcular a curva x recalque para o caso em que a placa é carregada sobre o solo sem estacas ($N = 0$). O recalque da “fundação” direta (S_0) pode ser encontrado de duas formas distintas, como apresentado na Equação 88. A partir do recalque é possível se obter a rigidez do solo (k_p), a partir da Equação 89. Os resultados encontrados são apresentados por meio da Tabela 32 e das Figuras 118, 119 e 120.

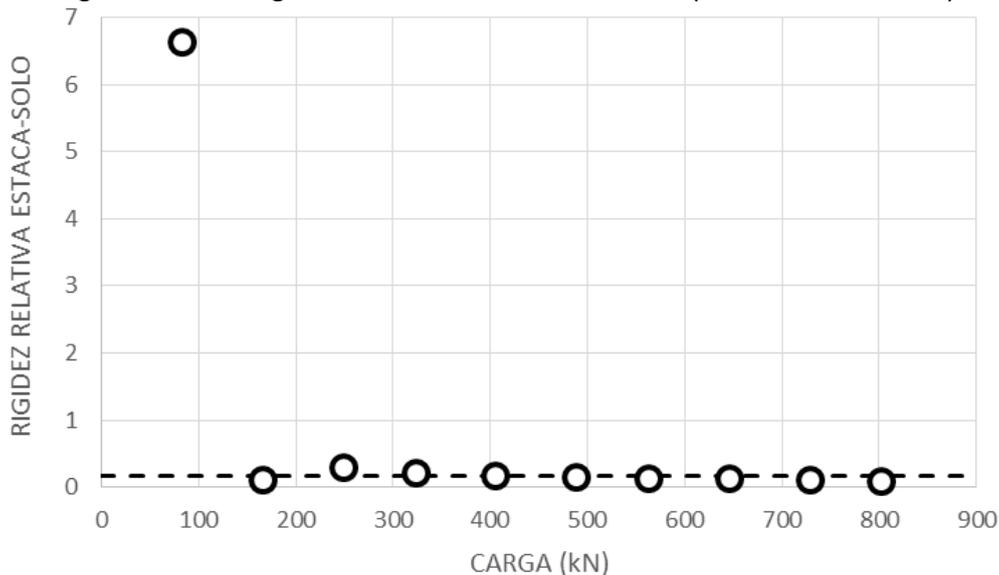
$$S_0 = S_1 \cdot (1 + \lambda) \quad \therefore \quad S_0 = S_4 \cdot (1 + 4 \cdot \lambda) \quad (88)$$

$$k_p = \frac{R}{S_0} \quad (89)$$

Tabela 32 – Resultados encontrados

Carga R (kN)	Solo + 1 estaca Recalque (mm) S_1	Solo + 4 estacas Recalque (mm) S_4	$F_{4,1}$	λ	CURVA RECONSTITUÍDA			$k_p = R/S_0$ (kN/mm)
					Recalque (N = 1)	Recalque (N = 4)	Recalque Médio S_0 (mm)	
					$S_0 = S_1 \cdot (1 + \lambda)$ (mm)	$S_0 = S_4 \cdot (1 + 4 \cdot \lambda)$ (mm)		
82,92	0,2525	0,0700	3,61	6,64	0,29	0,11	0,20	407,94
165,85	2,7000	2,0625	1,31	0,11	3,13	3,36	3,25	51,11
248,77	7,0625	4,1725	1,69	0,30	8,18	6,81	7,49	33,21
322,49	10,1150	6,5225	1,55	0,22	11,71	10,64	11,18	28,86
405,41	12,0900	8,4375	1,43	0,17	14,00	13,76	13,88	29,21
488,34	14,6950	10,4300	1,41	0,16	17,01	17,01	17,01	28,70
562,05	16,6700	12,4275	1,34	0,13	19,30	20,27	19,79	28,41
644,98	18,8150	14,0175	1,34	0,13	21,78	22,87	22,32	28,89
727,90	21,1600	16,3650	1,29	0,11	24,50	26,69	25,60	28,44
801,61	22,8400	18,3600	1,24	0,09	26,44	29,95	28,20	28,43

Fonte: Autoria Própria

Figura 118 – Rigidez Relativa Estaca – Solo (λ média = 0,1578)

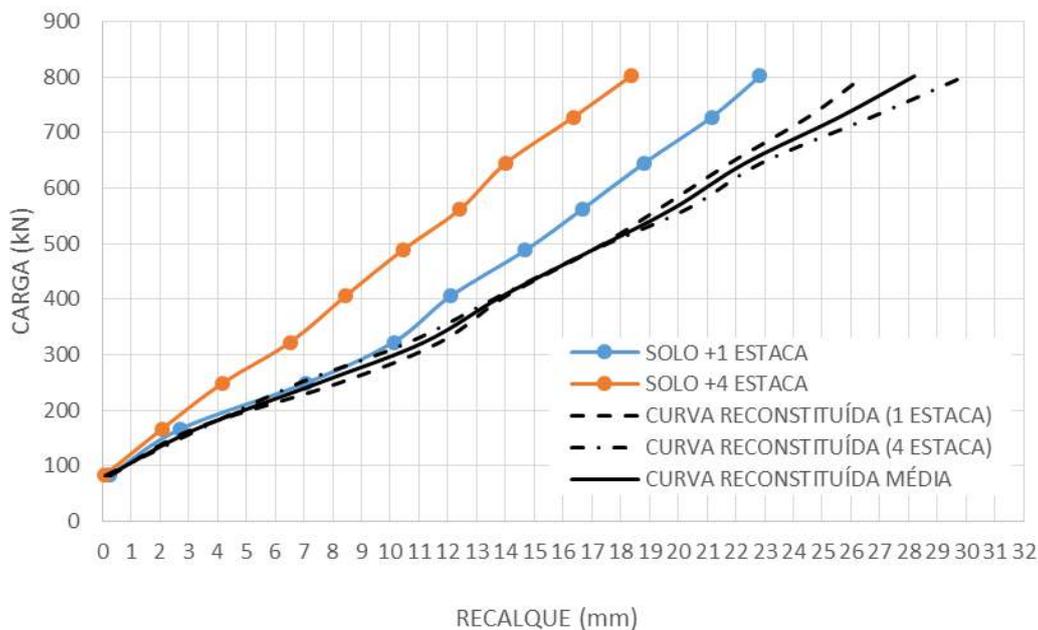
Fonte: Aatoria Própria

Da análise dos resultados apresentados por meio da Tabela 32, é possível observar que o fator de melhoramento entre o sistema com 4 colunas e o sistema com 1 coluna pode ser facilmente obtido a partir de uma relação direta entre os recalques para o mesmo carregamento. Os valores do fator de melhoramento variaram entre 1,24 até 3,61, e como esperado foram inferiores a relação $j/k = 4$ (sendo $j = 4$ colunas e $k = 1$ coluna).

Houve uma tendência de estabilização dos valores de rigidez estaca-solo a partir de estágios de carga superiores a 100 kN, onde foram encontrados valores entre 0,30 e 0,09, com média de 0,1578. O valor encontrado para cargas inferiores a 100 kN foi bastante elevado, superior a unidade, e igual a 6,64. É possível que para esse estágio de carga, o sistema tenha experimentado um ajuste devido o início do contato efetivo entre os seus componentes. O mesmo acontece para a Figura 120. Esse comportamento é recorrente e acontece em outros casos a frente.

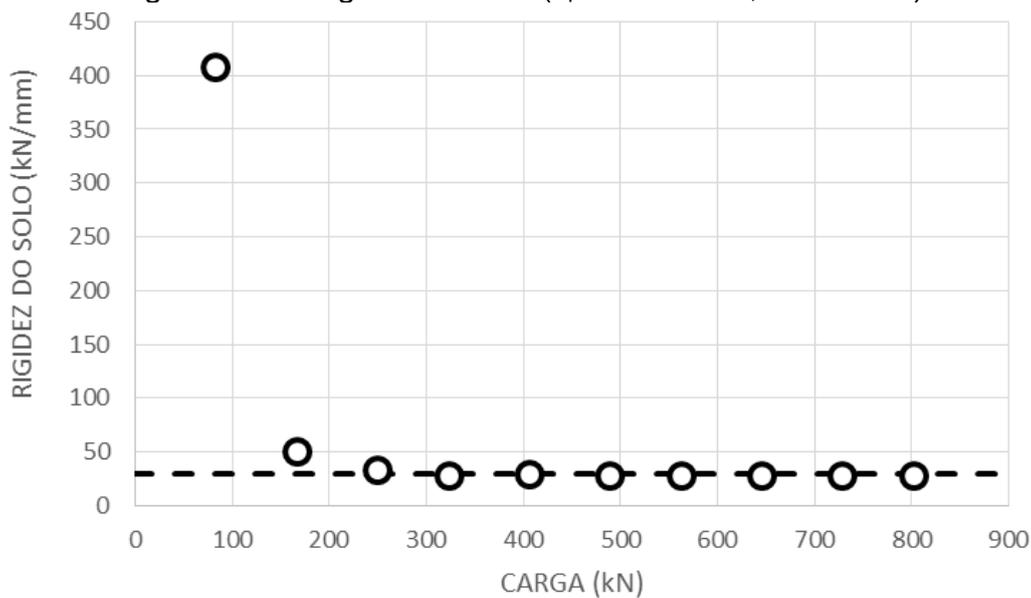
Esse valor médio é utilizado para calcular estimar a curva carga x recalque do solo sem estacas. É possível notar que as curvas de carga x recalque obtidas tendem para um comportamento linear, e as duas formas de estimar o valor de S_0 se mostram muito próximas entre si. Semelhantemente a rigidez estaca-solo a rigidez do solo (k_p) apresentou tendência de estabilização para valores superiores a 200 kN, onde variou entre 33,21 a 28,43 kN/mm, com média de 29,27 kN/mm.

Figura 119 – Curva Reconstituída – Carga x Recalque solo sem estacas.



Fonte: Autoria Própria

Figura 120 – Rigidez do Solo (k_p média = 29,27 kN /mm)



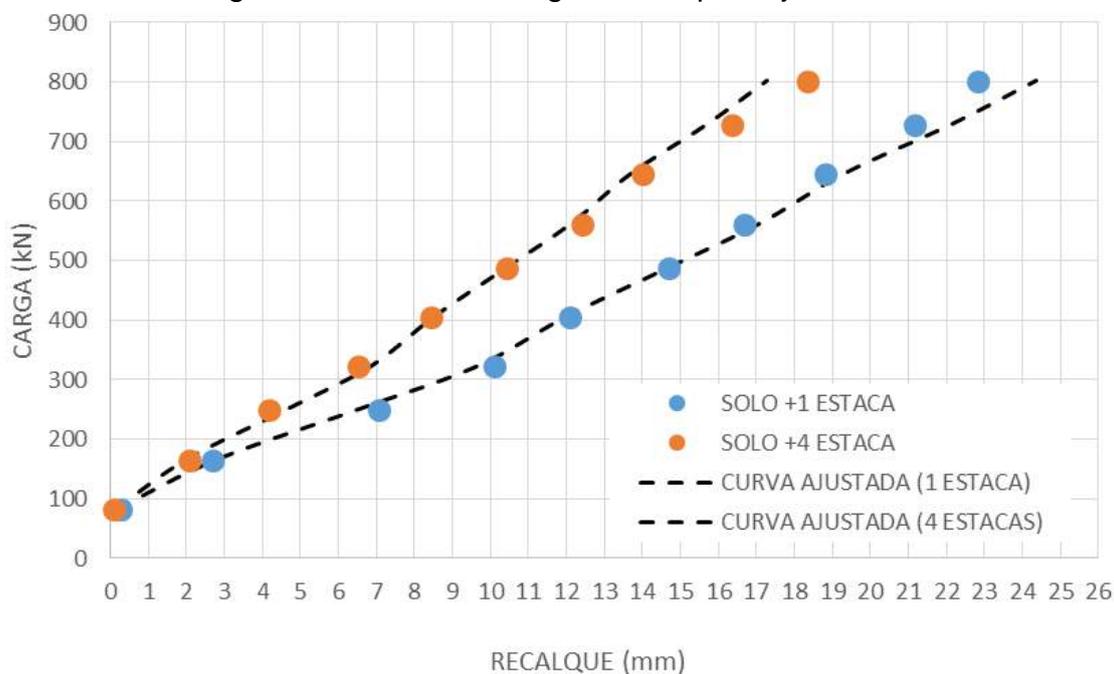
Fonte: Autoria Própria

Para a construção a curva x recalque dos ensaios realizados se utilizam a Equação 25 ($S_N = \frac{S_0}{1+\lambda.N}$), tendo em vista que para cada estágio de carga são obtidos os valores de S_0 (apresentados na Tabela 32), e de posse da rigidez relativa estaca-placa, é possível obter o recalque do grupo (S_N) para cada carga desejada.

Para esse exemplo foram calculados para as cargas de ensaio. De forma a

poder ajustar a curva carga x recalque dos ensaios, conforme Figura 121.

Figura 121 – Curvas carga x recalques ajustados.

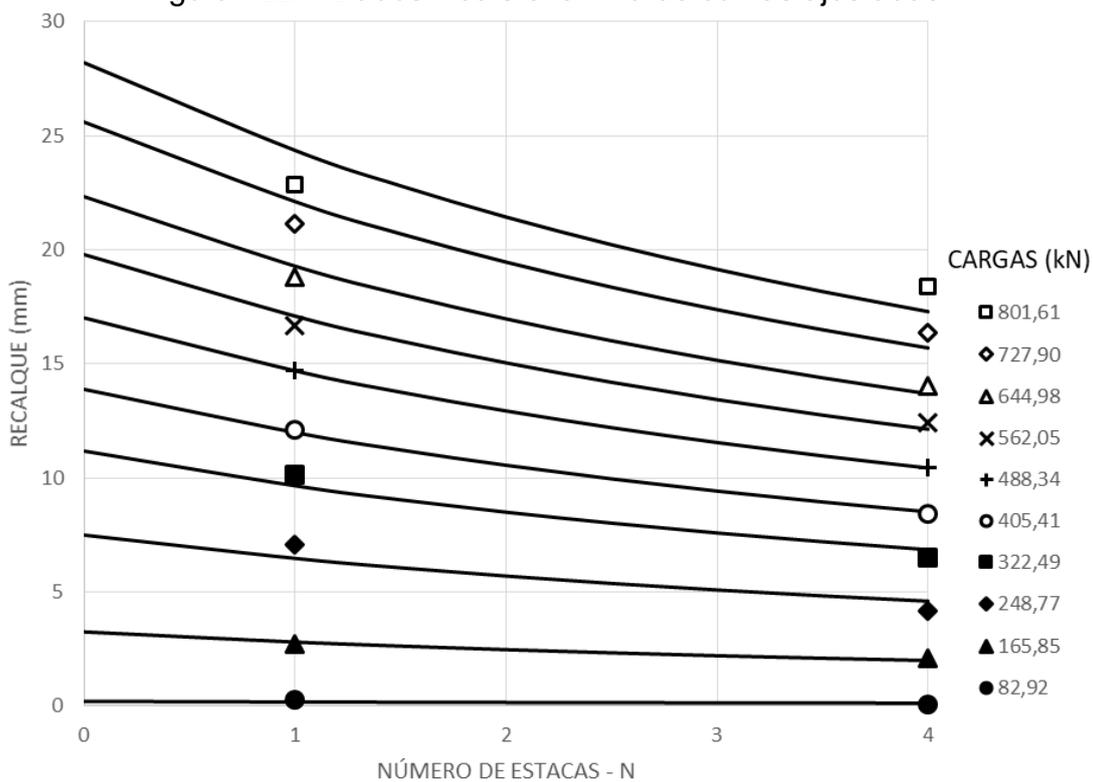


Fonte: Aatoria Própria

Também é possível ajustar as curvas de recalque versus o número de estacas, como apresentado na Figura 122, onde foram plotados os pontos reais de recalques e os obtidos a partir do ajuste do método. Nota-se que a família de curvas ajustadas apresenta valores muito próximos dos medidos principalmente em torno das cargas de 405 kN, apresentando maior erro para as cargas mais elevadas (727 e 801 kN).

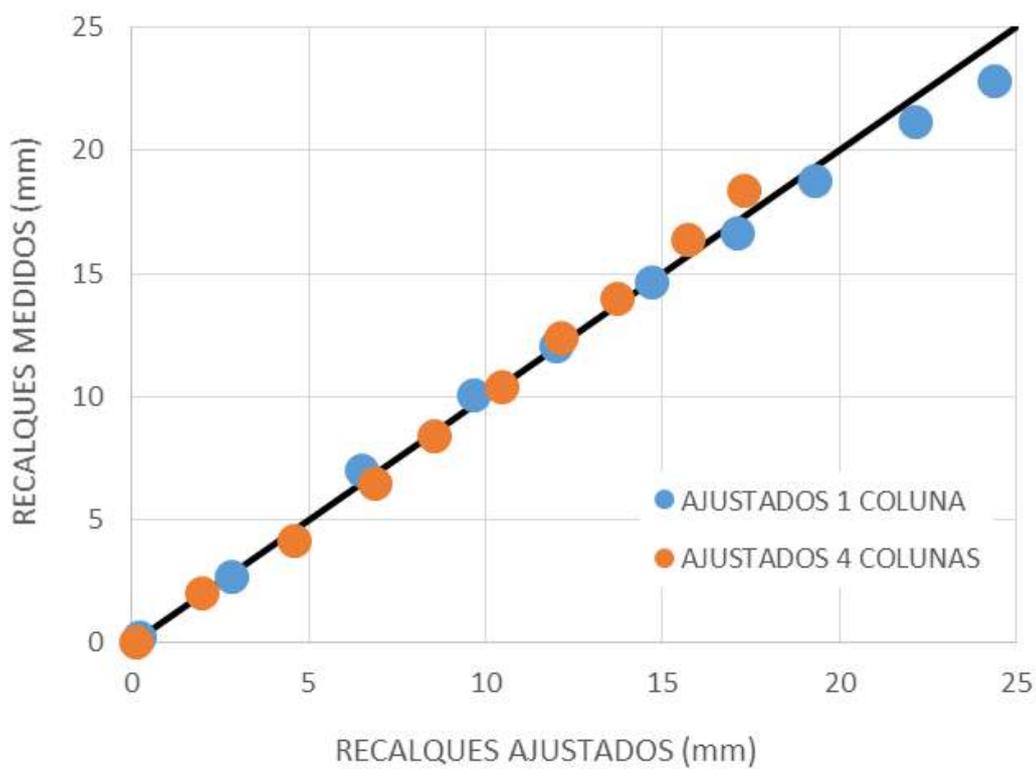
Com a finalidade de avaliar a acurácia do método, os recalques ajustados e os recalques medidos são plotados um versus o outro em comparação a reta de 45° ($y=x$), conforme Figura 123.

Figura 122 – Dados Reais e família de curvas ajustadas.



Fonte: Autoria Própria

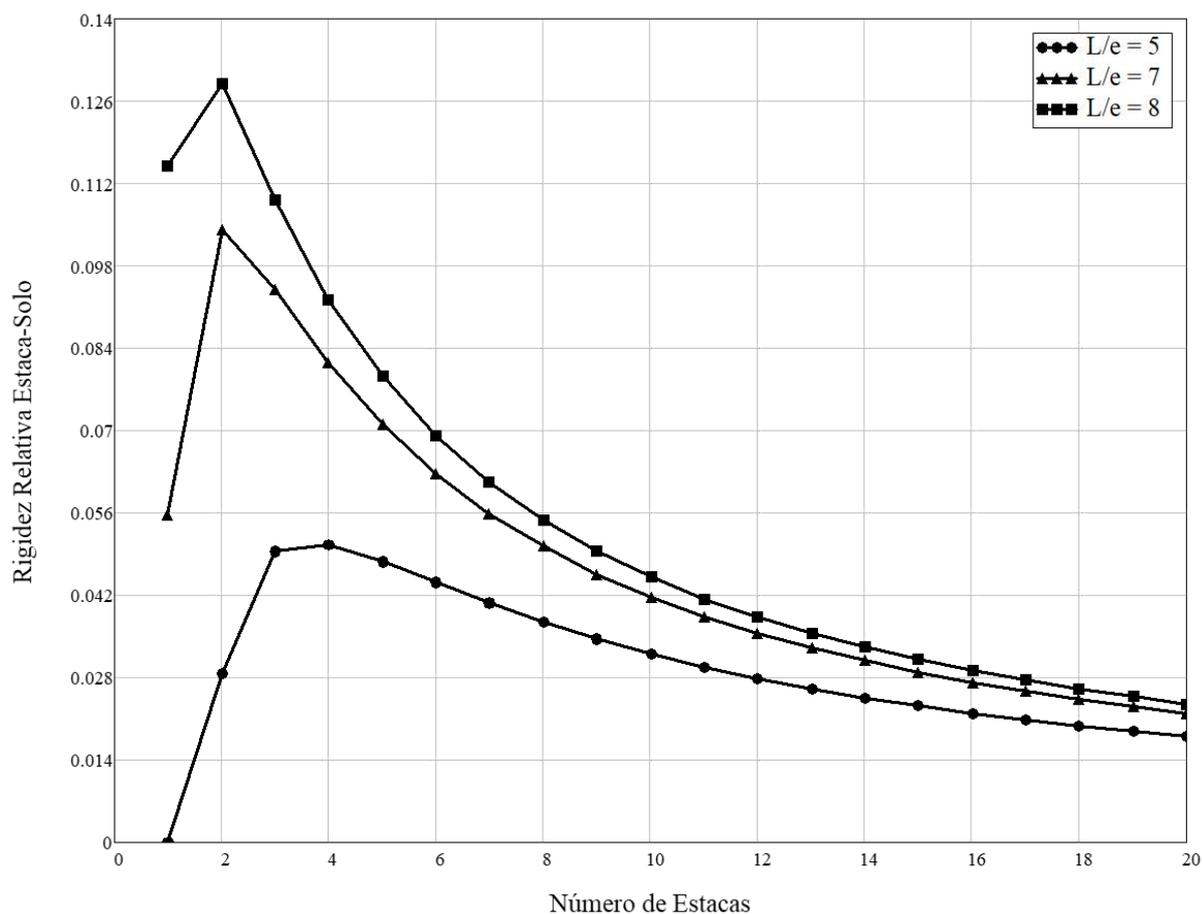
Figura 123 – Comparação entre recalques ajustados e recalques medidos.



Fonte: Autoria Própria

Por fim foi realizada comparação dos resultados obtidos com os previstos pelas equações de correlação do método com as equações empíricas de Mandolini (2012). Como as relações de L/e variaram entre 5 e 7,5, foram realizadas análises para $L/e = \{5, 7, 8\}$, conforme Figura 124. Foram encontrados os valores médios até $N=4$ de 0,026, 0,067 e 0,089, respectivamente. Com valor máximo de 0,129 para $L/e=8$, com $N = 2$. Os valores se mostraram pelo menos 40% inferiores aos encontrados anteriormente. Porém vale salientar que para o valor máximo de 0,129 houve uma ligeira aproximação, com erro de 18%. Ressaltasse que os valores estimados com a associação da metodologia com as equações empíricas de Mandolini (2012) são conservadores e apresentariam recalques mais elevados que os realmente medidos.

Figura 124 – Estimativa da Rigidez estaca-placa – a partir de Mandolini (2012).



Fonte: Autoria Própria

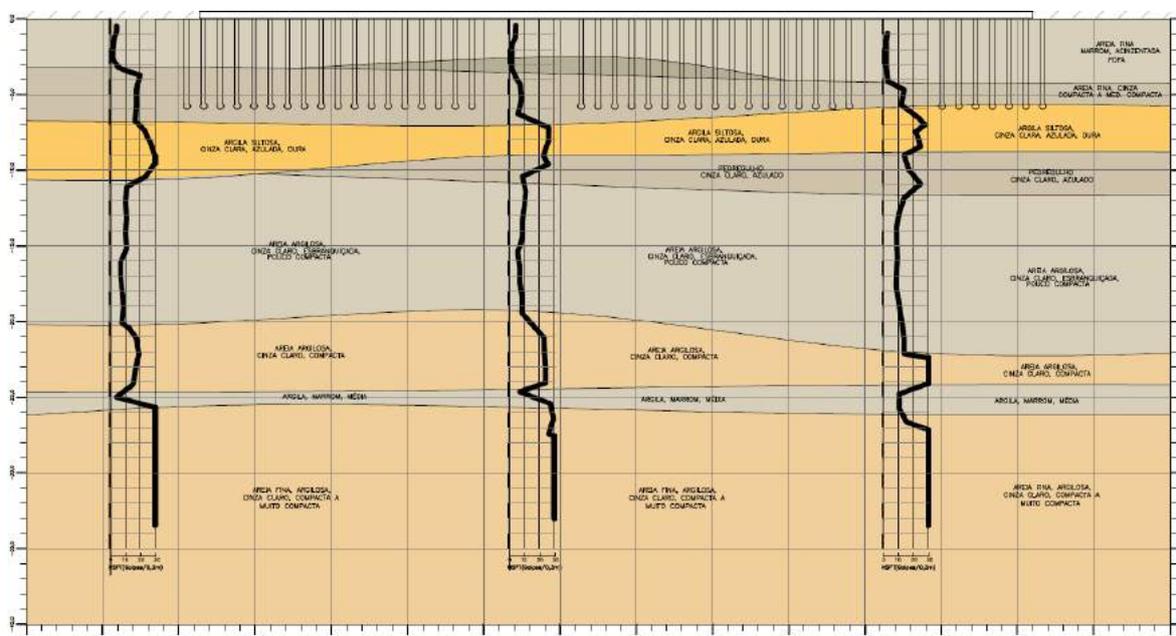
5.7 Duas Torres no Rosarinho, Recife/PE

Como a finalidade de verificar a possibilidade do uso da metodologia para estimativa de recalques foram compilados os dados relativos a uma edificação construída na região metropolitana do Recife, com vários resultados de ensaios de placa e com medição de recalques.

A edificação é composta por duas torres em estrutura apertada de concreto armado com 28 lajes. Cada torre é composta por 16 pilares com cargas verticais variando entre 3.370 a 7.190 kN.

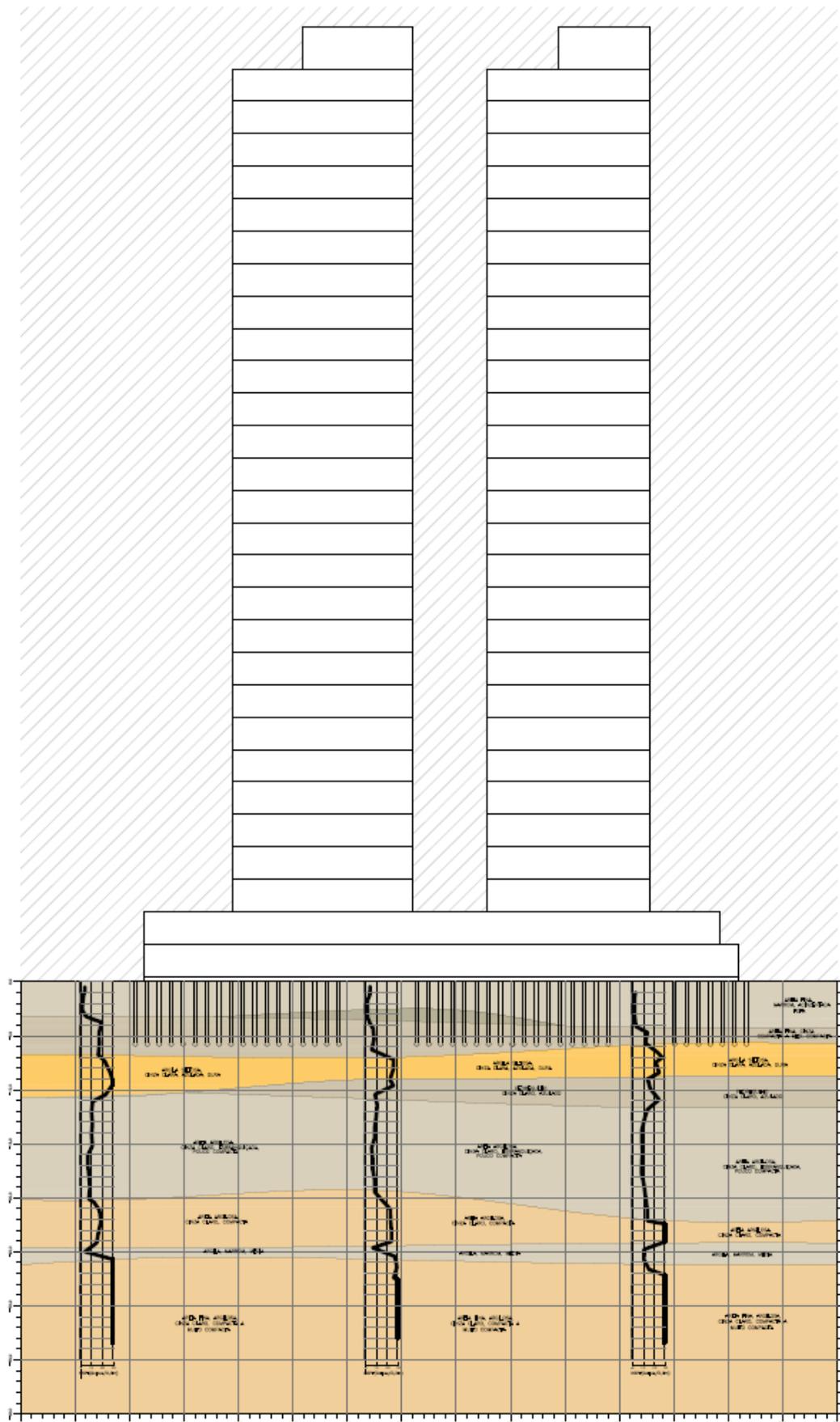
O perfil de solo é composto preponderantemente por deposições de camadas de areias, fofas até 4,00 m de profundidade e compacta até 7,00 m. Apenas entre as profundidades de 7,00 a 11,00 m encontra-se uma camada de argila Siltosa, cinza azulada, dura. Em seguida encontram-se intercalações de camadas de areias pouco compactas a muito compactas encontradas até o limite das sondagens em torno da profundidade de 35,00 m, conforme Figura 125 e 126.

Figura 125 – Perfil Geotécnico – Melhor Visualização no Apêndice A.



Fonte: Autoria Própria

Figura 126 – Resumo dos dados – Melhor visualização no Apêndice A.



Fonte: Autoria Própria

A solução de fundação foi realizada em fundação direta em sapatas assente sobre terreno melhorado com colunas de argamassa com 300 mm de diâmetro e comprimento médio de 6,00 m, com espaçamento de 0,80 m. São previstas 397 colunas por torre, com total de 1.045 colunas para toda a edificação. A carga total da edificação com carregamento pleno é de 80.080 kN, ver Figura 127.

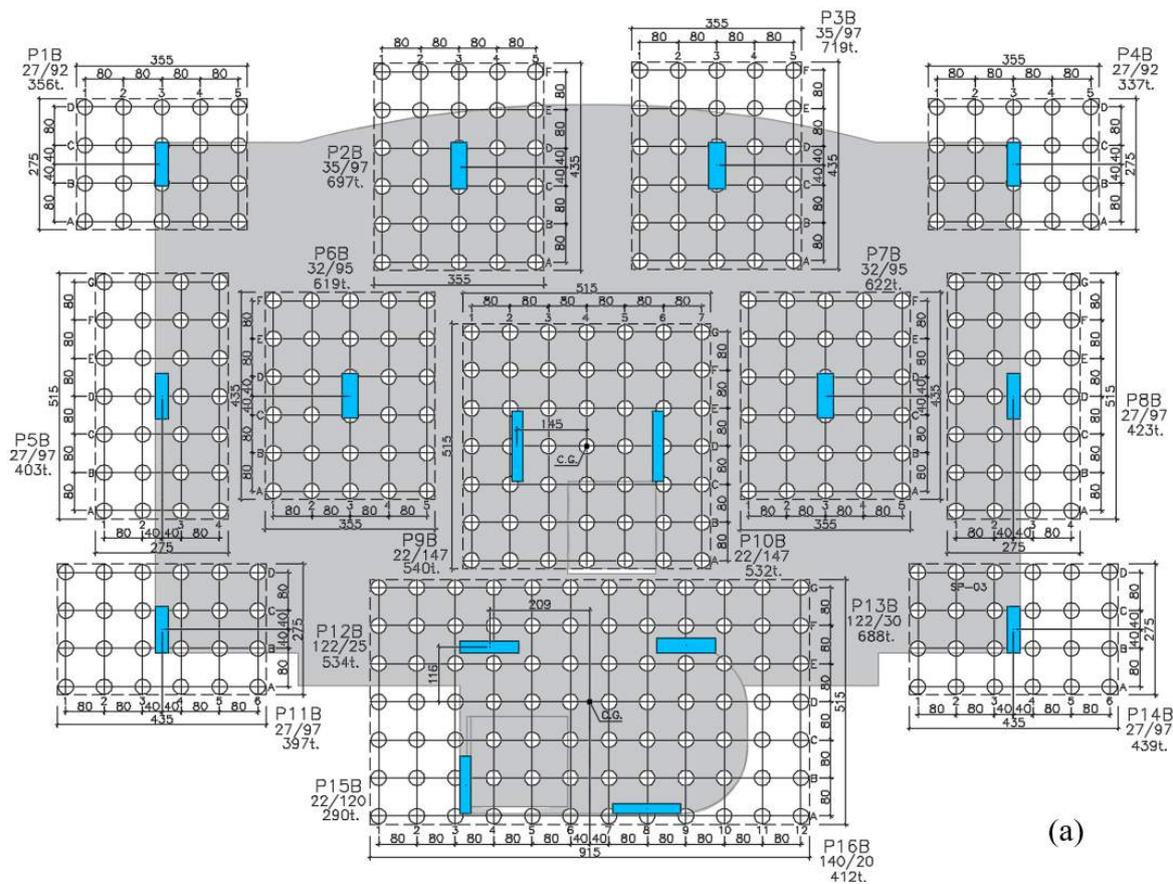
Foi realizada campanha de 06 ensaios de prova de carga em placa, sendo 3 sobre o solo melhorado e 3 sobre solo + 1 estaca, conforme pode ser visto a partir das Figuras 128. Para essa análise foi considerado que o diagrama de carga x recalque pode ser aproximado por uma reta a partir do resultado médio para ambas as configurações (com $N = 0$ e $N = 1$).

Logo a regressão linear passando pela origem apresenta coeficiente angular numericamente igual a rigidez obtida do ensaio. Assim o Fator de melhoramento é obtido diretamente pela sua definição como sendo a relação entre a rigidez do grupo sobre a rigidez do solo natural. A rigidez relativa estaca solo é obtida a partir da Equação 24.

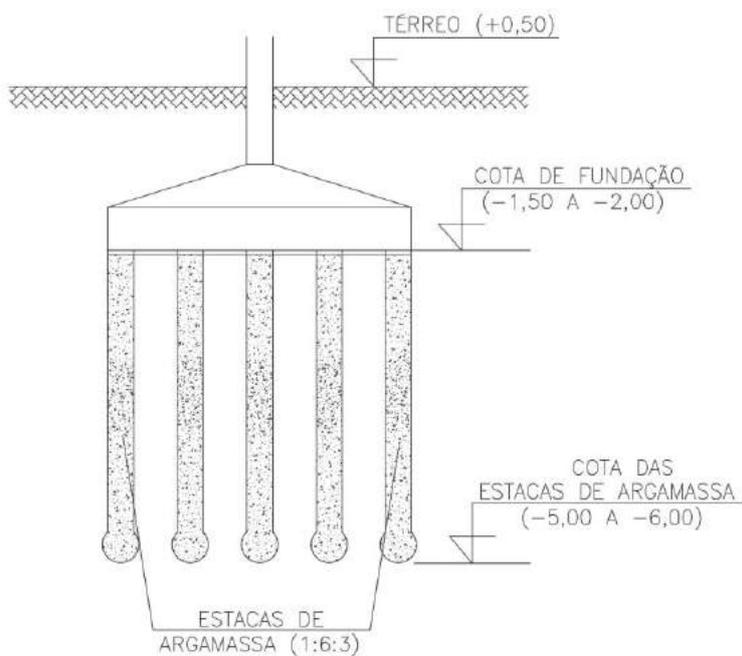
Ainda foi realizado controle de recalques da edificação. Na qual foram realizadas 12 medições para a Torre A e 13 para a Torre B, com intervalo de tempo de 605 e 619 dias, respectivamente.

O período de tempo entre a primeira medição de recalques e a entrega do edifício é de aproximadamente 2 anos. Os resultados das medições de recalques são apresentados por meio da Tabela 33 e 34 e das Figuras 129 e 130, para as Torres A e B, respectivamente.

Figura 127 – Fundação com colunas de argamassa (a) em planta (b) corte esquemático.



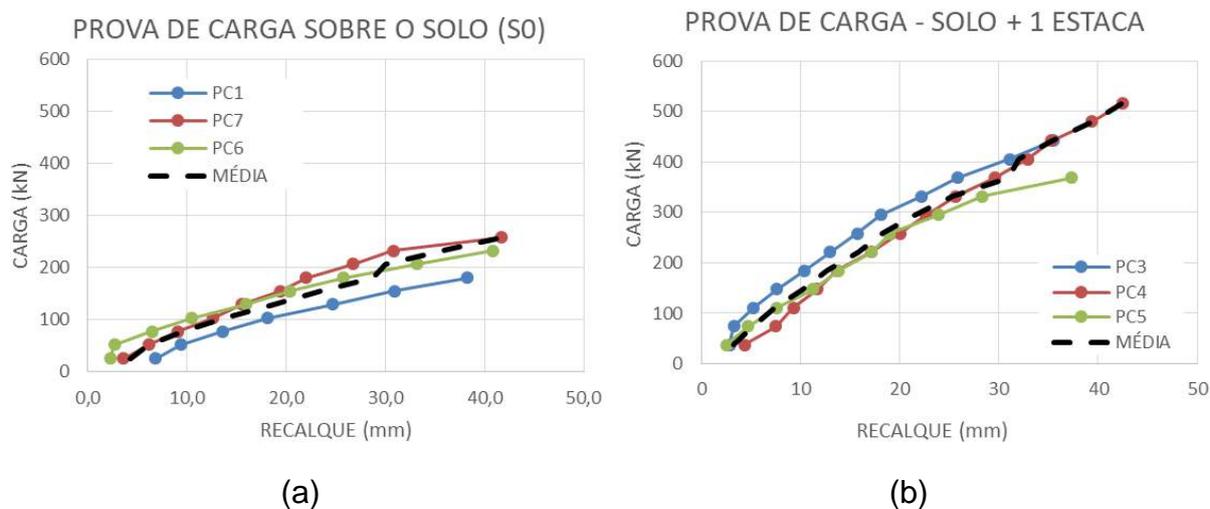
(a)



(b)

Fonte: Adaptado do Projeto de Fundações

Figura 128 – Resultado das provas de carga em placa (a) sobre solo (b) solo + 1 estaca.



Fonte: Autoria Própria

Tabela 33 – Recalques para a Torre A.

Intervalo de Tempo (dias)	0	41	82	116	154	195	223	311	404	517	605
A1	0	1,45	1,62	2,55	4,34	4,76	7,00	8,95	10,21	11,04	11,66
A2	0	2,57	3,43	4,55	7,12	8,01	10,44	13,37	15,49	17,23	16,22
A3	0	2,71	2,92	4,03	6,96	8,24	10,19	13,59	15,09	16,28	17,2
A4	0	1,89	1,54	2,14	4,83	5,67	7,09	11,3	13,35	14,16	15,81
A5	0	1,74	2,50	3,44	5,55	6,26	8,39	-	-	-	-
A6	0	2,33	3,19	4,78	7,49	8,55	10,87	13,96	15,76	16,76	-
A7	0	2,38	2,92	4,37	7,50	9,35	11,26	14,77	17,01	18,05	18,88
A8	0	2,43	2,58	4,22	7,53	8,52	11,56	15,02	17,56	18,13	19,22
A9	0	2,45	2,57	3,45	7,18	8,98	10,35	14,68	16,79	-	-
A10	0	2,79	2,31	3,01	5,59	5,82	9,05	11,91	14,01	14,24	17,13
A11	0	1,15	1,30	2,36	4,36	4,85	6,83	9,56	11,04	11,58	12,72
A12	0	2,27	2,69	4,32	7,32	8,24	10,48	13,61	16,00	17,18	18,02
A13	0	2,22	2,17	3,43	6,62	6,88	9,89	12,99	15,93	16,55	17,46
A14	0	2,64	2,64	3,49	5,02	5,20	7,87	10,32	-	-	-
A15	0	2,37	1,77	2,71	5,98	5,96	8,75	11,75	14,62	14,74	15,51
Máximo	0	2,8	3,4	4,8	7,5	9,3	11,6	15,0	17,6	18,1	19,2
Médio	0	2,2	2,4	3,5	6,2	7,0	9,4	12,6	14,8	15,5	16,3
Mínimo	0	1,1	1,3	2,1	4,3	4,8	6,8	9,0	10,2	11,0	11,7

Fonte: Autoria própria

Figura 129 – Resultado dos recalques medidos para a Torre A.

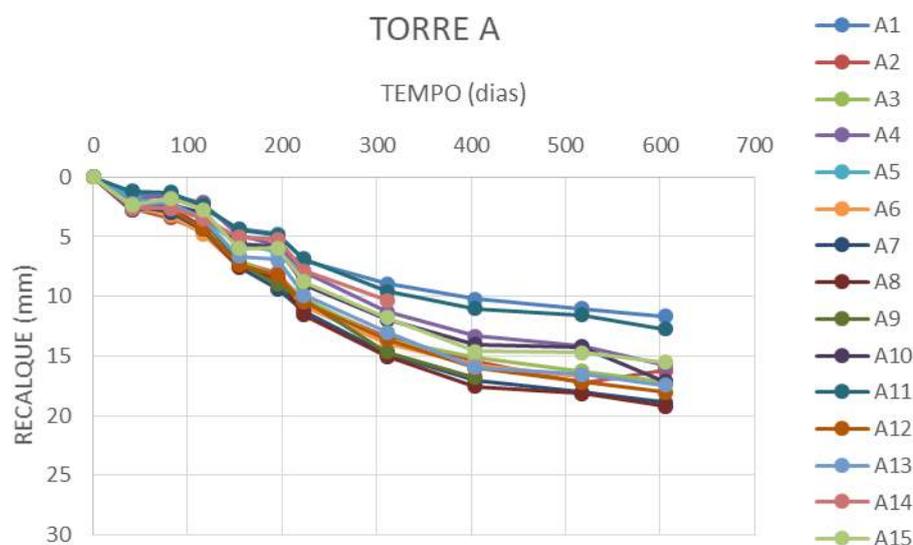
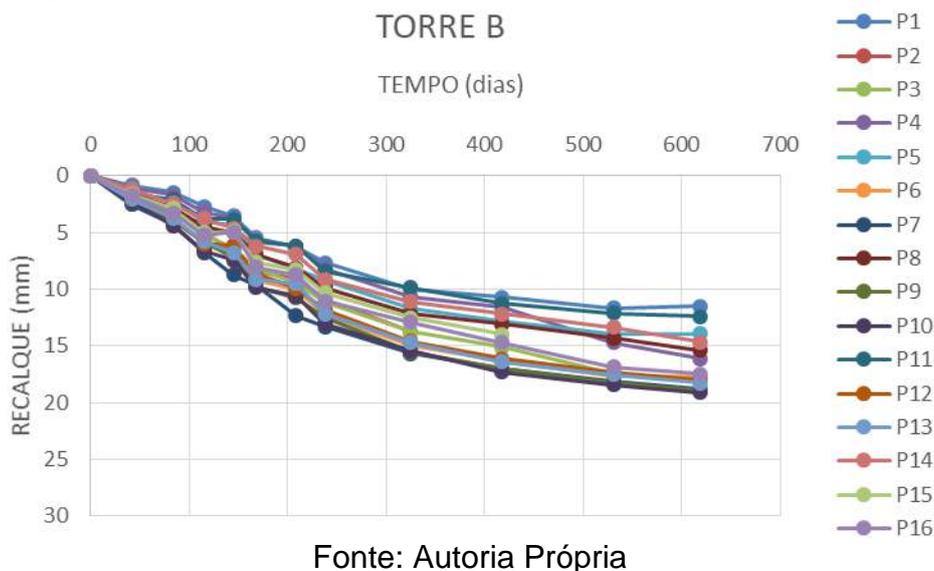


Tabela 34 – Recalques para a Torre B.

Intervalo de Tempo (dias)	TEMPO (dias)											
	0	42	84	115	145	168	209	238	325	418	531	619
P1	0	0,83	1,46	2,69	3,52	5,47	6,25	7,63	9,99	10,68	11,65	11,49
P2	0	1,85	3,04	4,87	6,69	8,42	9,11	10,88	13,75	-	-	-
P3	0	1,74	3,19	5,15	6,44	8,24	9,40	11,09	13,74	15,09	17,39	18,09
P4	0	1,14	1,66	3,20	3,73	5,82	6,20	8,18	10,62	11,54	14,68	16,09
P5	0	1,51	2,27	3,97	4,32	6,97	8,17	9,25	11,69	12,81	13,98	13,93
P6	0	2,54	3,81	5,73	6,90	9,19	10,00	12,29	14,99	16,35	17,68	17,70
P7	0	2,50	4,30	6,75	8,72	9,65	12,31	13,28	15,65	17,01	18,14	18,80
P8	0	1,63	2,74	4,45	5,00	6,91	8,11	9,86	12,15	13,05	14,30	15,40
P9	0	2,14	3,92	5,79	7,18	9,72	10,74	12,53	15,54	17,03	18,18	18,92
P10	0	2,27	4,38	6,57	7,43	9,88	10,61	13,01	15,44	17,30	18,41	19,10
P11	0	1,51	2,08	3,81	3,80	5,74	6,19	8,37	9,86	11,29	12,09	12,38
P12	0	1,82	3,63	5,94	6,16	8,69	9,89	11,85	14,57	16,11	17,34	17,97
P13	0	2,05	3,72	5,79	6,78	9,13	9,54	12,16	14,71	16,42	17,54	18,27
P14	0	1,20	2,43	3,77	4,63	6,18	6,92	9,10	11,11	12,18	13,37	14,64
P15	0	1,61	2,86	5,02	4,92	7,58	8,30	10,33	12,51	13,95	-	-
P16	0	1,73	3,25	5,26	4,96	8,06	8,75	11,04	12,89	14,72	16,87	17,45
Máximo	0	2,54	4,38	6,75	8,72	9,88	12,31	13,28	15,65	17,30	18,41	19,10
Médio	0	1,76	3,03	4,90	5,75	7,84	8,78	10,65	13,09	14,34	15,75	16,37
Mínimo	0	0,83	1,46	2,69	3,52	5,47	6,19	7,63	9,86	10,68	11,65	11,49

Fonte: Autoria Própria

Figura 130 – Resultado dos recalques medidos para a Torre B.



5.7.1 Recalques e velocidades estimadas

De posse dos resultados dos ensaios de placa foram realizadas regressões lineares entre a carga e os recalques obtidos. Por definição na Equação 15, o Fator de Melhoramento é a relação entre a rigidez do sistema (solo + 1 estaca) e a rigidez do solo sem estacas. Portanto F pode ser encontrado a partir das inclinações das retas de regressão. Conforme apresentado na Figura 131 e Tabela 35.

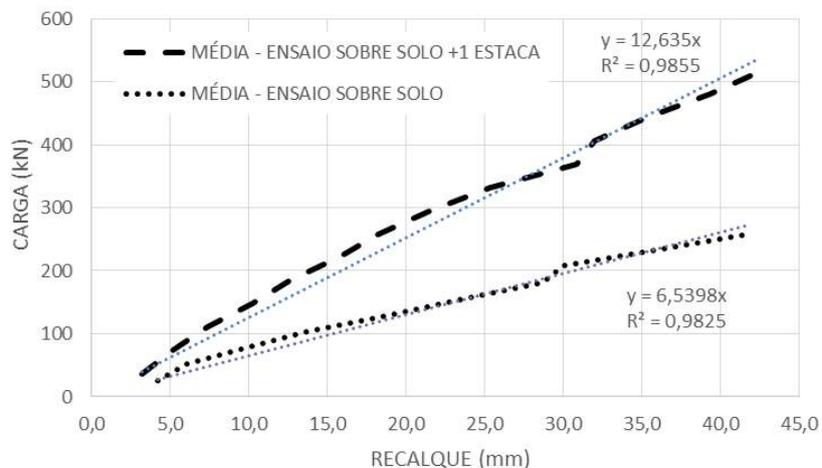
Para obtenção da rigidez relativa estaca-placa (λ) basta aplicar a Equação 44 ($\lambda = F - 1$). Com a Rigidez Relativa é possível estimar o recalque da edificação a partir da Equação 55. Para esse estudo foram estimados os recalques para cada sapata da edificação. O recalque médio da edificação foi obtido a partir da média dos recalques de cada sapata.

Para o momento da última medição de recalques, o edifício ainda não havia sido entregue, portanto não havia sido ocupado e não recebia os esforços decorrentes da sobrecarga operacional, que segundo Gusmão (2000), representa 15% do carregamento total da edificação. Portanto para estimativa dos recalques foi utilizado o valor de carregamento referente a 85% da carga vertical total.

Os recalques estimados são apresentados pela da Figura 132. A faixa de recalques estimados variou entre 19 e 32 mm, com média igual a 26 mm, 60% superior ao medido (em termos médios). Vale ressaltar que as medidas de carregamento são

estimadas, o edifício ainda estaca em fase de acabamento e não ocupado.

Figura 131 – Resultado dos recalques medidos para a Torre B.



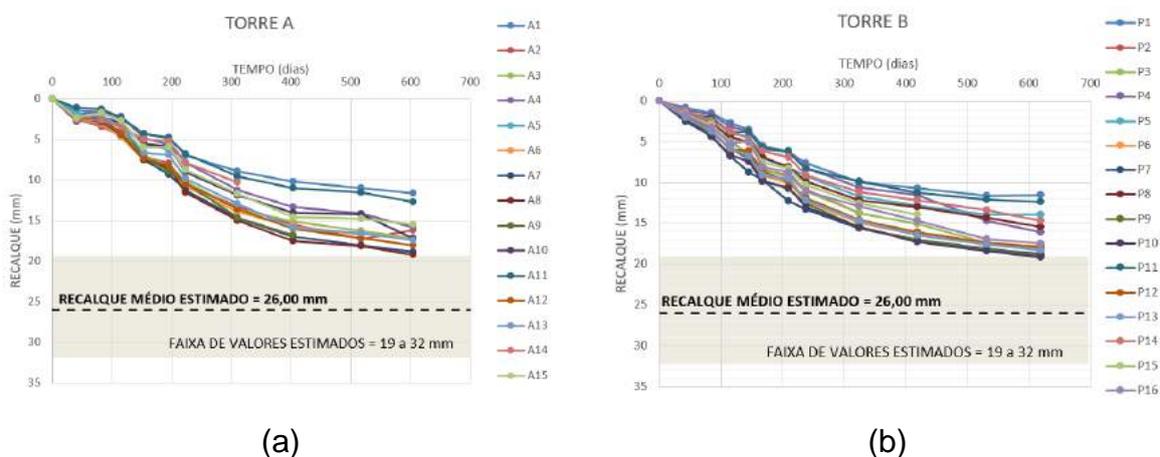
Fonte: Autoria Própria

Tabela 35 – Distribuição dos carregamentos na edificação.

Ensaio	Equação Regressão	Coefficiente Correlação (R²)	Rigidez (kN/mm)	Fator de Melhoria (F = k/k _p)	Rigidez Relativa (λ = F - 1)
Solo+1 Estaca	R = 12,635.S	0,9855	12,635	1,93	0,93
Solo	R = 6,5398.S	0,9825	6,5398		

Fonte: Autoria Própria

Figura 132 – Resultado dos recalques estimados pela metodologia (a) Torre A, (b) Torre B



Fonte: Autoria Própria

A partir da Equação 56 é possível estimar a velocidade do carregamento inicial.

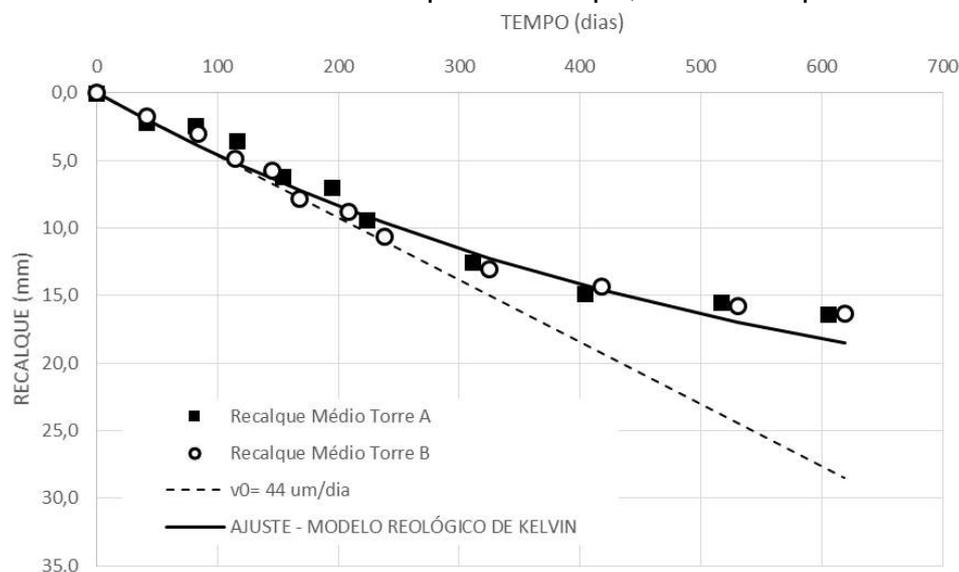
Para tanto é necessário que se obtenha a velocidade média de carregamento. Como se estima que o edifício estava com 85% de seu carregamento total para a última medição, em um intervalo de 605-619 dias, e a carga total do edifício é de 80.080 kN, é possível estimar que a velocidade de carregamento é da ordem de 111 kN/dia. Então aplicando-se a Equação 56, se obtém uma velocidade inicial de recalques de 44 $\mu\text{m}/\text{dia}$. A partir desses resultados é possível se estimar a equação do recalque com o tempo a partir da metodologia apresentada utilizando o modelo reológico de Kelvin, apresentado por Chamecki (1958). São obtidos os valores da rigidez do sistema k , do coeficiente de Amortecimento C e pôr fim a equação do recalque com o tempo $SN(t)$, ver Tabela 36. As Figuras 133 e 134 apresentam os recalques no tempo, e a comparação entre os recalques estimados e medidos, respectivamente.

Tabela 36 – Resultados das estimativas dos parâmetros do modelo de Kelvin.

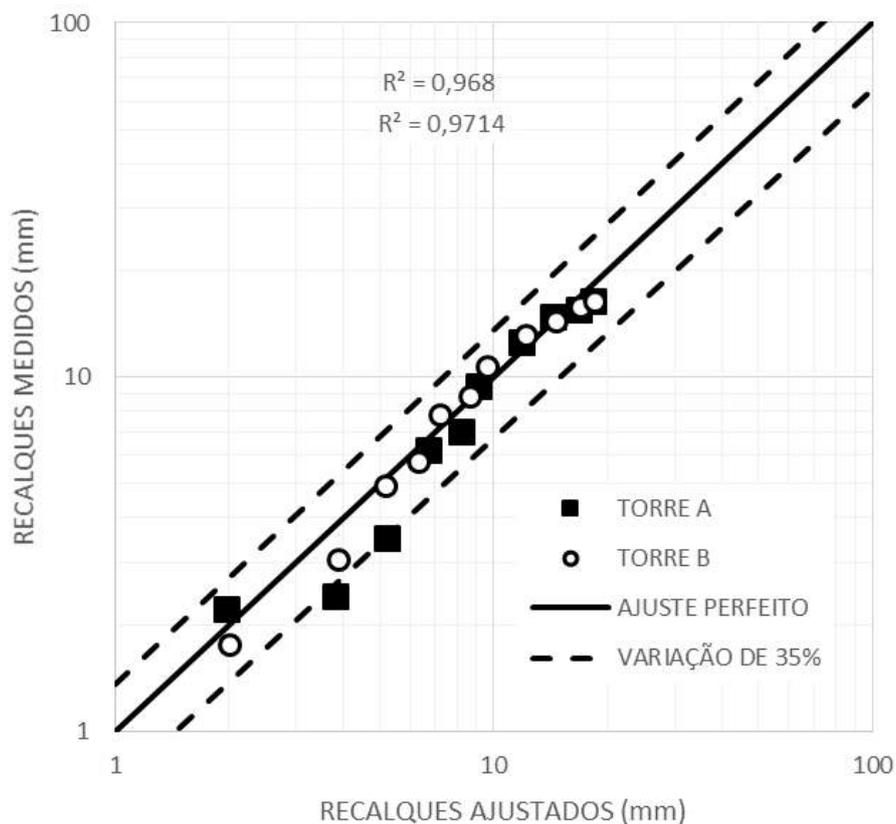
Grandeza	Equação
Rigidez do Grupo de estacas k	$k = k_p \cdot (1 + \lambda \cdot N) = 6,54 \cdot (1 + 0,93 \cdot 397) = 2.491 \text{ kN/mm}$
Recalque Final do Grupo de Estacas S_N	$S_N = \frac{P}{k} = \frac{68.068}{2.491} = 27 \text{ mm}$
Velocidade inicial de recalques v_0	$v_0 = \frac{v_c}{k} = \frac{111}{2.491} = 0,044 \text{ mm/dia}$
Coefficiente de Amortecimento inicial C	$C = \frac{P}{v_0} = \frac{68.068}{0,044} = 1.547.000 \frac{\text{kN}}{\text{mm/dia}}$
Recalque no tempo $S(t)$	$SN(t) = S_N \cdot (1 - e^{-\frac{k}{C} \cdot t}) = 27 \cdot (1 - e^{-0,0016 \cdot t})$

Fonte: Aatoria Própria

Figura 133 – Resultado dos recalques no tempo, estimados pelo Método D.



Fonte: Aatoria Própria

Figura 134 – Recalques Medidos *versus* Recalques Estimados

Fonte: Autoria Própria

5.8 Tanques de Suape: Retro análise

O último caso de obra ser explorado consiste em um conjunto de tanques de armazenamento de combustíveis instalados no complexo portuário de Suape, Ipojuca/PE. O conjunto é composto por 15 tanques, com diâmetros variando entre 14,40 m a 46,50 m.

Para avaliação da solução de fundação foi executada campanha de investigação geotécnica composta por:

- 21 furos de sondagens a percussão – SPT;
- Retirada de 68 amostras deformadas, entre as profundidades de 0,50 e 30,45 m;
- 68 ensaios de granulometria ao longo da profundidade amostrada;
- 52 ensaios de consistência (26 ensaios de limites de liquidez e 26 ensaios de limites de plasticidade);

Os resultados obtidos da campanha de prospecção são apresentados por meio da Figura 135, 136, 137 e 138.

Da Figura 135 é possível avaliar a resistência a penetração e a textura do material com a profundidade. Nota-se que do nível do terreno até a profundidade de 18,00-20,00 m é encontrada uma camada preponderantemente arenosa, com teores de finos inferiores a 20%, com comportamento aproximadamente homogêneo (conforme apresentado por Figura 136).

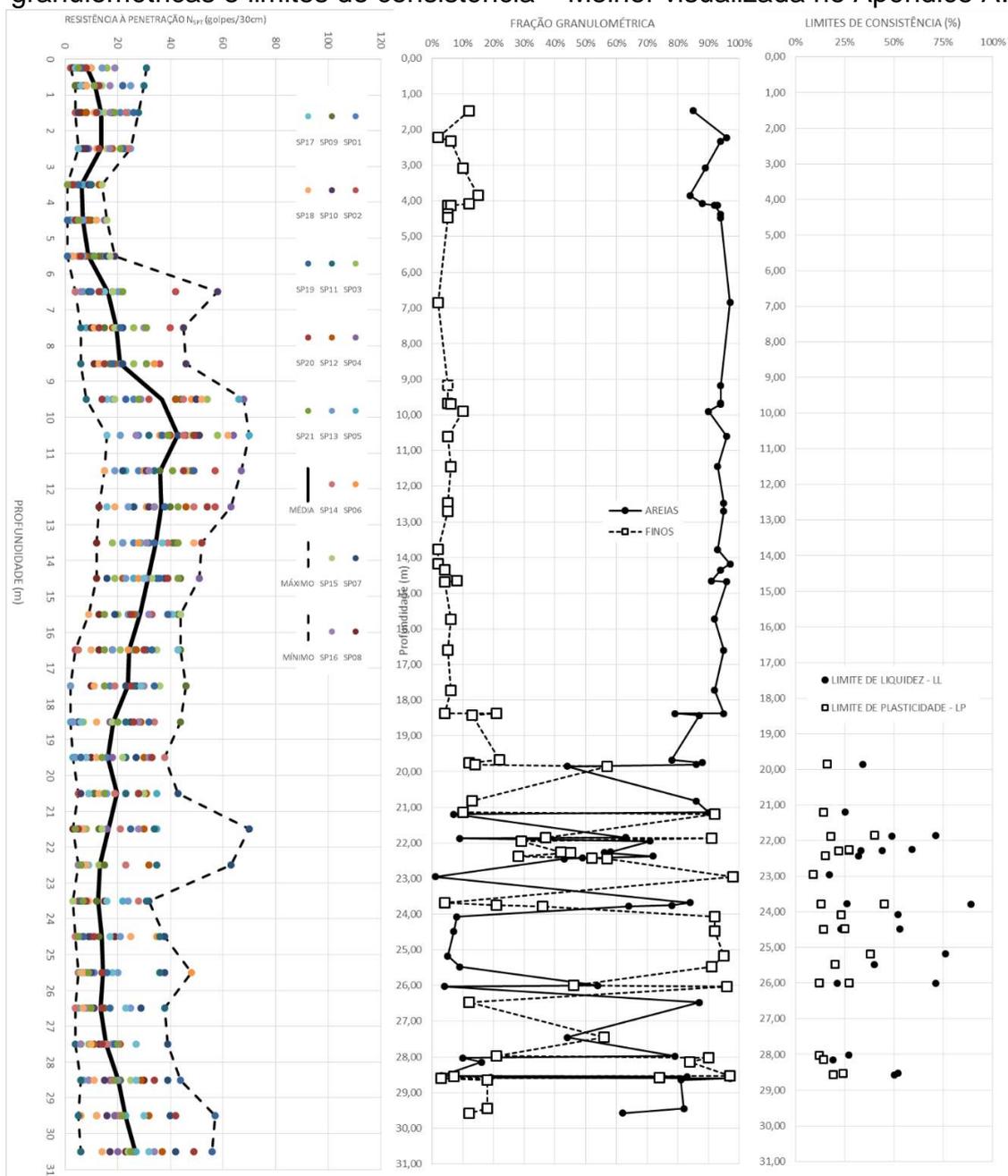
A partir de 20,00 m de profundidade a variabilidade das camadas é incorporada com nível de finos aumentando consideravelmente até valores próximos a 100% (ver Figura 137). Os ensaios de consistência foram realizados exatamente para as camadas abaixo de 20,00 m de profundidade.

Os limites de plasticidade encontrados são da ordem de 20% com picos próximos a 50%. Já os limites de liquidez variam entre 20 e 90%.

Quando os resultados de consistência são plotados na carta de plasticidade, é possível observar que os valores obtidos de IP x LL se encontram no lugar geométrico entre as Linhas A e o critério de Nagaraj e Jayadeva (1983), que representa a região para solos finos inorgânicos

Três amostras se mostraram abaixo da linha A, mas não se aproximaram do critério de Perrin, 1974 normalmente associado a materiais orgânicos.

Figura 135 – Dados de caracterização do subsolo, resistência a penetração, frações granulométricas e limites de consistência – Melhor visualizada no Apêndice A.



Fonte: Autoria Própria

A partir dessas informações é possível afirmar que o solo é composto preponderantemente por deposições de camadas de areia até os 20,00 m de profundidade, onde a estratigrafia se altera para um material mais variável, fino, tipicamente inorgânico. Classificado como mistura de siltes e argilas inorgânicos de baixa compressibilidade. Foi então elaborado o perfil geotécnico apresentado por meio da Figura 139 (também apresentado com detalhes no Apêndice A).

Figura 136 – Granulometria, camadas até 20 m de profundidade

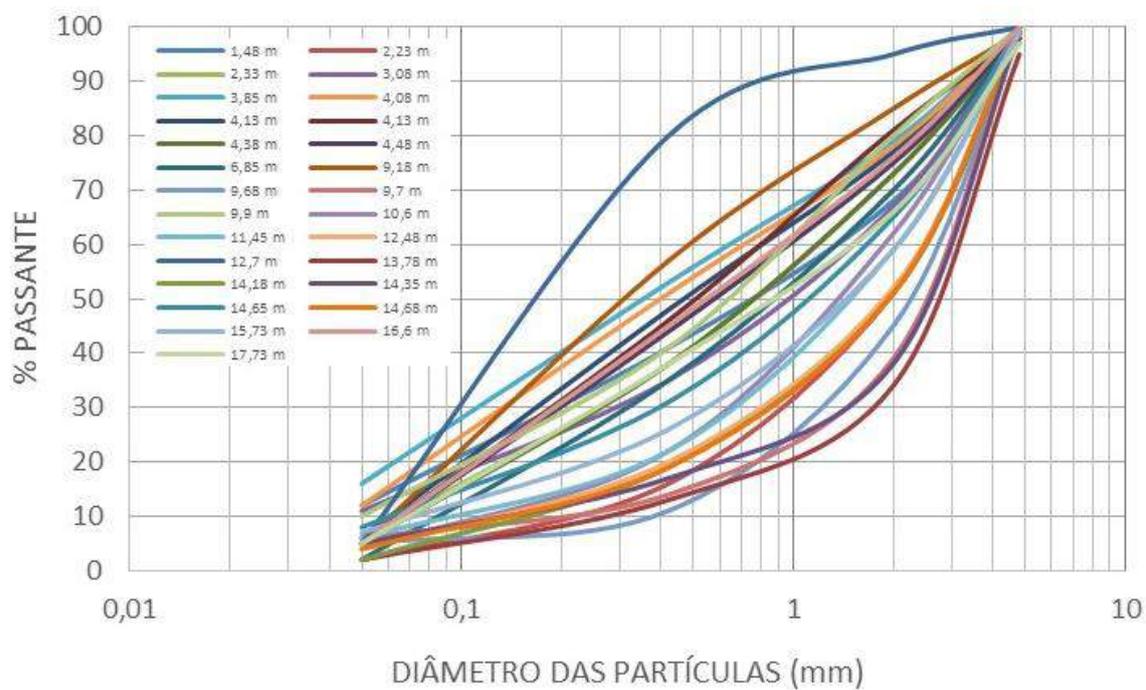


Figura 137 – Granulometria camadas entre 20 e 30 m de profundidade.

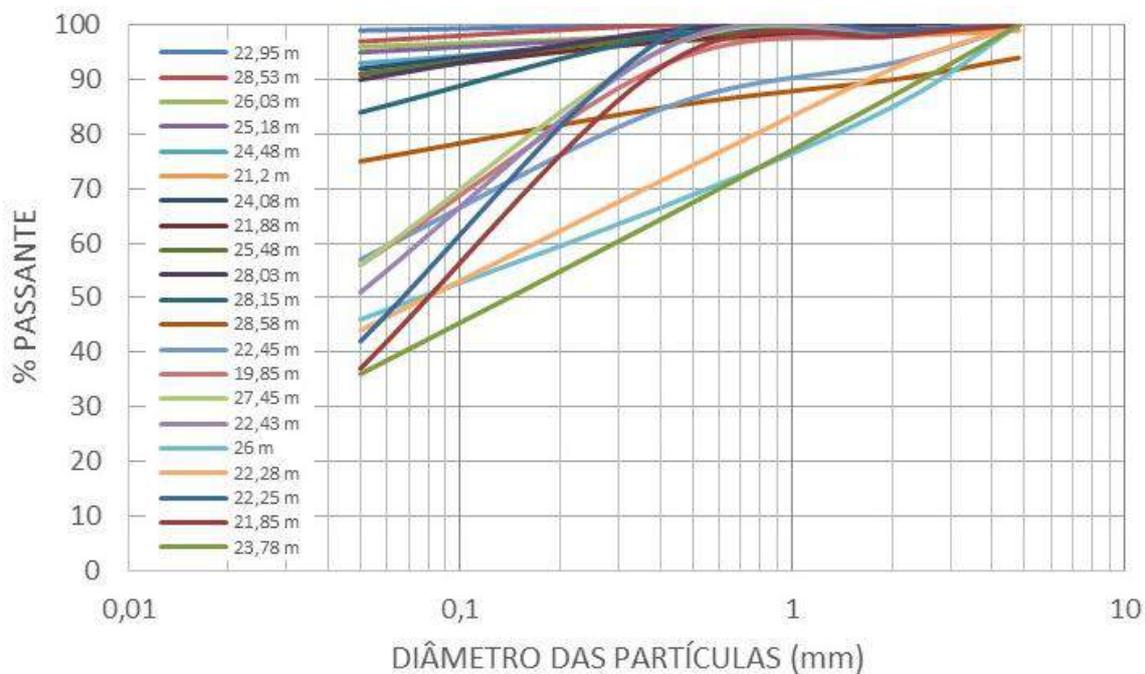
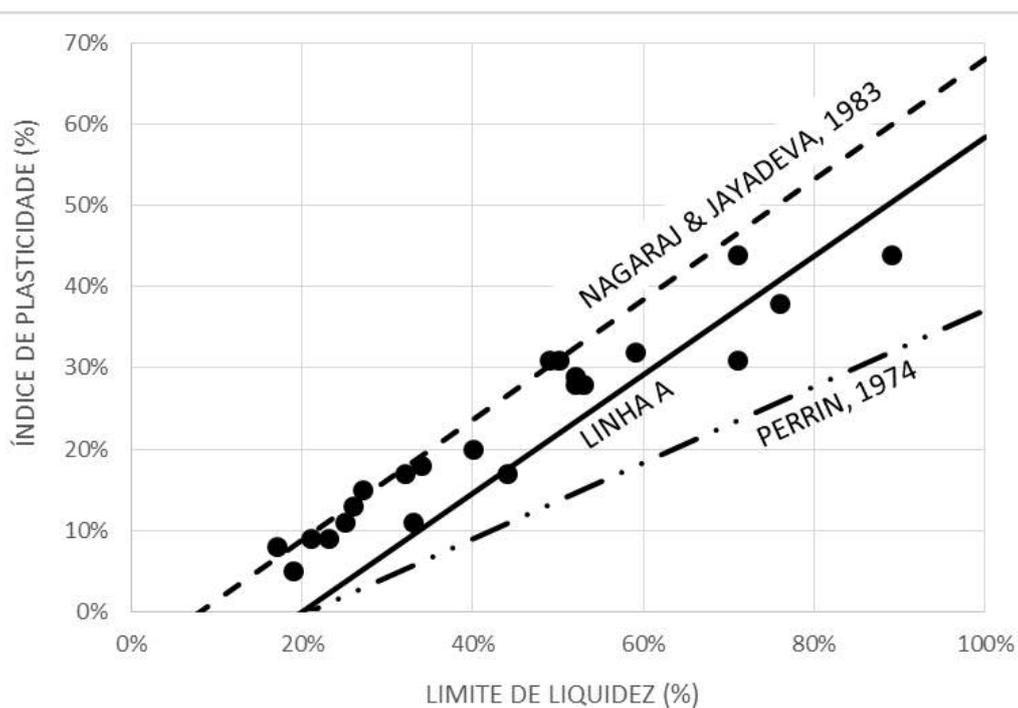
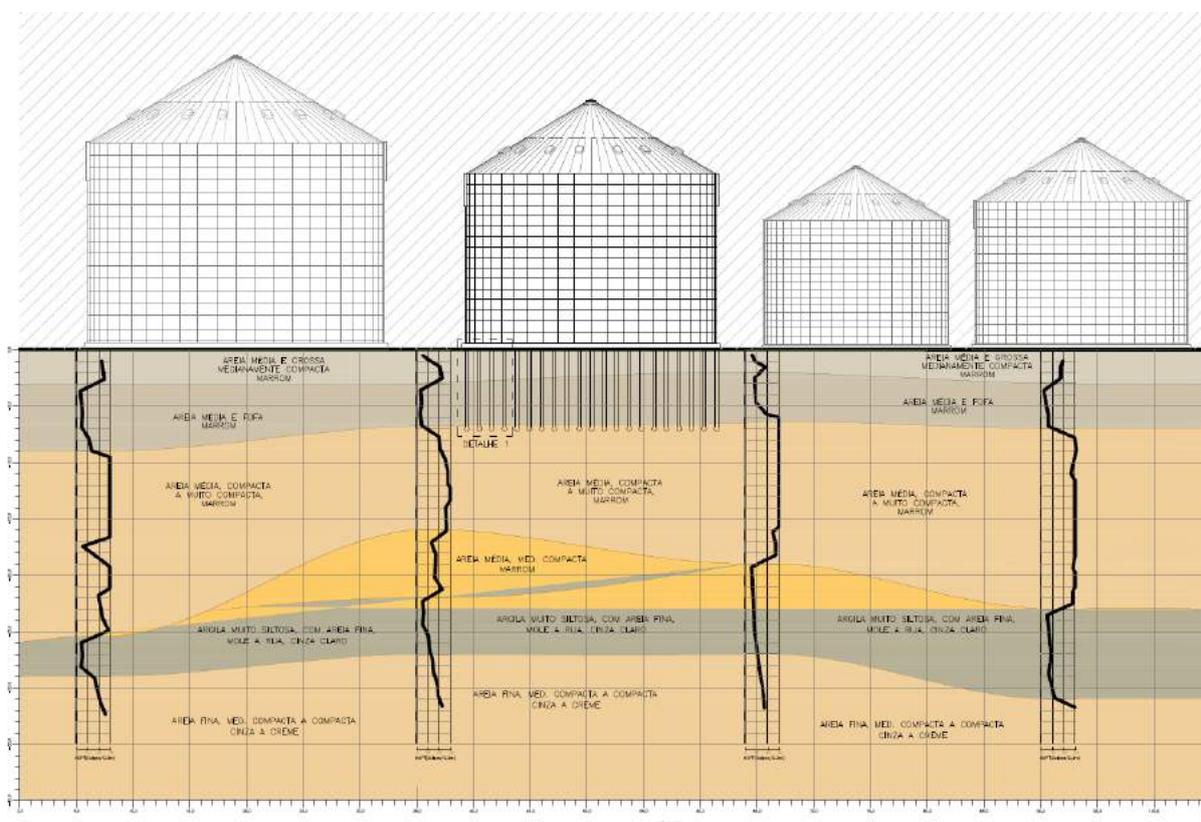


Figura 138 – Carta de plasticidade – resultados entre 20,00 m e 30,00 m.



Fonte: Autoria Própria

Figura 139 – Perfil Geotécnico dos Tanques – Melhor visualizada no Apêndice A.



Fonte: Autoria Própria

Devido as camadas superficiais do solo serem arenosas, porém fofas, a

solução de fundação adotada para os tanques foi a de colunas de melhoramento de solo, executadas em areia e brita, com 300 mm de diâmetro e comprimento de 7,00 m. A cota de fundação da ponta das colunas ficou assentada sobre a camada de areia média, compacta a muito compacta, que se estende até pelo menos a profundidade de 20,00 m.

Dessa forma, não são esperadas grandes compressões do solo sob a ponta das colunas de melhoramento, e a maior parcela da magnitude dos recalques deve estar restrita às camadas superficiais onde o melhoramento foi executado.

Para verificação de desempenho da edificação foram realizados ensaios de placa sobre uma estaca isolada, e sobre o solo melhorado (entre colunas). Os resultados dos ensaios são apresentados por meio da Tabela 37, e da Figura 140. As cargas variaram de 23,6 kN a 278,4 kN, com recalques que variaram entre 0,6375 a 21,8 mm.

Então, foram realizadas duas análises, a primeira baseada no Método A já apresentado anteriormente, para o qual, devido a natureza dos ensaios, será obtida a rigidez relativa estaca-placa para o caso sem a consideração dos efeitos de grupo (λ_0); e a segunda retro analisa o resultado da rigidez estaca-placa real (λ – com a consideração dos efeitos de grupo e de interação), a partir de resultados de medições de recalques durante os testes de enchimento dos tanques, para essa análise é utilizado o Método D.

Por fim são comparados os dois resultados obtidos a partir de dois caminhos opostos (método A – direto das provas de cargas e Método D – a partir de medições de recalque em campo), que a frente verificar-se-á a existência de um ponto de interseção entre ambos.

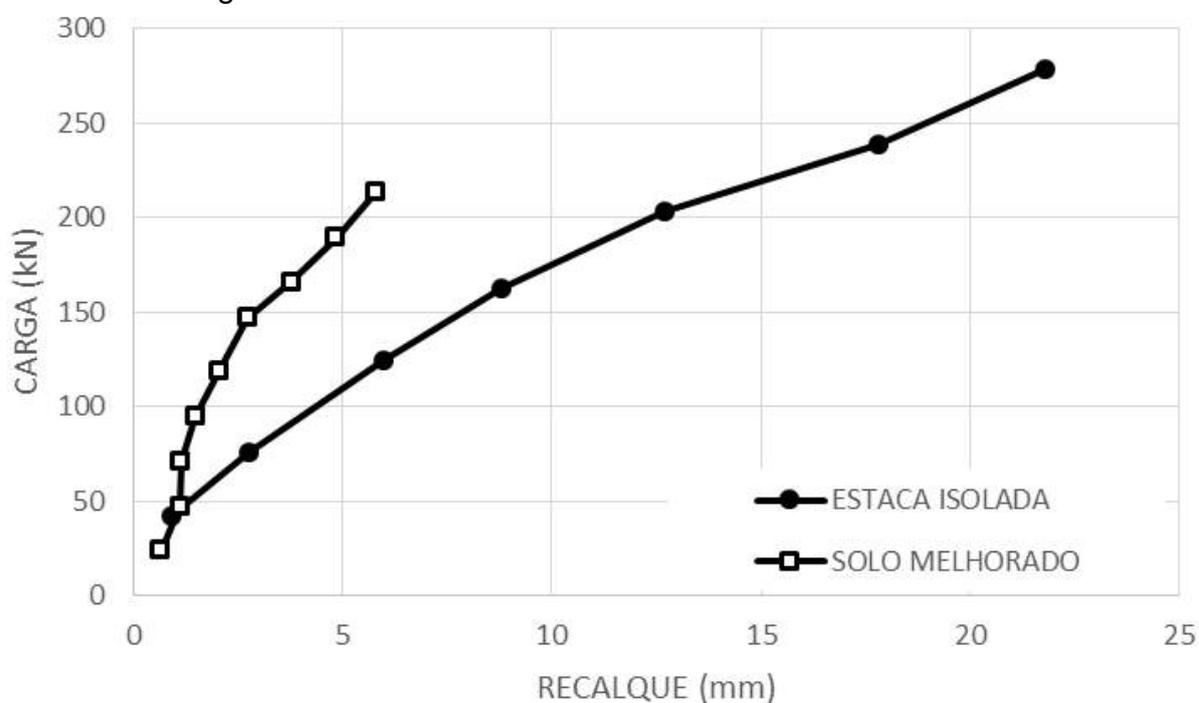
Para o desenvolvimento do Método A, foram utilizados os resultados dos ensaios de placa, porém como os estágios de cargas entre os dois ensaios não coincidem foram considerados os estágios mais próximos entre si, conforme Tabela 38. Foi considerado o critério de discrepância entre as cargas de até 10%, para mais ou para menos.

Tabela 37 – Resultados dos ensaios de prova de carga em placa.

Estágio de Carga	Prova de carga - Solo melhorado		Prova de carga - Estaca isolada	
	Carga (kN)	Recalque (mm)	Carga (kN)	Recalque (mm)
1	23,6	0,6375	41,7	0,8850
2	47,3	1,1000	76,1	2,7500
3	71,0	1,1350	124,5	5,9875
4	94,7	1,4750	162,2	8,7875
5	118,4	2,0275	203,1	12,7125
6	147,0	2,7275	238,6	17,8050
7	165,7	3,7725	278,4	21,8000
8	189,4	4,8425	-	-
9	213,1	5,7725	-	-

Fonte: Autoria Própria

Figura 140 – Resultado dos Ensaios de Placa Realizados



Fonte: Autoria Própria

Tabela 38 – Cargas Consideradas.

Carga no Solo (kN)	Carga Estaca Isolada (kN)	Carga Média (kN)	Varição (%)
47,3	41,7	44,5	6,3
71,0	76,1	73,6	3,5
118,4	124,5	121,5	2,5
165,7	162,2	164,0	1,1
213,1	203,1	208,1	2,4

Fonte: Autoria Própria

Após a seleção das cargas, foi calculada a rigidez da estaca, bem como a rigidez do solo, e a foi aplicado o Método A, e a equação direta oriunda do método, obtendo-se assim a rigidez relativa estaca-placa sem o efeito de grupo (λ_0). Os resultados são apresentados por meio da Tabela 39.

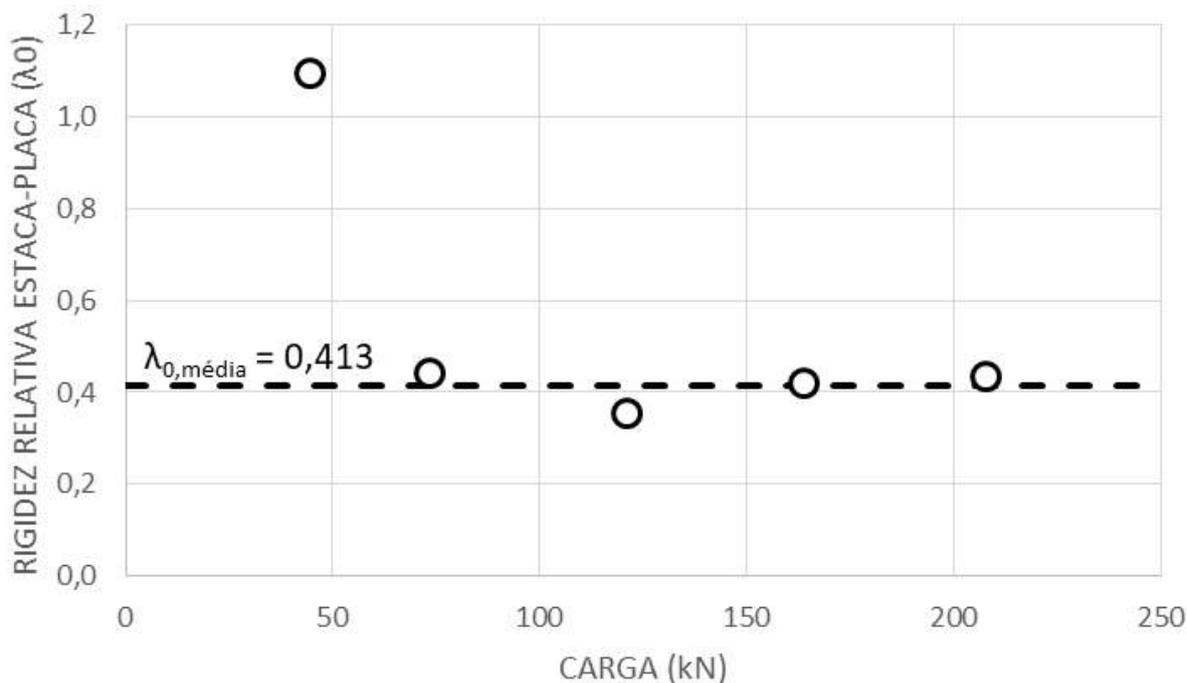
É possível observar que tanto a rigidez da estaca quanto a rigidez do solo tendem a decrescer com o aumento da carga aplicada. Porém o valor da rigidez relativa estaca-placa apresentou comportamento de estabilidade a partir da carga de 73,6 kN. Mantendo-se praticamente constante em torno do valor de $\lambda_0 = 0,413$, como é apresentado por meio da Figura 141.

Tabela 39 – Resultado da Rigidez da estaca do solo e Rigidez relativa estaca-placa.

CARGA (kN)	Rigidez da Estaca (k_e - kN/mm)	Rigidez do Solo (k_p - kN/mm)	Rigidez Relativa Estaca-placa (λ_0 – Sem efeito de grupo)
44,5 ± 6,3%	47,12	43,00	1,096
73,6 ± 3,5%	27,67	62,56	0,442
121,5 ± 2,5%	20,79	58,40	0,356
164,0 ± 1,1%	18,46	43,92	0,420
208,1 ± 2,4%	15,98	36,92	0,433

Fonte: Aatoria Própria

Figura 141 – Rigidez Relativa Estaca-placa – Obtidas a partir dos ensaios de placa



Fonte: Aatoria Própria

Vale salientar que a rigidez estaca-placa obtida não leva em consideração nenhum tipo de efeito de interação entre os elementos, uma vez que os ensaios considerados foram de placa sobre o solo (entre colunas) e sobre estaca (com a placa de mesmo diâmetro da estaca isolada).

Dessa forma foram utilizados os testes de enchimento realizados em cada tanque para traçar os diagramas carga-recalques grupo de estacas em serviço. Durante os testes os tanques são parcialmente cheios em níveis diferentes, transferindo cargas diferentes para a fundação, ao passo em que são medidos os recalques imediatos na fundação. De maneira que se aproxima de um ensaio de placa em escala real. Foram realizados ensaios nos Tanques 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13 e 14, com pressões que variaram entre os valores de 29,28 a 199,21 kPa, com recalques que variaram entre 2,97 a 14,27 mm. Conforme apresentado por meio da Tabela 40.

Então partindo da consideração que o teste de enchimento representa os recalques da edificação foi utilizado o Método D, para retro análise da Rigidez Relativa Estaca-Placa (λ), esta considera os efeitos de interação entre a placa e as colunas, uma vez que é obtida a partir de um ensaio em que todo o sistema é ensaiado. A obtenção dessa relação é realizada por meio da formulação apresentada no Método D, a qual se faz necessária a obtenção da rigidez variacional do solo sob a placa. Para tanto foi assumida a premissa de que o ensaio de placa realizado é representativo do sistema. Para essa configuração em questão essa premissa faz sentido, uma vez que a partir de 7,00 m de profundidade o solo se mostra muito compacto, onde não são esperados deslocamentos significativos abaixo da ponta das colunas. Dessa forma a região diretamente associada aos recalques da edificação ficam restritas a essas camadas superficiais de até 7,00 m, reduzindo as diferenças entre os efeitos de forma da placa e do tanque. Para configurações diferentes o contexto geológico-geotécnico deve ser levado em consideração para aplicação dos métodos. Bem como, sugere-se que em trabalhos futuros sejam analisadas ora por outros casos ora por modelagens numéricas, quais os limites da representatividade dos ensaios de placa servindo-se como protótipos das edificações reais.

A obtenção da rigidez do solo sob o tanque foi realizada a partir de regressão linear do diagrama carga-recalque do ensaio de placa sobre o solo (vale lembrar que é adotado o método das diferenças finitas a montante, conforme apresentado em capítulo anterior). A regressão linear, bem como a equação obtida é apresentada por

meio da Figura 142. Onde é possível observar que foi encontrado uma rigidez $k_p = 42,23$ kN/mm (coeficiente linear da reta de regressão), com coeficiente de correlação $R^2 > 0,85$. Então de posse da rigidez da placa sobre o solo k_p , do recalque real dos tanques, do número de estacas, e da carga aplicada, é possível retro analisar o valor de λ para cada tanque, em cada estágio de carregamento. Foram obtidos 31 valores de λ . Conforme resumido por meio da Tabela 40 e 41, e do histograma apresentado na Figura 143.

Tabela 40 – Resultados dos testes de enchimento.

TANQUE	BASE (m)	ÁREA DA BASE (m ²)	N	PRESSÃO (kPa)	RECALQUE (mm)	CARGA (kN)	λ
3	21,30	356,33	293	37,57	3,04	13.387	0,46
				73,86	6,08	26.319	0,35
				97,77	6,08	34.838	0,35
4	27,75	604,81	500	47,82	3,07	28.922	0,63
				109,3	5,12	66.106	0,44
				135,34	6,14	81.855	0,61
5	27,75	604,81	500	45,68	4,06	27.628	0,33
				103,32	7,17	62.489	0,32
				131,07	11,33	79.272	0,41
7	46,15	1.672,76	1.410	36,72	5,15	61.424	0,28
				74,29	7,17	124.269	0,20
				118,69	12,25	198.540	0,29
				141,32	14,27	236.394	0,27
10	27,75	604,81	500	46,83	2,97	28.323	0,46
				118,74	6,05	71.815	0,45
				132,01	9,20	79.841	0,56
				149,56	9,20	90.455	0,41
11	27,75	604,81	500	29,28	7,18	17.709	0,32
				68,66	8,14	41.526	0,11
				121,74	13,27	73.630	0,24
				148,27	13,27	89.675	0,26
12	27,75	604,81	500	45,97	3,07	27.803	0,46
				88,35	7,14	53.435	0,43
				100,33	7,14	60.681	0,35
				149,13	9,27	90.195	0,40
13	14,4	162,86	137	46,89	3,07	7.637	0,48
				73,79	5,12	12.017	0,42
				141	8,17	22.963	0,40
14	14,4	162,86	137	73,37	5,12	11.949	0,54
				140,57	8,24	22.893	0,40
				199,21	10,19	32.443	0,47

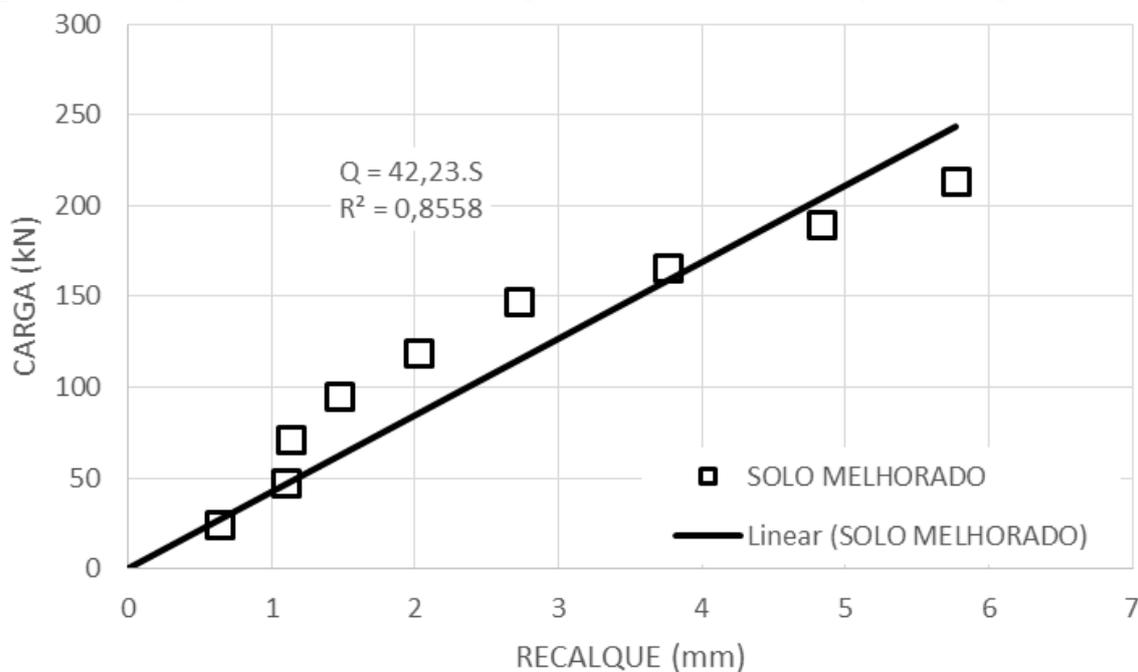
Fonte: Autoria Própria

Tabela 41 – Resultados dos valores de rigidez relativa estaca-placa retro analisados.

Rigidez Relativa	Número de dados	Faixa de Variação	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
λ	31	0,115 – 0,629	0,391	0,116	29,71

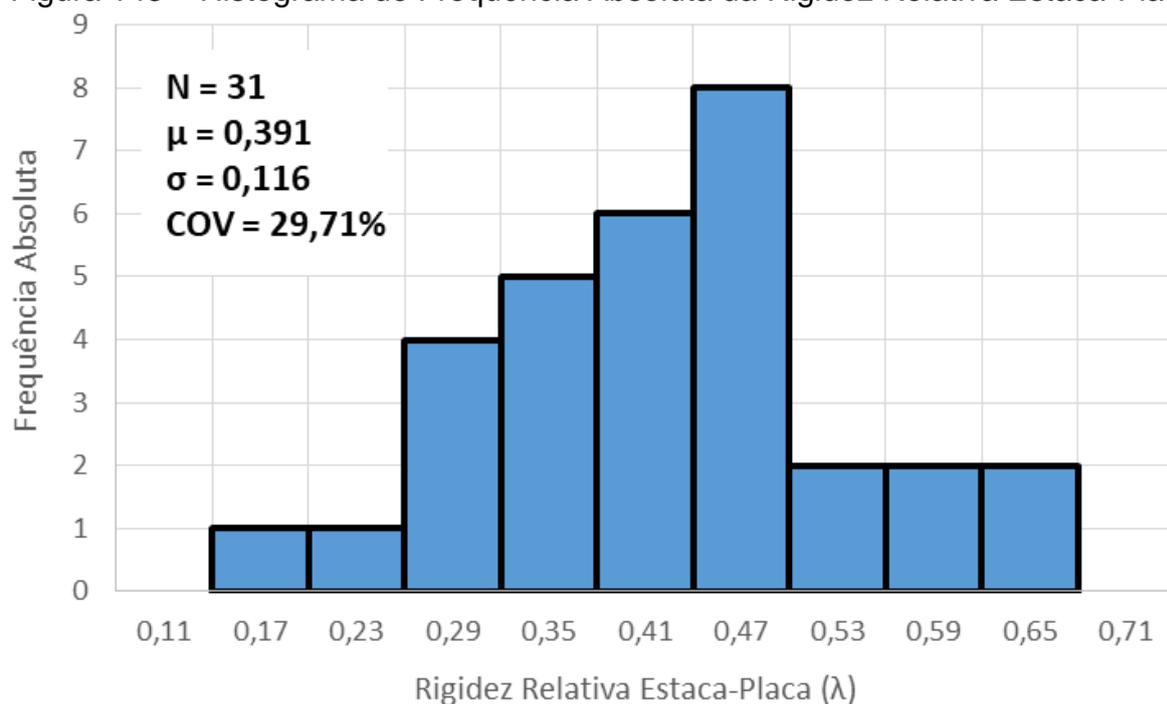
Fonte: Autoria Própria

Figura 142 – Ajuste linear da curva carga recalque e aproximação da Rigidez do solo



Fonte: Autoria Própria

Figura 143 – Histograma de Frequência Absoluta da Rigidez Relativa Estaca-Placa



Fonte: Autoria Própria

Como é possível observar foram obtidos os valores de Rigidez relativa estaca-placa λ variando entre 0,115 a 0,629, com média igual a 0,391, desvio padrão de 0,116 e coeficiente de variação de 29,71%. Esse coeficiente de variação está associado a diversos fatores, tais como variabilidade da estratigrafia do solo, resistência das camadas, execução não homogênea das colunas, propagação de erros nas medições dos recalques, e representatividade do ensaio para todos os tanques (distantes entre si) dentre outros. A Tabela 42 apresenta resultados típicos de coeficientes de variação para diversas grandezas utilizadas na mecânica dos solos. Alguns parâmetros utilizados nas teorias clássicas da mecânica dos solos apresentam valores de coeficiente de variação acima de 30%, tais como condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade, coeficiente de adensamento e os valores do índice N obtidos no ensaio de SPT.

Tabela 42 – Coeficientes de Variação por parâmetro Geotécnico.

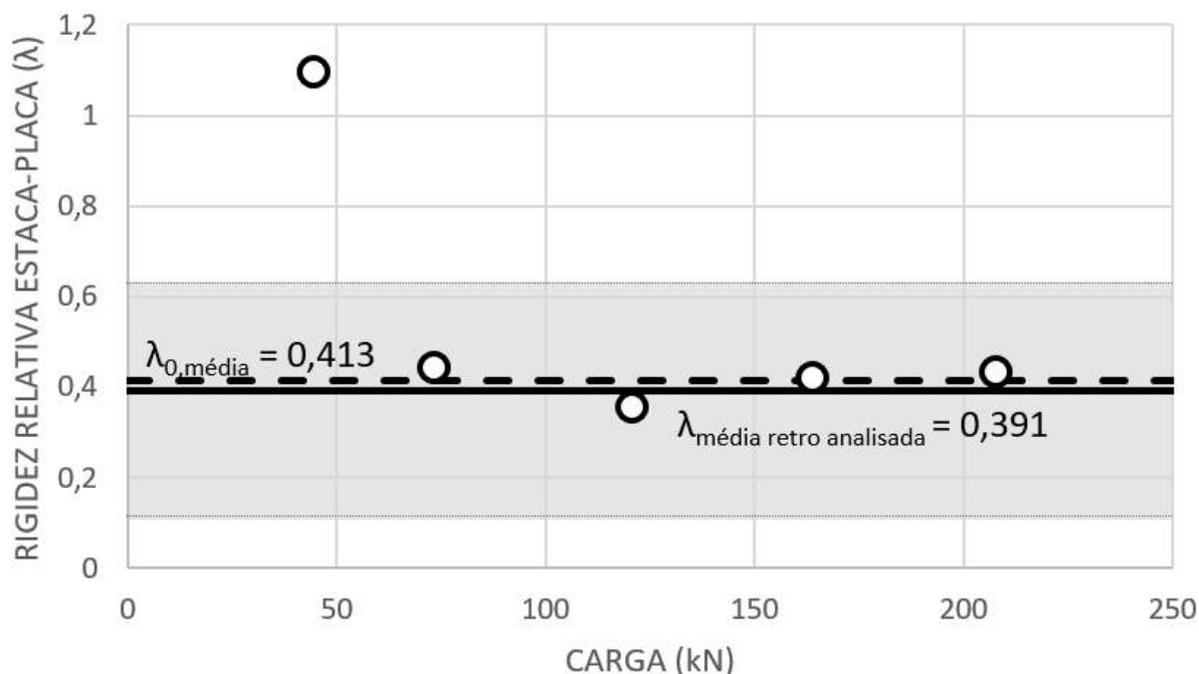
Propriedade ou resultado de ensaio de campo	Coeficiente de Variação - COV (%)	Fonte
Peso específico (γ)	3 a 7	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Peso específico submerso (γ_{sub})	0 a 10	Lacasse and Nadim (1997), Duncan (2000)
Ângulo de atrito efetivo (ϕ')	2 a 13	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Resistência não drenada (S_u)	13 a 40	Harr (1984), Kulhawy (1992), Lacasse and Nadim (1997), Duncan (2000)
Parâmetro de resistência não drenada (S_u/σ'_v)	5 a 15	Lacasse and Nadim (1997), Duncan (2000)
Índice de Compressão (C_c)	10 a 37	Harr (1984), Kulhawy (1992), Duncan (2000)
Pressão de Preconsolidação (p_p)	10 a 35	Harr (1984), Lacasse and Nadim (1997), Duncan (2000)
Coeficiente de permeabilidade de argila saturada (k)	68 a 90	Harr (1984), Duncan (2000)
Coeficiente de permeabilidade de argila não saturada (k)	130 a 240	Harr (1984), Benson et al. (1999)
Coeficiente de adensamento (c_v)	33 a 68	Duncan (2000)
Índice N_{SPT}	15 a 45	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Resistência de ponta elétrica (q_c)	5 a 15	Kulhawy (1992)
Resistência de ponta mecânica (q_c)	15 a 37	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Resistência do Dilatômetro (q_{DMT})	5 a 15	Kulhawy (1992)
Resistência não drenada - Ensaio de palheta (S_v)	10 a 20	Kulhawy (1992)

Fonte: Duncan 2000, adaptado

A partir dos resultados obtidos foi possível comparar os valores de λ_0 e λ obtidos pelos métodos A e D respectivamente. Como é apresentado por meio da Figura 144. A diferença entre a média obtida através do método A (0,413) para o valor obtido a partir do Método D (0,391) é de 5,62% e representa exatamente o efeito de grupo $\xi = \lambda_0/\lambda = 0,413/0,391 = 1,0562$. O efeito de grupo muito abaixo pode ser explicado pelo pequeno recalque esperado para as camadas abaixo da ponta das colunas, de forma que praticamente não existe aumento de recalques no sistema devido os deslocamentos das camadas subsuperficiais por serem compactas a muito compactas. Fato esse já observado em outros casos de obra por Almeida (2019).

Os valores encontrados se mostraram 70% superiores aos valores apresentados para os demais casos de obras em colunas de areia e brita (inferiores a 0,23). Porém ainda são muito inferiores aos valores encontrados para estacas de argamassa que apresentaram λ acima de 0,93 atingindo até valores de 3,8.

Figura 144 – Resultado da Rigidez Relativa obtida em ensaios de placa e retro analisadas.

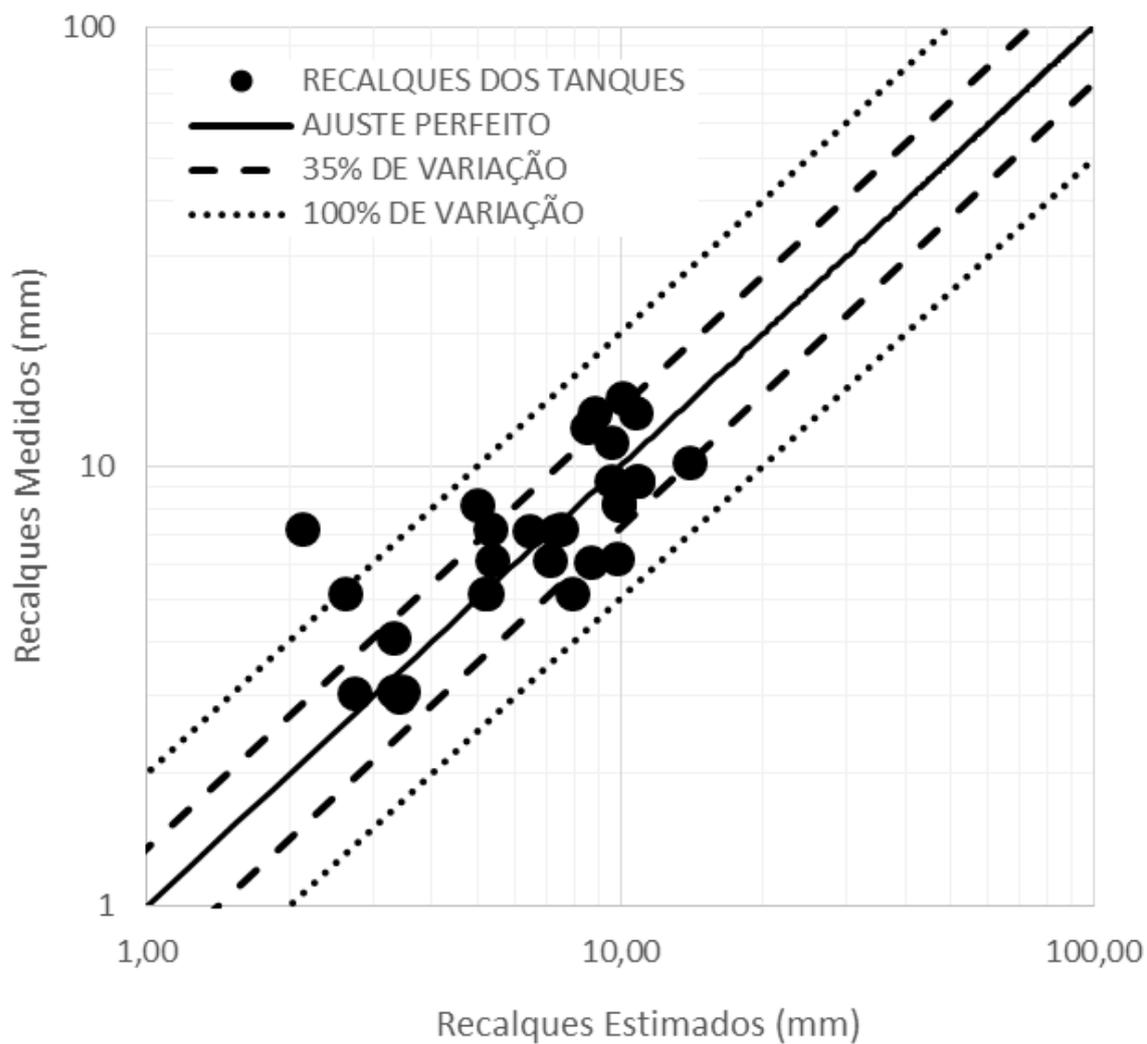


Fonte: Autoria Própria

Então, de posse dos resultados de carregamento, rigidez do solo sob a placa (k_p), número de estacas por tanque e rigidez estaca solo média ($\lambda = 0,391$), foi realizada uma estimativa dos recalques dos tanques para todos os cenários de

carregamento por enchimento. Foi encontrado um erro médio de 23,8%. Os recalques estimados são apresentados versus os recalques medidos por meio da Figura 145.

Figura 145 – Recalques medidos *versus* os recalques estimados.



Fonte: Aatoria Própria

5.9 Resumo dos resultados

Para o trabalho, ao todo são avaliados: 75 obras de publicação nacional ou internacional (Apêndice B); 84 obras de contexto local (apresentados ao longo da Revisão); Totalizando 159 casos de obras avaliados para todo o trabalho. Desses foram utilizados nove casos diferentes nesse capítulo. Divididos em 3 grupos. O primeiro de obras estudadas internacionalmente, o segundo um grupo de casos desenvolvidos no campus experimental da UNB e o terceiro, um conjunto de obras locais. Para todos os casos foram aplicadas as metodologias de A a D apresentadas anteriormente. E foram obtidos como principais resultados numéricos (i) a Rigidez relativa estaca-placa e o ajuste dos recalques. Também foram comparados os resultados encontrados com a Rigidez relativa que pode ser estimada pelas equações empíricas de Mandolini (2012). Esses 3 aspectos serão condensados nesse tópico. O Quadro da Figura 146 apresenta os resultados de λ encontrados, bem como o coeficiente de correlação R^2 encontrado para os ajustes.

Figura 146 – Recalques medidos *versus* os recalques estimados.

IN	Citação	Ref.	Coluna	e/d	L/e	d (m) e L (m)	λ	R^2
1	Poulos (2001)	Poulos (2001)	-	-	-	-	0,005	0,93
2	Poulos (2000)	Akasaka	Pré-moldada	2,79 a 5,44	4,24 a 8,33	520 12,0	0,1348	0,97
3	Katzenbach (2015)	Treptowers	Escavada	5,73	2,48 a 3,16	880 12,5 a 16,0	0,015	0,95
4	Sales (2000)	UNB1	Escavada	5,00	6,67	150 5,0	1,99; 2,06; 2,53	0,90
5	Passos (2005)	UNB2	Compactação	3,00	4,67	100 1,4	0,1357 0,2292	0,96
6	Pacheco (2002)	Res. no Parnamirim	Compactação	2,67	8,75	300 7,0	3,3405 4,2926	0,99
7	Inédito	Res. no Cupe	Compactação	2,67	5,00	300 4,0 a 6,0	0,1578	0,99
8	Amorim (2019)	2 torres no Rosarinho	Compactação	2,67	7,50	300 6,0	0,93	0,96
9	Amorim (2019)	Tanques de Suape	Compactação	3,67	6,36	300 7,0	0,115 a 0,6329	-

Legenda: e = espaçamento; d = diâmetro; e/d = espaçamento relativo; L/e = Comprimento Relativo; L (comprimento); λ = Rigidez Relativa estaca-placa; R^2 = Coeficiente de Correlação

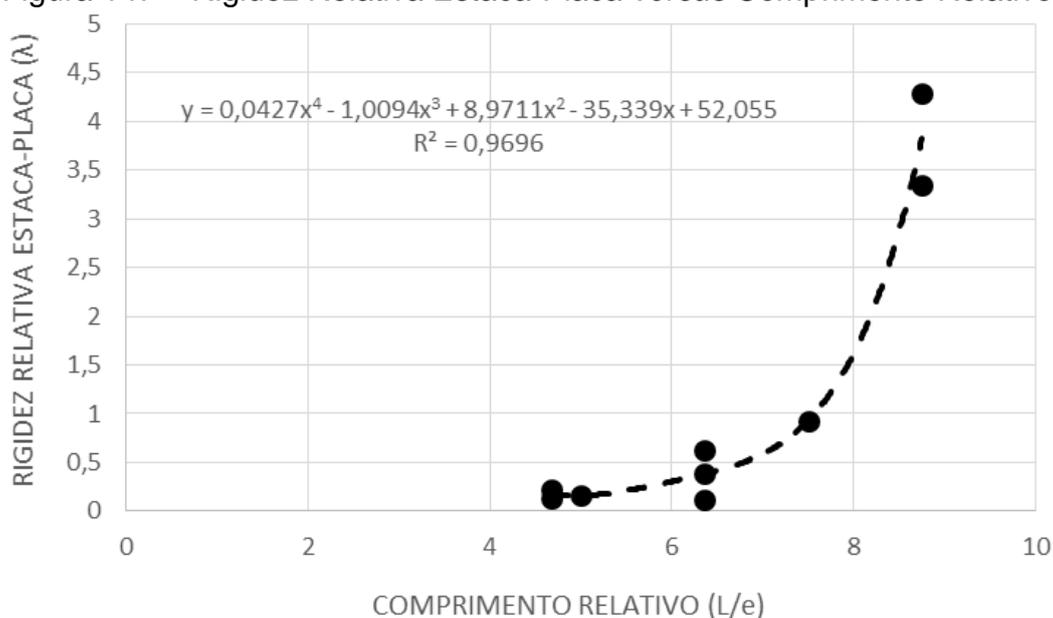
Fonte: Autoria Própria

5.9.1 Rigidez Relativa estaca-placa x Comprimento Relativo

Da análise do Quadro da Figura 146 é possível observar que os valores da Rigidez relativa estaca-placa (λ), não são uniformes. Variando de 4,29 até 0,005. Alguns pontos podem ser ressaltados para elucidar o entendimento dos resultados. Apenas os casos da UNB estudo por Sales (2000) e do Residencial no Parnamirim apresentaram resultados superiores a unidade. O caso da UNB se enquadra no grupo das colunas escavadas. Mas foi realizada em ambiente quase controlado com diâmetro pequeno, quando comparado aos diâmetros convencionais de obras de radier estaqueado, fato que pode sugerir alguma influência na ordem de grandeza dos resultados. Vale salientar que para o caso de solo saturado previamente, a rigidez obtida por meio do Método A se mostrou inferior a unidade, podendo representar outra dimensão do problema a ser melhor investigado.

Para as obras em compactação, nota-se uma tendência de aumento do valor de λ com a relação L/e , o caso do Residencial no Parnamirim consiste na maior relação de todo o trabalho desenvolvido. A Figura 147 apresenta uma relação de λ com L/e . Nota-se uma correlação muito forte ($R^2 = 0,96$) entre as variáveis, podendo fornecer um critério de partida para estimativas futuras de rigidez relativa estaca-placa para análises preliminares de estaqueamentos.

Figura 147 – Rigidez Relativa Estaca-Placa *versus* Comprimento Relativo.



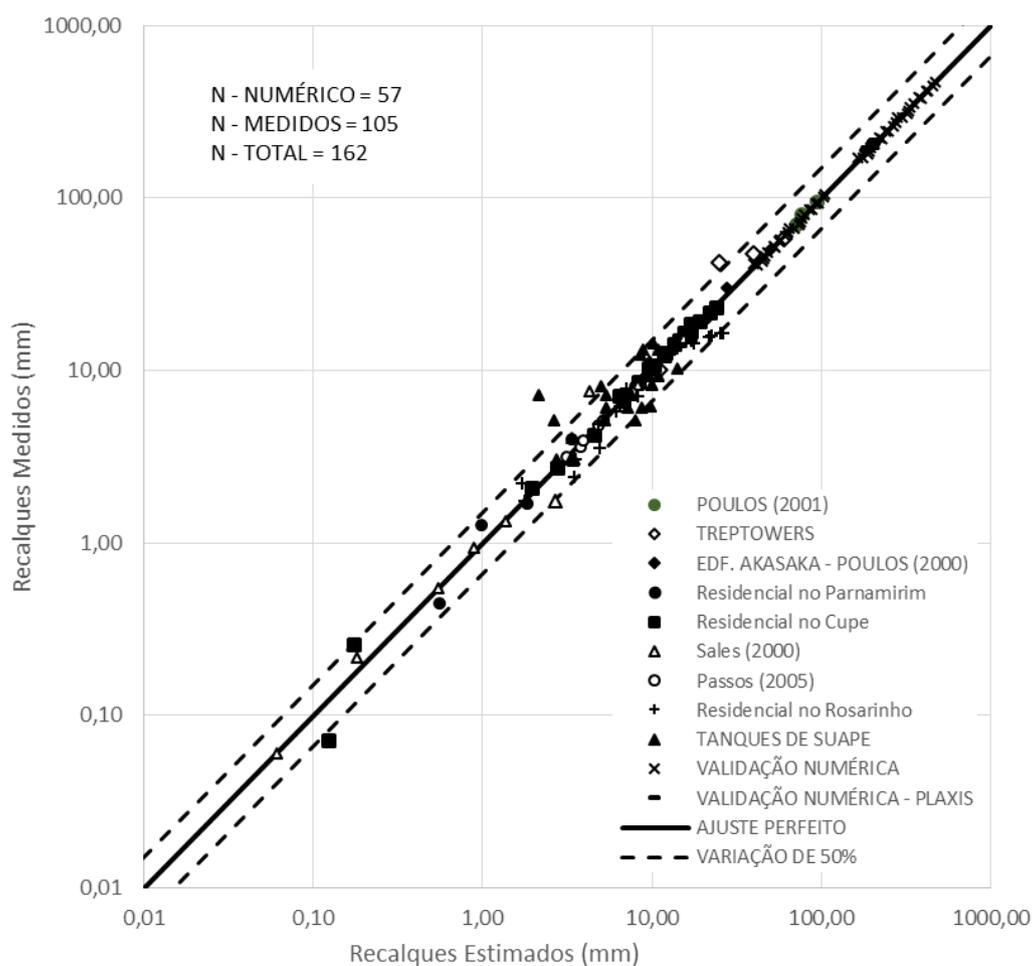
Fonte: Autoria Própria

5.9.2 Recalques Medidos x Recalques Ajustados

Também foi realizada análise comparativa entre os recalques medidos e os recalques estimados pela metodologia para todas os casos estudados no trabalho. Esse resultado é apresentado no gráfico da Figura 148, elaborado no formato log-log, seguindo o modelo apresentado por Mandolini (2012).

É possível observar que os resultados dos recalques estimados são aderentes aos recalques medidos para todos os casos, divergindo no máximo até 50% para mais ou para menos (apenas um ponto – triângulo preenchido, referente aos tanques de suape – se mostrou superior ao desvio de 50%). O erro médio cometido pelas medições foi de 22%. Os resultados corroboram para a aplicabilidade da metodologia uma vez que apresentaram convergência entre os recalques medidos e ajustados.

Figura 148 – Recalques Medidos *versus* Recalques estimados



Fonte: Autoria Própria

5.9.3 Proposta para modificação de Mandolini (2012)

Mandolini (2012) propôs uma correlação do coeficiente de efeito de grupo ξ com o parâmetro $R = (N.e/L)^{0,5}$. Em seu trabalho ele plota o gráfico da variável R_G (dada pela relação entre o coeficiente de efeito de grupo ξ e o número N de estacas ($R_G = \xi/N$), *versus* a variável R . De forma semelhante Mandolini (2012) plota os gráficos de $R_{G,máx}$ (relação entre o coeficiente de efeito de grupo $\xi_{máx}$ e o número N de estacas $R_{G,máx} = \xi_{máx}/N$) *versus* a variável R .

Como as três variáveis R_G , $R_{G,máx}$ e R dependem de N , elas não são estatisticamente consideradas como variáveis dependentes e podem ser escritas uma em função das outras. Como demonstrado pelas Equações 90 a 91 ao se isolar o valor de N e posteriormente igualar as equações resultantes.

$$R_G = \frac{\xi}{N} \quad (90)$$

$$R_{G,máx} = \frac{\xi_{Máx}}{N} \quad (91)$$

$$R = \sqrt{\frac{N.e}{L}} \quad (92)$$

$$N = \frac{\xi}{R_G} \quad \therefore \quad N = \frac{\xi_{Máx}}{R_{G,máx}} \quad \therefore \quad N = \frac{R^2.L}{e} \quad (93)$$

Onde: R_G = relação entre o coeficiente de Efeito de Grupo ξ e o número de estacas N , que assume o valor máximo $R_{G,máx}$, quando $\xi_{máx}$; L = Comprimento; e = espaçamento; A relação L/e é chamada de comprimento relativo.

Igualando-se as equações resultantes se obtém as equações 94 e 95, ou de forma geral 96 e 97.

$$R_G = \xi \frac{e}{L} R^{-2} \quad (94)$$

$$R_{G,máx} = \xi_{Máx} \frac{e}{L} R^{-2} \quad (95)$$

$$R_G = a_0 R^{a_1} \quad (96)$$

$$R_{G,máx} = a_2 R^{a_3} \quad (97)$$

Onde a_0 , a_1 , a_2 , e a_3 são coeficientes.

Os parâmetros a_0 e a_2 dependem do efeito de grupo, e do comprimento relativo L/e . Já os expoentes a_1 e a_3 deveriam ser iguais a -2 , para um ajuste teórico perfeito onde a amostra de dados apresenta os mesmos efeitos de grupo e comprimentos relativos. Como essas situações não são constantes nas massas de dados analisados, os coeficientes a_0 , a_1 , a_2 e a_3 são obtidos a partir da regressão linear do tipo potência. Para os dados de Mandolini (2012), a_0 assume o valor de $0,29$, e a_1 o valor de $-1,35$.

Logo para construção desse gráfico é necessário que se conheçam os valores dos efeitos de grupo. Para o presente trabalho foram calculados os coeficientes de efeitos de grupo para os casos 6 e 9, (residencial no Parnamirim e Tanques de Suape). Para obter o efeito de grupo máximo foi utilizada a equação 98 que já havia sido apresentada na metodologia, e aqui é lembrada.

$$\lambda = \frac{\xi - 1}{(\xi_{M\acute{a}x} - \xi) \cdot N} \quad (98)$$

Onde: λ = rigidez relativa Estaca-placa; ξ = Efeito de grupo; $\xi_{\text{máx}}$ = Efeito de grupo máximo.

Uma vez que os valores de ξ e de λ já são conhecidos a partir dos métodos que já foram apresentados durante os itens anteriores, foi possível se obter o valor de $\xi_{\text{máx}}$ bem como de R_G e $R_{G,\text{máx}}$.

A partir desses resultados foram plotados os gráficos de R_G e $R_{G,\text{máx}}$ em função de R , e obtidas as curvas de regressão de potência, conforme Figuras 150 e 151. A Tabela 43 compara as Equações obtidas com as de Mandolini (2012).

Por fim, a partir dos resultados obtidos, foram calculados os valores de Rigidez relativa estaca-placa, a partir das Equações R_G e $R_{G,\text{máx}}$, e comparadas com as obtidas pelas equações de Mandolini (2012). Todos os valores obtidos para esses casos são apresentados por meio do Quadro da Figura 149.

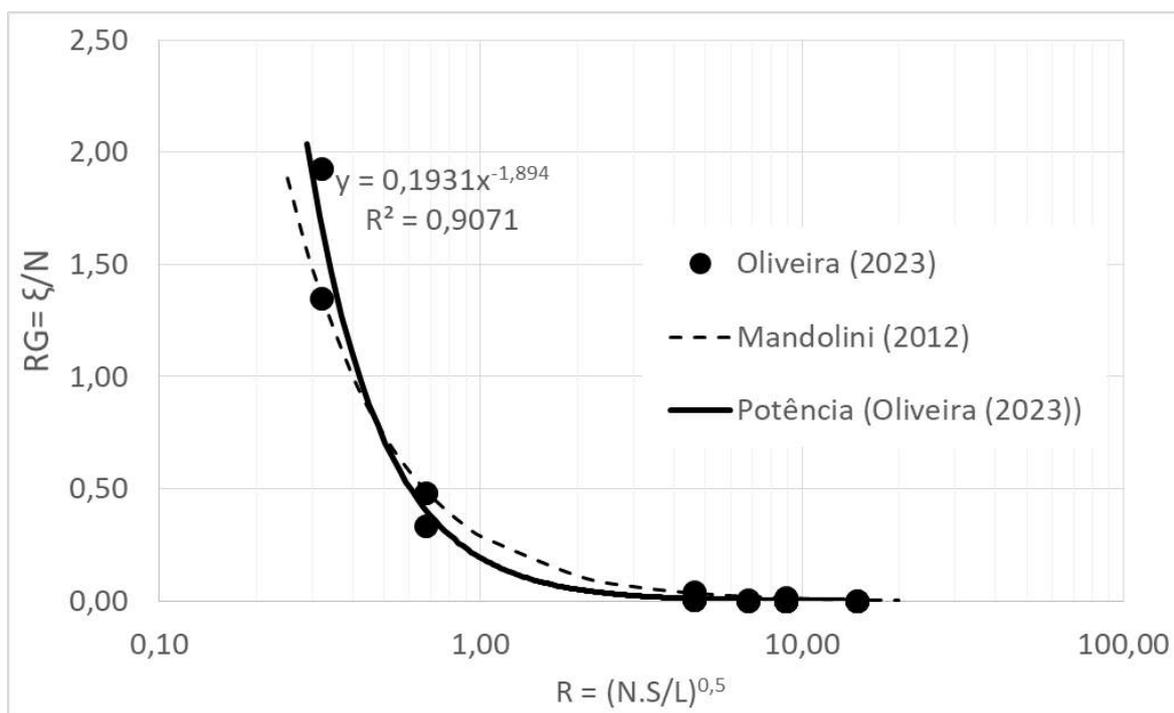
Figura 149 – Resumo dos resultados – Efeito de Grupo

CASO	N	L/e	R	λ	ξ	R_G	$\xi_{\text{máx}}$	$R_{G,\text{máx}}$	λ OLIVEIRA	λ MANDOLINI
1	1	9,86	0,32	4,26	1,35	1,35	1,43	1,432	5,833	0,194
1	4	8,75	0,68	4,26	1,35	0,34	1,37	0,343	1,78	0,099
1	1	9,86	0,32	3,34	1,93	1,93	2,21	2,208	5,833	0,194
1	4	8,75	0,68	3,34	1,93	0,48	2,00	0,500	1,78	0,099
9	293	6,35	6,79	0,46	1,00	0,00	1,00	0,003	0,182	0,00136
9	293	6,35	6,79	0,35	1,00	0,00	1,00	0,003	0,182	0,00136
9	293	6,35	6,79	0,35	1,67	0,01	1,68	0,006	0,182	0,00136
9	500	6,36	8,86	0,63	1,00	0,00	1,00	0,002	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,44	4,24	0,01	4,25	0,009	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,61	1,00	0,00	1,00	0,002	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,33	1,14	0,00	1,14	0,002	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,32	8,31	0,02	8,36	0,017	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,41	1,05	0,00	1,05	0,002	0,766	0,00619
9	1410	6,43	14,81	0,28	1,33	0,00	1,33	0,001	-*	-*
9	1410	6,43	14,81	0,20	1,00	0,00	1,00	0,001	-*	-*
9	1410	6,43	14,81	0,29	2,06	0,00	2,06	0,001	-*	-*
9	1410	6,43	14,81	0,27	1,48	0,00	1,48	0,001	-*	-*
9	500	6,36	8,86	0,46	1,00	0,00	1,00	0,002	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,45	4,83	0,01	4,84	0,010	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,56	1,00	0,00	1,00	0,002	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,41	1,00	0,00	1,00	0,002	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,32	1,12	0,00	1,12	0,002	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,11	1,00	0,00	1,00	0,002	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,24	2,69	0,01	2,71	0,005	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,26	1,49	0,00	1,50	0,003	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,46	1,00	0,00	1,00	0,002	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,43	5,90	0,01	5,92	0,012	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,35	1,37	0,00	1,38	0,003	0,766	0,00619
9	500	6,36	8,86	0,40	1,10	0,00	1,10	0,002	0,766	0,00619
9	137	6,42	4,62	0,48	1,00	0,01	1,00	0,007	0,161	0,002701
9	137	6,42	4,62	0,42	5,76	0,04	5,85	0,043	0,161	0,002701
9	137	6,42	4,62	0,40	1,48	0,01	1,49	0,011	0,161	0,002701
9	137	6,42	4,62	0,54	1,00	0,01	1,00	0,007	0,161	0,002701
9	137	6,42	4,62	0,40	1,50	0,01	1,51	0,011	0,161	0,002701
9	137	6,42	4,62	0,47	1,00	0,01	1,00	0,007	0,161	0,002701

N = Número de estacas; L/e = comprimento relativo; R = Razão de proporção; λ = rigidez relativa estaca-placa; ξ = Coeficiente de efeito de grupo; R_G relação entre o coeficiente de Efeito de Grupo ξ e o número de estacas N * Não foram retornados valores reais.

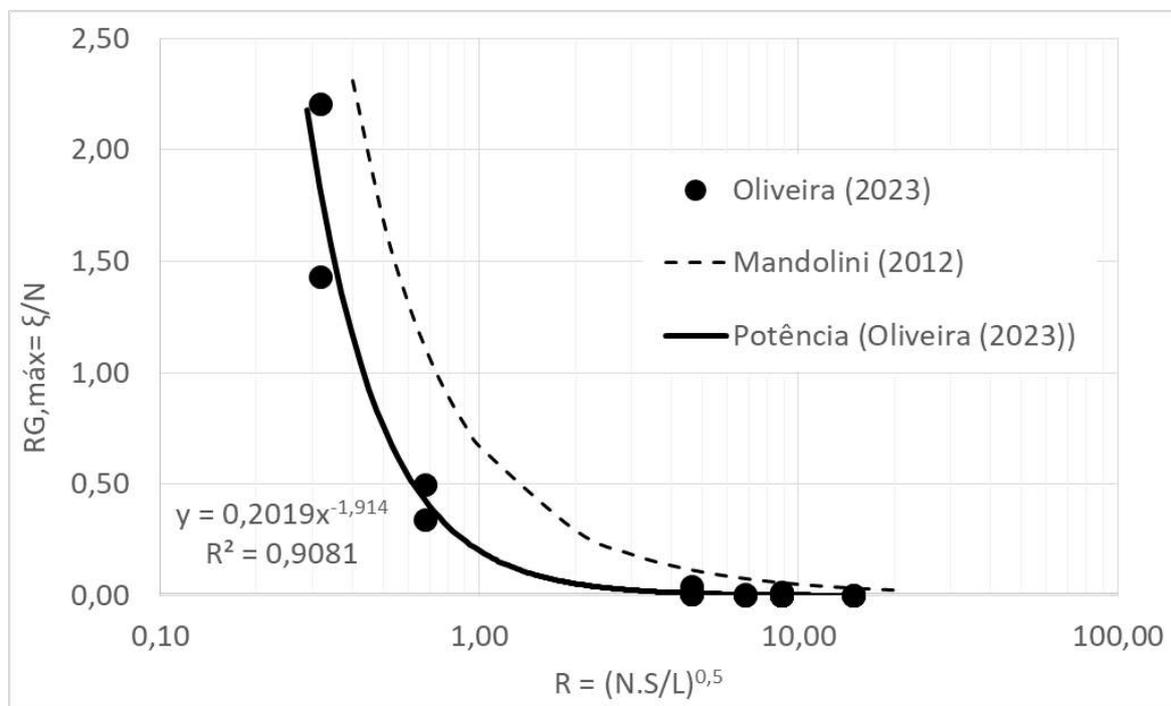
Fonte: Autoria Própria

Figura 150 – RG versus R – dados de casos de compactação



Fonte: Autoria Própria, adaptado de Mandolini (2012)

Figura 151 – RG,Máx versus R – dados de casos de compactação



Fonte: Autoria Própria, adaptado de Mandolini (2012)

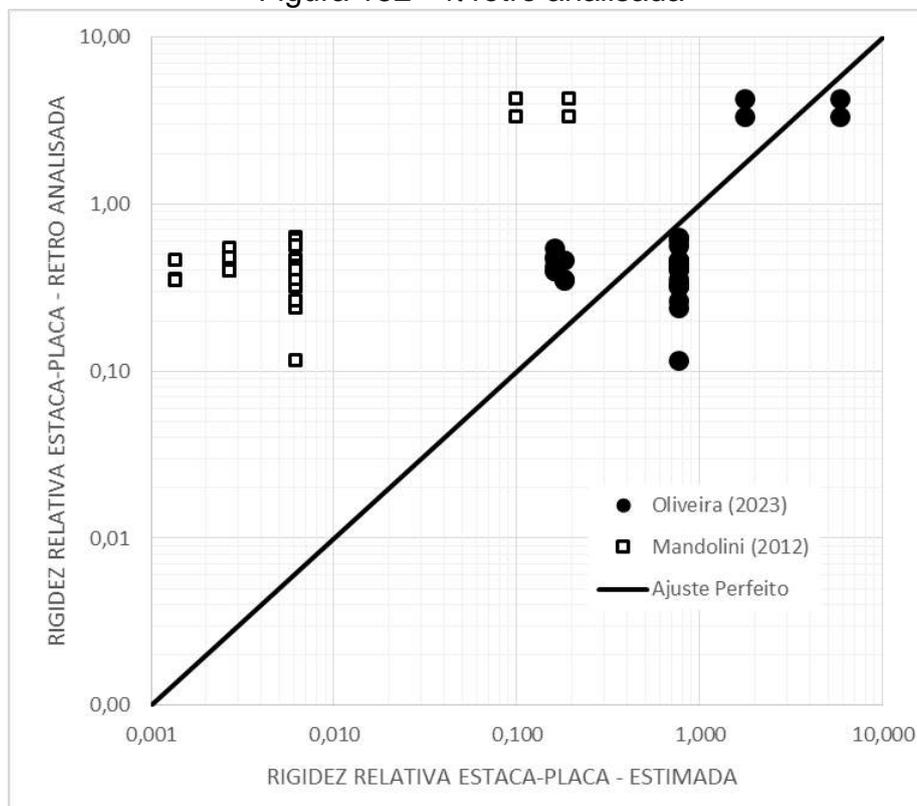
Tabela 43 – Equações obtidas.

Fonte	Parâmetro	Equação
Mandolini (2012)	RG	$RG = 0,29.R^{-1,35}$
Oliveira (2023)	RG	$RG = 0,19.R^{-1,89}$
Mandolini (2012)	RG,Máx	$RG,Máx = 0,5.R^{-1}+0,17.R^{-2}$
Oliveira (2023)	RG,Máx	$RG,Máx = 0,20.R^{-1,91}$

Legenda: RG = relação entre o coeficiente de Efeito de Grupo ξ e o número de estacas N, que assume o valor máximo RG,máx, quando ξ máx; $R = (N.e/L)^{0,5}$; N = número de estacas; e = espaçamento entre estacas; L = comprimento das estacas.

Fonte: Autoria Própria

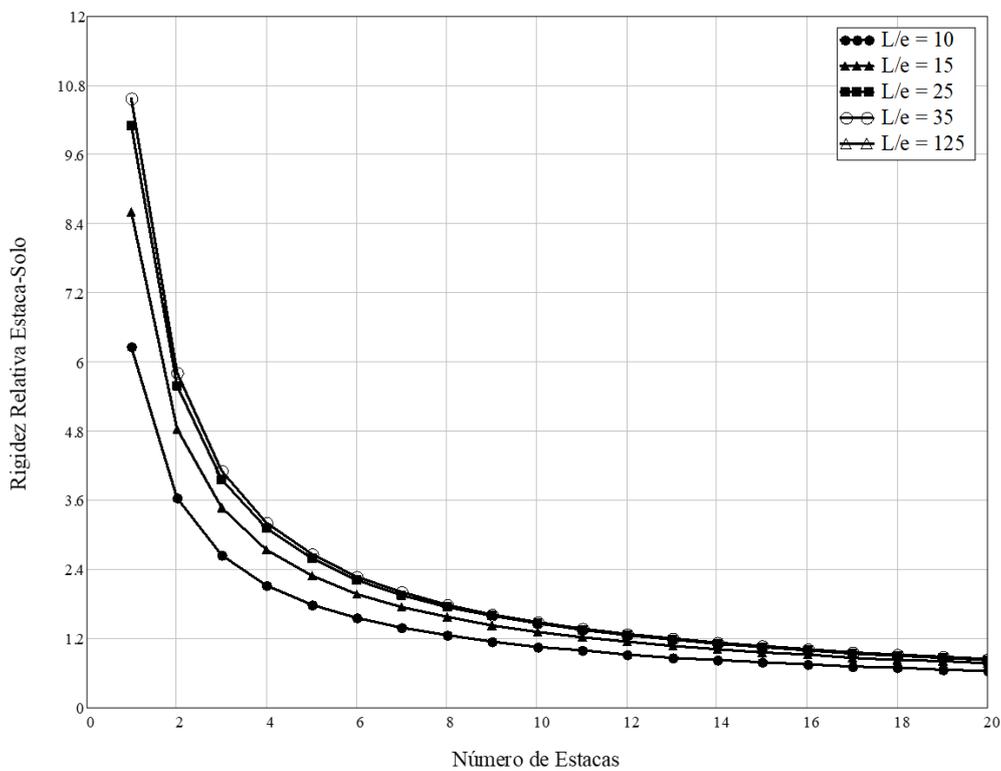
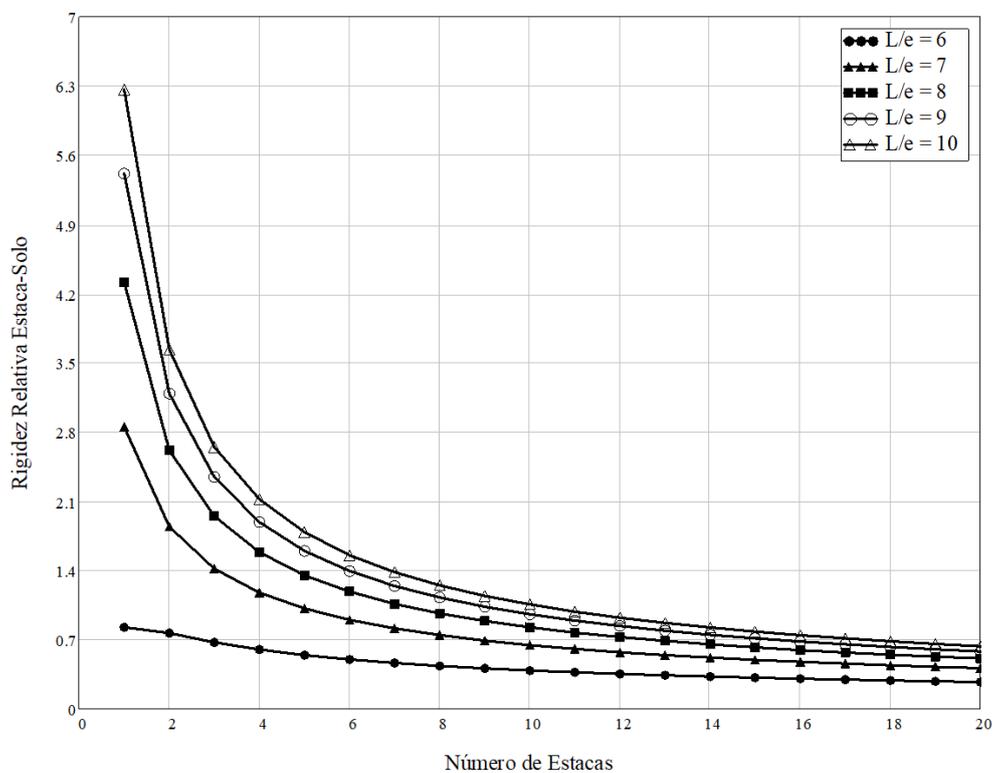
Para se obter os coeficientes de efeito de grupo, e efeito de grupo máximo, basta se dividir RG e RG,Máx por N. A partir dos resultados retro analisados de λ é possível observar que as equações propostas obtidas são mais assertivas para estimativa do valor da rigidez relativa estaca-placa do que as Equações de Mandolini (2012), conforme apresentado por meio da Figura 152. Dessa forma, o presente trabalho atinge o objetivo de a partir da configuração geométrica do estaqueamento estimar o valor de λ , e logo em seguida calcular o valor do recalque para situação de $N=0$ (S_0). Com esses dois dados pode-se construir a curva de recalque *versus* o número de estacas para o sistema de fundações.

Figura 152 – λ retro analisada

Fonte: Autoria Própria

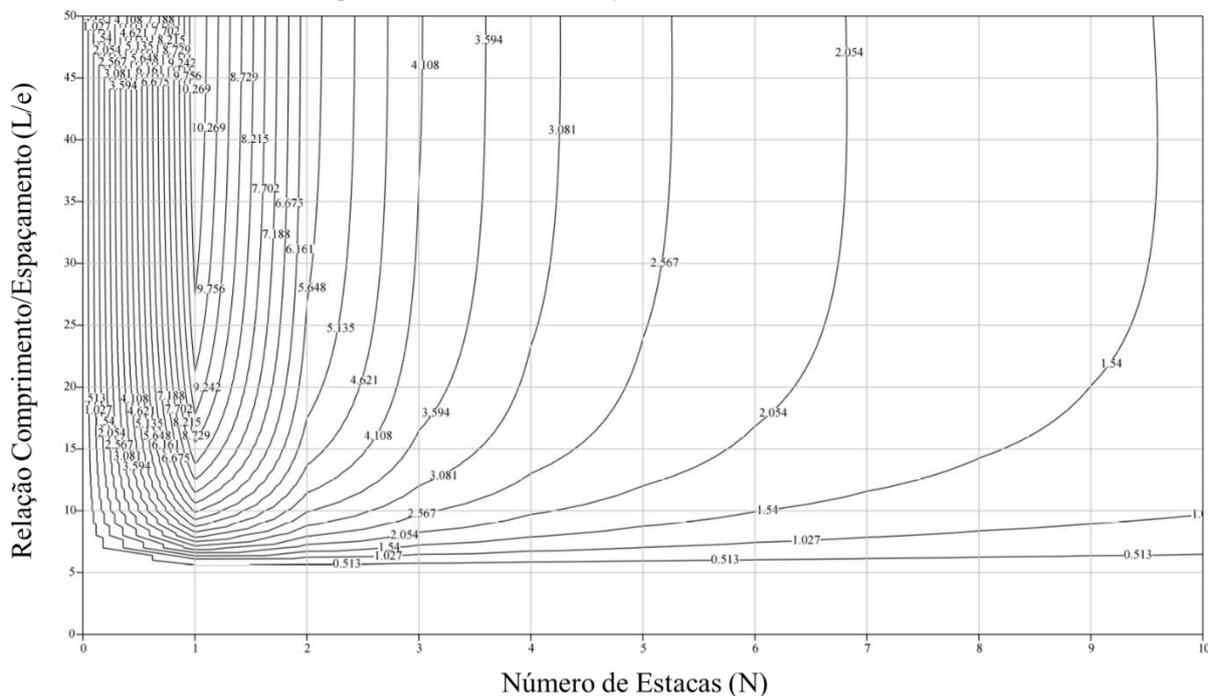
Como forma de simplificar a estimativa do valor da rigidez relativa estaca-placa a partir das equações encontradas, foram plotados os ábacos das Figuras 154 e 155, e a superfície de estado da Figura 156.

Figura 153 – Ábacos para estimativa de λ



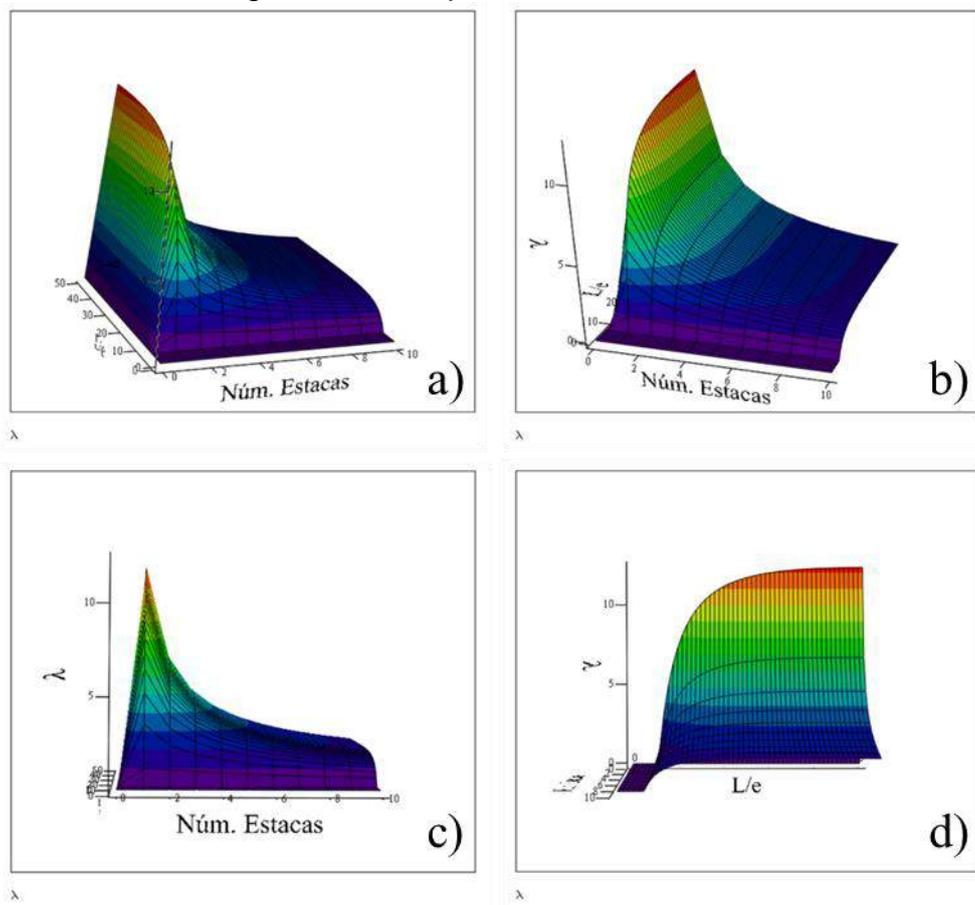
Fonte: Autoria Própria

Figura 154 – Ábacos para estimativa de λ



Fonte: Autoria Própria

Figura 155 – Superfície de Estado de λ



Fonte: Autoria Própria

6. CONCLUSÕES

- Foi observada tendência de crescimento do número de publicações nos últimos anos acerca do tema nos últimos anos com aceleração para os anos da pandemia sanitária. Com citações mais recorrentes a artigos desenvolvidos entre os anos de 2001 a 2005. Onde as principais escolas do conhecimento estão sediadas na Austrália, na Itália, na China e na Alemanha;
- Para o banco de dados de fundações internacionais a espessura do radier pode ser correlacionada com a altura da edificação. Variando entre valores de 1 a 2,5% da altura (H). A experiência de Recife e sua região metropolitana (RMR) mostrou valores dentro dessa faixa com espessuras da ordem de 2,5% da altura da edificação;
- Apresenta-se o desenvolvimento analítico-matemático para a proposta de metodologia, tendo como base a Rigidez Relativa Estaca-Placa (λ). Foi possível encontrar uma equação que correlacione os recalques com a variação da demanda por estacas (N);
- Para Eficiências superiores a 10, os erros esperados são inferiores a 10%. Deve-se manter atenção para a ocasião em que as áreas forem importantes para o sistema e, ao mesmo tempo, a rigidez estaca-solo obtida apresentar valor próximo a razão de áreas ($\lambda \sim \rho$);
- Encontra-se a relação entre o efeito de grupo e o efeito de grupo máximo, sendo essa correlação realizada por meio das parcelas de cargas que vão para ao solo e para as estacas. É demonstrado que o efeito de grupo atua apenas na parcela de carga que é decomposta para as estacas, diminuindo a rigidez das mesmas. Sugere-se que em trabalhos futuros esse assunto seja aprofundado. Tanto avaliando a validade desse postulado, quanto a intensidade da proposição;
- Em modelagem numérica no software de elementos finitos ELPLA, é possível confirmar o comportamento de redução de recalques com o aumento do número de estacas N, e o conseqüente aumento do Fator de Melhoramento. A rigidez relativa estaca-placa obtida varia entre 0,0235 e 0,0265, e o coeficiente de correlação varia entre 0,96 a 0,98. Confirma-se que a rigidez relativa estaca-placa praticamente não é influenciada pela diminuição do espaçamento médio, à medida que são incorporadas estacas ao sistema de fundações Fato que confirma a

hipótese analiticamente demonstrada que para sistemas com Eficiência E elevada, a não consideração das áreas conduz a erros diminutos. Também é avaliada a influência do carregamento sobre o valor da rigidez relativa estaca-placa. Verificou-se que com um aumento de mais de 10x no carregamento, houve um aumento de 12,7% de λ ;

- O trabalho avalia 159 obras em busca de encontrar conjunto de dados em que a metodologia seja aplicável.
- 6 casos de obras são selecionados, juntamente com 2 estudos realizados no campus experimental da UNB e mais um inédito, totalizando 9 casos;
- Para todos os casos estudados observa-se que a metodologia se mostra aderente aos resultados de recalques medidos, com índice de correlação R^2 sempre superior a 0,9;
- De forma geral é encontrada para a rigidez relativa estaca-placa uma variação entre 0,005 a 4,29. Apenas 2 casos dos 9, apresentam valores superiores a unidade (onde a rigidez da estaca isolada é superior a rigidez do solo sob a placa);
- Os recalques estimados a partir da metodologia apresentam erros médios de 22% em relação aos recalques reais;
- Para todos os resultados, verifica-se correlação dos valores de λ com os valores L/e (comprimento relativo), com R^2 superior a 0,96;
- Realiza-se uma proposta de modificação do método de Mandolini (2012) para estimativa do coeficiente de efeito de grupo. A proposta se baseia em parâmetros geométricos do estaqueamento como comprimento e espaçamento e encontrou forte aderência aos dados com $R^2 > 0,90$; A partir da modificação do método de Mandolini (2012) estimam-se os valores de λ com maior acurácia para a massa de dados de recalques de sistemas de fundações realizados com colunas de melhoramento; São construídos ábacos para facilitar o manejo da equação de estimativa de λ a partir do método modificado de Mandolini (2012);

Dessa forma demonstra-se que é possível estimar os recalques médios de uma fundação em radier estaqueado a partir de equação analítica, ao se levar em consideração aspectos geométricos da fundação, com alta aderência e com o erro médio aceitável para os padrões de estimativas geotécnicas. Assim validando a hipótese do trabalho.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De maneira geral, o trabalho se ocupa em desenvolver um método. Ou um conjunto de métodos. Com a finalidade de contribuir para o entendimento do fenômeno físico de carregamento e deformação de fundações em radier. A ênfase principal do trabalho orbita acerca das fundações realizadas por meio de colunas de compactação (embora tenha versado sobre estacas de outras naturezas, o núcleo do trabalho fala sobre melhoramento de solos). Então as sugestões para trabalhos futuros consistem basicamente em confirmar as premissas admitidas para os métodos apresentados, bem como verificação dos limites da aplicação do mesmo para outros contextos geotécnicos e estruturais.

Como o foco principal do trabalho consiste em colunas de compactação, região diretamente associada aos recalques das edificações analisadas ficam restritas a camadas superficiais que para o trabalho não eram muito superiores a 7,00 m, reduzindo as diferenças entre os efeitos de forma dos ensaios de placa e das estruturas. Para configurações diferentes o contexto geológico-geotécnico deve ser levado em consideração para aplicação dos métodos. Portanto, sugere-se que em trabalhos futuros sejam analisadas ora por outros casos ora por modelagens numéricas, quais os limites da representatividade dos ensaios de placa servindo-se como protótipos das edificações reais.

Uma propriedade derivada da formulação é que o efeito de grupo atua apenas na parcela de carga que é decomposta para as estacas, diminuindo a rigidez das mesmas. Sugere-se que em trabalhos futuros esse assunto seja aprofundado. Tanto avaliando a validade desse postulado, quanto a intensidade da proposição.

Ainda sugere-se que outras edificações sejam acompanhadas e avaliadas à luz do Método D, para prosseguimento das considerações realizadas e delineamento do campo de aplicações desse procedimento.

Um outro aspecto de sugestão consiste na verificação da aplicação dos métodos para sistemas não lineares, a partir da utilização das diferenças finitas a Montante e Centradas, a fim de verificar se grandes discrepâncias são encontradas.

REFERÊNCIAS

ABNT (2022). Projeto e execução de fundações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6122, Rio de Janeiro.

AKL, MANSOUR e MOUSTAFA (2014), Effect of changing configurations and lengths of piles on piled raft foundation behaviour. Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CiVEJ) Vol.1, No.1, June 2014.

ALLEVI, FERRERO, MUSSI, PERSIO e PETRELLA (2013). Structural and geotechnical design of a piled raft for a tall building founded on granular soil. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.

ALMEIDA et al (2020). Análise de Efeito de Grupo em Edifícios com Fundação Profunda na Região Metropolitana de Recife/PE, XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

AMORIM (2019), Proposta De Modelo De Transferência De Carga De Fundação Superficial Em Terreno Melhorado Com Estacas De Compactação. Dissertação de Mestrado, Universidade de Pernambuco, 2019.

BADELOU e POULOS (2016), Geotechnical foundation design for some of the world's tallest buildings, Japanese Geotechnical Society Special Publication, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

BALAAM e BOOKER (1984), Analysis Of Rigid Rafts Supported By Granular Piles, international journal for numerical and analytical methods in geomechanics. VOL 5. 379403 (1981).

BALAKUMAR; HUANG; OH; JAYASIRI; HWANG; BALASUBRAMANIAM (2021). Piled Raft on Sandy Soil - An Observational Study. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS e AGSSEA Vol. 52 No. 3 September 2021 ISSN 0046-5828.

BICUDO, I (2009). Os elementos/Euclides; tradução e introdução de Irineu Bicudo – São Paulo: Editora UNESP, 2009. 600p.: il.

BOUROTTE (2022), Areias: Amostras de Sedimentos (Areias). Seção Técnica de Informática - IGc/USP, disponível através do endereço: <https://areias.igc.usp.br/>, acessado em 02/12/2022.

CBTUH (2022), CTBUH Height Criteria for Measuring e Defining Tall Buildings, 2022. Acesso em 14.09.2022.

CHAMECKI, S (1958), Uma síntese da Reologia. Anais do II C.B.M.S. Recife, 1958.

CIORTAN e MANEA (2017), Foundation solutions for cereal silos in Romania. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017.

CLANCY e RANDOLPH (1993), An approximate analysis procedure for piled raft foundations. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 1993.

COLEMAN (2005), Clearwater local scour at complex piers. Journal of Hydraulic Engineering.

COSTA et al (2019), Análise de Banco de Dados de Fundações em Radier Estaqueado Na Região Metropolitana do Recife, SEFE 2019, SÃO PAULO, BRASIL, ABEF.

COSTA NUNES (1948). Foundation of tank O.C.B.-9 at Alemôa Santos - Brazil. 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Rotterdam) – 1948.

CPRM (1999), Carta Geotécnica e de susceptibilidade a processos geológicos do município de Ipojuca/Pernambuco. SÉRIE CARTAS TEMÁTICAS – VOLUME 02, RECIFE, 1999.

CPRM (2012), Projeto insumos minerais para a construção civil na região metropolitana do Recife. INFORME DE RECURSOS MINERAIS, Série Rochas e Minerais Industriais, nº 09, Recife, 2012.

ESLAMI, VEISKARAMI, ESLAMI (2011), Study on optimized piled-raft foundations (PRF) performance with connected and non-connected piles- three case histories. International Journal of Civil Engineering, Vol. 10, No. 2, June 2012.

FLEMING, W G. K.; WELTMAN, A. J.; RANDOLPH, M. E; ELSON, W. K (1985). Piling Engineering. Glasgow: Surrey University Press, 1985.

GALVÃO (2018), DINÂMICA DAS CORRENTES DE RETORNO DA PRAIA DO CUPE, LITORAL SUL DO ESTADO DE PERNAMBUCO.

GEFFEN e BIRNBAUM (2006). Raft and piles foundation of a silo. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

GENDY, (2007), Formulation of a composed coefficient technique for analyzing large piled raft. <https://www.researchgate.net/publication/273454586>, acessado em 11/01/2023

GUSMÃO (2000), Medições de Recalque de um Prédio em Recife. Simpósio Interação Estrutura-Solo em Edifícios, São Carlos, CD-ROM.

HORIKOSHI, RANDOLPH (1998), A contribution to optimum design of piled rafts, *Geotechnique* 48, No. 3, 301-317.

JUSTO, JARAMILO, VÁZQUEZ, JUSTO, PÉREZ (2009). The performance of piled raft foundations. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

KATZENBACH (2016), Combined Pile-Raft Foundations (CPRF) in theory and engineering practice • Current developments. IN: Symposium: Pile design and displacements. The Hague, The Netherlands, 27th May 2016.

KATZENBACH; CHOUDCHOURY (2013), ISSMGE Combined Pile-Raft Foundation Guideline, Technische Universität Darmstadt, Institute and Laboratory of Geotechnics, Darmstadt · Germany · July 2013.

KATZENBACH, R., LEPLA, S., e CHOUDHURY, D. (2016). *Foundation Systems for High-Rise Structures* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315368870>

KATZENBACH. MOORMAN (1998), Piled Raft Foundation, Interaction between piles and raft, International Conference on Soil Structure Interaction in Urban Civil engineering, Darmstadt · Germany · Outubro de 1998.

KATZENBACH e REUL (1997), Design and performance of piled rafts, XIV, ICSMFE, Hamburgo, Alemanha.

KATZENBACH, BACHMANN, BOLED-MEKASHA, RAMM (2005), Combined pile raft foundations (cprf): an appropriate solution for the foundations of high-rise buildings. *Slovak Journal Of Civil Engineering*, Slovak University Of Technology, 2005/3 PAGES 19 – 29.

LESZCZYNSKI (2009). Barretted raft design for high-rise building applying 3D numerical tool. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.

LEUNG e R. RADHAKRISHNAN (1985), The behaviour of a pile-raft foundation in weak rock. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (San Francisco).

LEVENTIS e POEPEL (2015), Analysis and Design of the Kingdom Tower Piled Raft Foundation. Global Interchanges – Resurgence of the Skyscraper city. CBTUH 2015, New York Conference.

LETIZIA, N., IODICE, C., e MANDOLINI, A. (2018). A Local Design Method for Pile Foundations. *Advances in Civil Engineering*.

LIANG; CHEN; SHI (2003). Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load. *Computers and Geotechnics*.

MALLMANN ET AL (2014), Classificação morfodinâmica das praias arenosas de Ipojuca (Pernambuco, Brasil) através da análise semântica de imagens de satélite pancromáticas, *Pesquisas em Geociências*, 41 (2): 169-189, maio/ago. 2014 Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

MANDOLINI, A. (2012). Piled Raft Concept and Its Rational Use In Foundation Design. Keynote Lecture, 4th International Conference on Site Characterization (ISC-4) Porto de Galinhas, Brazil, 18 - 21 September 2012.

MANDOLINI et al (2013). Rational Design of Piled Raft. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013.

MANDOLINI, A. AND VIGGIANI, C. 1997. Settlement of piled foundations. *Géotechnique*, 47, No 3, 791-816

MANDOLINI; RUSSO; VIGGIANI (2005). Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnology in Harmony with the Global Environment.

MEYERHOF (1959). Meyerhof, G.G. (1959) Compaction of Sands and Bearing Capacity of Piles. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 126, 1292-1322.

MÓCZÁR, B., MAHLER, A., LÓDÖR, K., e BÁN, Z. (2016). Back analysis of settlements beneath the foundation of a sugar silo by 3D finite element method. Plaxis Bulletin, 39, 12-17.

O' BRIEN, BURLAND e CHAPMAN (2012). Rafts and piled rafts. ICE manual of geotechnical engineering: Volume II, Chapter 56.

OLIVEIRA (2018), Influência Geológico-Geotécnica Na Escolha Dos Tipos De Fundações Do Bairro De Boa Viagem / Recife E Elaboração De Banco De Dados De Medições De Recalques Em Edifícios. Dissertação de Mestrado, Universidade de Pernambuco (UPE), 2018

OLIVEIRA (2013), Análise de provas de carga e confiabilidade para edifício comercial na região metropolitana do Recife. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE.

OLIVEIRA, P. E. S, COSTA M.S., ALMEIDA A. K. L, PEREIRA A. P. G., GUSMÃO, A.D, MAIA G.B (2018). Banco de dados de provas de carga estáticas em estacas hélice na zona sul da Região Metropolitana do Recife. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, XIX COBRAMSEG, Salvador.

PACHECO (2002). Estudo De Técnicas De Melhoramento De Terrenos Superficiais Arenosos No Recife. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

PASSOS (2005), Melhoramento de Solos Arenosos com estacas de Areia e Brita. Tese de Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília (UnB).

PLACZEK e JENTZSCH (1997), Pile-raft-foundation under exceptional vertical loads - Bearing behaviour and settlements. 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Hamburg).

PLACZEK, JENTZSCH e SCHULTE (2001), A contribution to the analysis and the design concept of piled raft foundations. 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Istanbul).

POULOS (1989). Pile behaviour - theory and application. *Geotechnique* 39, No. 3, 365 – 415

POULOS (1994), An approximate numerical analysis of pile–raft interaction. *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics* Vol. 18, 73-92 (1994)

POULOS (2000). Practical design procedures for piled raft foundations, In: *Design Applications Of Raft Foundations*, Edição: Thomas Telford.

POULOS (2001). *Pile Raft Foundation: Design and Application*. *Geotechnique*.

POULOS, BUNCE (2008), Foundation Design For The Burj Dubai – The World's Tallest Building, 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August, 2008.

POULOS, BUNCE (2008)b. Foundation Design For The Burj Khalifa, Dubai – The World's Tallest Building, 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August, 2008. Presented By: Ishan S. Tamhane.

PRAKOSO E KULHAWY (2001), Contribution To Piled Raft Foundation Design, *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering* / January 2001.

PUC-Rio (2023), Simulações Em Engenharia Elétrica, Sistema Massa-Mola-Amortecedor Com Um Grau De Liberdade. Sistema Maxwell, acessado em 09.01.2023 - <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/26288/introducao.html>, Departamento de Engenharia Elétrica – DEE, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio.

RANDOLPH (1994). Design Methods For Pile Groups And Piled Rafts. XIII ICSMFE. Nova Delhi, India.

RANDOLPH (2003). Science and empiricism in pile foundation design. *Geotechnique*.

REUL (2005). Piled Raft Foundation, 2005-Bscs-Geo-Institute Recent Advances In Geotechnical Engineering Seminar.

REUL, RANDOLPH (2003). Piled rafts in overconsolidated clay: Comparison of in situ measurements and numerical analyses. *Geotechnique*

REUL, RANDOLPH (2004). Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

RUSSO et al (2012). Re-assessment of foundation settlements for the Burj Khalifa, Dubai. *Acta Geotechnica* (2013) 8:3–15, DOI 10.1007/s11440-012-0193-4.

SANCTIS e MANDOLINI (2006). Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

SANTOS et al (2020). Efeito de Grupo em Estacas do Tipo Hélice Contínua de um Edifício Instrumentado. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

SALES (2000). Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas. Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade de Brasília (UnB)

SALES et al (2015). Fundações em Solos não saturados. In: Solos Não saturados no contexto geotécnico, capítulo 24.

SKEMPTON, A. W (1953). Piles and pile foundations, Discussion. In: ICSMFE, 3, 1953, Zurich. Proceedings... Zurich, 1953. v.3, p. 172.

SMALL, POULOS (2007). A method of analysis of piled rafts. Common Ground Proceedings 10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics Brisbane.

SOUZA (2014), Utilização de Radier Estaqueado em Obras Especiais e Edifícios Altos. VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, 2014.

Tan, Y., Chow, C., e Clue, S. (2005) “A design approach for piled raft with short friction piles for low rise buildings on very soft clay.” *Geotechnical Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp 84-90.

TAN, Y., CHOW, C., e CLUE, S. (2005), A design approach for piled raft with short friction piles for low rise buildings on very soft clay. *Geotechnical Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp 84-90.

TANG e ZHAO (2014). 121-story Shanghai Center Tower foundation re-analysis using a compensated pile foundation theory. The structural design of tall and special buildings. *Struct. Design Tall Spec. Build.* 23, 854–879 (2014) DOI: 10.1002/tal

WHITAKER, H. (1957). The design of piled foundations. Oxford: Pergamon Press, 1957.

VAN DER VEEN, C. (1953). The Bearing Capacity of a Pile. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, 2: 84-90.

VARGAS, M. (1996). História da matematização da natureza. Estudos Avançados, 10(28), 249-276. Recuperado de <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/8962>

VARGAS, M. Building settlement observations in São Paulo. 1948. Proc., II ICSMFE, Rotterdam, Vol. 4, pp. 13-21.

VARGAS, M. Foundation of tall buildings on sand in São Paulo (Brazil). 1961. Proc., V ICSMFE, Paris, Vol. 1, pp. 841-843.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. (2010). Fundações. Livro. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VESIC, A. S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand, Performance of Deep Foundations, ASTM STP, n. 444, p. 171-222, 1969.

VIGGIANI, C. 1998. Pile groups and piled rafts behaviour. Proc. 3rd Int. Geot. Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, 77-94

XIAO, CHAO, ZHAO (2011), Foundation Design for the Shanghai Center Tower. Advanced Materials Research Vols 243-249 (2011) pp 2802-2810, Trans Tech Publications, Switzerland (2011).

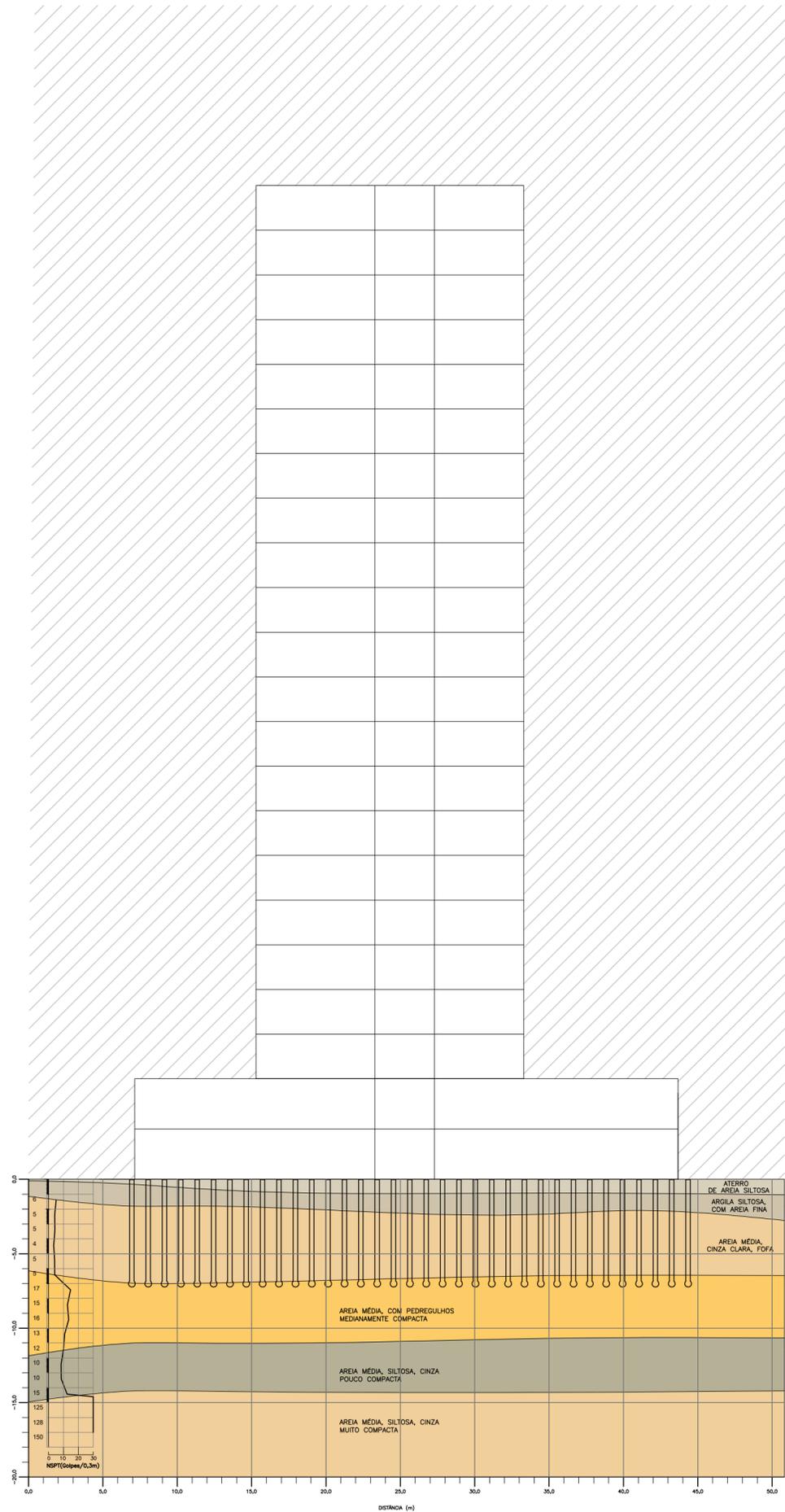
YAMASHITA, WAKAI, HAMADA (2015), Load-Settlement Behavior of Piles in Piled Raft System Based on Field Monitoring. TAKENAKA TECHNICAL RESEARCH REPORT No.71 2015.

ZEEVAERT (1957). Compensated friction-pile foundation to reduce the settlement of buildings on highly compressible volcanic clay of Mexico City. Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, London 2.

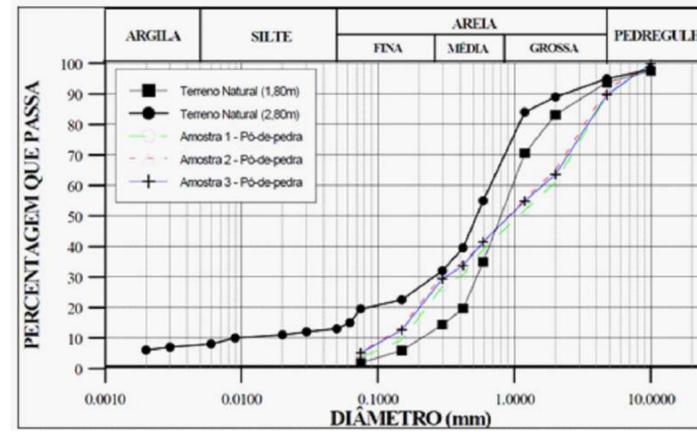
ZHAO E LIU (2017). Foundation Differential Settlement Included Time-dependent Elevation Control for Supertall Structures. International Journal of High-Rise Buildings Volume 6 Number 1CBTUH Research Paper.

APÊNDICE A – PERFIS GEOTÉCNICOS DOS CASOS LOCAIS

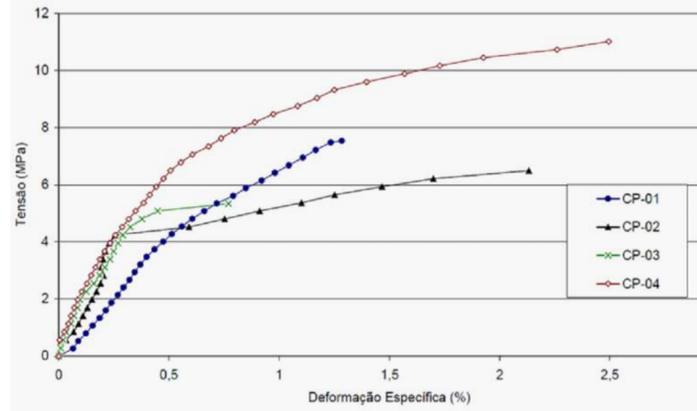
PERFIL GEOTÉCNICO, ADAPTADO DE PACHECO (2002)



GRANULOMETRIA, A PARTIR DE PACHECO (2002)



ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES NAS COLUNAS, A PARTIR DE PACHECO (2002)



EXTRAÇÃO DOS TESTEMUNHOS, A PARTIR DE PACHECO (2002)



TESTEMUNHOS, A PARTIR DE PACHECO (2002)



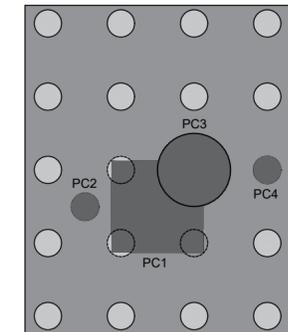
Situada no bairro do Parnamirim em Recife/PE corresponde a um edifício residencial com 20 lajes construído em estrutura aporticada de concreto armado. Atualmente o edifício apresenta tempo de utilização em torno de 20 anos (durante a realização do trabalho de Pacheco, 2002, o edifício estava em construção).

O perfil de subsolo é composto por uma camada inicial de aterro encontrada para as primeiras profundidades, seguido por camada de argila siltosa até 2,00 m de profundidade. A seguir encontra-se uma camada de areia fofa até 7,00 m. Logo em seguida é verificada uma camada de areia média com pedregulhos, medianamente compacta, até a profundidade de 11,00 m. Após a camada medianamente compacta supracitada encontra-se uma camada de areia siltosa, cinza, pouco compacta, até a profundidade de 15,00 m. Por fim encontra-se uma camada de areia muito compacta encontrada até o limite das sondagens, na profundidade de 18,00 m.

A solução de fundação para o edifício foi realizada em fundação direta, por sapatas, assentes sobre colunas de melhoria em argamassa, com traço de 1:8:4 (cimento: areia: brita), diâmetro de 300 mm, e comprimento de 7,00 m. As colunas estão diretamente apoiadas sobre a camada de areia com pedregulhos, medianamente compacta, atravessando a camada de argila siltosa e de areia fofa encontradas até os 7,00 m de profundidade.

ENSAIOS DE PLACA

SP11 - 2,90 x 3,60

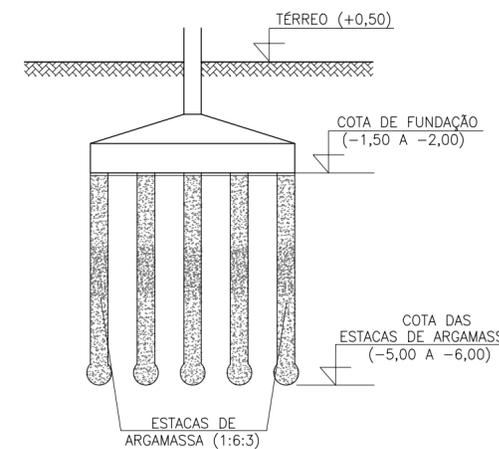
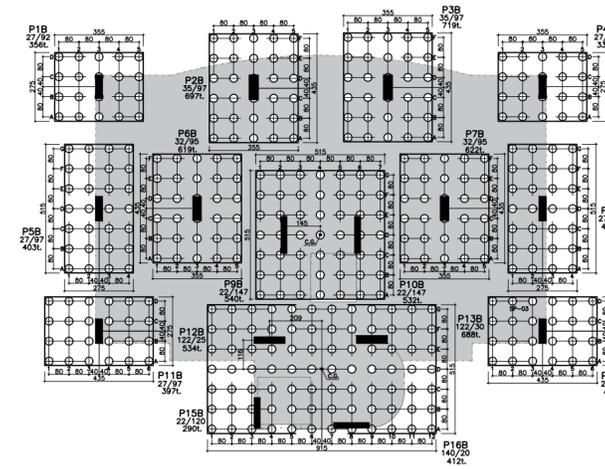


OBRA	RESIDENCIAL NO PARNAMIRIM	OBRA N°	
FINALIDADE	APÊNDICES DE TESE DE DOUTORADO	PRANCHA N°	
LOCAL	PARNAMIRIM, RECIFE, PE	REVISÃO	
PROJETO	ESTUDO DE PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA	DATA	DEZEMBRO/2022
TÍTULO	PERFIL GEOTÉCNICO E DETALHES DE PROJETO	ESCALA	SEM ESCALA
		DESENHO	PEDRO OLIVEIRA

Situada no bairro de rosarinho, Recife/PE. A edificação é composta por duas torres em estrutura apertada de concreto armado com 28 lajes.

Cada torre é composta por 16 pilares com cargas verticais variando entre 3.370 a 7.190 kN.

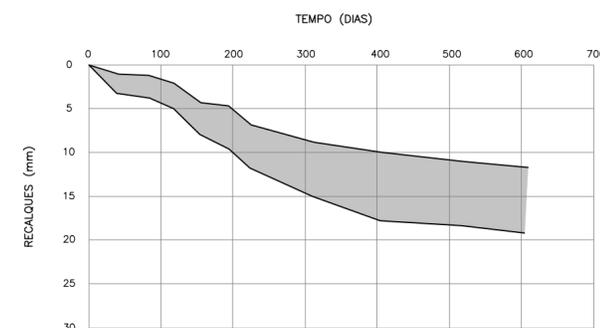
A solução de fundação foi realizada em fundação direta em sapatas assente sobre terreno melhorado com colunas de argamassa com 300 mm de diâmetro e comprimento médio de 6,00 m. São previstas 397 colunas por torre, com total de 1.045 colunas para toda a edificação. A carga total da edificação com carregamento pleno é de 80.080 kN.



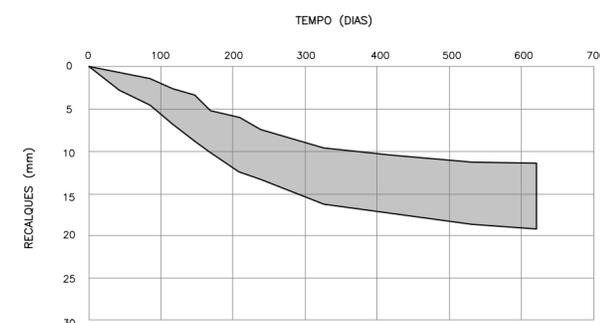
RESUMO DAS MEDIÇÕES DE RECALQUES PARA A TORRE A

Data	23/07/2011	02/09/2011	25/11/2011	27/12/2011	03/02/2012	15/03/2012	12/05/2012	09/07/2012	10/10/2012	31/01/2013	28/04/2013
Tempo	0	41	82	116	154	195	223	311	404	517	605
A1	0,00	1,45	1,42	2,05	4,34	4,76	7,00	8,95	10,31	11,04	11,46
A2	0,00	2,27	3,43	4,05	7,12	8,05	10,44	13,37	15,69	17,23	14,52
A3	0,00	2,71	2,82	4,03	6,96	8,24	10,19	13,59	15,09	16,28	17,20
A4	0,00	1,99	1,54	2,14	4,85	3,67	7,40	11,30	13,35	14,16	15,81
A5	0,00	1,74	2,50	3,44	5,55	6,26	8,39				
A6	0,00	2,33	3,19	4,78	7,49	8,50	10,87	13,96	15,76	16,76	
A7	0,00	2,38	2,92	4,37	7,50	9,35	11,26	14,77	17,01	18,08	18,80
A8	0,00	2,45	2,58	4,22	7,53	8,52	11,56	13,02	17,56	18,15	19,22
A9	0,00	2,45	2,57	3,45	7,18	8,99	10,35	14,68	16,79		
A10	0,00	2,79	2,31	3,01	5,59	5,85	9,05	11,91	14,01	14,24	17,13
A11	0,00	1,15	1,30	2,36	4,36	4,85	6,83	9,56	11,64	11,58	12,52
A12	0,00	2,27	2,69	4,32	7,32	8,24	10,48	13,61	16,00	17,18	18,52
A13	0,00	2,22	2,17	3,43	6,62	6,86	9,89	12,89	15,83	16,05	17,46
A14	0,00	2,44	2,64	3,48	5,02	5,25	7,97	10,32			
A15	0,00	2,37	1,77	2,71	5,98	5,96	8,75	11,75	14,62	14,74	15,51
Média	0,0	2,8	3,4	4,8	7,5	8,2	11,6	15,0	17,6	18,1	19,2
Desvio	0,0	0,2	0,4	0,5	0,2	0,4	0,4	0,8	1,0	1,0	1,0
Minimo	0,0	1,1	1,3	2,1	4,3	4,8	6,8	9,0	10,2	11,0	11,7

RECALQUES NO TEMPO – TORRE A



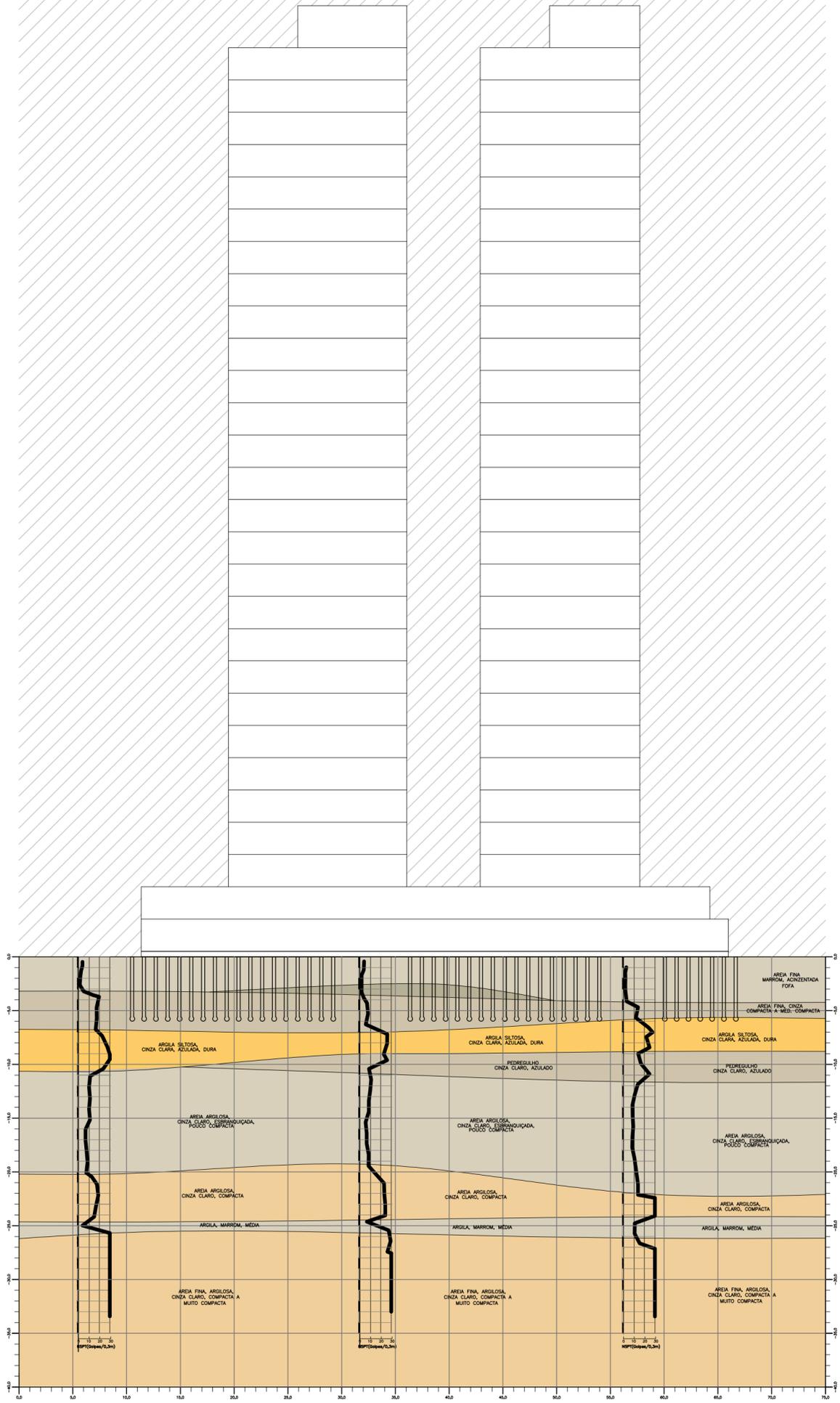
RECALQUES NO TEMPO – TORRE B

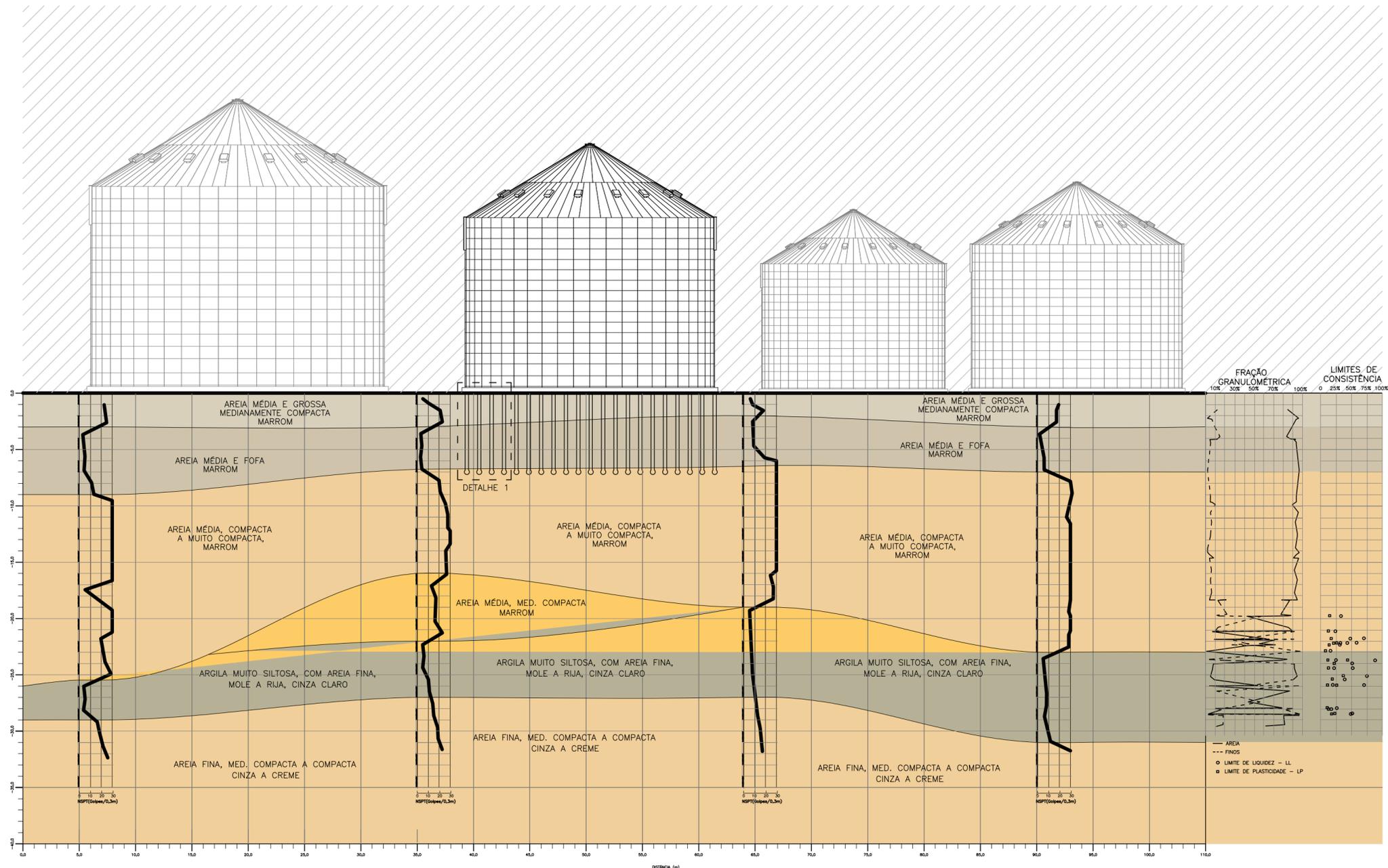


RESUMO DAS MEDIÇÕES DE RECALQUES PARA A TORRE B

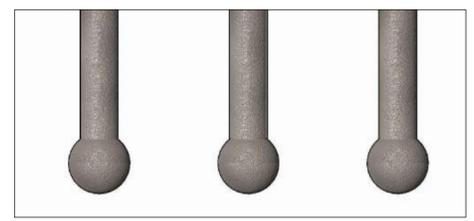
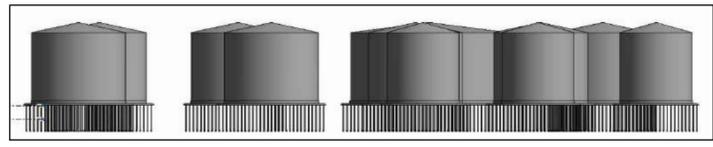
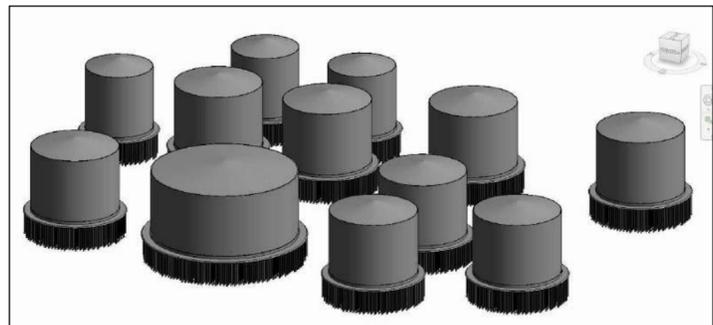
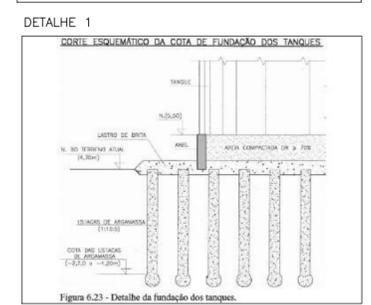
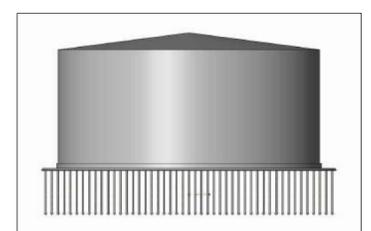
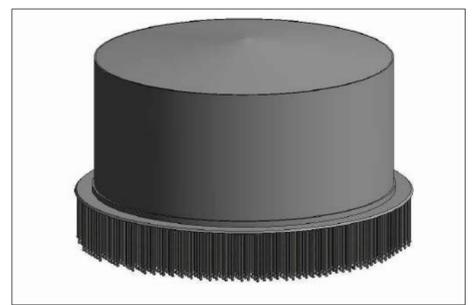
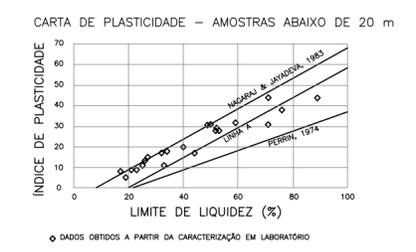
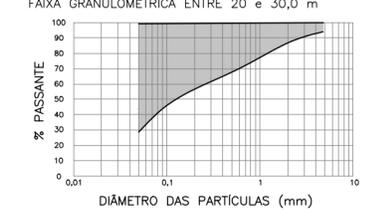
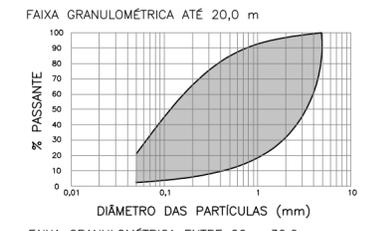
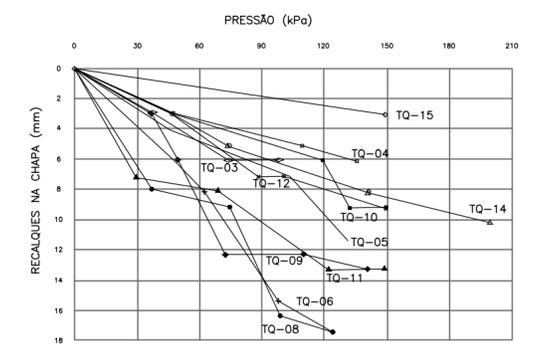
Data	09/07/2011	19/09/2011	11/11/2011	12/12/2011	11/01/2012	05/02/2012	15/03/2012	13/05/2012	09/07/2012	10/10/2012	31/01/2013	28/04/2013	25/06/2013
Tempo	0	42	84	115	143	186	209	298	325	418	521	619	748
P1	0,0	0,83	1,46	2,69	3,52	5,47	6,55	7,83	9,09	10,88	11,65	11,49	
P2	0,0	1,85	3,04	4,87	6,69	8,42	9,11	10,88	13,75	15,09	17,39	18,09	20,56
P3	0,0	1,74	3,19	5,15	6,44	8,24	9,40	11,09	13,74	15,09	17,39	18,09	20,56
P4	0,0	1,14	1,66	3,20	3,73	5,82	6,20	8,19	10,82	11,54	14,65	16,09	
P5	0,0	1,51	2,27	3,97	4,52	6,97	8,17	9,29	11,69	12,81	12,88	13,83	
P6	0,0	2,54	3,81	5,73	6,90	9,19	10,00	12,29	14,99	16,35	17,68	17,70	
P7	0,0	2,50	4,30	6,75	8,72	9,80	12,31	13,28	15,65	17,01	18,14	18,80	21,99
P8	0,0	1,83	2,14	4,45	5,00	8,91	8,11	9,86	12,15	13,05	14,50	15,40	18,78
P9	0,0	2,14	3,52	5,79	7,18	9,72	10,74	12,53	15,34	17,03	18,15	18,82	20,56
P10	0,0	2,27	4,38	6,57	7,43	9,86	10,61	12,01	15,44	17,30	18,41	19,10	20,20
P11	0,0	1,51	2,08	3,81	3,80	5,74	6,19	8,37	9,66	11,29	12,09	12,38	14,70
P12	0,0	1,82	2,63	5,94	6,16	8,69	9,89	11,80	14,57	16,11	17,24	17,97	20,11
P13	0,0	2,05	3,12	5,79	6,78	9,13	9,54	12,16	14,71	16,42	17,84	18,27	19,05
P14	0,0	1,20	2,43	3,72	4,43	6,18	6,62	8,10	11,11	12,18	13,37	14,64	17,51
P15	0,0	1,61	2,46	5,20	4,92	7,58	8,30	10,33	12,31	13,69			
P16	0,0	1,73	3,25	5,28	4,96	8,06	8,75	11,04	12,89	14,72	16,87	17,45	17,94
Média	0,0	1,76	3,03	4,90	6,78	7,94	8,78	10,65	13,69	14,54	16,25	16,57	18,28
Desvio	0,0	0,43	1,46	2,69	3,52	4,47	6,19	7,83	9,26	10,68	11,65	11,49	14,70

OBRA	RESIDENCIAL NO ROSARINHO	OBRA N°	
FINALIDADE	APÊNDICES DE TESE DE DOUTORADO	PRANCHA N°	
LOCAL	ROSARINHO, RECIFE, PE	REVISÃO	
PROJETO	ESTUDO DE PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA	DATA	DEZEMBRO/2022
TÍTULO	PERFIL GEOTÉCNICO E DETALHES DE PROJETO	ESCALA	SEM ESCALA
		DESENHO	PEDRO OLIVEIRA





TESTES DE ENCHIMENTO



OBRA	TANQUES DE SUAPE	OBRA N°	
FINALIDADE	APÊNDICES DE TESE DE DOUTORADO	PRANCHA N°	
LOCAL	SUAPE, IPOJUÇA, PE	REVISÃO	
PROJETO	ESTUDO DE PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA	DATA	DEZEMBRO/2022
TÍTULO	PERFIL GEOTÉCNICO E DETALHES DE PROJETO	ESCALA	SEM ESCALA
		DESENHO	PEDRO OLIVEIRA

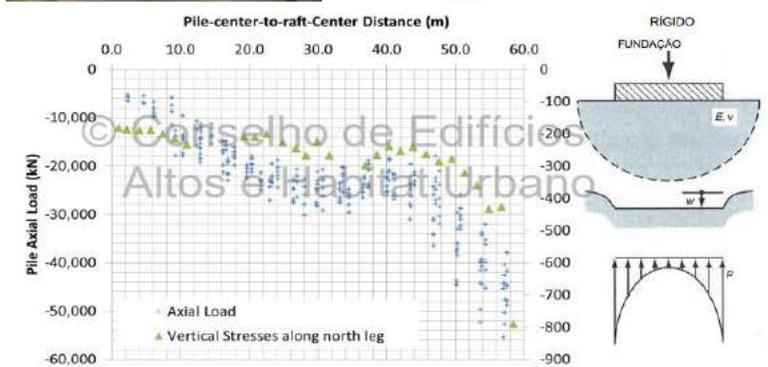
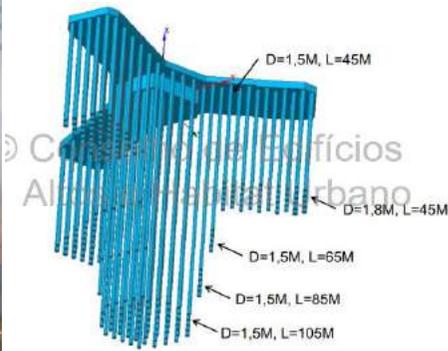
APÉNDICE B – BANCO DE DADOS DE OBRAS DE RADIER ESTAQUEADO

RESUMO DO BANCO DE DADOS DE OBRAS EM RADIER ESTAQUEADO

ÍNDICE	REFERÊNCIA	ano	LOCAL	NOME	ALTURA	ÁREA	CARGA (tf)	TENSÃO (MPa)	E. DO RADIER (m)		N. ESTACAS			ESPA. ESTA. (m)				L (m)				RECALQUES (mm)	
1	Levensis & Poeppel (2015)		ARÁBIA SAUDITA	KINGDOM TOWER	1000	3200	860000	2,69	4,5	5	270	1,5					45	65	85	105			
2	AKL, MANSOUR & MOUSTAFA (2014), R. KATZENBACH, et al (2005)	1983	ALEMANHA	MESSE-TORHAUS	130	857,5	40000		2,5	-	84	0,9		2,7	3,15	20						15	
3	R. KATZENBACH, et al (2005)		ALEMANHA	DEUTSCHE BANK	158	4800			4												10	22	
4	Poulos, 2000	1991	ALEMANHA	MESSE TURM TOWER	256	3457	188000	0,58	3	6	64	1,3		4,55	7,8	26,9	30,9	34,9			13	14,4	
5	Estemi, 2011		INDONÉSIA	-	117	4356			2	5		1		3		25	35	45	65				
6	Estemi, 2011		BABOLASAR - CASPIAN SEA	EDF. AFSOON COASTAL	36	625	5328	0,0852	0,8		42					8,5	10				2,6		
7	Yamashita et al (2015)		TOQUIO	5	36							0,6	1,2	1,2		44					2,1		
8	O' Brien et al (2012)		ALEMANHA	DG-BANK 6	208	2940			3	4,5	40			4	6	30						11	
9	Reul (2005)		ALEMANHA	AMERICAN EXPRESS 7	75	3575	72300	0,2022	2		35	0,9				20						5,5	
10	Reul (2005)		ALEMANHA	TAUNUSTOR JAPAN-CENTRE	115	1920	63000	0,3281	1	3,5	25	1,3		5,5		22						6,5	
11	Reul (2005)		ALEMANHA	FORUM - KASTOR	95	2830	75000	0,265	1	3	26	1,3				20	30					5,5	
12	Reul (2005)		ALEMANHA	CONGRESS CENTRE MESSE FRANKFURT	52	10200	144000	0,141	0,8	2,7	141	1,3				12,5	34,5				4	6	
13	Katzenbach (2017)		ALEMANHA	MAIN TOWER	199	3800	147000	0,3868	3	3,8	112	1,5				30						2,5	
14	Katzenbach (2016)		ALEMANHA	EUROTHEUM	110	1893	42500	0,2245	1	2,5	25	1,5				25	30					2,9	
15	Poulos, H. G. (2001)		ALEMANHA	WESTEND ONE	208	2940	95000	0,3322	3	4,7	40	1,3				30						12	
16	Souza (2014)	1998	KUALA LUMPUR MALÁSIA	PETRONAS TOWER	451,9				4,5			1,3		4,7		40	105						
17	Souza (2014)	2004	TAIWAN	TAIPEI INTERNATIONAL FINANCIAL CENTER	508	8526			3	4,7	380	1,5		3,96		40	60						
18	Souza (2014)	2010	DUBAI	BURJ DUBAI	828				3,7		196	1,5		3,75		50					7	7,5	
19	Souza (2014)	2012	CHINA	CHINA CENTRAL TELEVISION	234				7		1242	1,2				33							
20	ZHAO E LIU (2017) Xiao et al (2011)	2014	CHINA	SHANGHAI TOWER	632	8254	850000	1,03	6		955	1		3		82	86				9,07	11,2	
21	Micár et al (2016)	2013	Kaposvár	SILO	39		60000		0,25		376	0,8	1	1,2	1,5	2,5	14,7	12,52	14,95			4	
22	A. Mandolini (2006)		NÁPOLES	-	90		20000				637	0,6				20							
23	LEUNG & RADHAKRISHNAN (1985)		SINGAPURA	8	126				2		203												
24	Cortan & Manea (2017)		ROMÊNIA	ARMAZÉM	135		50000		1,35	1,85		0,4				12						0,59	
25	Cortan & Manea (2017)	2013	ROMÊNIA	SILOS NO PORTO	24		37800							1,6	5							0,53	
26	Cortan & Manea (2017)		ROMÊNIA	SILOS 45-40			240000		3													22	
27	TAN, CHOW & CLIFF (2005)	2002	MALÁSIA	CASAS GEMINADAS					0,15			0,15				9						0,899	1,325
28	Poulos, H. G. (2001)		JAPÃO	EDIFÍCIO 5 ANDARES	19,5	552			0,3		20	0,8	0,7	6	12	15,8						1,5	
29	Poulos, H. G. (2001)		SUÉCIA	EDF. RES. 1							211					28							
30	Poulos, H. G. (2001)		SUÉCIA	EDF. RES. 2							104					26							
31	Poulos, H. G. (2001)		BRASIL	AKASAKA		1190						0,52				12							
32	PLACZEK & JENTZSCH (1997), PLACZEK, JENTZSCH & SCHULTE (2001)	1999	ALEMANHA	USINA	135				3,5			0,5		2,25	3,5	7						4	5
33	Katzenbach (2016)	1976	ALEMANHA	MARRIOTT-HOTEL	162																		34
34	Katzenbach (2016)	1978	ALEMANHA	OLD DRESDNER BANK					3	4				5		7						20	
35	Katzenbach (2016)	2014	ALEMANHA	TAUNUSTURM	170		200000		2,8		46					25							
36	Katzenbach (2016)		UCRÂNIA	MIRAX PLAZA TOWER A	200		220000				62					33							
37	Balakumar et al (2021)		ALEMANHA	PALÁCIO DA REGÊNCIA	36				0,6		93	0,6				14						1,2	1,4
38	Reul (2005)	1997	ALEMANHA	TREPTOWERS	121	1376	63200	0,4592	2	3	54	0,9				12,5	13	14,5	16			0,73	
39	Reul (2005)		ALEMANHA	SONY CENTER	103	2600	65500	0,0252	2,5		44	1,5				15	25					0,28	
40	Reul (2005)	2006	ALEMANHA	WESTEND DUO	96		91500		1,2	1,8	26	1,2				20	25					7,2	
41	Small & Poulos (2007)		POLÓNIA	TERMINAL DE GÁS		4345	35700	0,0822	0,9		180	1	0,62			26,5						3	
42	Small & Poulos (2007)		PORTUGAL	PONTE		110					16	1,1		3		48							
43	BADELOU & POULOS (2016)		AUSTRÁLIA	INSTALAÇÃO DE IMPRESSÃO					0,8			0,9				7,5							
44	BADELOU & POULOS (2016)		CORÉIA	INCHEON TOWER					5,5		172	2,5											
45	Poulos, H. G. (2005)		DUBAI	TWIN TOWERS	355				1,5		194	1,2				40	45					13,8	9,1
46	Poulos, 2000		ALEMANHA	COMMERZBANK	300	2150	1300000	0,604651163	2,5		111	1,5	1,8			45						19	
47	Souza (2014)		BRASIL	TIKUNA'S TOWER	111,8				2		121	0,8	0,9	1		18	22	25					
48	Xiao et al (2011)		CHINA	CHANGFENG MARKET	238	2875	201250	0,7			416					72,5						6,8	5,54
49	Xiao et al (2011)		CHINA	HENGLONG PLAZA	288	3196	424500	1,3282	3,3		849					81,5						5,1	4,78
50	Xiao et al (2011)		CHINA	EDF. JINMAO	420,5	3519	300000	0,8525	4		429	0,914				83						7,2	5,91
51	Xiao et al (2011)		CHINA	SHANGAI WORLD FINANCIAL CENTER	492	6200	440000	0,7097	4,5		1177					79						9,76	8,81
52	Tang & Zhao (2014)		LONDRES	HYDE PARK CAVALRY BARRACKS	625						51	0,91		1,9		24,8						2	2,5
53	Tang & Zhao (2014)		LONDRES	EDF. EM STONEBRIDGE PARK	831				0,9		351	0,45		1,6		13							1,2
54	Tang & Zhao (2014)		CHINA	EDF. ZHANGWU	652						203	0,45		1,65	3,3	27							
55	Tang & Zhao (2014)		CHINA	EDF. DE SEGURANÇA PÚBLICA	602						108	0,5		1,63	2,23	54,6							
56	Tang & Zhao (2014)		CHINA	HUBEI FOREIGN TRADE CENTRE		1823					344	0,55		1,7	2	28							
57	Katzenbach (2016)	2003	ALEMANHA	OFFENBACH AM MAIN	120						36					25	30	35				6	
58	Reul (2005)		ALEMANHA	FORUM - POLLUX	130	1920	76000	0,3958		3	22	1,3				30						7	
59	Reul (2005)		ALEMANHA	MAIN FORUM	80	7579	84900	0,112		2,8	48	1,2				18,5	20					3,2	
60	Reul (2005)		ALEMANHA	WESTHAFEN TOWER	110	3731	49000	0,1313		4,2	32	1,5				12,5	15					3,5	
61	Reul (2005)		ALEMANHA	HAUS DER WIRTSCHAFT	68	5120	60500	0,1182		2	476	1,2				25	37,5	41					2,5
62	Justo et al (2009)		ESPAÑA	DEPÓSITO MINERAL	9,5	4050			0,8		697	0,65	0,75			16	16,5					25,7	
63	O' Brien et al (2012)			CARIGLIANO BRIDGE										3		50						5,2	
64	O' Brien et al (2012)	1984	LONDRES	QUEEN ELIZABETH II CONFERENCE CENTRE		1122			2			1,8				16						1,6	2
65	O' Brien et al (2012)		LONDRES	CANARY WHARF SOUTH		625								4		25,5						4,5	
66	GEFFEN & BIRNBAUM (2006)	1996		SILO Nº 12	40		14000		0,5	1,5	20	1,1		2,75		20	21					5,1	
67	Allievi et al (2013)		ITÁLIA	ISOZAKI TOWER	202,2	1704	135000	0,7924	2,5	3,5	62	1,5	1,2			33,2							
68	Leszczynski (2009)		POLÓNIA</																				

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

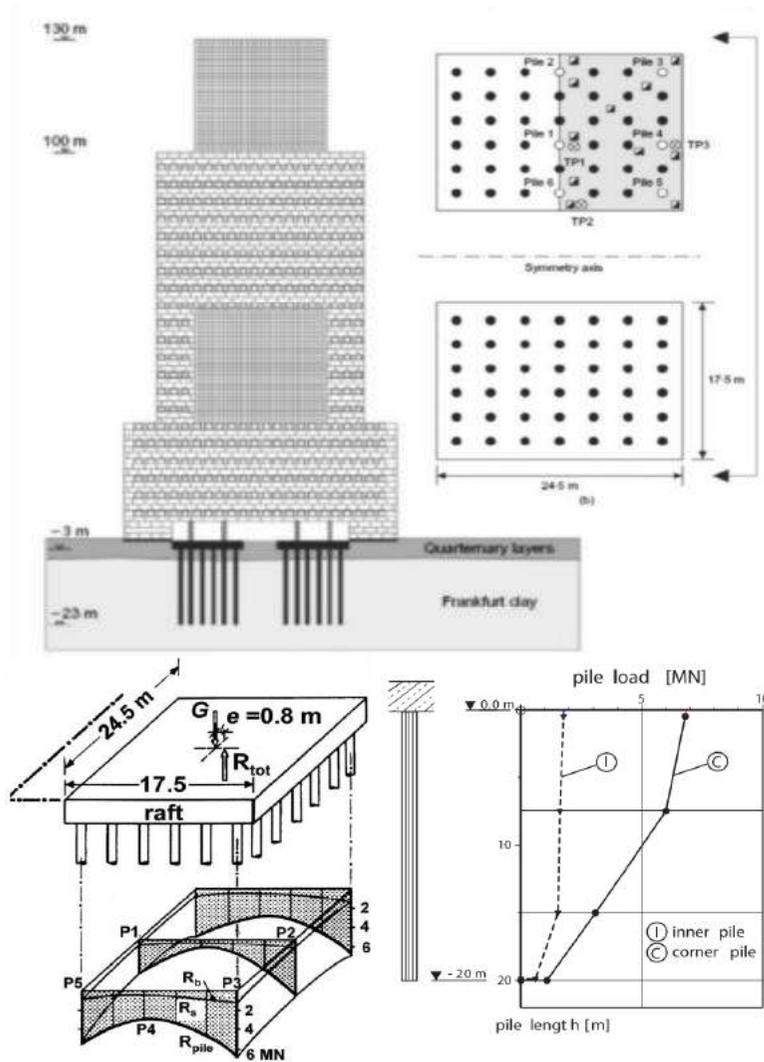


Nome	Kingdom Tower				
Ano de construção					
Local	Arábia Saudita				
Altura (m)	1000				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	3200				
Carga (kN)	Real	Estimada			
	8600000	X			
Tensão	2,69				
N de estacas	270				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	4,5	5			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,5				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	45	65	85	105	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências

Leventis & Poepel (2015)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



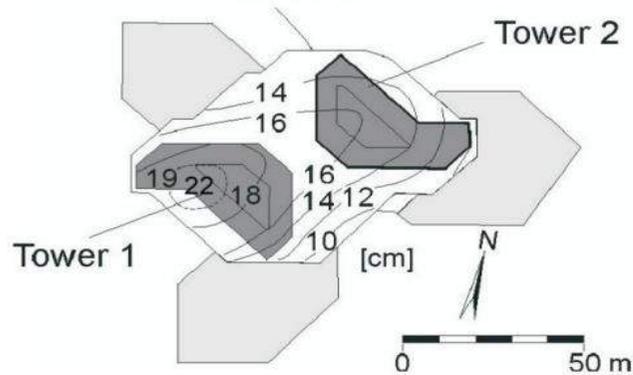
Nome	Messe-Torhaus1			
Ano de construção	1983			
Local	Frankfurt, Alemanha			
Altura (m)	130			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
	2 x 429 (858)	17,5	24,5	
Carga (kN)	Real	Estimada		
	400000	X		
Tensão				
N de estacas	2 x 42 (84)			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
		2,5		
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
		0,9		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
			2,7	3,15
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
		20		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			150	

Referências
 R. KATZENBACH, et al (2005)



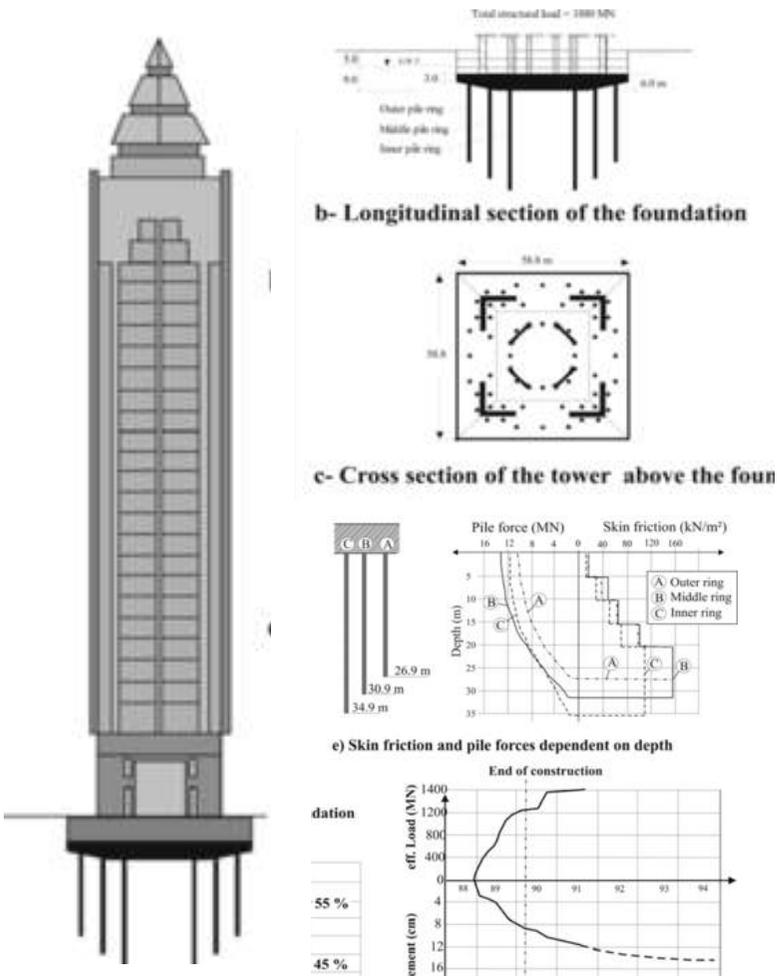
Nome	Deutsche Bank2				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	158				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
4800	80	60			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
	4				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
		16			

4 m thick raft



Referências
 R. KATZENBACH, et al (2005)

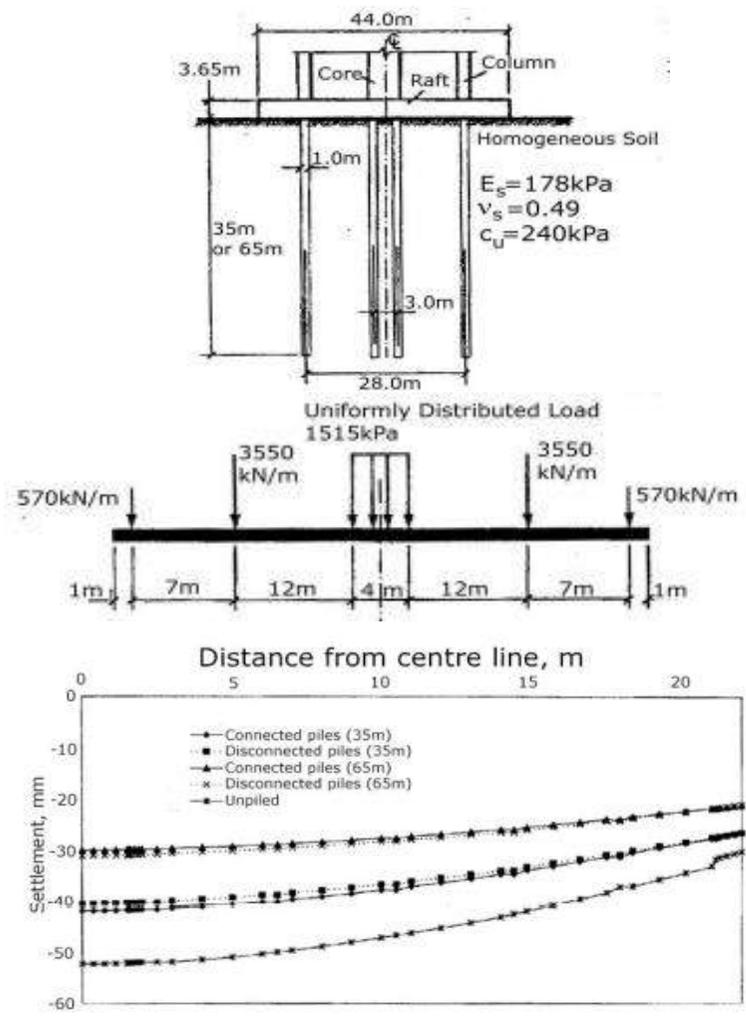
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Messe Turn Tower			
Ano de construção	1991			
Local	Frankfurt, Alemanha			
Altura (m)	256			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
3457	58,8	58,8		
Carga (kN)	Real	Estimada		
1880000 X				
Tensão	0,58			
N de estacas	64			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	3	6		
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	1,3			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
	X		4,55	7,8
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	26,9	30,9	34,9	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			144	

Referências
 Poulos, 2000 (livro)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

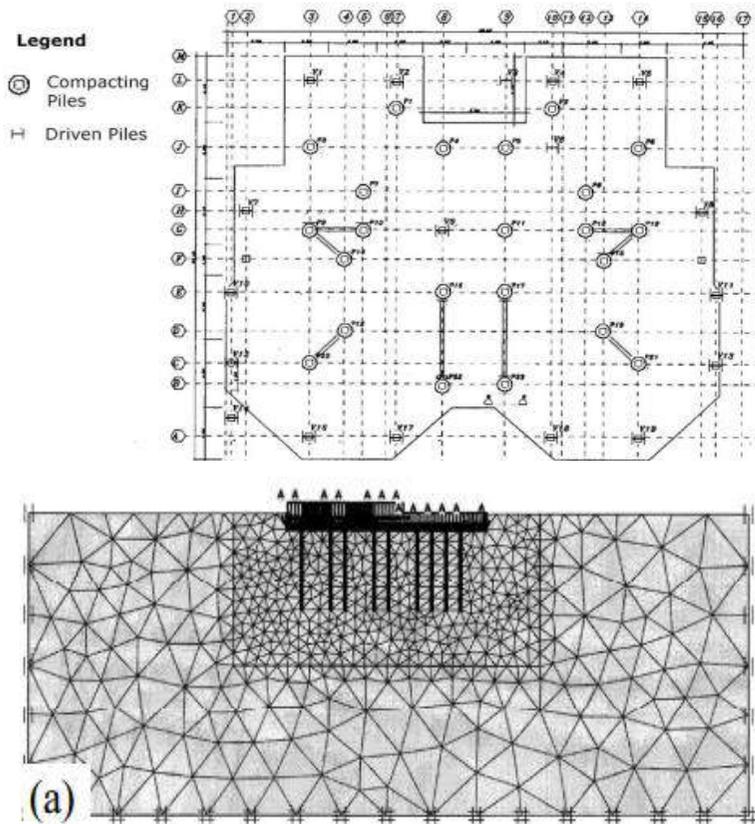


Nome	-			
Ano de construção	-			
Local	Jacarta, Indonésia			
Altura (m)	117			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
	4356	44	99	
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	2	5		
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	1			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
	X		3	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	25	35	45	65
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			15,6	

Referências
 Eslami, 2011

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

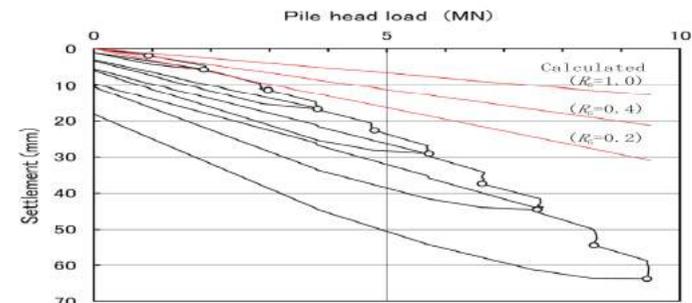
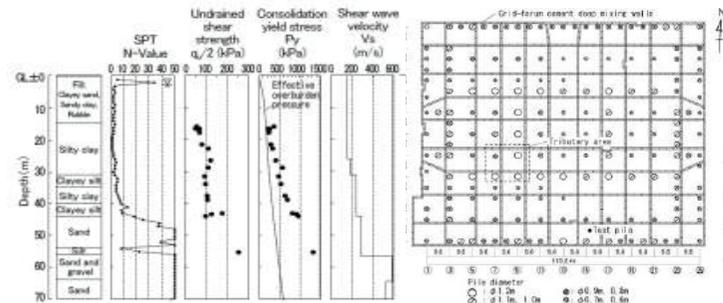
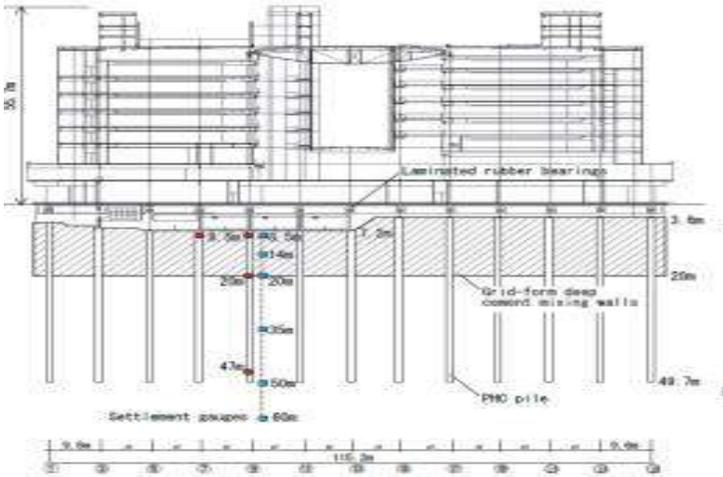
Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Edf. Afsoon Coastal				
Ano de construção					
Local	Irã				
Altura (m)	36				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	625	25			
Carga (kN)	Real	Estimada			
	53280	X			
Tensão	0,0852				
N de estacas	42				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
		0,8			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
		8,5	10		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			26		

Referências
Eslami, 2011

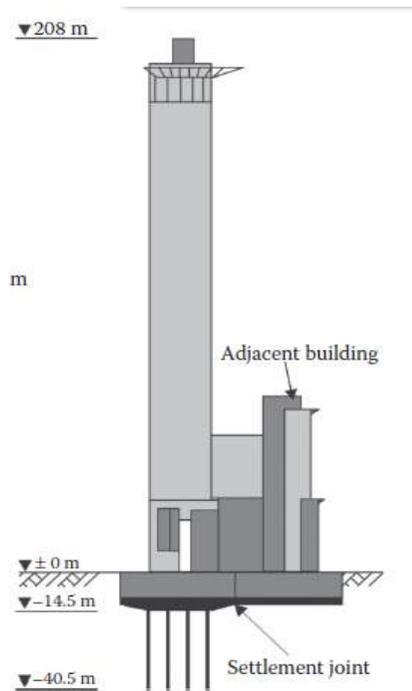
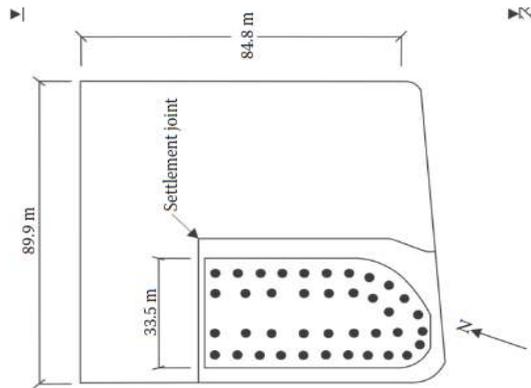
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	-			
Ano de construção	-			
Local	Tóquio			
Altura (m)	36			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
Tipo de estacas	Pré-moldada de Concreto			
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	0,6	1,2		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
			1,2	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	44			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			21	

Referências
 Yamashita et al (2015)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

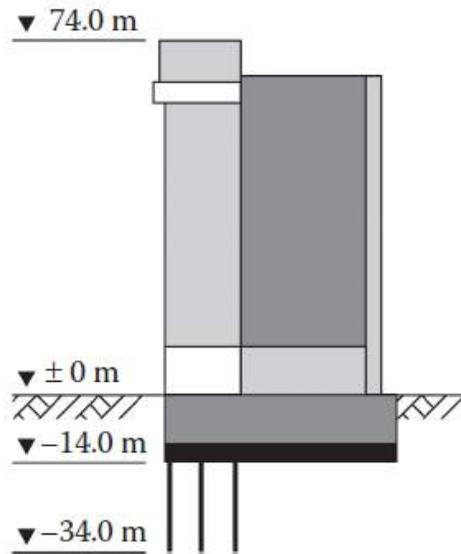
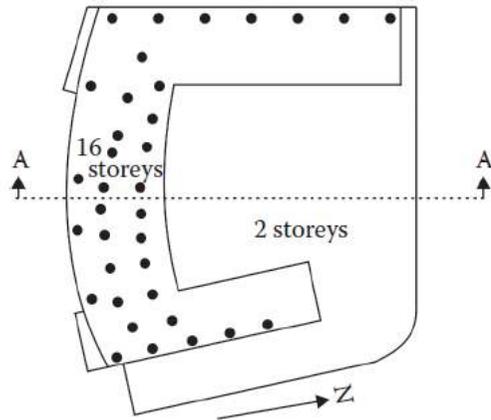


Nome	DG-Bank			
Ano de construção				
Local	Alemanha			
Altura (m)	208			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
	2940			
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas	40			
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)		
	3	4,5		
Tipo de estacas				
Díâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	1,3			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
	X		4	6
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	30			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			110	

Referências
 O' Brien et al (2012)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	American Express				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	75				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	3575				
Carga (kN)	Real	Estimada			
	723000	X			
Tensão	0,2022				
N de estacas	35				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	2				
Tipo de estacas					
Díâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,9				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	20				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			55		

Referências

Reul (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

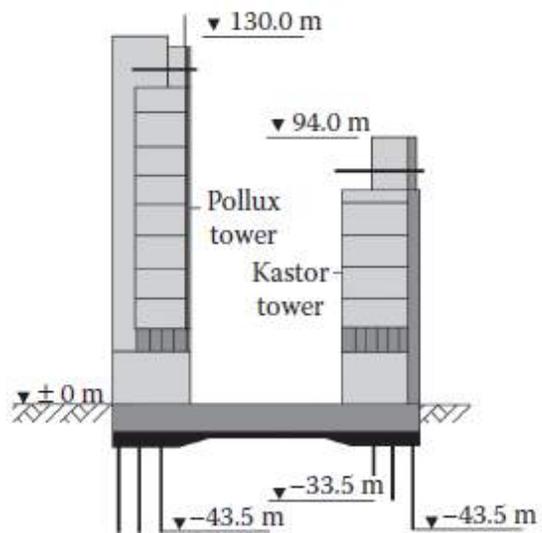
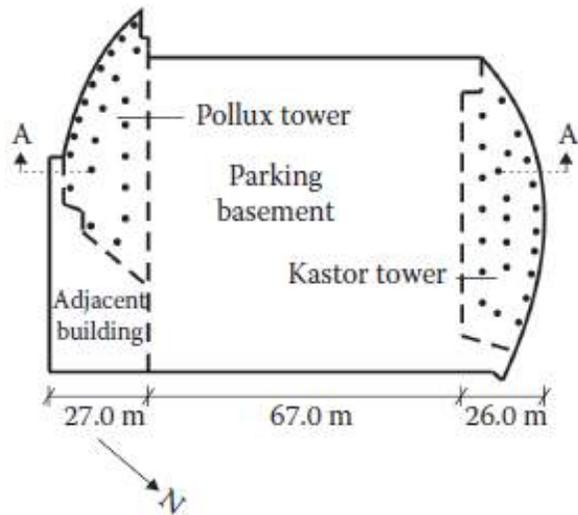


Nome	Taunustor Japan-Centre				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	115				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
1920					
Carga (kN)	Real	Estimada			
630000	X				
Tensão	0,3281				
N de estacas	25				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
	1	3,5			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,3				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
		X	5,5		
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	22				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			65		

Referências
 Reul (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Forum - Kastor				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	95				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	2830				
Carga (kN)	Real	Estimada			
	750000	X			
Tensão	0,265				
N de estacas	26				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	1	3			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,3				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	20	30			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			55		

Referências

Reul (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Congress Centre Messe Frankfurt				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	52				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
10200					
Carga (kN)	Real	Estimada			
1440000	X				
Tensão	0,141				
N de estacas	141				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
	0,8	2,7			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,3				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	12,5	34,5			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			60		

Referências

Reul (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

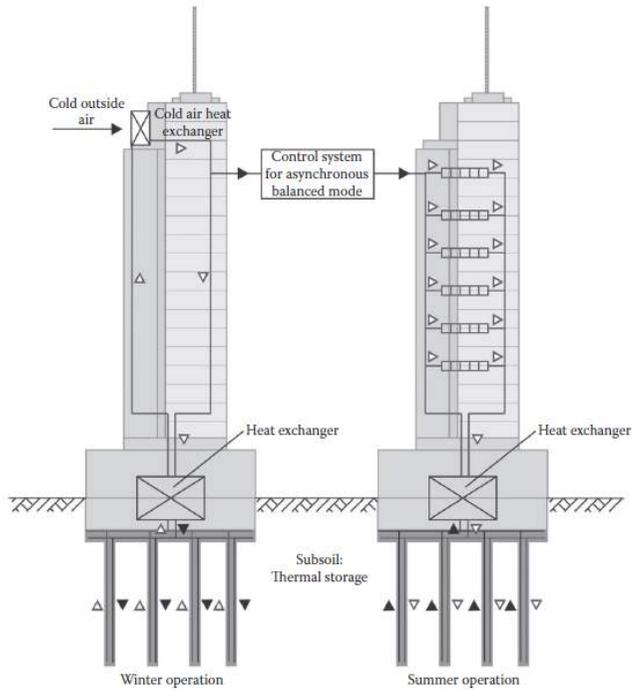
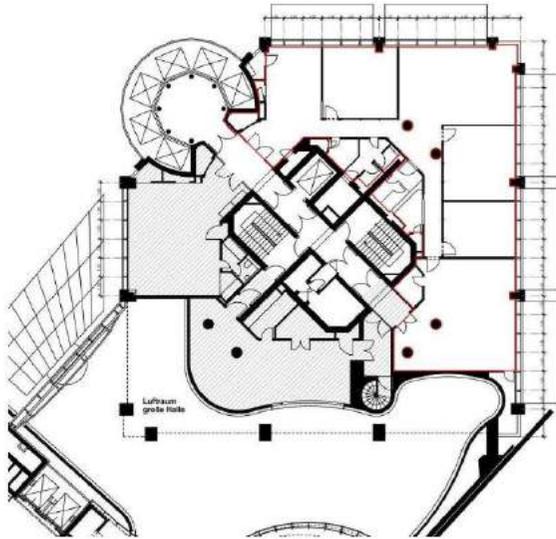


Figure 7.12 Seasonal thermal storage for cooling.

Nome	Main Tower				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	199				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
3800					
Carga (kN)	Real	Estimada			
1470000	X				
Tensão	0,3868				
N de estacas	112				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	3	3,8			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,5				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	30				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			25		

Referências
 Katzenbach (2017)

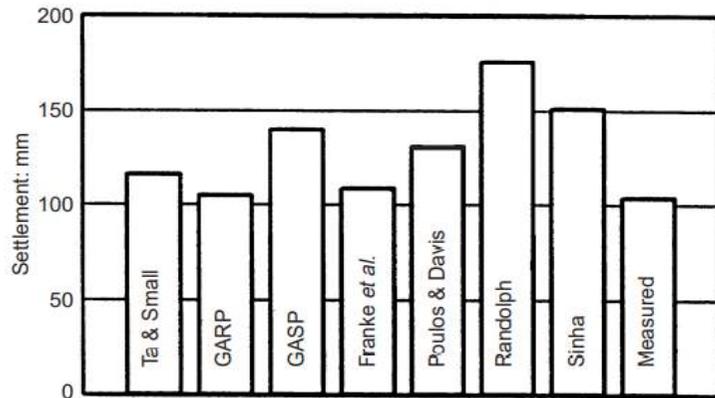
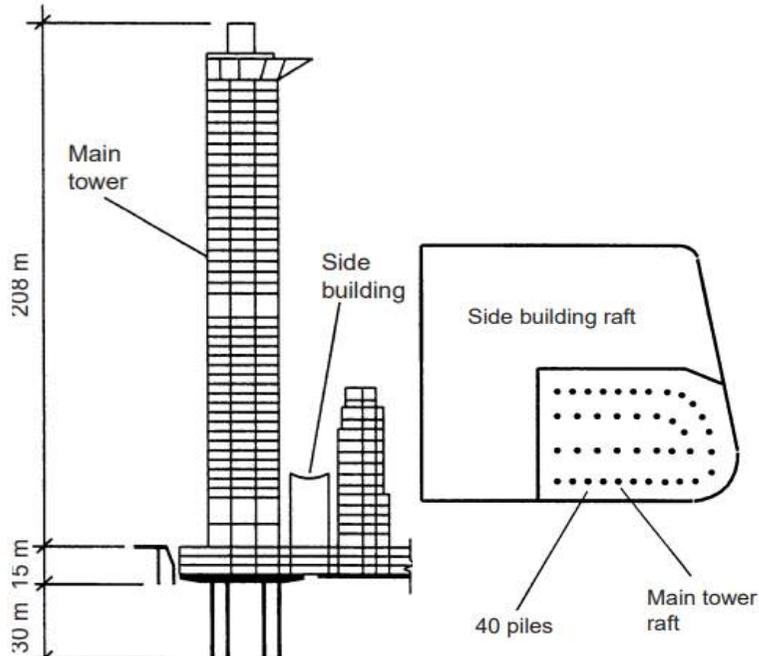
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Eurotheum				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	110				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
1893					
Carga (kN)	Real	Estimada			
425000	X				
Tensão	0,2245				
N de estacas	25				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	1	2,5			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,5				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	25	30			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			29		

Referências
 Katzenbach (2017)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

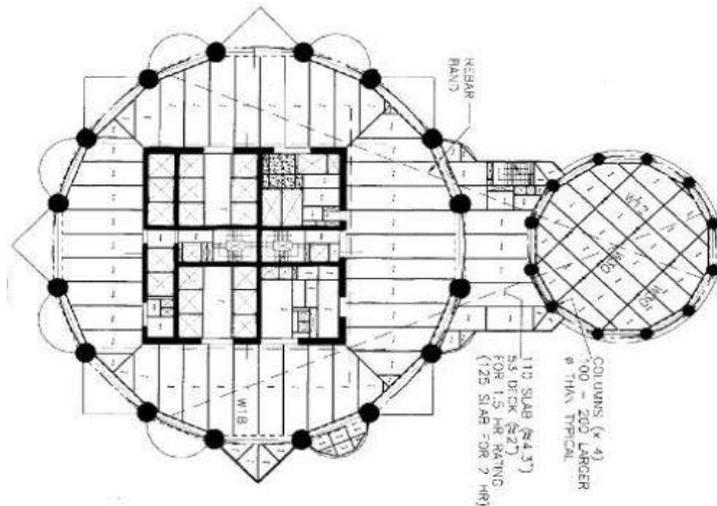
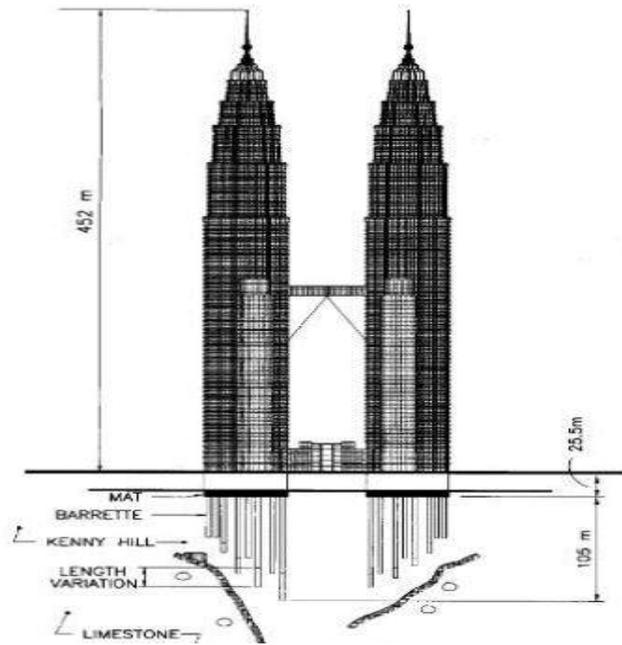


Nome	Westend One				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	208				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
2914	47	62			
Carga (kN)	Real	Estimada			
968000		X			
Tensão	0,3322				
N de estacas	40				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
	3	4,5			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,3				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	30				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			105		

Referências
 Poulos, H. G. (2001).

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

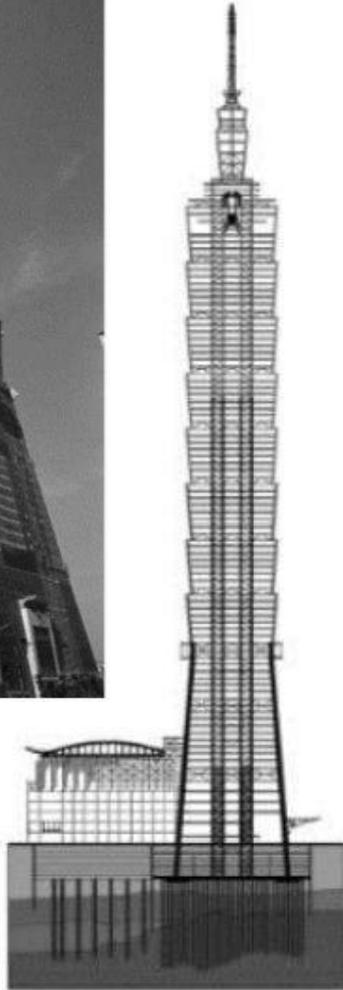
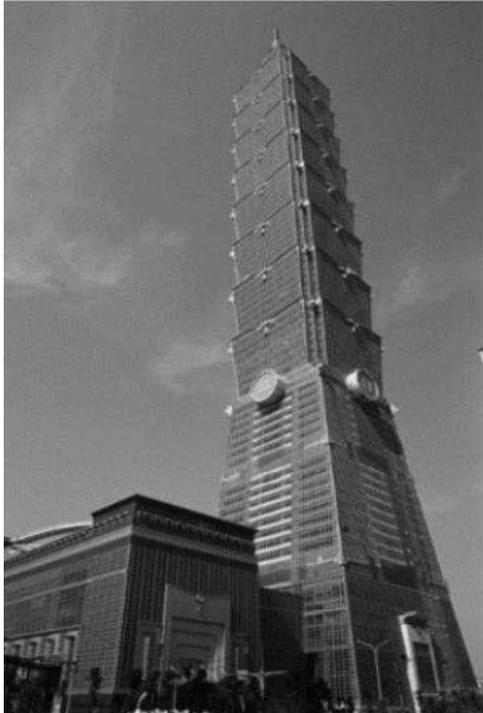


Nome	Petronas Tower				
Ano de construção	1998				
Local	Kuala Lumpur, Malásia				
Altura (m)	451,9				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	4,5				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,3				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		4,7		
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	40	105			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
Souza (2014)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Taipei 101				
Ano de construção	2004				
Local	Taiwan				
Altura (m)	508				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
8256	87	98			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	380				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	3	4,7			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,5				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		3,96		
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	40	60			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
Souza (2014)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

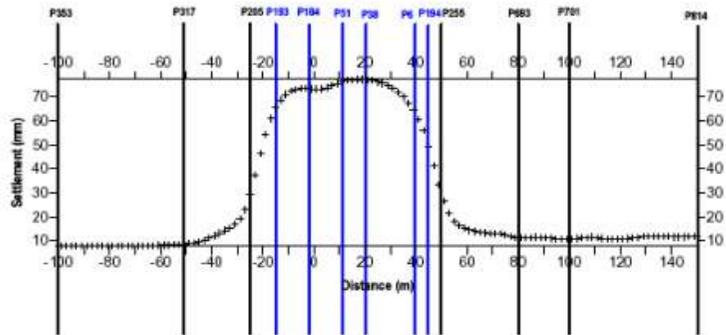
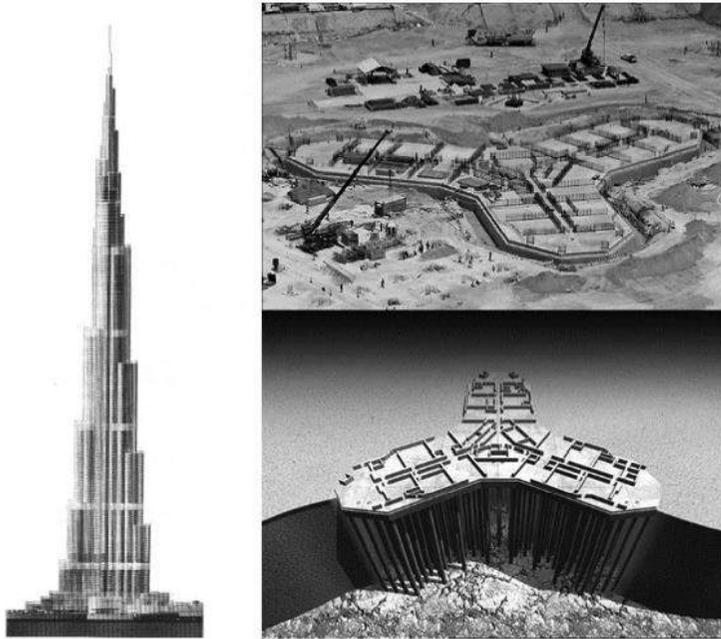


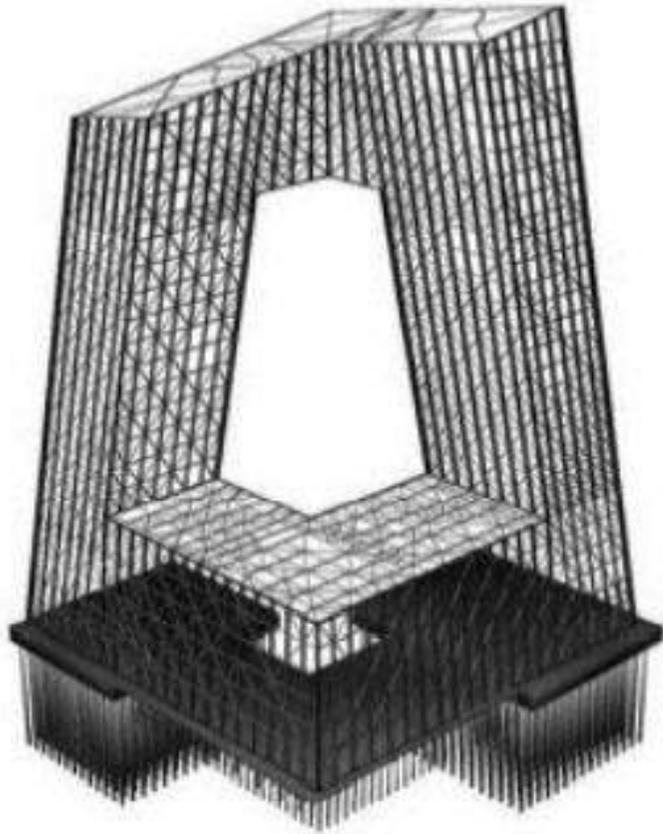
Fig 6: Computed Settlement Across Section Through Centre of Tower

Nome	Burj Dubai				
Ano de construção	2010				
Local	Dubai				
Altura (m)	828				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão	Escavadas				
N de estacas	196				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	3,7				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,5				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		3,75		
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	50				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			70		

Referências
Souza (2014)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

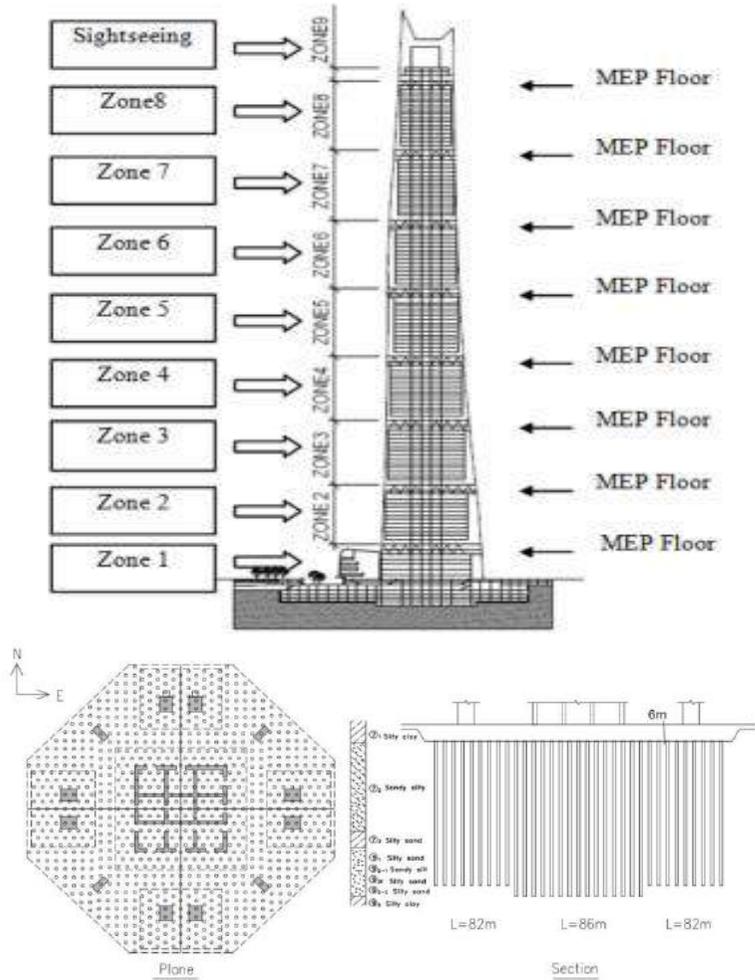
Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	China Central Television				
Ano de construção	2012				
Local	China				
Altura (m)	234				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	1242				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	7				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,2				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	33				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
Souza (2014)

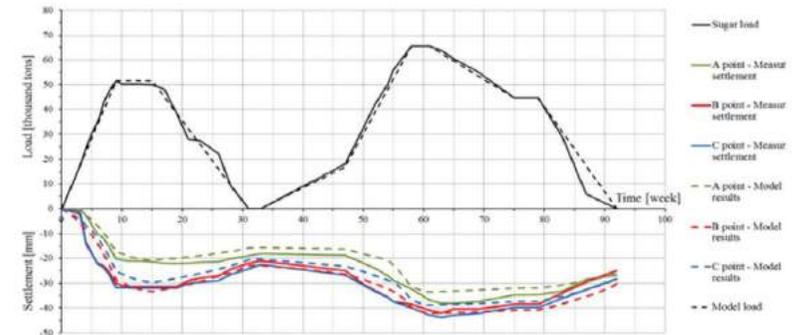
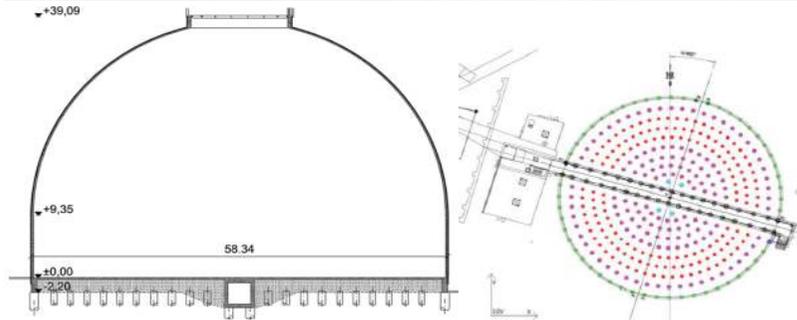
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome		Shangai Center Tower			
Ano de construção		214			
Local		China			
Altura (m)		632			
Área (m ²)		B (m)	L (m)		
8254					
Carga (kN)		Real	Estimada		
8500000		X			
Tensão		1,03			
N de estacas		955			
Espessura do radier		t1 (m)	t12(m)		
		6			
Tipo de estacas					
Diâmetro		D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
		1			
Espaçamento		Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
		X		3	
Comprimento das Estacas (m)		L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
		82	86		
Recalque (mm)		Mínimo	Médio	Máximo	
		90,7		112	

Referências
 ZHAO E LIU (2017)

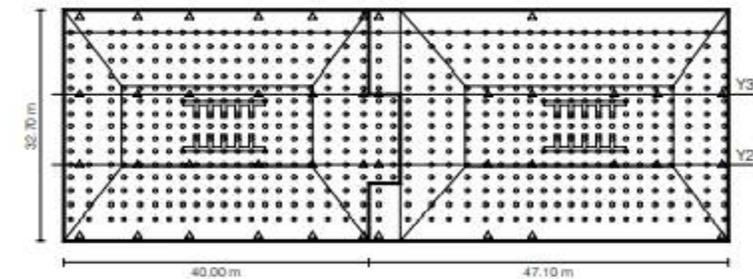
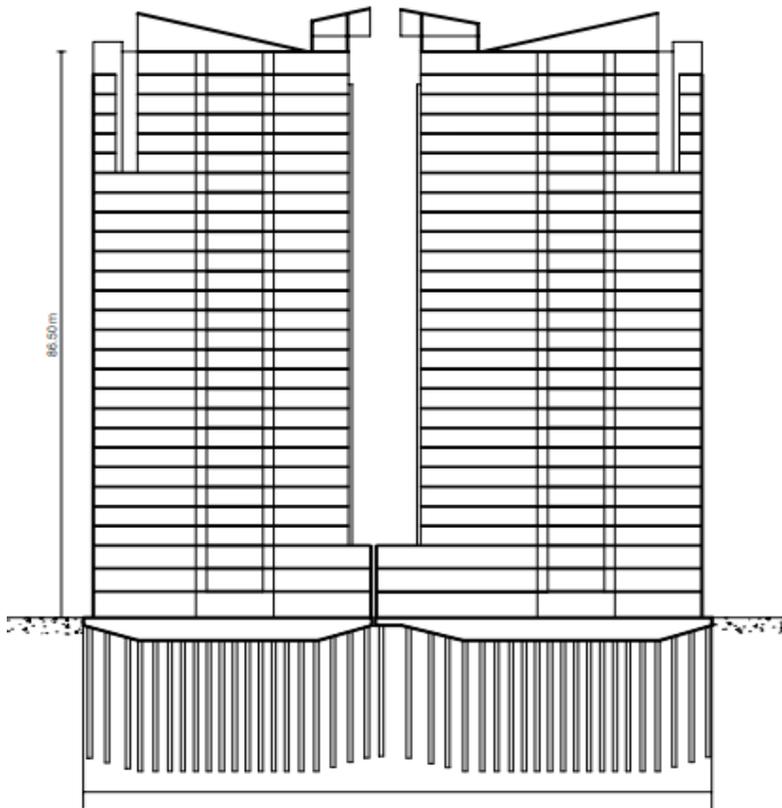
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Silo			
Ano de construção	2013			
Local	Kaposvár Hungria			
Altura (m)	39			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
600000		X		
Tensão				
N de estacas	376			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	0,25			
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	1	1,2	0,8	
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
	X		1,5	2,5
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	14,7	12,52	14,95	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
		4		

Referências
 Móczár et al (2016)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

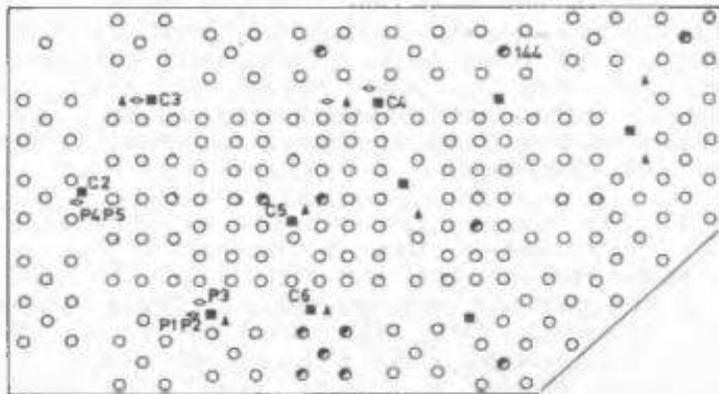


Nome	-			
Ano de construção				
Local	Nápoles, Itália			
Altura (m)	90			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
	200000	X		
Tensão				
N de estacas	637			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
Tipo de estacas				
Díâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	0,6			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	20			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	

Referências
 A. Mandolini (2006)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



LEGEND

- INSTRUMENTED PILES
- TOTAL PRESSURE CELL
- ◊ PIEZOMETER
- ▲ SETTLEMENT GAUGE

Fig. 1 Instrument layout plan

Nome					
Ano de construção					
Local	Singapura				
Altura (m)	126				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	203				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
	2				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências

LEUNG & RADHAKRISHNAN (1985)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

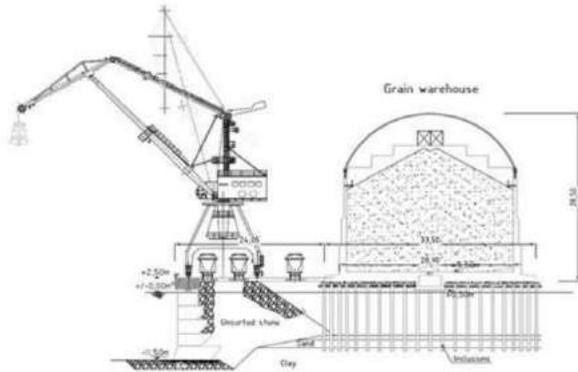


Figure 1. New horizontal silo (warehouse) for grain

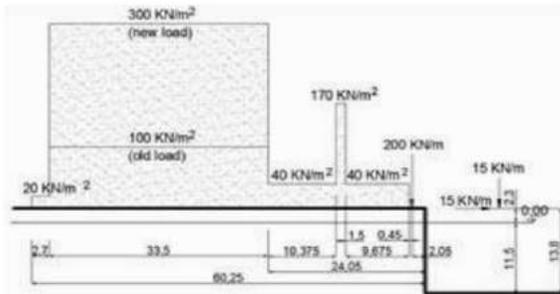
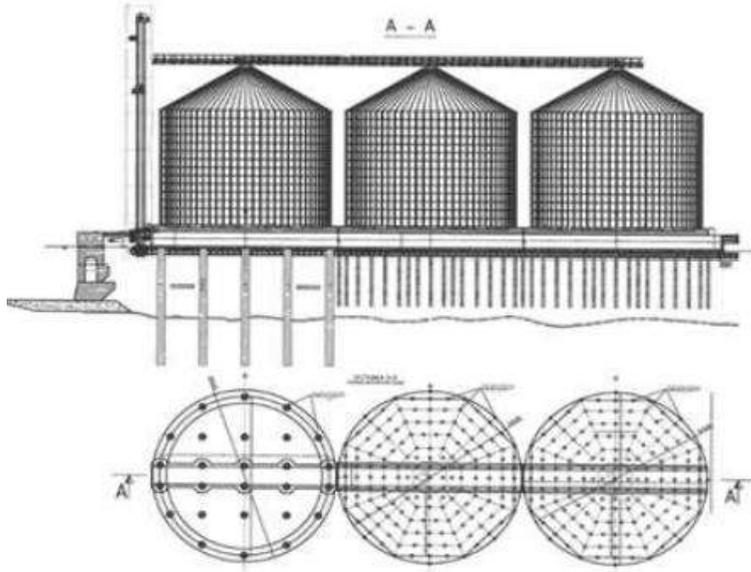


Figure 2. Loads applied on the quay

Nome	Armazém				
Ano de construção					
Local	Romênia				
Altura (m)	135				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
500000	X				
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
	1,35	1,85			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,4				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	12				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
		5,9			

Referências
 Ciortan & Manea (2017)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

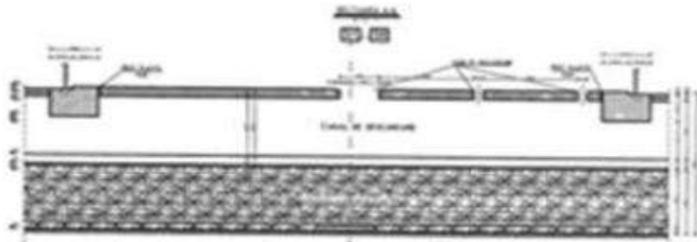
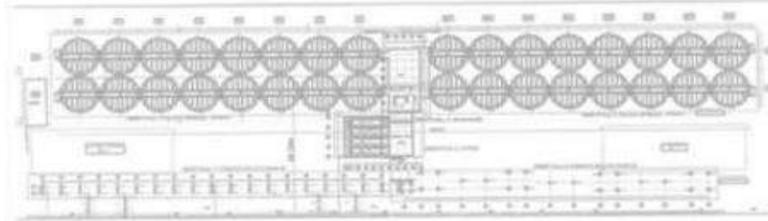


Nome	Silos no Porto				
Ano de construção	2013				
Local	Romênia				
Altura (m)	24				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
	378000	X			
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		1,6	5	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
		5,3			

Referências
 Ciortan & Manea (2017)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

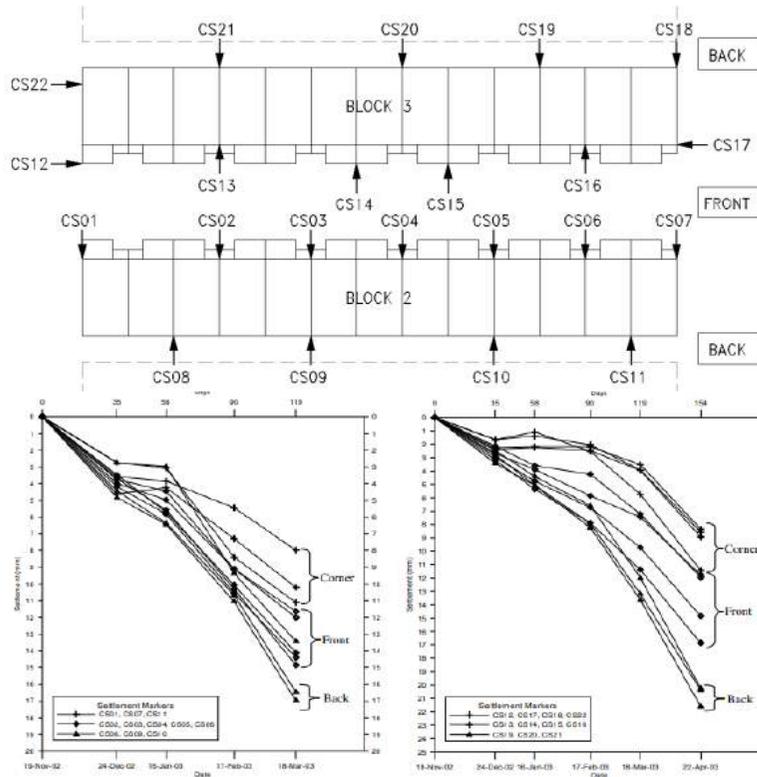


Nome	Silos 45-40				
Ano de construção					
Local	Romênia				
Altura (m)					
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
2400000		X			
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
	3				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
		120			

Referências

Ciortan & Manea (2017)

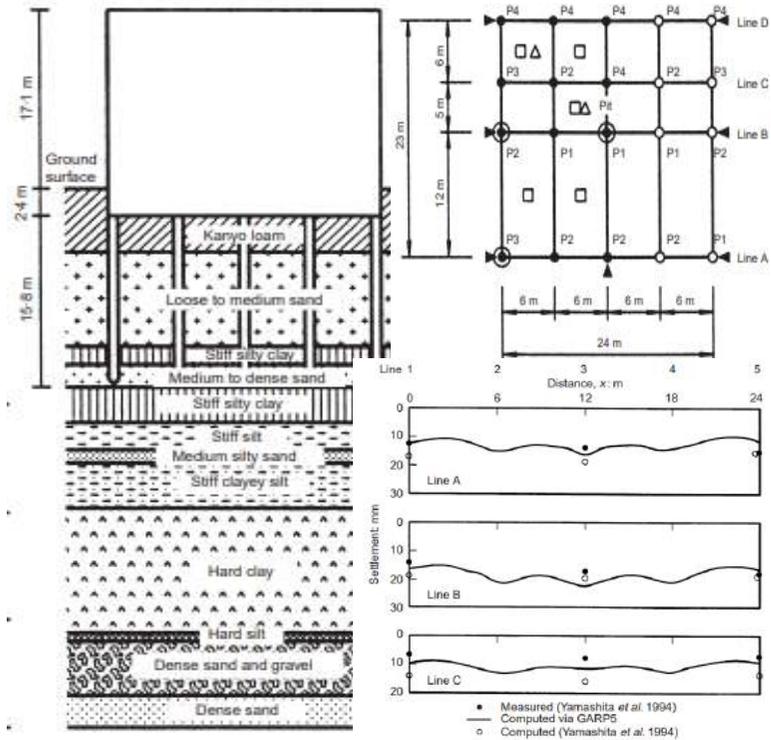
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Casas Geminadas			
Ano de construção	2002			
Local	Klang, Malásia			
Altura (m)				
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	0,15			
Tipo de estacas	Quadrada de Concreto Armado			
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	0,15			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	9			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
		11,12		

Referências
 TAN, CHOW, & CLUE, (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

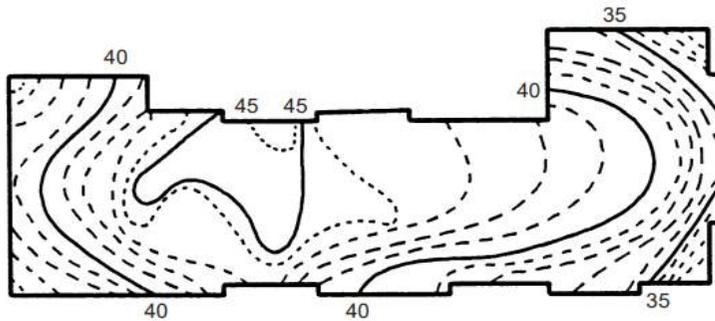


Nome	Edf. 5 andares			
Ano de construção				
Local	Urawa, Japão			
Altura (m)	19,5			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
	552	24	23	
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas	20			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
		0,3		
Tipo de estacas	Estacas de concreto escavadas			
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
		0,8	0,7	
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
		X	6	12
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
		15,8		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
		15		

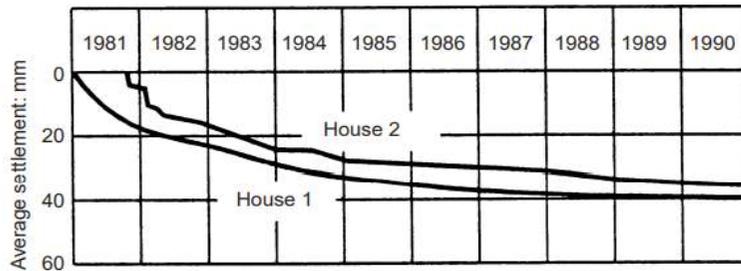
Referências
 Poulos, H. G. (2001)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



House 1: Conventional foundation
(211 piles, 28 m long)



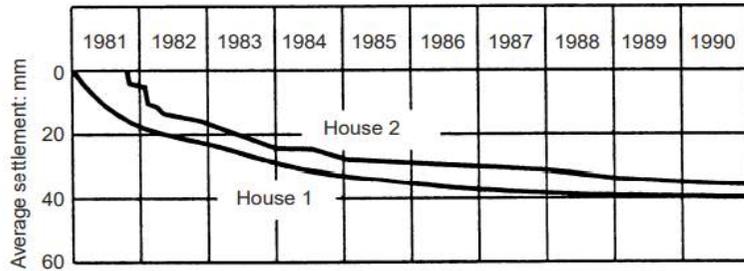
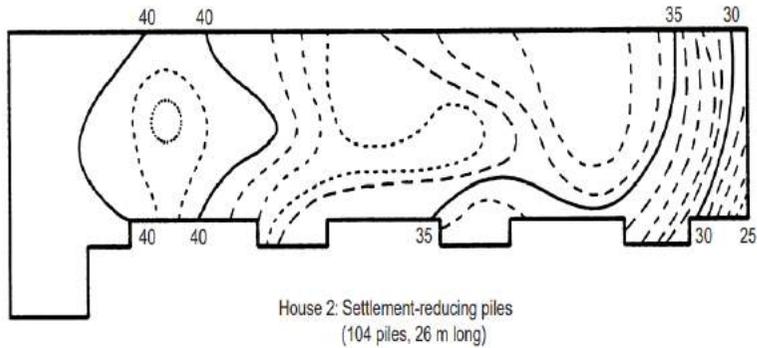
Nome	Residencial 1			
Ano de construção				
Local	Suécia			
Altura (m)				
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas	211			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	28			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	

Referências

Poulos, H. G. (2001)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



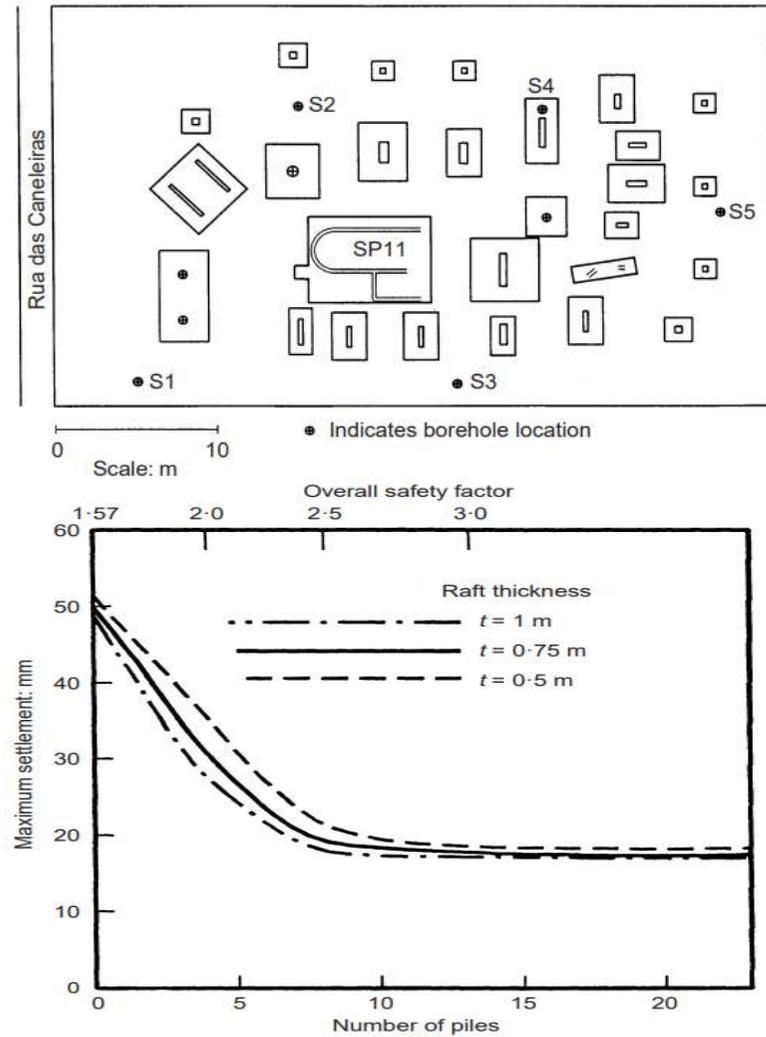
Nome	Residencial 2				
Ano de construção					
Local	Suécia				
Altura (m)					
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas	104				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	26				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências

Poulos, H. G. (2001)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Akasaka			
Ano de construção				
Local	São Paulo, Brasil			
Altura (m)				
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
	1190,4	44,5	26,75	
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)		
Tipo de estacas	Pré-moldada de Concreto			
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	0,52			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	12			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	

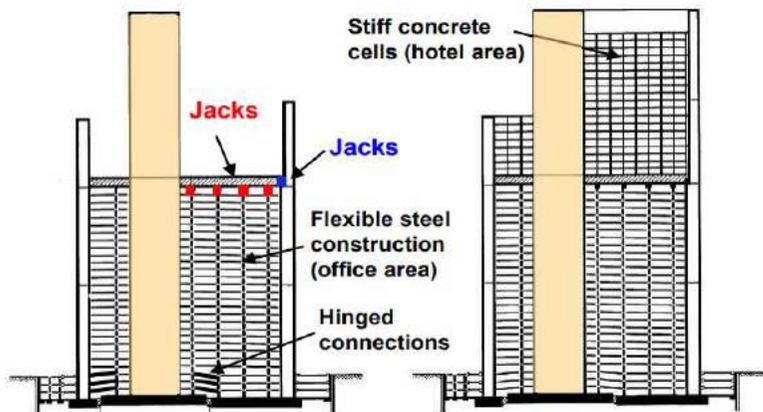
Referências

Poulos, H. G. (2001)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

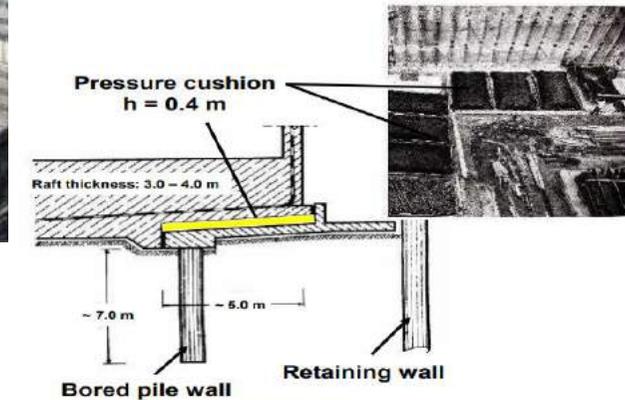


Nome	Marriott-Hotel				
Ano de construção	1976				
Local	Alemanha				
Altura (m)	162				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			340		



Referências
 Katzenbach (2016)

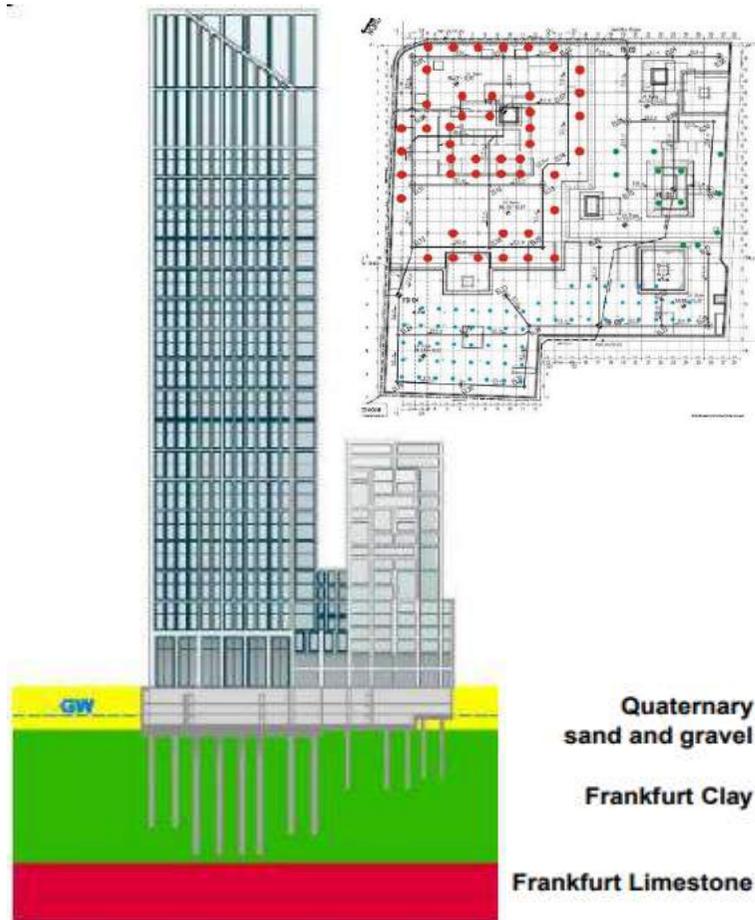
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Old Dresdner Bank				
Ano de construção	1978				
Local	Alemanha				
Altura (m)					
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	3	4			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
		X	5		
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	7				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			200		

Referências
 Katzenbach (2016)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Taunusturm				
Ano de construção	2014				
Local	Alemanha				
Altura (m)	170				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
2000000	X				
Tensão					
N de estacas	46				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	2,8				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	25				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
 Katzenbach (2016)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

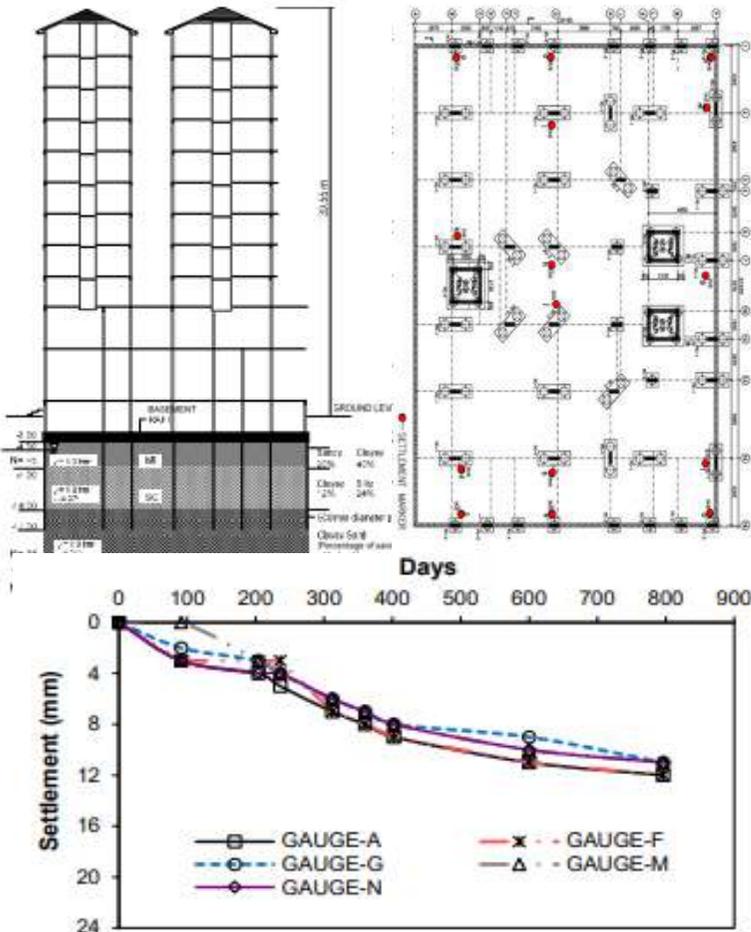


Nome	Mirax Plaza Tower A				
Ano de construção					
Local	Kiev, Ucrânia				
Altura (m)	200				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
	2200000				
Tensão					
N de estacas	62				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	33				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
 Katzenbach (2016)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



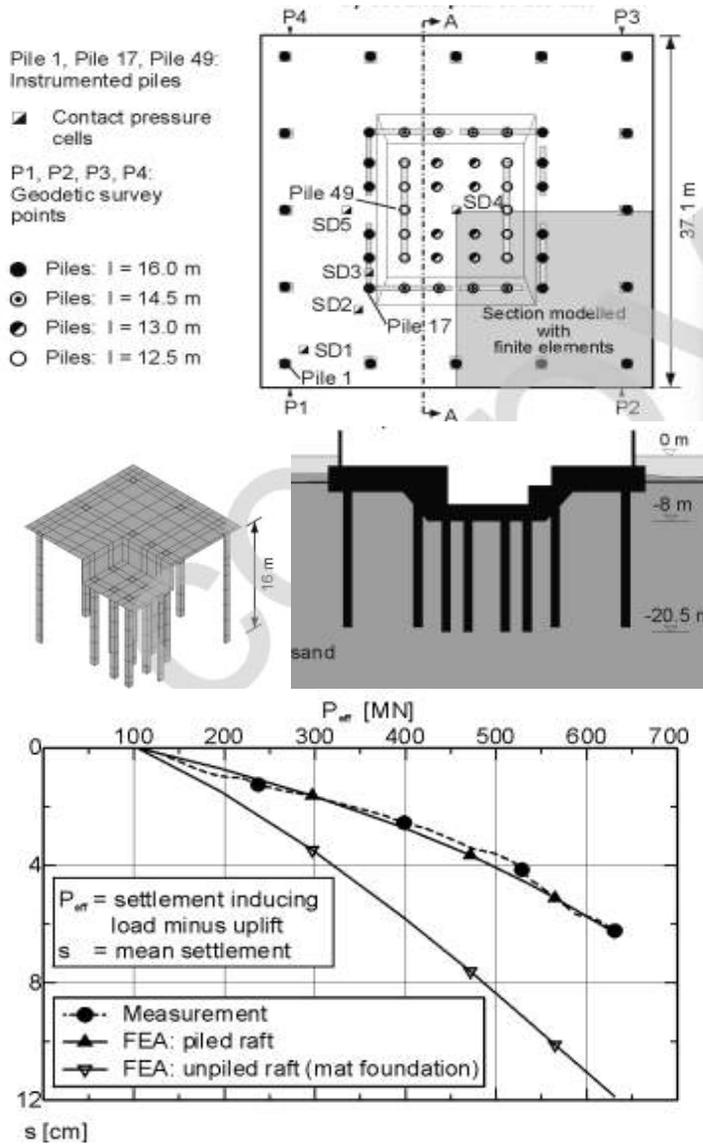
Nome	Palácio da Regência				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	36				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	800	32	25		
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	93				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
		0,6			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
		0,6			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
		14			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			14		

Referências

Balakumar et al (2021)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

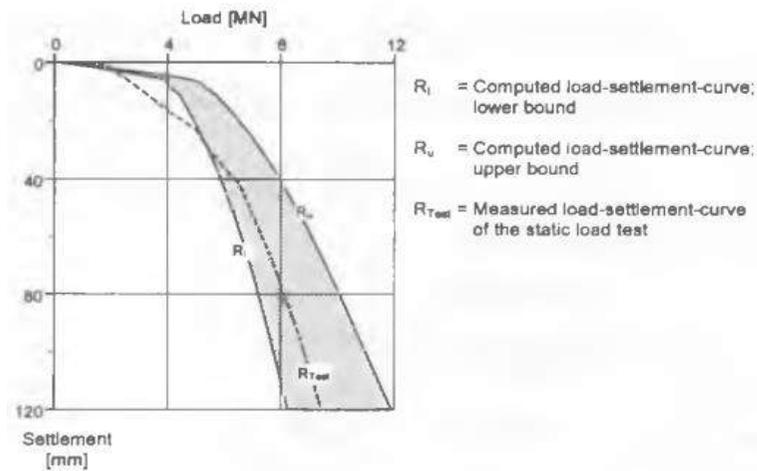
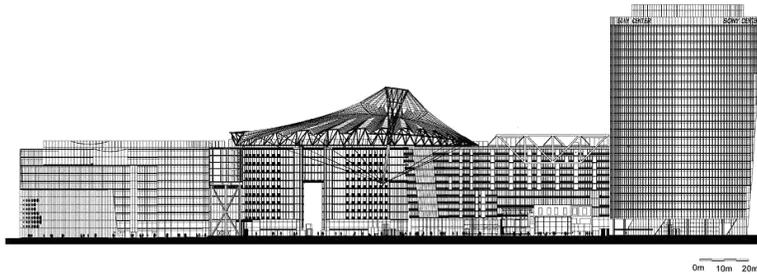
Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Treptowers			
Ano de construção	1997			
Local	Alemanha			
Altura (m)	121			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
	1376,4	37,1	37,1	
Carga (kN)	Real	Estimada		
	632000	X		
Tensão	0,4592			
N de estacas	54			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	2	3		
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	0,9			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	12,5	13	14,5	16
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			7,3	

Referências
Reul (2005)

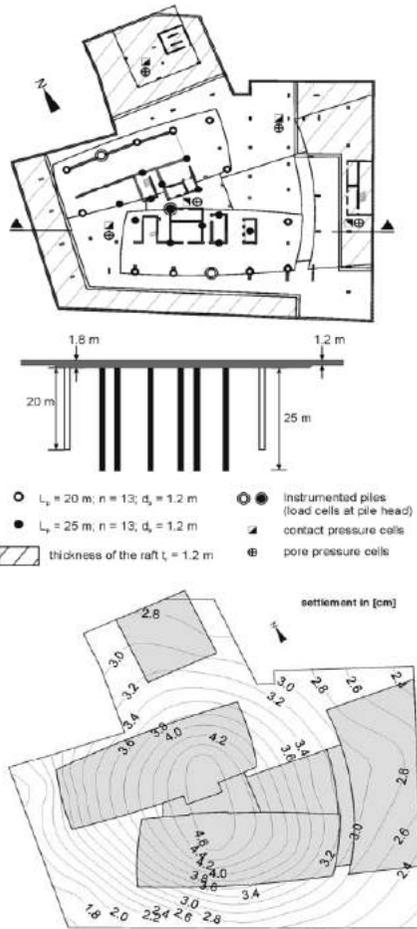
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Sony Center			
Ano de construção				
Local	Alemanha			
Altura (m)	103			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
2600				
Carga (kN)	Real	Estimada		
65500	X			
Tensão	0,0252			
N de estacas	44			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	2,5			
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	1,5			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	15	25		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			2,8	

Referências
 Reul (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

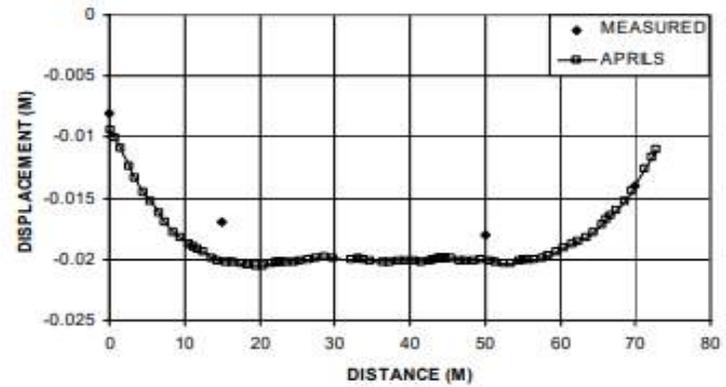
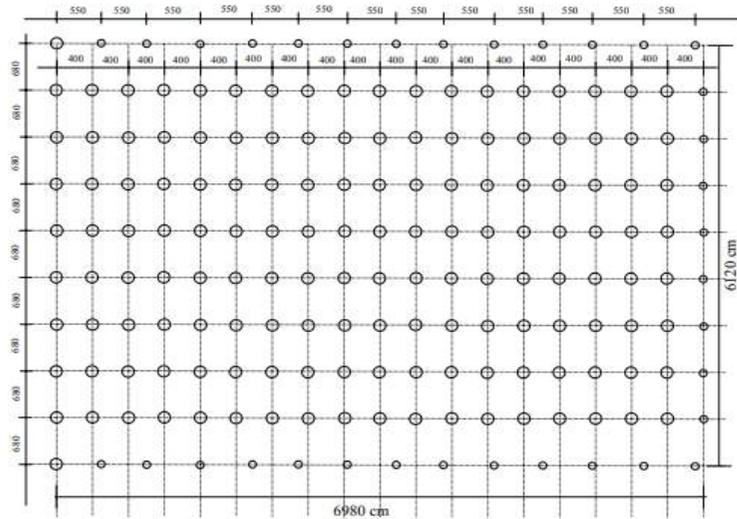


Nome	Westend Duo			
Ano de construção	2006			
Local	Alemanha			
Altura (m)	96			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
	915000	X		
Tensão				
N de estacas	26			
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)		
	1,2	1,8		
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	1,2			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	20	25		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			72	

Referências
 Reul (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



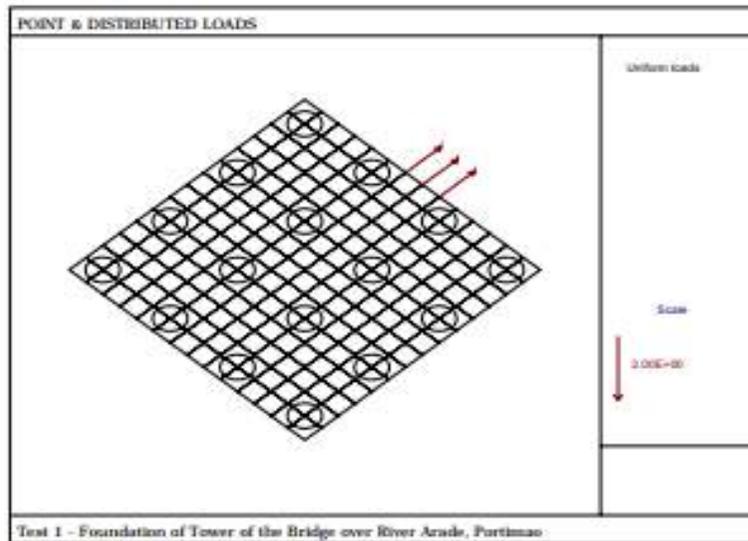
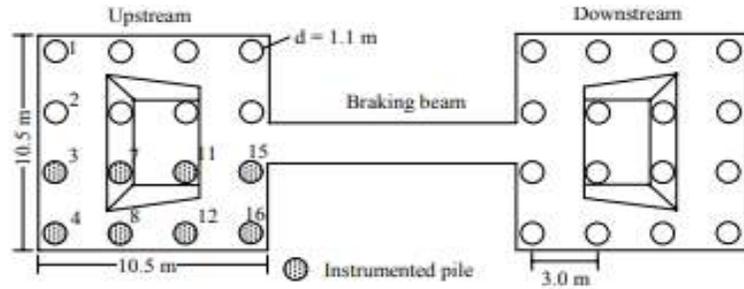
Nome	Terminal de Gás Líquido				
Ano de construção					
Local	Gdansk, Polônia				
Altura (m)					
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	4345,2	71	61,2		
Carga (kN)	Real	Estimada			
	357000	X			
Tensão	0,0822				
N de estacas	180				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	0,9				
Tipo de estacas	Estacas Escavadas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1	0,62			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	26,5				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			30		

Referências

Small & Poulos (2007)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Fundação de Ponte				
Ano de construção					
Local	Portugal				
Altura (m)					
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	110,25	10,5	10,5		
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	16				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,1				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		3		
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	48				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências

Small & Poulos (2007)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

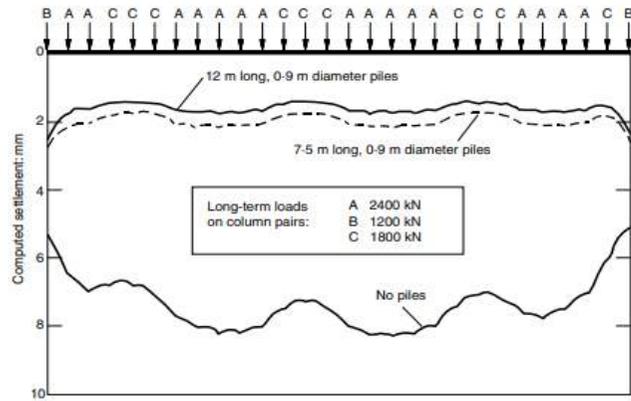
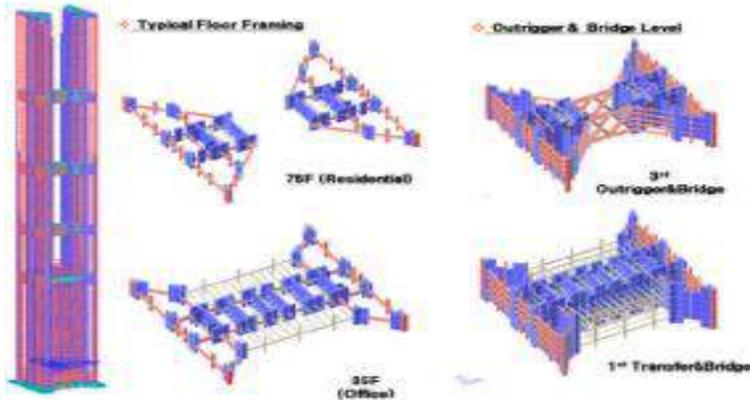
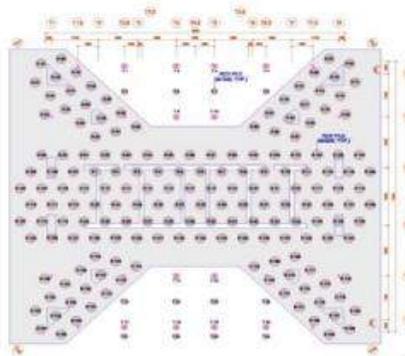


Figure 16.17. Computed settlement profiles for strip foundation (117 m long, 5 m wide, 0.8 m thick) for Printing Facility, Sydney, Australia

Nome	Fundação de tira para instalação de impressão				
Ano de construção	1994				
Local	Sydney, Austrália				
Altura (m)					
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	0,8				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,9				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	7,5				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
 BADELOU & POULOS (2016)

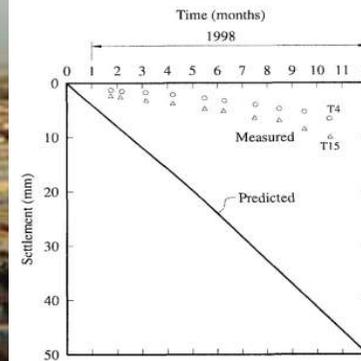
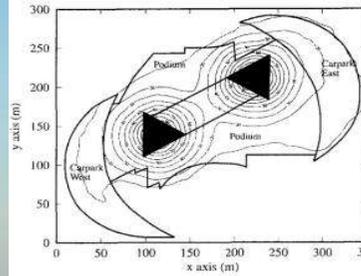
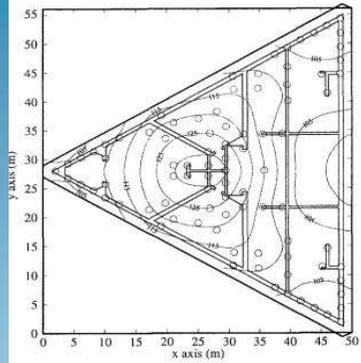
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Incheon Tower				
Ano de construção					
Local	Coréia				
Altura (m)					
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	172				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	5,5				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	2,5				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
 BADELOU & POULOS (2016),

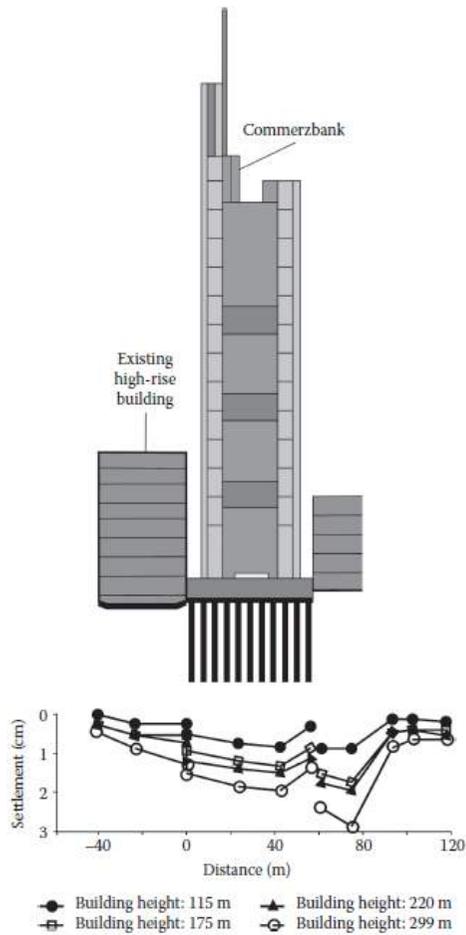
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Twin Towers				
Ano de construção					
Local	Dubai				
Altura (m)	355				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	194				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	1,5				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,2				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	40	45			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			13,8		

Referências
 H. G. Poulos (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



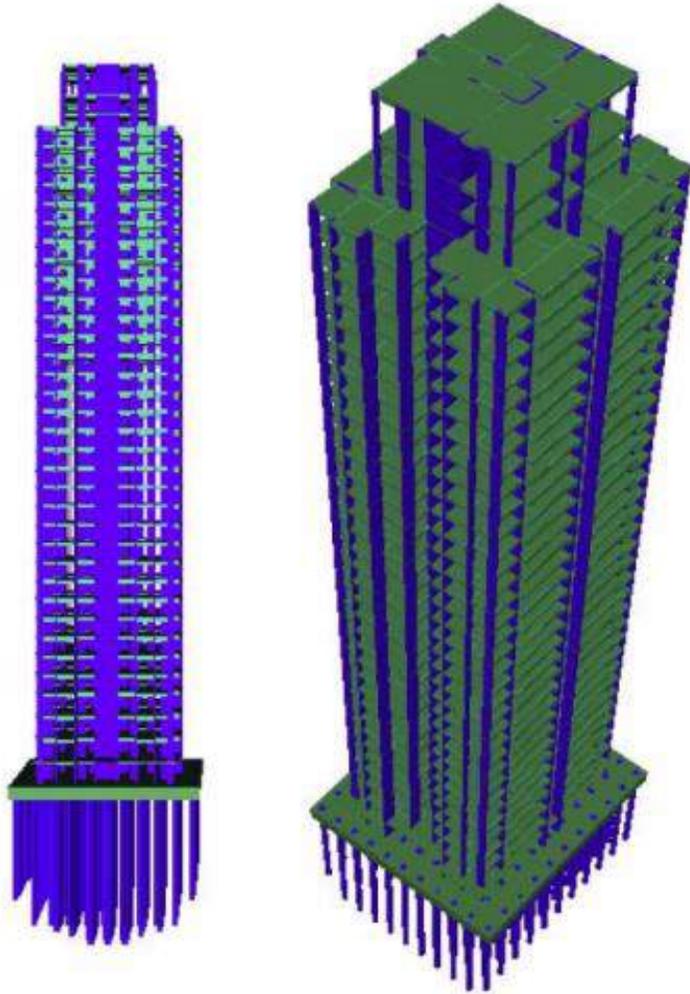
Nome	COMMERZ BANK				
Ano de construção					
Local	Frankfurt, Alemanha				
Altura (m)	300				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
2150					
Carga (kN)	Real	Estimada			
1300000	X				
Tensão	550				
N de estacas	111				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	2,5				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,5	1,8			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X				
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	45				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
		19			

Referências

Poulos, 2000 (livro)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Tikuna's Tower				
Ano de construção					
Local	Amazonas, Brasil				
Altura (m)	111,8				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	121				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	2				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,8	0,9	1		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	18	22	25		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
Souza (2014)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

Nome	Changfeng Market				
Ano de construção					
Local	China				
Altura (m)	238				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
2875					
Carga (kN)	Real	Estimada			
2012500	X				
Tensão	0,7				
N de estacas	416				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	72,5				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
	55,4		68		

Referências
 Xiao et al (2011)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



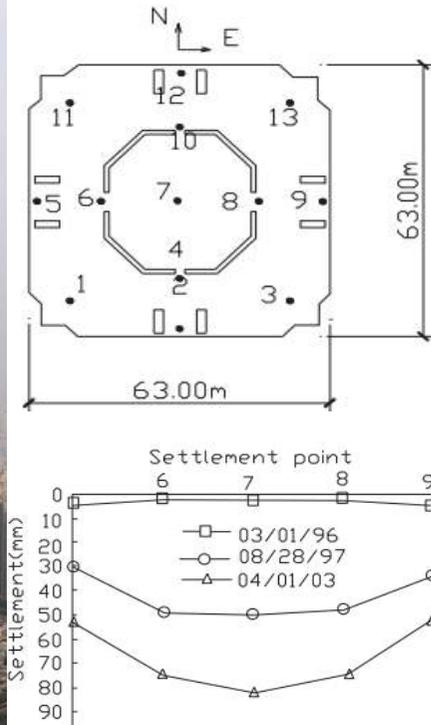
Nome	Heng long Plaza 66				
Ano de construção	2001				
Local	China				
Altura (m)	288				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
3196					
Carga (kN)	Real	Estimada			
4245000	X				
Tensão	1,3282				
N de estacas	849				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	3,3				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	81,5				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
	47,8		51		

Referências

Xiao et al (2011)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

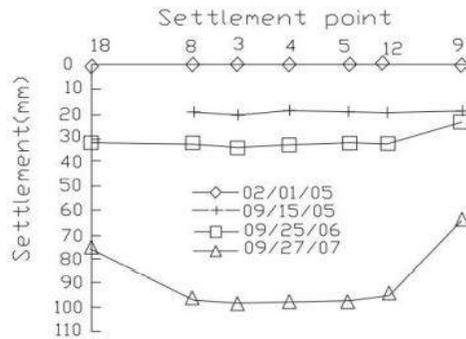
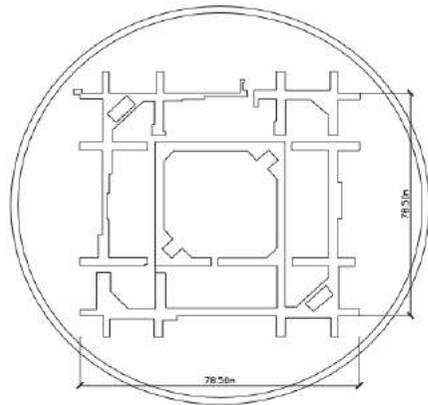


Nome	Edf. Jinmao				
Ano de construção					
Local	China				
Altura (m)	420,5				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	3519				
Carga (kN)	Real	Estimada			
	3000000				
Tensão	0,8525				
N de estacas	429				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	4				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,914				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	83				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
	59,1		72		

Referências

Xiao et al (2011)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Shangai World Financial Center				
Ano de construção					
Local	China				
Altura (m)	492				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
6200					
Carga (kN)	Real	Estimada			
4400000	X				
Tensão	0,7097				
N de estacas	1177				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	4,5				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	79				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
	88,1		97,6		

Referências
 Xiao et al (2011)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

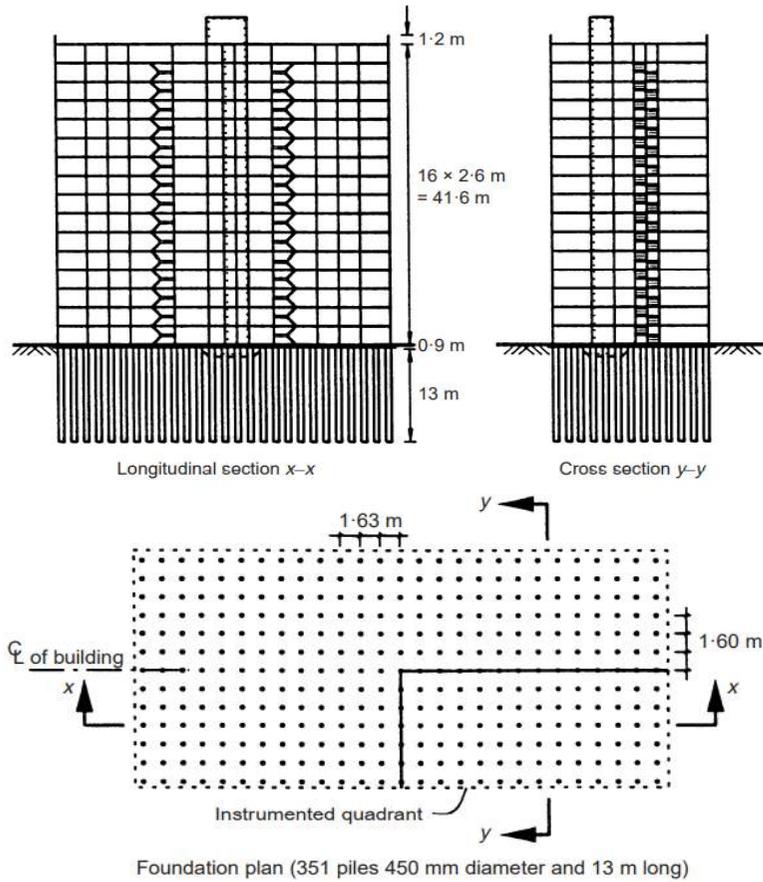


Nome	Hyde Park Cavalry Barracks				
Ano de construção	1970				
Local	Londres				
Altura (m)	94				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	625	25	25		
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	51				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,91				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		1,9		
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	24,8				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			25		

Referências
 Tang & Zhao (2014)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Edf. em Stonebridge Park				
Ano de construção					
Local	Londres				
Altura (m)					
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	831,36	43,3	19,2		
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	351				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,45				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		1,6		
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	13				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
		12			

Referências

Tang & Zhao (2014)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

Nome	Edf. Zhangwu				
Ano de construção					
Local	China				
Altura (m)	48*				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
652,49	45,95	14,2			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	203				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,45				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		1,65	3,3	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	27				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
 Tang & Zhao (2014)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Public Security Building				
Ano de construção					
Local	China				
Altura (m)	96*				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
602	28	21,5			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	108				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,5				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		1,63	2,23	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	54,6				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

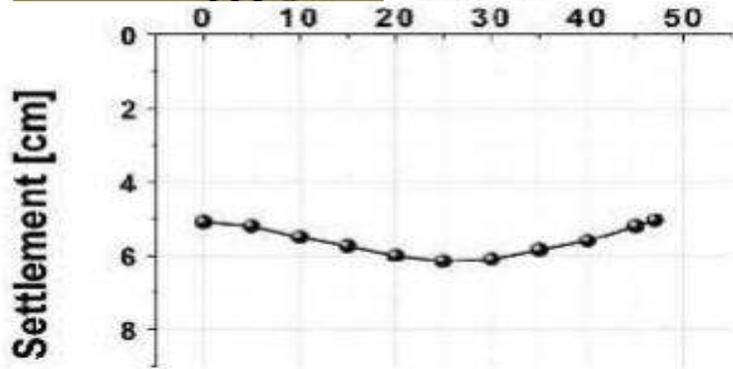
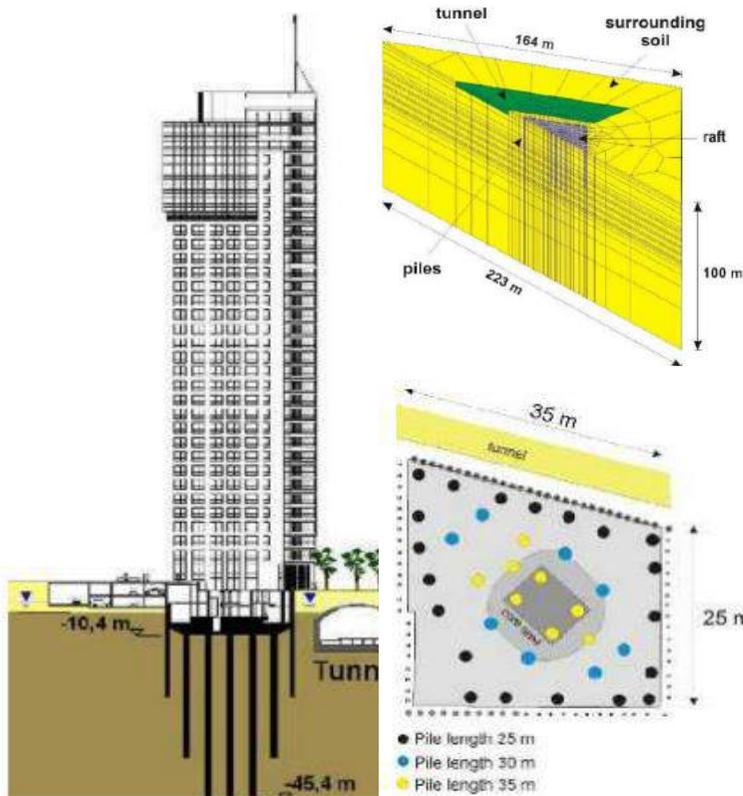
Referências
 Tang & Zhao (2014)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

Nome	Hubei Foreign Trade Centre				
Ano de construção					
Local	China				
Altura (m)	66*				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
1823,29	42,7	42,7			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	344				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,55				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
	X		1,7	2	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	28				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
 Tang & Zhao (2014)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

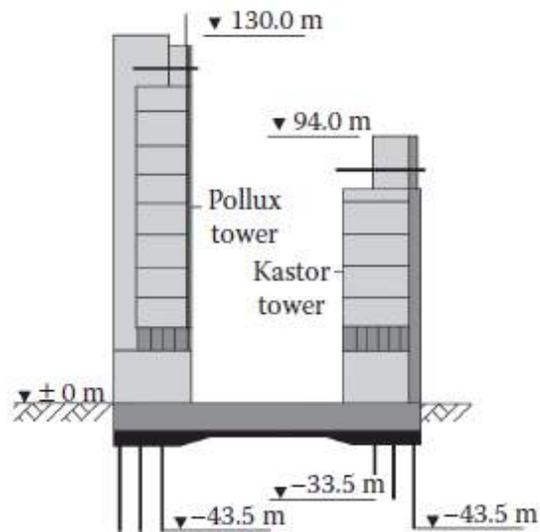
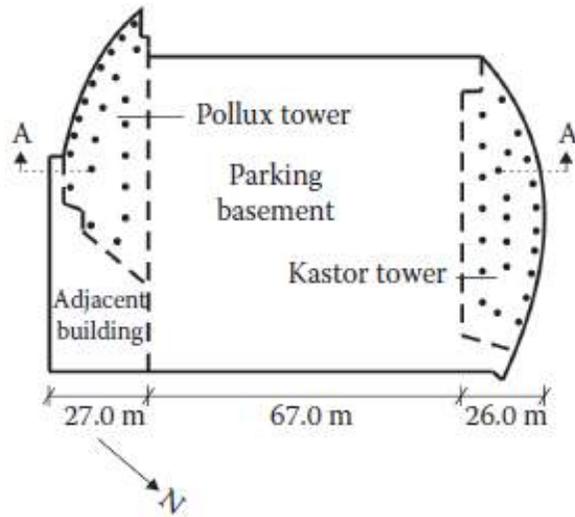


Nome	Offenbach am Main				
Ano de construção	2003				
Local	Alemanha				
Altura (m)	120				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	36				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			60		

Referências
 Katzenbach (2016)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Forum-Pollux				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	130				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
1920					
Carga (kN)	Real	Estimada			
760000	X				
Tensão	0,3958				
N de estacas	22				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
		3			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,3				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	30				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			70		

Referências

Reul (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

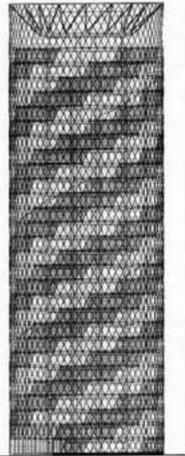
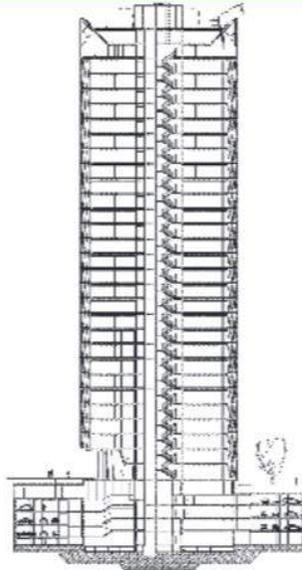
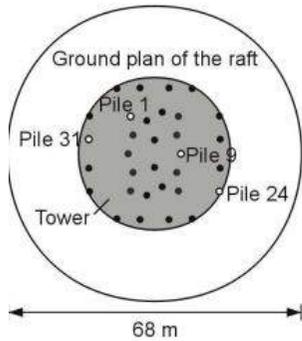


Nome	Main Forum				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	80				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
7579					
Carga (kN)	Real	Estimada			
849000	X				
Tensão	112				
N de estacas	48				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
		2,8			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,2				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	18,5	20			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			32		

Referências
 Reul (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Westhafen Tower				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	112				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	3731				
Carga (kN)	Real	Estimada			
	490000	X			
Tensão (kPa)	131,3320826				
N de estacas	32				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
		4,2			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,5				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	12,5	15			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			35		

Referências
Reul (2005)

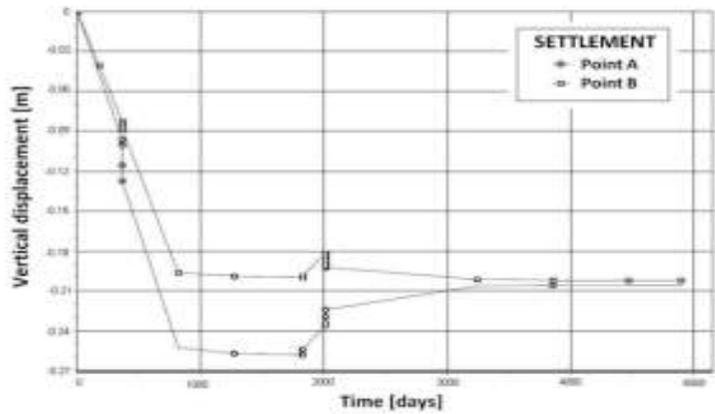
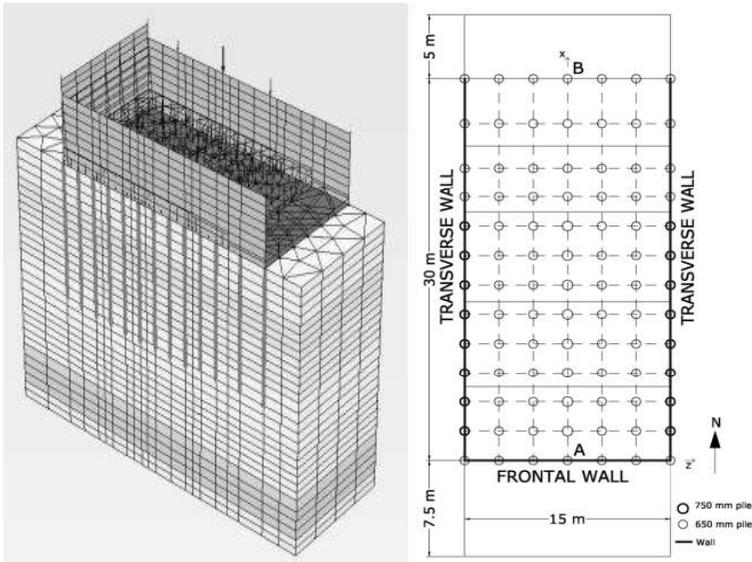
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Haus Der Wirtschaft Offenbach				
Ano de construção					
Local	Alemanha				
Altura (m)	68				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
5120					
Carga (kN)	Real	Estimada			
605000	X				
Tensão	118				
N de estacas	476				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
		2			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,2				
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	25	37,5	41		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			25		

Referências
 Reul (2005)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Depósito Mineral			
Ano de construção				
Local	Bacia do Guadalquivir, Espanha			
Altura (m)	9,5			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
	4050	135	30	
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas	697			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	0,8			
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	0,65	0,75		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	16	16,5		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			257	

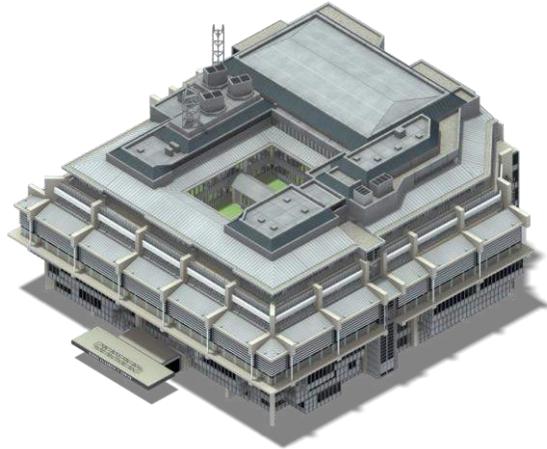
Referências
 Justo et al (2009)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

Nome	Carigliano Bridge				
Ano de construção					
Local					
Altura (m)					
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas					
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
			3		
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	50				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			52		

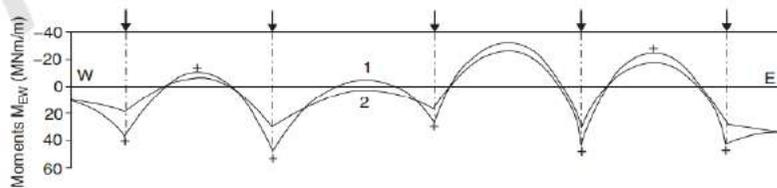
Referências
 O' Brien et al (2012)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Queen Elizabeth II Conference Centre			
Ano de construção	1984			
Local	Londres			
Altura (m)				
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
	1122			
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	2			
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	1,8			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	16			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
		20		

Referências
 O' Brien et al (2012)



Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



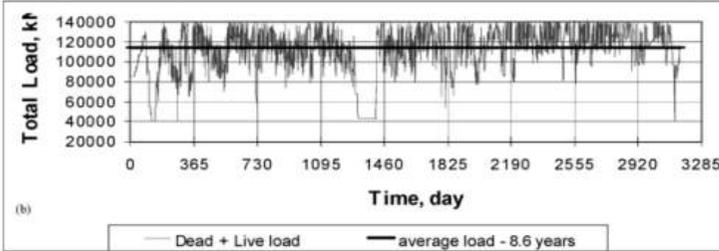
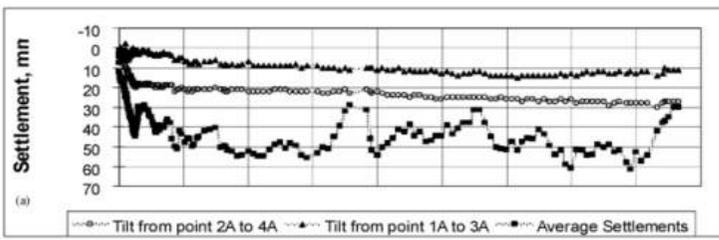
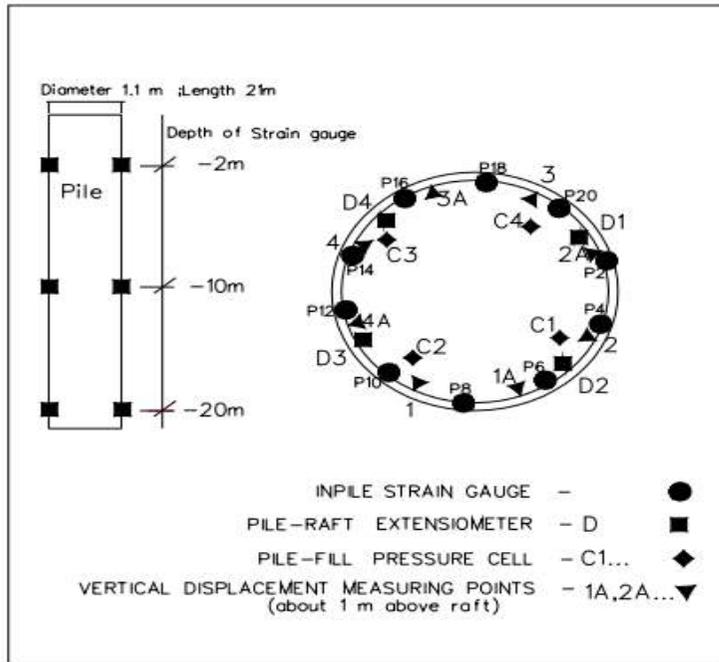
Nome	Canary Wharf South			
Ano de construção				
Local	Londres			
Altura (m)				
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
625	25	25		
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
	X		4	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	25,5			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			45	

Referências

O' Brien et al (2012)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo

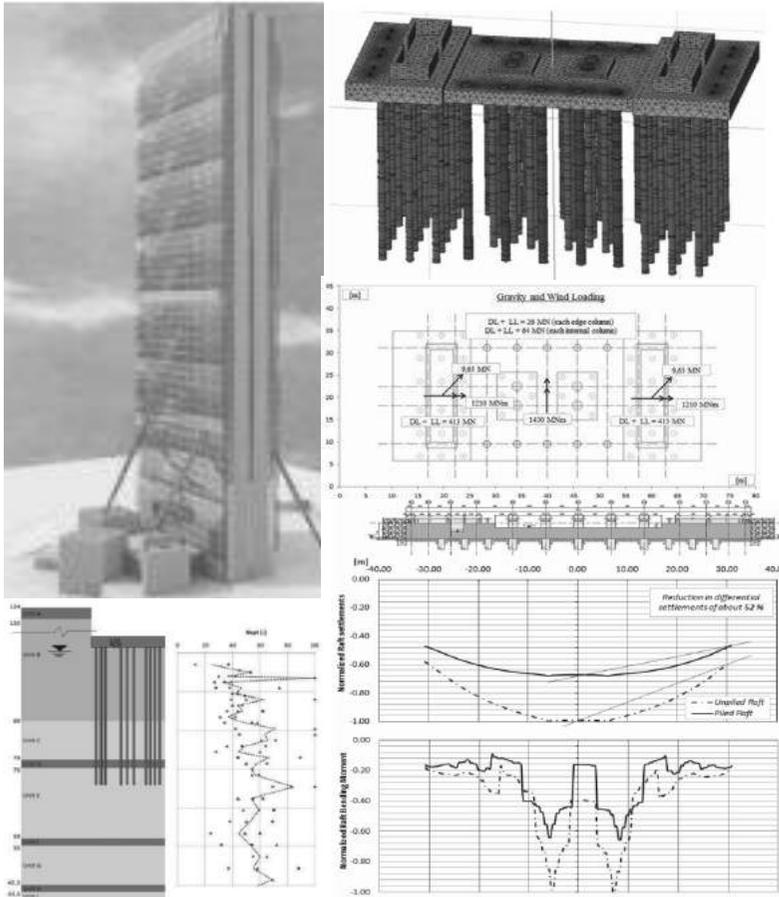


Nome	Silo N° 12			
Ano de construção	1996			
Local				
Altura (m)	40			
Área (m²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
	140000	X		
Tensão				
N de estacas	20			
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)		
	0,5	1,5		
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	1,1			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
	X		2,75	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	20	21		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			51	

Referências

GEFFEN & BIRNBAUM (2006)

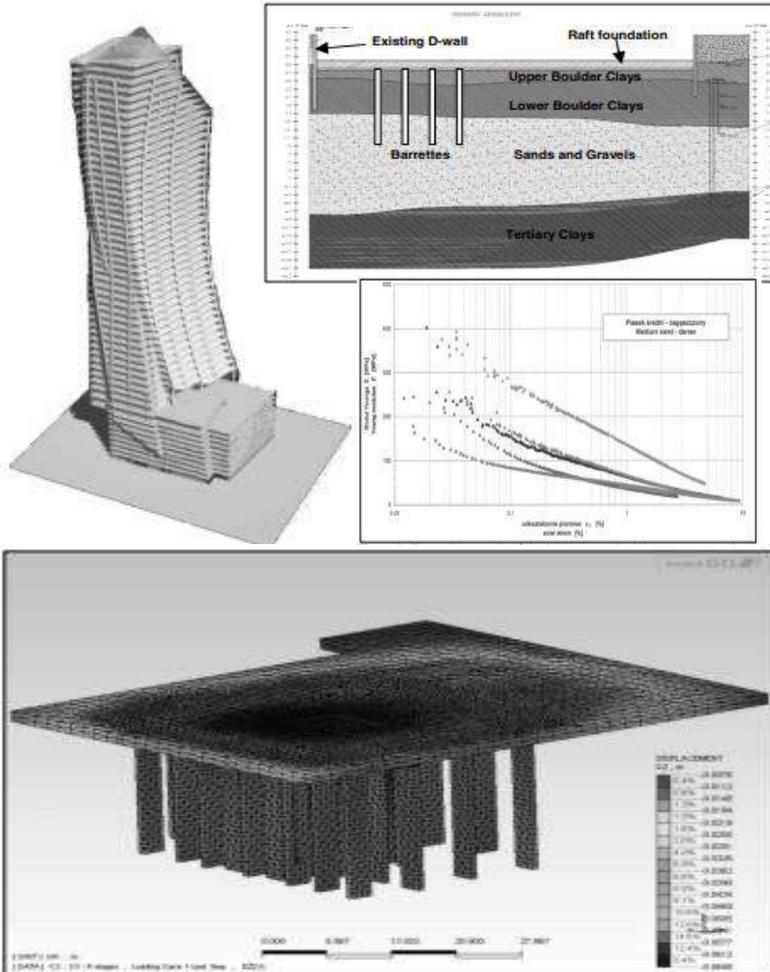
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Isozaki Tower				
Ano de construção					
Local	Milão, Itália				
Altura (m)	202,2				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
	1703,7	63,1			
Carga (kN)	Real	Estimada			
	1350000	X			
Tensão	0,7924				
N de estacas	62				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
	2,5	3,5			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,5	1,2			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	33,2				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		

Referências
 Allievi et al (2013)

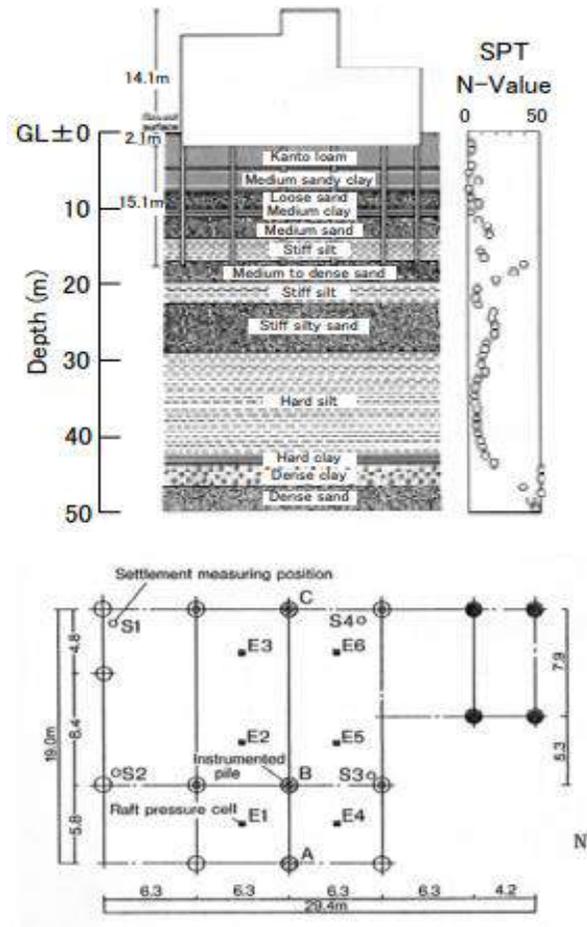
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Edf. em Varsóvia				
Ano de construção					
Local	Varsóvia, Polônia				
Altura (m)	192				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	42				
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)			
	2,05	1,5			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			60		

Referências
 .eszczyński (2009)

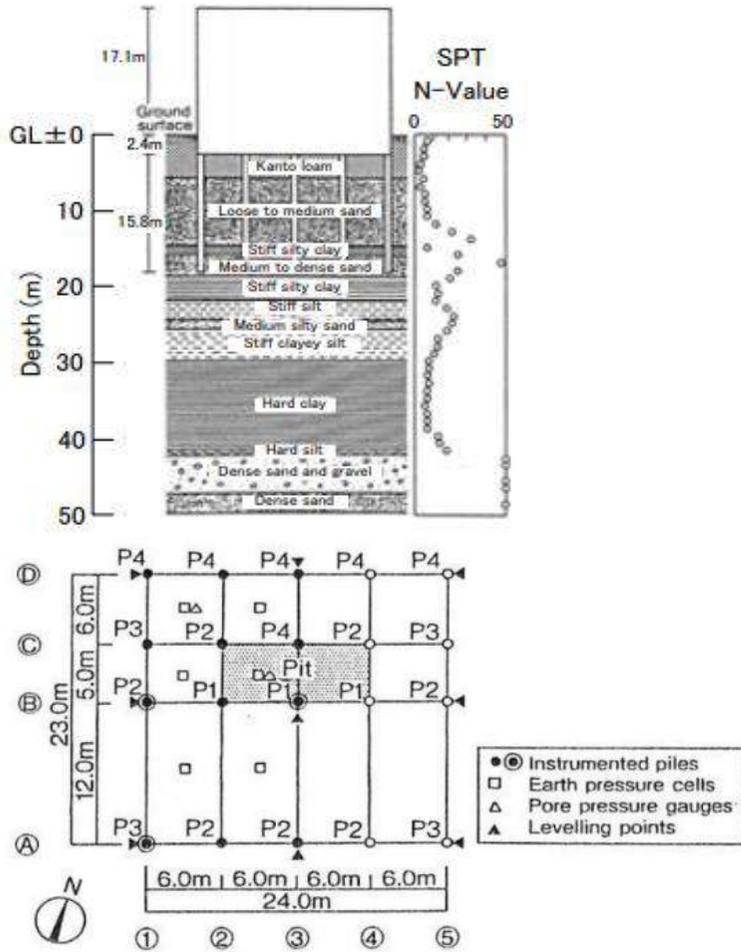
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	EDF. 4 ANDARES			
Ano de construção	1987			
Local	JAPÃO			
Altura (m)	14,1			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas	16			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	2,1			
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	0,25	0,4		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	15,1			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			10,5	

Referências
 K. Yamashita (2015)

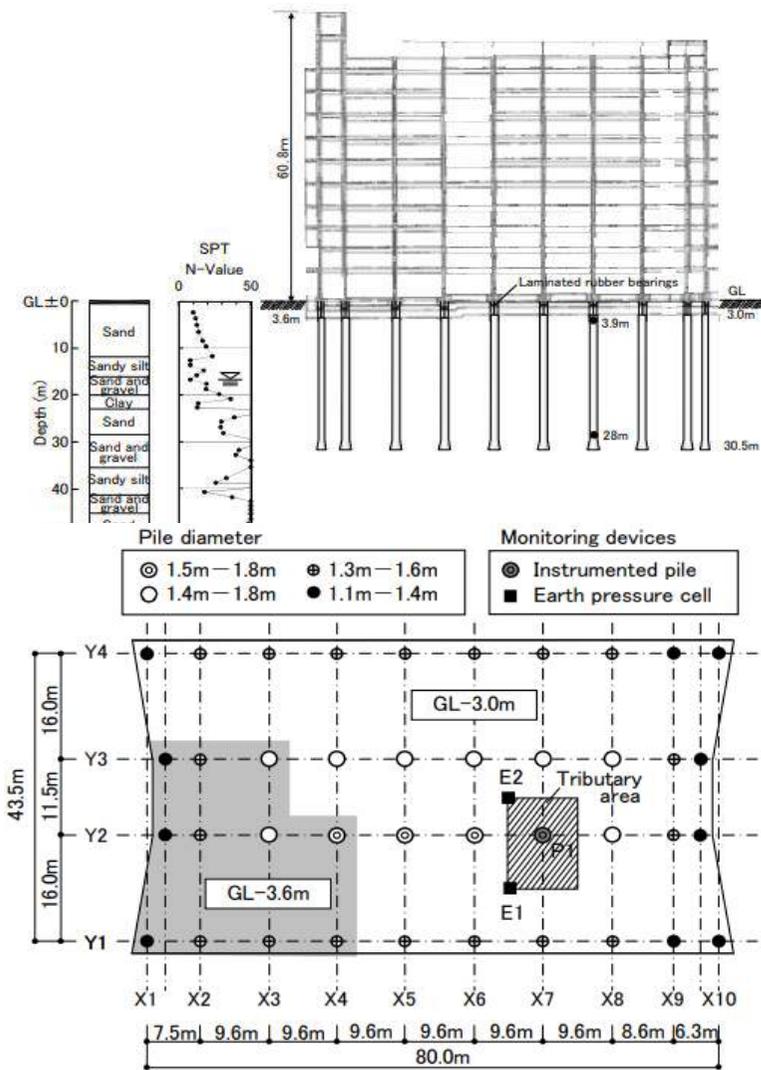
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	EDF. 5 ANDARES			
Ano de construção	1993			
Local	JAPÃO			
Altura (m)	17,1			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas	20			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	2,4			
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	0,3		0,41	
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m) L4 (m)	
	14,6		15,8	
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			18,5	

Referências
 K. Yamashita (2015)

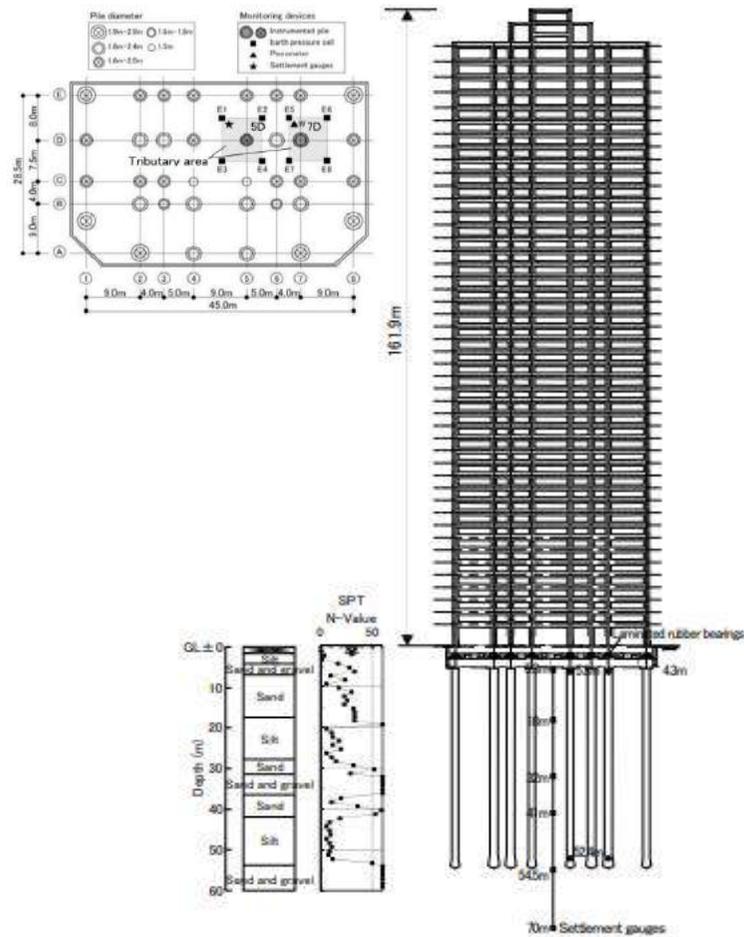
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	EDF. 11 ANDARES			
Ano de construção	2005			
Local	JAPÃO			
Altura (m)	60,8			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas	40			
Espessura do radier	t1 (m)	t2(m)		
	3	3,6		
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	1,1	1,5		
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	27,5	26,9		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
			10	

Referências
 K. Yamashita (2015)

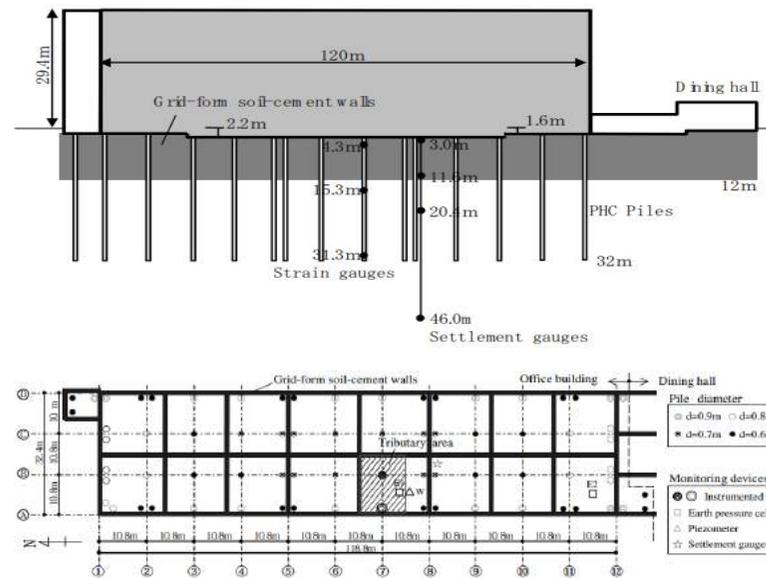
Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	EDF. 47 ANDARES				
Ano de construção	2009				
Local	JAPÃO				
Altura (m)	161,9				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
Tensão					
N de estacas	36				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	4,3				
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	1,5	1,9			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	50,2				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
				29	

Referências
 K. Yamashita (2015)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Nome	Edf. em Minamisuna				
Ano de construção	2004				
Local	Tóquio, Japão				
Altura (m)	29,4				
Área (m ²)	B (m)	L (m)			
Carga (kN)	Real	Estimada			
378000	X				
Tensão					
N de estacas	70				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)			
	2,2	1,6			
Tipo de estacas					
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)		
	0,6	0,9			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)	
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	
	30				
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo		
			31		

Referências
 K. Yamashita (2009)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira
 Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



BANCO DO ESTADO DE SÃO PAULO

SOCIEDADE ANONIMA

Capital: Cr\$ 100.000.000,00

Reservas: Cr\$ 95.016.068,26

Tem a honra de comunicar sua mudança para a nova sede á:

PRAÇA ANTONIO PRADO

onde, a partir de amanhã, 17 do corrente, funcionarão todos os seus serviços.

São Paulo 16 de junho de 1946.

TELEFONES

Rêde interna - 60 Ramais

3-3101
 3-3102
 3-3103
 3-3104
 3-3105
 3-3106
 3-3107
 3-2049
 3-2239
 3-2655

Endereço telegrafico:
BANESPA

Nome	Banco do Estado de São Paulo			
Ano de construção				
Local	São Paulo, Brazil			
Altura (m)	33 Pavimentos - H est = 99 m			
Área (m ²)	B (m)	L (m)		
	700			
Carga (kN)	Real	Estimada		
	264300		X	
Tensão				
N de estacas	317			
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
	3			
Tipo de estacas				
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
	0,5			
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
	18			
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	
	8	19	24	

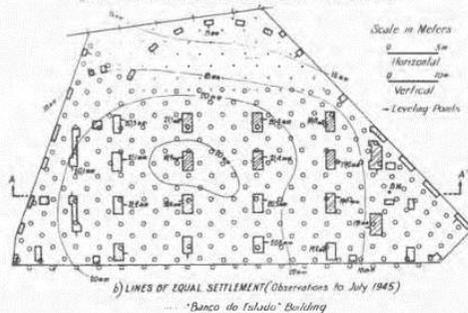
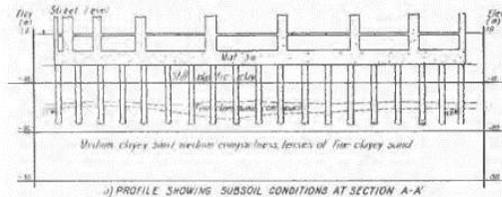
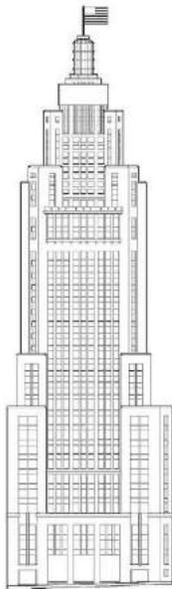
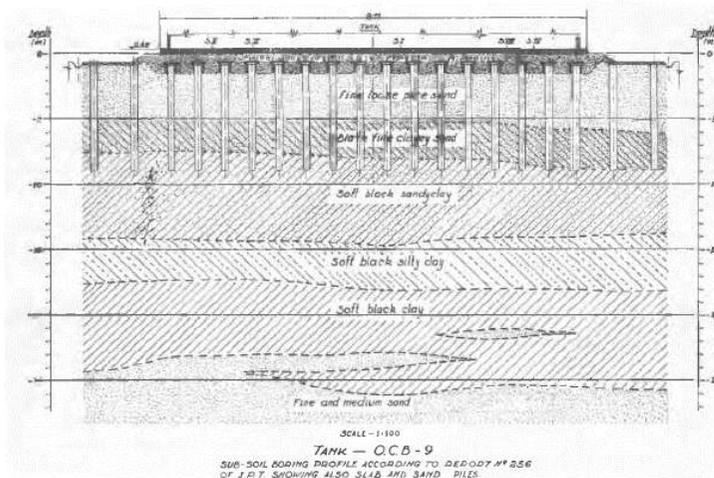


FIG. 2

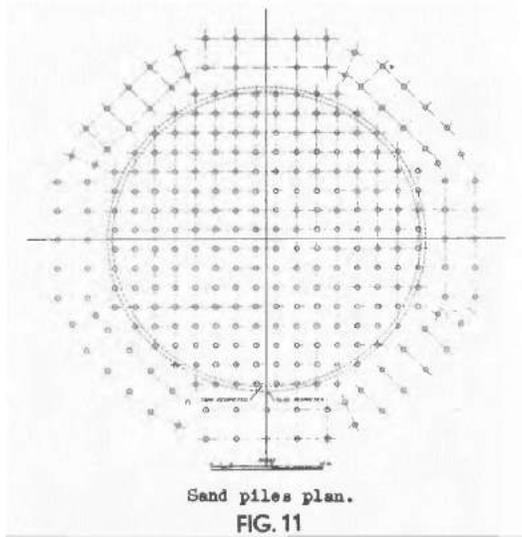
Referências
 Vargas (1948)

Pedro Eugenio Silva de Oliveira

Banco de dados de radier Estaqueado no Mundo



Sub-soil boring profile.
FIG. 3



Sand piles plan.
FIG. 11

Nome	Tanque O.C.B - 9			
Ano de construção				
Local	Alamoia, Santos, Brasil			
Altura (m)	30 pés - 9 m			
Área (m ²)	D (m)	D (m)		
	729	100 pés		
Carga (kN)	Real	Estimada		
Tensão				
N de estacas				
Espessura do radier	t1 (m)	t12(m)		
Tipo de estacas	Estacas de Areia - Compactação tipo Franki			
Diâmetro	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)	
Espaçamento	Real	Estimado	E1 (m)	E2 (m)
Comprimento das Estacas (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
		9		
Recalque (mm)	Mínimo	Médio	Máximo	

Referências

Costa Nunes (1948)