



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



GABRIELA FRANÇA AZEVEDO

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA
DO CONTATO BLOCO-SOLO NO COMPORTAMENTO DE
FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS**

Uberlândia, 2019

GABRIELA FRANÇA AZEVEDO

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA
DO CONTATO BLOCO-SOLO NO COMPORTAMENTO DE
FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

Uberlândia, 2019

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A994 Azevedo, Gabriela França, 1995-
2021 Análise numérica da influência da geometria do contato
bloco-solo no comportamento de fundações estaqueadas
[recurso eletrônico] / Gabriela França Azevedo. - 2021.

Orientador: Jean Rodrigo Garcia.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.421>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Garcia, Jean Rodrigo, 1980-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-
graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 262, PPGEC				
Data:	06 de agosto de 2021	Hora de início:	14:26 h	Hora de encerramento:	17:20 h
Matrícula do Discente:	11912ECV007				
Nome do Discente:	Gabriela França Azevedo				
Título do Trabalho:	Análise numérica da influência da geometria do contato bloco-solo no comportamento de fundações estaqueadas				
Área de concentração:	Estruturas e Construção civil				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Análise da interação solo-fundação e contenção em solos tropicais do Brasil				

Reuniu-se, em sessão pública pela plataforma Conferência Web (MConf) provida pela Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Paulo José Rocha de Albuquerque – FEC/UNICAMP, David de Carvalho – FEAGRI/UNICAMP e Jean Rodrigo Garcia – FECIV/UFU orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Jean Rodrigo Garcia, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Jean Rodrigo Garcia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/08/2021, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Jose Rocha de Albuquerque, Usuário Externo**, em 06/08/2021, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **David de Carvalho, Usuário Externo**, em 06/08/2021, às 18:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2893896** e o código CRC **8DF19FA5**.

Dedico este trabalho a meu Pai Osvaldo.

A minha mãe Zélia.

E a minha vizinha Edith.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir realizar este sonho, e a mim por não desistir.

Agradeço imensamente meus pais e a minha avó Edith.

Ao professor Jean Garcia, por todo apoio, colaboração e empenho.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pela aquisição da licença do *software* RS2 utilizado nas análises realizadas nesta pesquisa.

À Universidade Estadual de Campinas, em especial o professor Paulo Albuquerque pelo empréstimo da ferramenta CESAR-LCPC, utilizada nas análises realizadas nesta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

RESUMO

Quando as estimativas de projeto são maiores que as condições suportadas por uma fundação rasa é conveniente a adição de estacas para melhorar seu desempenho tanto na capacidade de carga, como na redução de recalques. Raramente utiliza-se a combinação de diferentes tipos de fundações, como o radier estaqueado, devido à complexidade que envolve o processo de transferência de cargas dos elementos de fundação ao solo. No Brasil é comum o uso do grupo de estacas unidas por um bloco de coroamento, porém, este sistema não considera a parcela relativa ao contato bloco-solo na capacidade de carga da fundação. Em contrapartida, no radier estaqueado, esse contato colabora com a capacidade total de carga e na redução dos recalques. Assim, analisa-se neste trabalho a influência da geometria de contato bloco-solo e do espaçamento entre estacas na distribuição e transferência de cargas em radier estaqueado e grupo de estacas, por meio de análises híbridas e tridimensionais (3D) pelo método dos elementos finitos (MEF) a partir da variação geométrica do elemento superficial em contato com o solo, e do espaçamento (s) entre estacas, mantendo-se constantes o número de estacas ($L=5\text{m}$ e $d=30\text{cm}$) e a área líquida de contato para cada cenário analisado ($s=4d$, $6d$ e $8d$). Para tanto, foram analisados nove radiers isolados, três grupos de estacas, e nove radiers estaqueados considerando o contato bloco-solo. Verificou-se, que a consideração do contato bloco-solo permitiu um aumento na capacidade de carga do sistema em até 84% quando comparado com o grupo de estacas. Enquanto no radier estaqueado o contato bloco-solo foi responsável por cerca de 15% a 61% do carregamento total da fundação. Os resultados tridimensionais revelam que a escolha da geometria de contato bloco-solo não remete a variação na capacidade de carga do sistema, entretanto apresenta mudanças significativas na forma como ocorre a mobilização do atrito lateral e da transferência de carga axial nas estacas que por sua vez altera a distribuição de cargas entre os elementos da fundação. A análise numérica 3D se mostrou capaz de simular comportamentos fidedignos, desde que validados e calibrados previamente. Por outro lado, a análise híbrida apresentou valores coerentes, porém, conservadores.

Palavras-chave: Fundação estaqueada – Radier estaqueado – Grupo de estacas – Geometria de contato bloco-solo – Análise numérica – Modelagem 3D.

ABSTRACT

When design estimates are bigger than the conditions supported by a shallow foundation, it is convenient to add piles to improve its performance, so much in load capacity and in reducing settlements. The combination of different types of foundations such as piled raft up is rarely used due to the complexity involved in the process of transferring loads from the foundation elements to the ground. However, in Brazil it is common to use the pile group joined by a pile cap, however, this system does not consider the contributing portion of the block-soil contact in the load capacity of the foundation. On the other hand, in the pile raft, the block-soil contact contributes to the total load capacity and reduction of settlements. Thus, in this work will analyze the influence of the contact geometry of the block-soil and the spacing between piles on the distribution and transfer of loads in piled raft and pile group, by two-dimensional and three-dimensional finite element analysis (FEM) from the geometric variation of the surface element and spacing (s) between piles, keeping constant the number of piles ($L = 5\text{m}$ and $d = 30\text{cm}$) and the liquid contact area for each scenario analyzed ($s = 4d$, $6d$ and $8d$). For this purpose, nine single blocks will be analyzed, three groups of piles, in the respective spacing " s ", and nine piled rafts considering the block-soil contact. It was found that the consideration of this contact caused an increase in the load capacity of the system by up to 84%, when compared to the pile groups. While, in the piled raft, the contact block-soil was responsible for about 15% to 61% of the total load of the foundation. The three-dimensional results reveal that the choice of the block-soil contact geometry does not modify in the total load capacity of the system, although it presents significant changes in the mobilization of lateral friction and transfer of axial load in the piles, which in turn alters the load distribution between the foundation elements. The 3D numerical analysis proved to be able to simulate reliable behavior when properly validated and calibrated, when compared, it is clear that the hybrid analysis presents coherent, however, conservative values.

Keywords: Piled Foundation – Piled raft – Pile group – Block-soil contact geometry – Numerical analysis – 3D modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas de fundações: a) estaca isolada, b) grupo de estacas, c) radier estaqueado.	28
Figura 2 – Classificação dos sistemas de fundação.	30
Figura 3 - Recalques da fundação em função do coeficiente (α_{rp}).	31
Figura 4 - Seção transversal do Exhibition Hall 3.	33
Figura 5- Burj Khalifa - Emirados Árabes Unidos.	34
Figura 6 - Chaminé da usina de Isle of Grain, Kent, Inglaterra.	37
Figura 7 - Radier estaqueado anular (a) seção transversal (b) modelo tridimensional.	38
Figura 8 - Modelo tridimensional da chaminé e do radier estaqueado.	39
Figura 9 - Interações de um radier estaqueado entre: estaca-estaca, estaca-radier, radier-radier, estaca-solo, base da estaca-eixo da estaca.	41
Figura 10 – Influência da interação estaca-radier na distribuição da carga axial e atrito lateral em uma (a) estaca isolada única e uma (b) estaca no radier estaqueado.	42
Figura 11 - Comportamento carga vs recalque em diferentes tipos de fundações.	42
Figura 12 - Comparação de zonas de tensão sob (a) estaca isolada e (b) grupo de estacas.	43
Figura 13 - Região de bulbo de tensões provocado por um radier estaqueado.	44
Figura 14 - Geometrias das fundações superficiais.	50
Figura 15 - Recalque percentual médio vs área relativa das estacas.	51
Figura 16 - Modelo de radier estaqueado em escala reduzida (circular e quadrado).	51
Figura 17- Comportamento carga vs recalque de radiers estaqueados (quadrado e circular). .	52
Figura 18 - Redução de recalques diferenciais devido ao acréscimo de estacas centrais.	54
Figura 19 - Esquema de projeto com estacas para redução de recalques diferenciais.	54
Figura 20 - Curva carga vs recalque.	55
Figura 21 - Curva carga vs recalque simplificada.	60
Figura 22 - Abordagem do radier equivalente para grupo de estacas.	62
Figura 23 - Substituição do grupo de estacas, ou radier estaqueado, pelo pilar equivalente. ..	63
Figura 24 - Área A_g para um pequeno radier estaqueado.	64
Figura 25. Radier estaqueado dividido em unidades individuais.	66
Figura 26 - Fundações analisadas.	72
Figura 27 – Fundação estaqueada: quadrada, circular e octogonal, respectivamente.	74
Figura 28 - Parâmetros médios do perfil geológico.	76

Figura 29 - Sólido axissimétrico.....	80
Figura 30- Sistema de coordenadas cilíndricas (r, z, θ).....	81
Figura 31 – Conversão do radier estaqueado em pilar equivalente.	84
Figura 32 – Representação axissimétrica do pilar equivalente.....	85
Figura 33 – Condições de contorno.....	86
Figura 34 – Deslocamentos horizontais nas extremidades do modelo híbrido com $s=4d$	86
Figura 35 - Deslocamentos horizontais nas extremidades do modelo híbrido com $s=6d$	87
Figura 36 - Deslocamentos horizontais nas extremidades do modelo híbrido com $s=8d$	87
Figura 37 – Refinamento da malha em torno do pilar equivalente.	89
Figura 38 – Elemento triangular de 6 nós.....	89
Figura 39- Curvas carga vs recalque pela análise híbrida.	91
Figura 40 - Curvas carga vs recalque experimental e numérico de Garcia (2015) e híbrido. ..	93
Figura 41 - $\frac{1}{4}$ do modelo tridimensional do radier estaqueado quadrado modelado.....	95
Figura 42 – Densidade da malha no radier estaqueado circular (PRC8d).....	96
Figura 43 -Densidade da malha no radier estaqueado octogonal (PRO8d).....	97
Figura 44 - Densidade da malha no radier estaqueado quadrado (PRS8d).	97
Figura 45 – Tipos de malhas com função: (a) Linear (b) Quadrática.....	98
Figura 46 - Radier estaqueado circular (PRC6d).....	100
Figura 47 - Radier estaqueado octogonal (PRO6d).....	100
Figura 48 - Radier estaqueado quadrado (PRS6d).	100
Figura 49 - Grupo de estacas circular (PGC6d).	101
Figura 50 - Grupo de estacas octogonal (PGO6d).....	101
Figura 51 - Grupo de estacas quadrangular (PGS6d).....	101
Figura 52 - Condições de contorno (PRS6d).....	102
Figura 53 – Carga aplicada no topo de $\frac{1}{4}$ do pilar.....	103
Figura 54 - Curvas carga vs recalque (comparação).	104
Figura 55 - Curva carga vs recalque experimental e numérica de estaca única.	105
Figura 56 – Parâmetros geotécnicos do solo adotados nas análises 3D.	106
Figura 57 – Cargas de ruptura convencionada nos métodos equivalentes e seus respectivos espaçamentos.	108
Figura 58 – Carga de ruptura convencionada na base e no topo do pilar equivalente.	109
Figura 59 - Fator de interação entre o grupo de estacas e o radier e proporção de carga resistida pelo radier e o grupo de estacas (P_r/P_p).	109
Figura 60 - Rigidez versus espaçamento.	110

Figura 61 - Deslocamentos no modelo híbrido 4d a 10%, 50% e 100% da carga de ensaio.	111
Figura 62 - Deslocamentos no modelo híbrido 6d a 10%, 50% e 100% da carga de ensaio.	112
Figura 63 - Deslocamentos no modelo híbrido 8d a 10%, 50% e 100% da carga de ensaio.	112
Figura 64 - Comportamento carga vs recalque na análise híbrida.	113
Figura 65 - Transferência de carga média ao longo do comprimento da estaca nos espaçamentos: 4d, 6d e 8d.	114
Figura 66 - Força de atrito lateral ao longo do comprimento da estaca.	114
Figura 67 - Localização do ponto para obtenção dos deslocamentos totais.	115
Figura 68 - Corte transversal na estaca a 0, -2 e -4m de profundidade no PRC6d a 100% do carregamento.	116
Figura 69 - Transferência de carga axial média obtidas com 9 e 17 linhas.	117
Figura 70 - Localização de pontos para obtenção de dados.	117
Figura 71 - Deslocamentos no PRC4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	119
Figura 72 - Deslocamentos no PRO4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	119
Figura 73 - Deslocamentos no PRS4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	120
Figura 74 - Curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados PRC4d, PRO4d e PRS4d.	121
Figura 75 - Compressão no PRC4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	122
Figura 76 - Compressão no PRO4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	123
Figura 77 - Compressão no PRS4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	123
Figura 78 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRC4d.	124
Figura 79 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRO4d.	124
Figura 80 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRS4d.	125
Figura 81 - Distribuição de cargas no radier estaqueado circular PRC4d.	125
Figura 82 - Distribuição de cargas no radier estaqueado octogonal PRO4d.	126
Figura 83 - Distribuição de cargas no radier estaqueado quadrado PRS4d.	126
Figura 84 - Fator de segurança nos radiers estaqueados s=4d.	127
Figura 85 - Deslocamentos no PG4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	129
Figura 86 - Curvas carga vs recalque do grupo de estacas com espaçamento 4d.	129
Figura 87 - Compressão no grupo de estacas (PG4d) a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	130
Figura 88 - Transferência de cargas em uma estaca do grupo de estacas (PG4d).	131
Figura 89 - Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG4d).	131
Figura 90 - Fator de segurança no grupo de estacas com espaçamento 4d.	132
Figura 91 - Comparação entre as curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados (PR) e grupo de estacas (PG) com espaçamento 4d.	133

Figura 92 – Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG4d) e no radier estaqueado (PRC4d).	133
Figura 93 – Comparação do Fator de Segurança entre o grupo de estacas (PG4d) e radiers estaqueados (PR4d).	134
Figura 94 - Deslocamentos no PRC6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	135
Figura 95 - Deslocamentos no PRO6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	136
Figura 96 - Deslocamentos no PRS6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.....	136
Figura 97 - Curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados PRC6d, PRO6d e PRS6d.	137
Figura 98 - Compressão no PRC6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.....	138
Figura 99 - Compressão no PRO6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.....	138
Figura 100 - Compressão no PRS6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	139
Figura 101 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado circular PRC6d.	139
Figura 102 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado octogonal PRO6d.	140
Figura 103 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado quadrado PRS6d.	140
Figura 104 – Distribuição de cargas no radier estaqueado circular PRC6d.	141
Figura 105 - Distribuição de cargas no radier estaqueado octogonal PRO6d.	141
Figura 106 - Distribuição de cargas no radier estaqueado quadrado PRS6d.....	142
Figura 107 – Fator de segurança nos radiers estaqueados com espaçamento $s=6d$	143
Figura 108 - Deslocamentos no PG6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.....	144
Figura 109 - Curvas carga vs recalque do grupo de estacas com espaçamento $6d$	145
Figura 110 - Compressão no grupo de estacas (PG6d) a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	145
Figura 111- Transferência de cargas em uma estaca do grupo de estacas (PG6d).....	146
Figura 112 - Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG6d).	146
Figura 113 - Fator de segurança no grupo de estacas com espaçamento $6d$	147
Figura 114 - Comparação entre as curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados e grupo de estacas com espaçamento $6d$	148
Figura 115 – Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG6d) e no radier estaqueado (PRC6d).....	148
Figura 116 – Fatores de segurança para os radiers estaqueados (PR6d) e grupo de estacas (PG6d).	149
Figura 117 - Deslocamentos no PRC8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	150
Figura 118 - Deslocamentos no PRO8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.....	151

Figura 119 - Deslocamentos no PRS8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.....	151
Figura 120 - Curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados PRC8d, PRO8d e PRS8d. ..	152
Figura 121 - Compressão no PRC8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.....	153
Figura 122 - Compressão no PRO8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.....	153
Figura 123 - Compressão no PRS8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	154
Figura 124- Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRC8d.	154
Figura 125 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRO8d.....	155
Figura 126 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRS8d.....	155
Figura 127 - Distribuição de cargas no radier estaqueado circular PRC8d.....	156
Figura 128- Distribuição de cargas no radier estaqueado octogonal PRO8d.....	156
Figura 129 - Distribuição de cargas no radier estaqueado quadrado PRS8d.....	157
Figura 130 - Fator de segurança nos radiers estaqueados s=8d.....	158
Figura 131 - Deslocamentos no PG8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.....	159
Figura 132- Curvas carga vs recalque do grupo de estacas com espaçamento 8d.	160
Figura 133 - Compressão no grupo de estacas (PG8d) a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	160
Figura 134 - Transferência de cargas em uma estaca do grupo de estacas (PG8d).....	161
Figura 135 - Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG8d).	162
Figura 136 - Fator de segurança no grupo de estacas com espaçamento s=8d.	162
Figura 137 – Comparação entre as curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados (PR) e grupo de estacas (PG) com espaçamento 8d.	163
Figura 138 – Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG8d) e no radier estaqueado (PRC8d).....	164
Figura 139 – Comparação do Fator de Segurança entre o grupo de estacas (PG8d) e radiers estaqueados (PR8d).	165
Figura 140 – Curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados (PR) e grupo de estacas (PG).	166
Figura 141 – Comparação entre os grupos de estacas: (PG) transferência de cargas axial média para s=4d, 6d e 8d, (PG4d) atrito lateral para s=4d, (PG6d) atrito lateral para s=6d e (PG8d) atrito lateral para s=8d.	168
Figura 142 – Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG) s=4d, s=6d e s=8d.....	169
Figura 143 – Deslocamentos totais no PRC6d e PG6d a 100% da carga de ensaio.....	170
Figura 144 – Comparativo entre curvas de transferência de cargas e atrito lateral entre o grupo de estacas (PG) e os radiers estaqueados (PR) s=4d.	171

Figura 145 - Comparativo entre curvas de transferência de cargas e atrito lateral entre o grupo de estacas (PG) e os radiers estaqueados (PR) $s=6d$	172
Figura 146 - Comparativo entre curvas de transferência de cargas e atrito lateral entre o grupo de estacas (PG) e os radiers estaqueados (PR) $s=8d$	173
Figura 147 - Carga convencional de ruptura em relação à área de contato do radier/estacas.	174
Figura 148 - Distribuição de cargas nos radiers estaqueados circular (C), octogonal (O) e quadrado (S) com $s=4d$	175
Figura 149 - Distribuição de cargas nos radiers estaqueados circular (C), octogonal (O) e quadrado (S) com $s=6d$	175
Figura 150 - Distribuição de cargas nos radiers estaqueados circular (C), octogonal (O) e quadrado (S) com $s=8d$	176
Figura 151 - Relação da capacidade de carga (ζ_{PR}) entre o PR e PG nos espaçamentos 4d, 6d e 8d.	177
Figura 152 - Proporção de carga absorvida pelas estacas a 100% do carregamento nos radiers estaqueados circular (C), octogonal (O) e quadrado (S).	178
Figura 153 - Relação entre α_{UR} e $(A_G/A)/(s/d)$ nos radiers estaqueados com $s=4, 6$ e $8d$. ..	178
Figura 154 - Zona de influência nas diferentes geometrias do radier estaqueado.	180
Figura 155 - Relação entre carga absorvida pelas estacas e a proporção da área de influência pela área do bloco nos radiers estaqueados com $s=4, 6$ e $8d$	181
Figura 156 - Relação entre carga absorvida pelo radier e a proporção da área de influência pela área do bloco nos radiers estaqueados com $s=4, 6$ e $8d$	182
Figura 157 - Deslocamentos no RIC4 a 10% 50% e 100% da carga de ensaio.	183
Figura 158 - Curvas carga vs recalque dos radiers isolados RIC4, RIO4 e RIS4.	184
Figura 159 - Curvas carga vs recalque dos radiers isolados RIC6, RIO6 e RIS6.	184
Figura 160 - Curvas carga vs recalque dos radiers isolados RIC8, RIO8 e RIS8.	185
Figura 161 - Deslocamentos nas diferentes fundações a 100% do carregamento.	186
Figura 162 - Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI circular 4d.	186
Figura 163 - Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI octogonal 4d.	187
Figura 164 - Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI quadrado 4d.	187
Figura 165 - Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI circular 6d.	188
Figura 166 - Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI octogonal 6d.	188
Figura 167 - Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI quadrado 6d.	189
Figura 168 - Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI circular 8d.	189

Figura 169 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI octogonal 8d.	190
Figura 170 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI quadrado 8d.	190
Figura 171 – Comportamento carga vs recalque nas fundações de base circular com espaçamento $s=4d$	192
Figura 172 – Comportamento carga vs recalque nas fundações de base octogonal com espaçamento $s=4d$	192
Figura 173 – Comportamento carga vs recalque nas fundações de base quadrada com espaçamento $s=4d$	193
Figura 174 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base circular com espaçamento $s=6d$	193
Figura 175 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base octogonal com espaçamento $s=6d$	194
Figura 176 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base quadrada com espaçamento $s=6d$	194
Figura 177 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base circular com espaçamento $s=8d$	195
Figura 178 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base octogonal com espaçamento $s=8d$	195
Figura 179 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base quadrada com espaçamento $s=8d$	196
Figura 180 – Rigidez global do radier estaqueado (K_{pr}) e a rigidez correspondente: ao radier isolado (K_r) e o grupo de estacas (K_p) do sistema nas diferentes geometrias e espaçamentos estudados.	197
Figura 181 – Rigidez global dos radiers estaqueados (K_{pr}) ao longo dos estágios de carregamento.	198
Figura 182 – Rigidez do grupo de estacas (K_p) do PR ao longo dos estágios de carregamento.	198
Figura 183 – Rigidez do radier isolado (K_r) no PR ao longo dos estágios de carregamento.	199
Figura 184 – Rigidez do grupo de estacas sem contato bloco-solo (K_{PG}) ao longo dos estágios de carregamento.	199
Figura 185 – Rigidez do radier isolado (K_{RI}) ao longo dos estágios de carregamento.	200
Figura 186 - Cargas de ruptura convencionada a 10% do diâmetro da estaca para as fundações estaqueadas nos métodos do pilar e radier equivalente, análise híbrida 2D e tridimensional.	201

Figura 187 – Transferência de carga axial média no grupo de estacas 4d.	217
Figura 188 - Transferência de carga axial média no grupo de estacas 6d.	217
Figura 189 - Transferência de carga axial média no grupo de estacas 8d.	218
Figura 190 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado circular 4d.	218
Figura 191 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado circular 6d.	218
Figura 192 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado circular 8d.	219
Figura 193 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado octogonal 4d.	219
Figura 194 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado octogonal 6d.	219
Figura 195 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado octogonal 8d.	220
Figura 196 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado quadrado 4d.	220
Figura 197 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado quadrado 6d.	220
Figura 198 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado quadrado 8d.	221
Figura 199 - Deslocamentos no RIC4 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	222
Figura 200 - Deslocamentos no RIO4 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	223
Figura 201 - Deslocamentos no RIS4 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	223
Figura 202 - Deslocamentos no RIC6 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	224
Figura 203 - Deslocamentos no RIO6 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	224
Figura 204 - Deslocamentos no RIS6 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	225
Figura 205 - Deslocamentos no RIC8 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	225
Figura 206 - Deslocamentos no RIO8 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	226
Figura 207 - Deslocamentos no RIS8 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.	226

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos blocos de acordo com o espaçamento entre estacas.....	75
Tabela 2 - Módulo cisalhante (G) médio em cada perfil do solo.	76
Tabela 3 – Parâmetros geotécnicos de entrada para o método do Pilar Equivalente	77
Tabela 4 - Parâmetros geotécnicos de entrada para o método do Radier Equivalente.....	78
Tabela 5 – Densidade da malha adotada nas análises.	89
Tabela 6. Parâmetros do solo e da fundação utilizados nas análises híbridas.	94
Tabela 7 - Densidade da malha tridimensional.	99
Tabela 8 - Parâmetros do material das estacas e radier adotados nas análises 3D.....	106
Tabela 9 – Proporção da área de influência nas diferentes geometrias e espaçamentos do radier estaqueado.	180
Tabela 10 - Parâmetros geométricos das fundações estaqueadas sem contato bloco-solo....	213
Tabela 11 - Parâmetros geométricos das fundações superficiais	213
Tabela 12 - Parâmetros geométricos das fundações estaqueadas com contato bloco-solo ...	214
Tabela 13 -Valores de carga e recalque obtidos para os radiers estaqueados circular (PRC), octogonal (PRO) e quadrado (PRS) nos respectivos espaçamentos ente estacas $s=4d$, $6d$ e $8d$	215
Tabela 14 - Valores de carga e recalque obtidos para os grupos de estacas nos respectivos espaçamentos ente estacas $s=4d$, $6d$ e $8d$	216
Tabela 15 - Valores de carga e recalque obtidos para os radiers isolados circular (RIC), octogonal (RIO) e quadrado (RIS) nas dimensões correspondentes aos espaçamentos ente estacas $s=4d$, $6d$ e $8d$	216

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estruturas com fundações em radier estaqueado na argila de Frankfurt.	34
Quadro 2- Casos históricos de fundações estaqueadas.....	46
Quadro 3 - Métodos de cálculo em radiers estaqueados.	57
Quadro 4- Áreas de acordo com os espaçamentos entre estacas.	71
Quadro 5 - Modelos de fundações analisadas	73

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo de atrito do solo;
ϕ_C	Ângulo de atrito da fundação;
A_a	Área da seção transversal do aço;
A_c	Área útil da secção transversal do concreto;
A_{eq}	Área equivalente do radier;
A_g	Área total do grupo de estacas;
A_L	Área líquida de contato;
A_p	Soma das áreas da seção transversal das estacas;
B	Largura do radier equivalente;
C_C	Coesão da fundação;
C_s	Coesão do solo;
d	Diâmetro da estaca;
d_{eq}	Diâmetro do pilar equivalente;
D_{eq}	Diâmetro equivalente;
E_a	Módulo de Young do aço;
E_c	Módulo de Young do concreto;
E_{comp}	Módulo de deformabilidade composto;
E_p	Módulo de Young das estacas;
E_s	Média do módulo de Young correspondente ao solo que as estacas estão inseridas;
E_s	Módulo de Young do solo;
E_{sav}	Módulo de Young médio do solo ao longo do eixo da estaca;
E_{sb}	Módulo de Young da camada resistente da ponta da estaca;
E_{sl}	Módulo de Young do solo na ponta da estaca;
FS	Fator de segurança;
G	Módulo cisalhante do solo;
G_{avg}	Módulo de cisalhamento médio;
G_b	Módulo de cisalhamento na ponta da estaca;
G_l	Módulo de cisalhamento a uma profundidade de $Z=L$;
h	Altura total do bloco;
h	Altura total do bloco;
I	Fator de influência do radier;

I	Fator de influência;
k_1	Rigidez de uma estaca única medida no topo;
k_p	Rigidez da estaca;
k_{PG}	Rigidez do grupo de estacas;
k_{PG}	Rigidez do grupo de estacas;
k_{pr}	Rigidez do radier estaqueado;
k_r	Rigidez do radier isolado;
k_r	Rigidez do radier isolado;
K_{RI}	Rigidez do radier isolado;
L	Comprimento da estaca;
n	Número de estacas;
P_l	Carga total aplicada;
P_b	Cargas que chega na base da estaca;
P_{PG}	Carga aplicada ao grupo de estacas;
P_r	Carga transferida pelo radier;
P_t	Carga total aplicada;
P_{up}	Capacidade de carga última no grupo de estacas;
q	Carga vertical procedente da estrutura;
Q_{PG}	Carga do grupo de estacas;
Q_{pile}	Carga transferida pelas estacas;
Q_{PR}	Carga total da estrutura;
Q_R	Carga do radier;
r_0	Raio da estaca;
r_c	Raio médio do radier sob estacas;
R_c	Resistência à compressão simples;
R_{eq}	Raio equivalente;
R_{eq}	Raio equivalente;
r_m	Raio máximo de influência da estaca;
R_s	Taxa de recalque do grupo de estacas;
R_t	Resistência à tração do material;
s	Espaçamento entre estacas;
S_{eq}	Recalque do radier equivalente;

S_{PR}	Recalque de uma fundação estaqueada;
S_R	Recalque de um radier isolado;
w_{PG}	Recalque do grupo de estacas;
w_r	Recalque do radier;
W_t	Recalque no topo da estaca;
x	Proporção de carga transferida pelo radier;
α_{pr}	Razão entre a carga transferida pelo grupo de estacas e a carga total do radier estaqueado;
α_{rp}	Fator de interação estaca-radier;
γ	Peso específico do solo;
ν	Coefficiente de Poisson;
ν_s	Coefficiente de Poisson do solo;
ρ	Recalque;
a	Extensão do bloco em determinada direção;
a	Dimensão do bloco;
α_p	Dimensão do pilar em determinada direção;
a_p	Dimensão do pilar na direção considerada;

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas;
MEF	Método dos Elementos Finitos;
PR	Radier Estaqueado;
PG	Grupo de estacas;
RI	Radier isolado;
PRS4d	Radier estaqueado quadrado com espaçamento $s=4d$;
PRS6d	Radier estaqueado quadrado com espaçamento $s=6d$;
PRS8d	Radier estaqueado quadrado com espaçamento $s=8d$;
PRC4d	Radier estaqueado circular com espaçamento $s=4d$;
PRC6d	Radier estaqueado circular com espaçamento $s=6d$;
PRC8d	Radier estaqueado com circular espaçamento $s=8d$;
PRO4d	Radier estaqueado octogonal com espaçamento $s=4d$;
PRO6d	Radier estaqueado octogonal com espaçamento $s=6d$;
PRO8d	Radier estaqueado octogonal com espaçamento $s=8d$;
PG4d	Grupo de estacas com espaçamento $s=4d$;
PG6d	Grupo de estacas com espaçamento $s=6d$;
PG8d	Grupo de estacas com espaçamento $s=8d$;
IRS4	Radier isolado quadrado 4;
IRS6	Radier isolado quadrado 6;
IRS8	Radier isolado quadrado 8;
IRC4	Radier isolado circular 4;
IRC6	Radier isolado circular 6;
IRC8	Radier isolado circular 8;
IRO4	Radier isolado octogonal 4;
IRO6	Radier isolado octogonal 6;
IRO8	Radier isolado octogonal 8;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	25
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	25
1.2	JUSTIFICATIVA.....	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1	FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS.....	27
2.1.1	<i>Grupo de estacas vs radier estaqueado</i>	28
2.2	APLICABILIDADE DAS FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS	32
2.2.1	<i>Edifícios de grande altura.....</i>	32
2.2.2	<i>Torres eólicas.....</i>	35
2.2.3	<i>Chaminés industriais.....</i>	37
2.3	COMPORTAMENTO DO RADIER ESTAQUEADO	39
2.3.1	<i>Efeito de contato bloco-solo.....</i>	45
2.4	EFEITO DA GEOMETRIA DO BLOCO	48
2.5	PROJETO DE RADIER ESTAQUEADO.....	52
2.5.1	<i>Filosofias de Projeto</i>	53
2.5.2	<i>Etapas de projeto</i>	56
2.6	MÉTODOS DE CÁLCULO	57
2.6.1	<i>Métodos simplificados.....</i>	58
2.6.2	<i>Interações do radier estaqueado.....</i>	66
2.6.3	<i>Método dos Elementos Finitos</i>	69
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	71
3.1	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	71
3.1.1	<i>Altura do bloco.....</i>	74
3.2	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO SOLO E CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CONCRETO	75
3.3	PRINCÍPIOS ADOTADOS NOS MÉTODOS EQUIVALENTES	77
3.4	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	78
3.4.1	<i>Software RS2.....</i>	79
3.4.2	<i>Software CESAR-LCPC</i>	80
4	MODELAGEM NUMÉRICA.....	82

4.1	ANÁLISE HÍBRIDA	83
4.1.1	<i>Testes de validação do modelo híbrido</i>	91
4.1.2	<i>Calibração das propriedades geotécnicas</i>	92
4.2	ANÁLISE TRIDIMENSIONAL	94
4.2.1	<i>Testes de validação do software CESAR-LCPC</i>	103
4.2.2	<i>Calibração do modelo e propriedades geotécnicas</i>	104
5	RESULTADOS	107
5.1	MÉTODOS EQUIVALENTES	107
5.2	MÉTODO HÍBRIDO	110
5.3	MÉTODO TRIDIMENSIONAL	114
5.3.1	<i>Obtenção dos dados de saída</i>	115
5.3.2	<i>Radier estaqueado e grupo de estacas com espaçamento 4d</i>	118
5.3.3	<i>Radiers estaqueados e grupo de estacas com espaçamento 6d</i>	134
5.3.4	<i>Radiers estaqueados e grupo de estacas com espaçamento 8d</i>	149
6	COMPILAÇÃO DAS SIMULAÇÕES E DISCUSSÕES	166
6.1	ANÁLISE TRIDIMENSIONAL	166
6.2	MÉTODOLOGIAS DE CÁLCULO	200
7	CONCLUSÕES	203
8	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	205
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	206

1 INTRODUÇÃO

A crescente tendência à verticalização proveniente do alto crescimento demográfico e pela escassez de áreas construtivas especialmente nos grandes centros urbanos é um assunto frequentemente discutido no cenário da construção civil, pois conduzem à necessidade de estruturas cada vez mais altas que por sua vez necessitam de sistemas de fundações cada vez mais eficientes e capazes de suportar as cargas resultantes das grandes estruturas com maior segurança e economia.

Normalmente quando as estimativas de projeto são maiores que as condições suportadas por uma fundação rasa é comum a adição de estacas para melhorar o desempenho da fundação. Embora ainda haja uma resistência em unir fundações rasas (bloco/radier/sapata) com profundas (estacas) pelo fato de transferirem de maneiras diferentes os esforços decorrentes da estrutura para o solo. O uso das fundações estaqueadas vem se popularizando nos últimos anos, especialmente nas estruturas de grande porte, pois apresentam uma melhoria na eficiência quando comparadas com as fundações tradicionais.

Estudos mostram que a principal razão para a inclusão de estacas é controlar os recalques totais e diferenciais (EL-MOSSALLAMY; LUTZ; DUERRWANG, 2009; FATTAH; AL-MOSAWI; AL-ZAYADI, 2014; LIMA, 2007; PRAKOSO; KULHAWY, 2001; RANDOLPH, 1994) pois elas fornecem a maior parte da rigidez em cargas de utilização, enquanto a fundação superficial fornece uma capacidade adicional no carregamento final. Com isso, é possível reduzir o número de estacas quando o bloco/radier, em contato com o solo, contribui com esta capacidade adicional (BEZERRA, 2003; POULOS; SMALL; CHOW, 2011; RANDOLPH, 1994).

É de suma importância a consideração do contato bloco-solo pois apresenta um aumento substancial na capacidade de carga do sistema (BALAKUMAR et al., 2018; BEZERRA, 2003; LIMA, 2007; SALES, 2000) que por sua vez possibilita reduzir os custos da fundação (EL-MOSSALLAMY; LUTZ; DUERRWANG, 2009; FREITAS, 2018; GARCIA, 2015; KATZENBACH et al., 2005; OH et al., 2009; POULOS, 2001), da mesma forma que há uma redução na quantidade de materiais utilizados na fundação que conseqüentemente reduzirá os impactos ambientais.

Entretanto por muito tempo essa contribuição da superfície da fundação rasa junto ao solo subjacente foi negligenciada independentemente se o bloco se encontra em contato com o solo ou não. Todavia, estudos mostram que o bloco/radier possui uma participação significativa na capacidade de carga nas fundações estaqueadas, além de que a não consideração do contato bloco/solo, pode interferir diretamente na previsão da capacidade de carga e de recalques do sistema de fundação. Um estudo comparativo apresentado por Long (2010) acerca da distribuição percentual de cargas entre as estacas e o radier demonstra que o contato radier-solo pode contribuir com cerca de 51% da carga total do sistema.

As fundações estaqueadas são comumente conhecidas na comunidade geotécnica como sendo a combinação de uma fundação rasa com uma profunda, especificamente, a interligação de um radier, bloco ou sapata com uma estaca ou grupo de estacas. Na literatura geotécnica cada autor apresenta diferentes abordagens quando se trata da consideração ou não do contato bloco-solo na terminologia destas fundações. Nesta pesquisa denomina-se como radier estaqueado a união entre fundações rasas e profundas, em que o elemento superficial apresenta contato direto com o solo, colaborando assim, com a transferência de cargas para solo.

Enquanto o grupo de estacas, como descrito por Sales (2000) e Bezerra (2003) é a fundação na qual apenas as estacas suportam toda a parcela da carga, enquanto que o bloco tem exclusivamente a função estrutural de ligar as estacas, ou seja, não se considera que o bloco é capaz de transferir cargas para o solo. Contudo, o conceito do grupo de estacas é normalmente utilizado nas fundações brasileiras apesar de que na realidade o bloco mantém contato direto com o solo.

Dessa forma, faz-se necessário compreender os parâmetros que influenciam o desempenho da fundação estaqueada a fim de otimizar o sistema. Embora nestes últimos anos venha sendo estudado com mais afinco a fundação estaqueada seguindo uma tendência crescente na consideração do contato bloco-solo, ainda são raros os estudos que analisam a influência da geometria desse contato no comportamento da fundação. Dentre os estudos existentes, Garcia e Albuquerque (2021) chama a atenção de que a geometria do bloco provoca uma interferência no comportamento em termos de capacidade de carga e rigidez do elemento de fundação.

Tal contexto denota a necessidade de uma pesquisa mais detalhada acerca da influência da geometria de base da fundação em contato com o solo, pois esta geometria pode interferir

diretamente no comportamento da fundação. Assim, esse estudo visa uma melhor compreensão acerca da mudança geométrica do elemento superficial de fundação em contato com o solo por meio de análises numéricas em fundações do tipo radier estaqueado, grupo de estacas e radier isolado.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência da geometria de contato bloco-solo no comportamento das fundações estaqueadas, assim como no compartilhamento e na transferência de carga dos elementos que compõem o sistema de fundação e o solo, a partir de modelos bi e tridimensionais, baseados em análises híbridas e em elementos finitos, previamente calibrados e validados, analisar-se-á o comportamento de modelos de fundações em radiers estaqueados, grupos e estacas e radier isolados no perfil de solo do campo experimental da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas-SP.

1.1.2 Objetivos específicos

Para uma maior compreensão acerca do tema, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o comportamento das fundações em radier estaqueado, grupo de estacas e radier isolado, a partir da variação da forma geométrica da base em contato com o solo, e do espaçamento entre estacas em fundações estaqueadas;
- Avaliar o comportamento carga vs recalque dos elementos de fundação analisados, visando compreender a influência na capacidade de carga e no recalque quanto se altera a geometria do contato bloco-solo e o espaçamento entre estacas;
- Determinar a influência da geometria do contato bloco-solo e do espaçamento entre estacas na distribuição e transferência de cargas nas fundações estaqueadas, assim como no compartilhamento de carga;
- Avaliar a variação do atrito lateral ao longo do fuste da estaca ocasionada pelo contato bloco-solo e/ou espaçamento entre estacas.
- Comparar a capacidade de suporte das fundações estaqueadas entre os métodos teóricos e análises híbridas e tridimensionais previamente validadas e calibradas.

1.2 JUSTIFICATIVA

São escassos os trabalhos que retratam sobre a maneira que a geometria da fundação superficial afeta no comportamento das fundações estaqueadas. No Brasil, frequentemente utiliza-se o grupo de estacas unidas por um bloco, mas, este sistema não considera a parcela de carga contribuinte do contato bloco-solo, assim como também não leva em consideração o tipo de geometria da base do bloco.

Ainda assim, as fundações estaqueadas, com contato bloco-solo, contribuem de maneira significativa na redução dos recalques diferenciais e totais (RANDOLPH, 1994), no aumento da capacidade de carga do sistema (BEZERRA, 2003; SALES, 2000), além da redução de custos na fundação (GARCIA, 2015). Ressalta-se que boa parte destes benefícios é consequência da participação do contato bloco-solo, que é muitas vezes negligenciada, evidenciando a importância da elaboração de pesquisas para uma melhor análise e compreensão sobre as fundações estaqueadas, sobretudo, acerca do tipo da geometria de base que compreende o bloco/radier.

Dessa forma, os resultados provenientes desta dissertação visam contribuir com análises relacionadas à influência de diferentes geometrias de base da fundação superficial e do espaçamento entre estacas em fundações estaqueadas (com e sem contato bloco-solo) e rasas por meio de análises numéricas híbridas 2D e 3D pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), visando ampliar o conhecimento quanto à variação geométrica da fundação superficial no comportamento carga vs recalque bem como na distribuição e transferência de cargas entre os elementos que compõem o sistema de fundação e o solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS

É de conhecimento da comunidade geotécnica que as fundações podem ser classificadas pela maneira que transferem a carga para o solo e pela sua geometria. A fundação rasa, superficial ou direta, transmite a carga para o solo por meio da sua grande área de base, enquanto as fundações profundas, transferem a carga ao solo tanto pela sua área de base (ou ponta), quanto pela sua área lateral, ou ainda pela combinação de ambas. Conforme Garcia (2015), a fundação estaqueada pode ser considerada como um elemento de fundação de inúmeras interfaces.

A adesão do conceito de fundação estaqueada de acordo com Fattah, Yousif e Al-Tameemi (2015) inicia-se por volta da década de 50, sendo abordado por vários autores, incluindo Zeevaert (1957), Davis e Poulos (1972), Hooper (1973), Burland et al. (1977), Katzenbach e Reul (1997). Além destes, há relatos que em 1977, na Conferência de Tóquio, já havia discussão acerca do uso de estacas agrupadas como redutoras de recalque em fundações superficiais (MANDOLINI; VIGGIANI, 1997).

Sales (2000) cita o estudo de Kishida e Meyerhof (1965) como um dos primeiros a levar em consideração o contato da fundação superficial apoiada no solo. Sabe-se que a contribuição desse contato na distribuição de cargas e controle de recalques deve ser analisado com atenção pois representa uma diferença significativa quando esse contato é desconsiderado. Por outro lado, nas fundações estaqueadas, na maioria das vezes as estacas são adicionadas para reduzir o recalque (RANDOLPH, 1994) ou ainda quando os requisitos de projeto forem maiores que a capacidade de suporte da fundação superficial (POULOS, 2001).

A fundação estaqueada constitui numa combinação de elementos (radier/bloco, estaca e solo) capazes de suportar grandes cargas decorrentes da superestrutura com uma maior economia quando comparada com as tradicionais fundações (GARCIA; ALBUQUERQUE, 2019; KATZENBACH; ARSLAN; MOORMANN, 2000; POULOS, 2001; RANDOLPH, 1994; SOUSA, 2003).

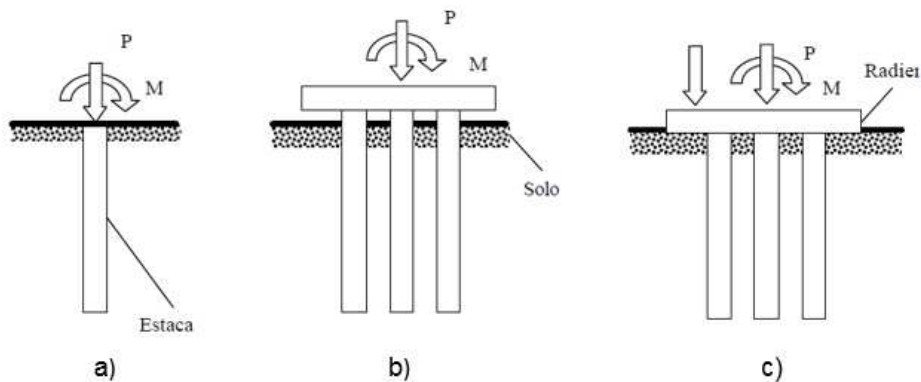
Quando se trata de fundações estaqueadas percebe-se que há algumas divergências na comunidade geotécnica quanto aos princípios desse tipo de fundação. Os conceitos e classificações abordados para a presente pesquisa estão explanados na próxima seção.

2.1.1 Grupo de estacas vs radier estaqueado

As fundações estaqueadas podem ser divididas pela existência ou pela ausência do contato da fundação superficial com o solo. Para se ter um melhor entendimento acerca dos tipos de fundações abordados neste trabalho é importante diferenciá-los. A Figura 1 exemplifica as principais diferenças entre os sistemas: (a) estaca isolada, (b) grupo de estacas e (c) radier estaqueado.

Constata-se que a estaca isolada pode transmitir a carga ao perfil de solo (em determinadas condições) pela sua base e/ou pela sua superfície lateral. Do mesmo modo é a transferência de cargas do grupo de estacas, porém deve se levar em consideração a influência da interação entre esses elementos. Enquanto o radier estaqueado apresenta em adicional a interação entre os vários elementos: radier-estaca, radier-solo, estaca-estaca e estaca-solo.

Figura 1 - Sistemas de fundações: a) estaca isolada, b) grupo de estacas, c) radier estaqueado.



Fonte: Bezerra (2003).

Cabe salientar que o grupo de estacas consiste na união de várias estacas conectadas por um elemento estrutural, normalmente de rigidez elevada, que permite a transmissão de cargas da estrutura para as estacas. Nesse tipo de fundação, mesmo o bloco possuindo contato direto com o solo, (o que muitas vezes é natural na realidade) esse contato não é considerado com relação à capacidade de carga e previsão de recalques do sistema.

Enquanto a ausência do contato bloco-solo é característica dominante no grupo de estacas, no radier estaqueado a propriedade primordial é a capacidade que o elemento superficial, em contato com o solo, contribui na capacidade de carga e na redução dos recalques do sistema de fundação (BEZERRA, 2003; SALES, 2000).

Neste trabalho o termo “radier estaqueado” é utilizado para abordar sistemas de fundação cujo contato da fundação superficial com o solo são considerados, além da ideia citada por Garcia (2015) que os caracterizam como qualquer tipo de fundação superficial que se sustente não apenas em estacas, como também no próprio solo que é apoiado, interligando ambos os efeitos de carga e recalque com os elementos existentes. Enquanto o termo “grupo de estacas” é adotado para sistemas de fundações, onde, a parcela de carga resultante do contato bloco-solo é totalmente desprezada.

Nesse sentido, as fundações estaqueadas podem ainda ser identificadas a partir da proporção de carga transmitida entre cada elemento de fundação (bloco/radier e estacas) e o solo. Assim, para uma fundação em radier estaqueado, o modo de distribuição e transferência de cargas varia entre o comportamento de um radier isolado, quando o grupo e estacas apresenta pouca participação de carga na fundação, e o grupo de estacas, quando a parcela de carga predominante é resultante do grupo de estacas embora ainda há uma pequena participação de carga pelo radier.

Em suma, Mandolini (2003) utiliza-se do cálculo de um coeficiente (α_{pr}) para classificar fundações em radier isolado, grupo de estacas e radier estaqueado (Figura 2). Este coeficiente pode ser obtido a partir da Equação 1, que compreende a razão entre a quantidade de carga transferida pelas estacas ($\sum Q_{pile}$), e a carga total da fundação (Q_{PR}).

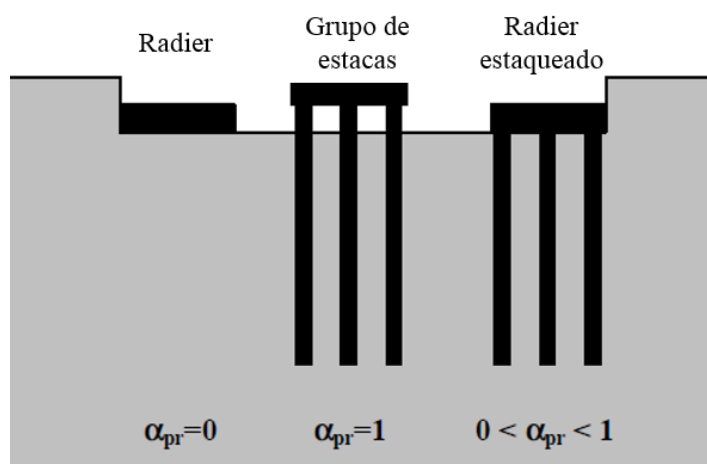
$$\alpha_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{pile,i}}{Q_{PR}} \quad (1)$$

Conforme sua rigidez, um radier estaqueado transfere a soma das cargas verticais de uma estrutura (Q_{PR}) para o solo através da pressão de contato do radier com uma força resultante (Q_R) e transfere para as estacas, uma força resultante (Q_{PG}), descrita por:

$$Q_{PR} = Q_R + Q_{PG} = Q_R + \sum_{i=1}^n Q_{pile,i} \quad (2)$$

Dessa forma, como exemplifica a Figura 2 uma fundação superficial sem estacas (radier isolado) é caracterizada por um coeficiente $\alpha_{pr}=0$; do mesmo modo, um $\alpha_{pr}=1$ identifica um grupo de estacas interligados a um bloco, possuindo este, ausência do contato com o solo; enquanto que o intervalo entre $0 < \alpha_{pr} < 1$ é característico de uma fundação em radier estaqueado, ou seja, tanto o radier quanto o grupo de estacas trabalham concomitantemente na transferência cargas da estrutura ao solo (MANDOLINI, 2003).

Figura 2 – Classificação dos sistemas de fundação.

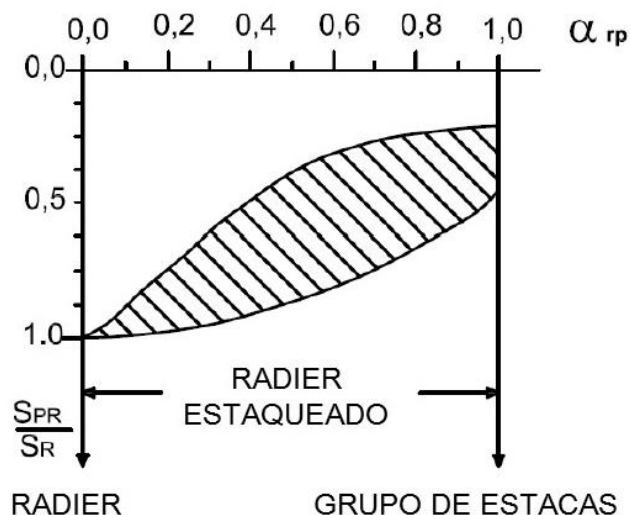


Fonte: Adaptado de Mandolini (2003).

Dentro desse contexto, Mandolini (2003) chama atenção para o fato de que a metodologia tradicional de projeto de uma fundação estaqueada consiste em assegurar que a carga estrutural possa ser transportada totalmente pelas estacas com um fator de segurança aceitável considerando a capacidade máxima das estacas. Ressalta-se que apesar de ser uma prática recorrente em muitos países, essa abordagem considera a fundação em radier estaqueado como um grupo de estacas ao admitir $\alpha_{pr}=1$, ou seja, mesmo com o elemento superficial em contato com o solo, desconsidera-se a capacidade de carga proveniente deste contato bloco/solo.

Katzenbach et. al. (2005) apresentam esse coeficiente denominado como α_{rp} , sendo a razão entre a soma das cargas transportadas pelas estacas, e a carga total proveniente da superestrutura. Do mesmo modo que o coeficiente α_{pr} , um coeficiente α_{rp} igual a zero representa um radier sem a presença de estacas, e um coeficiente de valor 1 caracteriza um grupo de estacas ignorando a existência do radier. Na Figura 3, os autores correlacionam o coeficiente α_{rp} com a relação do recalque de uma fundação estaqueada S_{PR} pelo recalque de um radier isolado S_R .

Figura 3 - Recalques da fundação em função do coeficiente (α_{rp}).



Fonte: Adaptado de Katzenbach, et al. (2005).

A Figura 3 comprova que o comportamento de um sistema em radier estaqueado em relação aos recalques é compreendido entre o comportamento de um radier isolado e de um grupo de estacas, demonstrando que a classificação das fundações estaqueadas é diretamente dependente da parcela de carga contribuinte pela fundação superficial e pela parcela de carga resultante das fundações profundas.

As fundações estaqueadas no geral abrangem uma complexa interação tridimensional entre seus elementos e o solo, enquanto o grupo de estacas envolve uma interação mais simples entre as estacas e o solo. O radier estaqueado apresenta uma interação árdua entre o radier, estacas e solo, que dificulta a escolha deste tipo de fundação na prática. Em termos de capacidade de carga, o grupo de estacas tem como colaboradores apenas o grupo de estacas, enquanto que o radier estaqueado conta com a colaboração de todo o sistema combinado (estacas + radier) garantindo uma maior segurança da estrutura (BALAKUMAR et al., 2018)

Dessa forma, pode-se afirmar que a complexidade de projetar uma fundação em radier estaqueado pode ser compensada por uma maior confiabilidade e segurança no sistema. Independentemente do tipo de fundação estaqueada esse sistema está presente nas maiores construções distribuídas por todo o mundo, desde arranha-céus, chaminés industriais, e torres eólicas apresentadas a seguir.

2.2 APLICABILIDADE DAS FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS

Apresenta-se nessa subseção alguns estudos e aplicações de diferentes estruturas, como por exemplo nos edifícios de grande altura, torres de energia eólica, e chaminés industriais que se desenvolveram em fundações estaqueadas.

2.2.1 Edifícios de grande altura

É notável que nestes últimos anos, tem havido um rápido aumento no número de estruturas construídas sobre as fundações estaqueadas, especialmente nos edifícios de grande altura em diversos países do mundo. Algumas dessas grandes estruturas mencionadas por Katzenbach, Leppa e Choudhury (2017) são listadas abaixo:

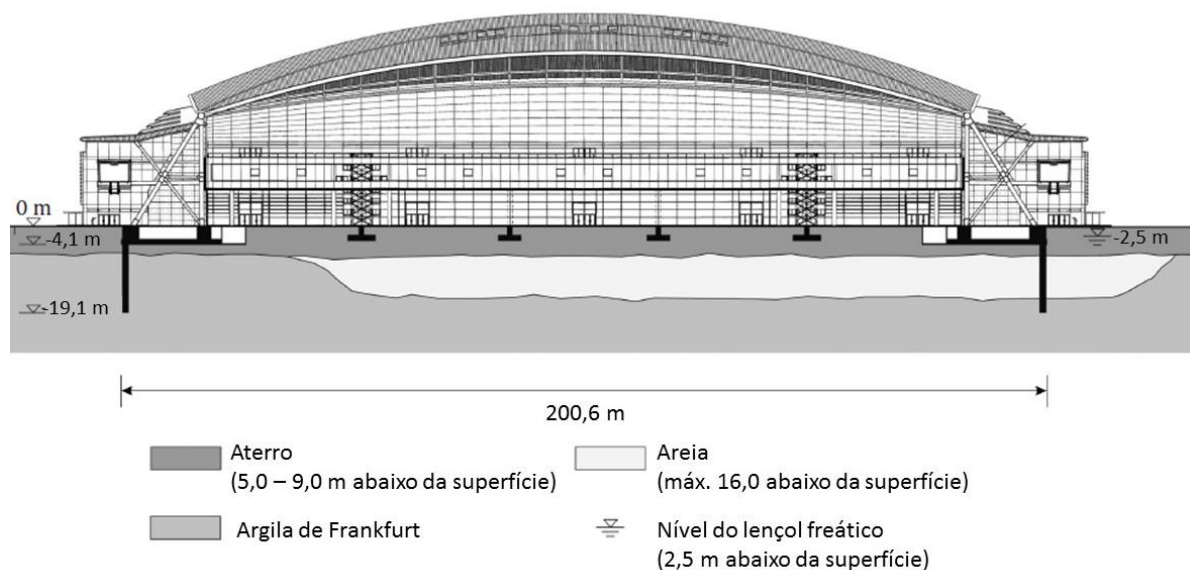
- 1- A torre de escritórios *Sony Center* de 103 m de altura em Berlim, Alemanha, com uma área de 2600 m², foi construída sobre fundação estaqueada entre os anos de 1998 a 2000.
- 2- A *Federation Tower*, um complexo com duas torres situadas na cidade de Moscou, Rússia. Iniciada sua construção em 2003, as torres possuem alturas estimadas de 450m e 230 metros.
- 3- O *Exhibition Hall 3*, concluído em 2001 é um dos maiores salões de exposições da Europa, localizado em Frankfurt, Alemanha. O salão tem um comprimento de 210 m, uma largura de 130 m, e uma altura de aproximadamente 45 m (Figura 4). Vale ressaltar que devido à forte interação entre a superestrutura, a fundação e o subsolo, tornou-se necessário uma maior limitação nos deslocamentos da fundação. O projeto de fundações do Exhibition Hall possui dois radiers estaqueados (um em cada extremidade) e foi fundamentado em análises 3D pelo método dos elementos finitos.

Em seu trabalho, Poulos (2017) apresenta outras grandes estruturas:

- 1- *Emirates Twin Towers*, as “Torres Gêmeas” localizadas em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos. A torre mais alta possui 355m de altura e 52 andares enquanto a outra possui 305 m de altura e 52 andares ambas construídas em radier estaqueado.

- 2- *Burj Khalifa*, em Dubai, Emirados Árabes Unidos, atualmente o mais alto edifício do mundo com 828m de altura e 160 andares, o Burj Khalifa foi construído sob radier estaqueado (Figura 5).
- 3- Finalizada no início de 2016, a *Torre de Shanghai*, em Shanghai, na China tem 632 m de altura e 128 andares. As condições de solo consistiam principalmente de argilas aluviais, e o tipo de fundação escolhida foi o radier estaqueado.

Figura 4 - Seção transversal do Exhibition Hall 3.



Fonte: Katzenbach, Leppla, Choudhury (2017)

Além destes, no solo argiloso de Frankfurt, na Alemanha há registros de grandes construções em radier estaqueado desde o ano de 1983, algumas destas estruturas são apresentadas no Quadro 1, bem como o número de andares, área total da fundação e quantidade de estacas. Para mais detalhes sobre tais estruturas e seus projetos de fundação, consultar Katzenbach, Arslan e Moormann (2000).

No Brasil, o edifício *Akasaka* construído sobre uma fundação estaqueada na cidade de São Paulo foi tema de estudo em Poulos (1994). De acordo com o autor, fundações em sapatas isoladas seria inicialmente proposto para o projeto, porém adicionou-se estacas com o intuito de elevar o fator de segurança (FS), que passou de 1,57 para 2,25, além de reduzir o recalque, que inicialmente era superior a 50mm chegando a um limite de 30mm. Dessa forma, a fundação

superficial passaria a suportar aproximadamente 35% do carregamento, enquanto as escacas seriam responsáveis por 65%.

Figura 5- Burj Khalifa - Emirados Árabes Unidos.



Fonte: Poulos (2017)

Quadro 1 – Estruturas com fundações em radier estaqueado na argila de Frankfurt.

Estruturas	Período de construção	Nº de andares	Área da fundação (m ²)	Quantidade de estacas
Edifício Messe-Torhaus	1983-1985	22-30	2 x 430	2 x 42
Messeturm	1988-1991	64	3457	64
DG-Bank (Westendstrasse 1)	1990-1993	53	2940	40
American Express	1991-1992	16	3570	35
Taunustor Japan-Centre	1994-1996	29	1920	25
Fórum (Kastor e Pollux)	1994-1997	22/32	14000	26/22
Centro de congressos Messe Frankfurt	1995-1997	13-14	10200	141
Main Tower	1996-1999	57	3800	112
Eurotheum	1997-1999	31	1830	25
Frankfurter Welle	1988-2001	13	2500	102

Fonte: Adaptado de Katzenbach, Arslan e Moormann (2000)

Ainda no Brasil, conforme o ranking internacional *The Skyscrapercenter*, uma das maiores estruturas em construção na América Latina está localizada em Balneário Camboriú. As duas torres residenciais *Yachthouse* são compostas por 81 pavimentos em cada torre, estimadas para 280,3 metros de altura e previsão de conclusão em 2021. Esta grandiosa estrutura, é sustentada por fundação estacada, que levou aproximadamente um ano e meio para ficar pronta, consumindo mais de 4600m³ de concreto apenas para a fundação superficial (WOLNEY, 2017).

2.2.2 Torres eólicas

Além destas estruturas, as fundações em radier estacado estão presentes nas fundações de torres eólicas ou aerogeradores, que são equipamentos que transformam a energia eólica provenientes do vento em energia elétrica, são vantajosas, pois é uma das fontes de energia que menos prejudicam o meio ambiente.

Os carregamentos das torres eólicas, desde as hélices até a fundação, diferentemente de outras estruturas, apresentam comportamentos cíclicos e alternados que podem apresentar graves danos a estrutura ao longo do tempo (RIBEIRO, 2014). Os diversos efeitos e interações desta estrutura devem ser levadas em consideração no projeto de fundação, como por exemplo a fadiga, o momento fletor e a rigidez rotacional. O radier estacado, para determinados perfis de solo, tem se mostrado uma das melhores opções como fundação de torres eólicas e vem se tornando tema de estudo em todo o mundo.

Svensson (2010) por exemplo, estudou e comparou diferentes sistemas de fundação para aerogeradores, (uma fundação superficial e duas fundações estacadas) em três tipos de solo. Concluiu que todos os sistemas são viáveis, porém, em um dos solos, o radier estacado resultou em elevados comprimentos de estacas, aumentando consideravelmente o custo da fundação. Entretanto, segundo o autor que modelou em 2D, um modelo tridimensional provavelmente resultaria em um projeto mais confiável, podendo levar a menores recalques e certamente em um menor comprimento e número de estacas.

É importante enfatizar que o tipo mais comum de fundação offshore, fundação marítima, são as fundações estacadas, utilizadas desde 1940 em profundidades de água de até 150 m, e de 5 a 120 m de profundidade abaixo do fundo do mar. São consideradas a mais econômica dentre

os diversos tipos de fundações, além de ser facilmente construída (WESTGATE; DEJONG, 2005).

Ravichandran, Shrestha e Piratla (2018) estudaram o projeto e otimização de fundações em radier estaqueado para uma turbina eólica de 130m de altura em solo argiloso e arenoso. Foi analisado variações dos parâmetros de resistência ao solo e velocidade do vento, além do comprimento de estacas e raio do radier. O estudo mostrou que para ambos os tipos de solo, os requisitos de projeto podem ser atendidos aumentando o número e comprimento de estacas, ou aumentando o raio do radier quando a velocidade do vento é aumentada. Verificou-se ainda que o recalque diferencial controlou o projeto final e foi considerado como a resposta principal no processo de otimização.

No Brasil, há algumas contribuições interessantes que englobam o comportamento de radiers estaqueados para torres eólicas. Uma destas, elaborada por Ribeiro (2014) onde estuda a fadiga em fundações superficiais e estaqueadas para estas estruturas. O autor buscou seguir todas as considerações utilizadas pelos fabricantes de turbinas. A fundação estaqueada estudada possuía geometria de bloco octogonal de aproximadamente 2m de espessura composto por 24 estacas de 60 cm de diâmetro, com 23m de comprimento. Concluiu-se que ambas as fundações são viáveis, a fim de atender aos requisitos de rigidez global, comprovando a viabilidade quanto aos parâmetros de rigidez e de dimensões razoáveis de geometria em planta.

Freitas (2018) estudou a fundação de um aerogerador assente sobre um arenito consolidado na cidade de Macau-RN no Brasil. Por serem grandes estruturas com momentos de elevada magnitude, necessitam de fundações eficazes que suportem os esforços provenientes do aerogerador com segurança. Assim como verificado em outras estruturas, a autora observou que o radier estaqueado para aerogeradores podem reduzir o custo, assim como o tempo de execução da obra ao considerar a contribuição do bloco na transmissão dos esforços.

As torres eólicas são estruturas complexas que apresentam diversos efeitos e interações exclusivas desse sistema que são conduzidos para a fundação, estas por sua vez, devem ser capazes de atender as imposições estipuladas pela estrutura, transferindo ao solo os esforços provenientes do aerogerador com segurança. Nesse sentido, conclui-se que a fundação estaqueada é qualificada para atender tais esforços seguramente.

2.2.3 Chaminés industriais

Chaminés são estruturas importantes nas indústrias e são usadas para descartar os poluentes para a atmosfera. Atualmente, as chaminés estão sendo construídas cada vez mais altas devido à elevada demanda de controle de poluição, podendo chegar em mais de 400m de altura. A análise deste tipo de estrutura deve ser tratada diferentemente de outras formas de estruturas, pois são sensíveis aos esforços do vento (JAYALEKSHMI; JISHA; SHIVASHANKAR, 2015).

Durante a década de 70, muitas chaminés industriais ainda eram construídas com tijolo. Um relato considerável é que algumas destas chaminés foram construídas em fundações estacadas, como por exemplo, a principal chaminé da usina “Isle of Grain” em Kent na Inglaterra (Figura 6), construída em 1975 com 245m de altura sobre uma fundação estacada de 30m de diâmetro (HEMSLEY, 2000).

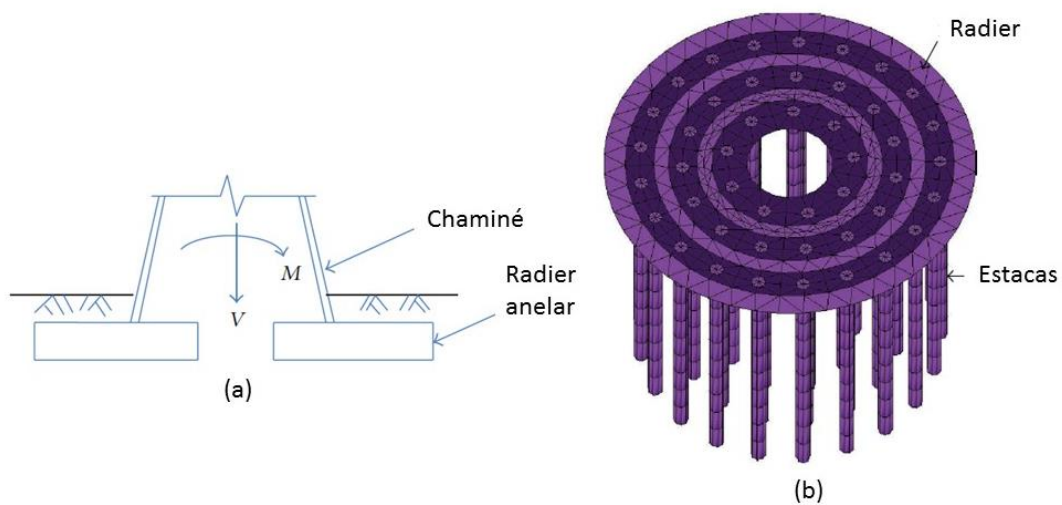
Figura 6 - Chaminé da usina de Isle of Grain, Kent, Inglaterra.



Fonte: Hemsley (2000).

Jayalekshmi et al. (2014) estudaram análises sísmicas de chaminés com fundações anelares em radier estaqueado por meio do método dos elementos finitos (MEF) em 3D considerando a flexibilidade do solo (Figura 7). Segundo os autores, as fundações em radier anulares são razoavelmente mais econômicas do que o radier circular para chaminés industriais. Ademais, quando as condições geotécnicas não são favoráveis para o radier isolado, as fundações estaqueadas são frequentemente adotadas.

Figura 7 - Radier estaqueado anular (a) seção transversal (b) modelo tridimensional.

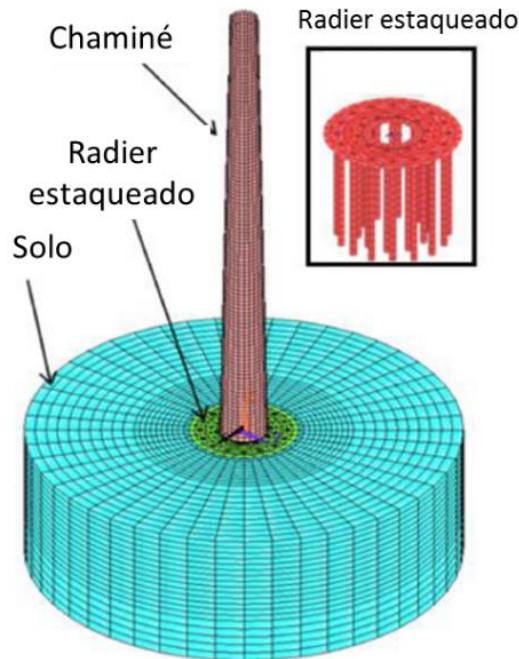


Fonte: Adaptado de Jayalekshmi et al. (2014)

Dentro desse contexto, Jayalekshmi, Jisha e Shivashankar (2017) estudaram fundações anelares em radier isolado e radier estaqueado para chaminés de 100 e 400 m de altura construídas em solo composto por areia solta ou média pelo método dos elementos finitos tridimensional. O modelo da chaminé sobre o radier estaqueado pode ser visualizado na Figura 8.

Os autores constataram que o comportamento para o radier isolado varia consideravelmente, dependendo da rigidez do solo subjacente e a rigidez da fundação. Concluíram que o radier estaqueado é o tipo de fundação mais adequada para chaminés altas, além disso, o recalque do radier estaqueado em uma chaminé com 400m de altura pôde ser reduzido em até 62%, devido à adição de estacas na base anelar do radier em solo arenoso.

Figura 8 - Modelo tridimensional da chaminé e do radier estaqueado.



Fonte: Adaptado de Jayalekshmi, Jisha e Shivashankar (2017).

Ao considerar os referidos aspectos, é importante observar que a escolha da fundação em radier estaqueado pode ser empregada com sucesso, de modo viável e com segurança para as mais diversas estruturas, tais como edifícios de grande altura, chaminés industriais e torres eólicas. Vale destacar, a fundamental importância de levar em consideração o contato bloco-solo nestes projetos, visto que esse contato eleva a capacidade de carga do sistema, dentre outros fatores destacados na subseção 2.3.1.

2.3 COMPORTAMENTO DO RADIER ESTAQUEADO

A análise de um radier estaqueado é considerado um dos problemas mais desafiadores da engenharia de fundações devido a interação entre os elementos estruturais (radier, estacas) e o solo. Cada elemento interage com outro gerando alterações no comportamento de cada elemento quando comparado com ele isolado. Dessa forma, para um projeto com maior segurança é essencial compreender e considerar esses efeitos, principalmente o efeito de contato bloco-solo que muitas vezes é negligenciada.

A resistência em utilizar o radier estaqueado é resultante do complexo mecanismo de transferência de cargas da fundação. Frequentemente utiliza-se o grupo de estacas unidas por um bloco, mas este sistema desconsidera a parcela de carga contribuinte do contato do bloco-solo, como também não leva em consideração a geometria de base desse bloco.

Convém destacar que o contato bloco-solo exerce tensões adicionais que anteriormente não existiam no caso do bloco suspenso ao solo, o qual modifica todo o sistema de transferência de cargas. Demonstrando mais uma vez, a importância da consideração deste contato e a necessidade de estudar com maiores detalhes a influência dessa área e geometria de contato.

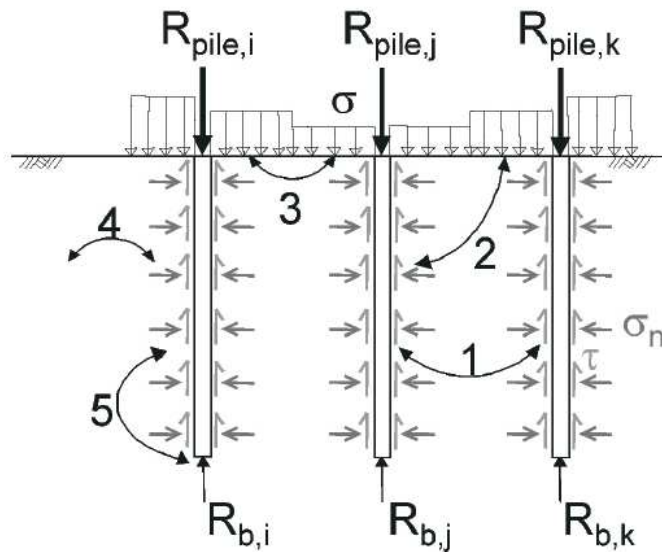
É sabido que a complexidade do radier estaqueado é proveniente da união entre diferentes tipos de fundações e da interação entre os elementos estruturais e o solo. Essa interação é dependente de uma série de parâmetros, como: diâmetro, comprimento, espaçamento e configuração das estacas; do tamanho, espessura e rigidez do radier (BALAKUMAR, 2008); além dos parâmetros do solo como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson (BEZERRA, 2003).

Em geral, o comportamento do grupo de estacas sofre influência do elemento superficial a partir da premissa que este encontra-se em contato com o solo. Quando isso ocorre, aumentará a interação entre os elementos de fundação gerando uma maior capacidade de suporte do bloco, compartilhando cargas que anteriormente eram absorvidas apenas pelas estacas (GARCIA; ALBUQUERQUE; FREITAS NETO, 2014).

Apresenta-se na Figura 9, as possíveis interações entre os elementos que compõem o radier estaqueado. Nesta, é possível visualizar que cada elemento de fundação influencia e é influenciado por outro elemento. Uma estaca por exemplo é exposta aos efeitos provocados por outras estacas e pelo radier, e o radier por sua vez sofre influência das tensões geradas pelo grupo de estacas.

Nesse sentido, ao considerar cada elemento (estaca, radier e solo) separadamente nota-se que a interação entre eles é inevitável. O radier certamente é afetado pela presença das estacas e as estacas provavelmente são afetadas pela pressão do solo a partir do radier, pois o aumento das tensões laterais sobre as estacas afeta sua capacidade de resistência lateral (NOVAK; REESE; WANG, 2005).

Figura 9 - Interações de um radier estaqueado entre: estaca-estaca, estaca-radier, radier-radier, estaca-solo, base da estaca-eixo da estaca.

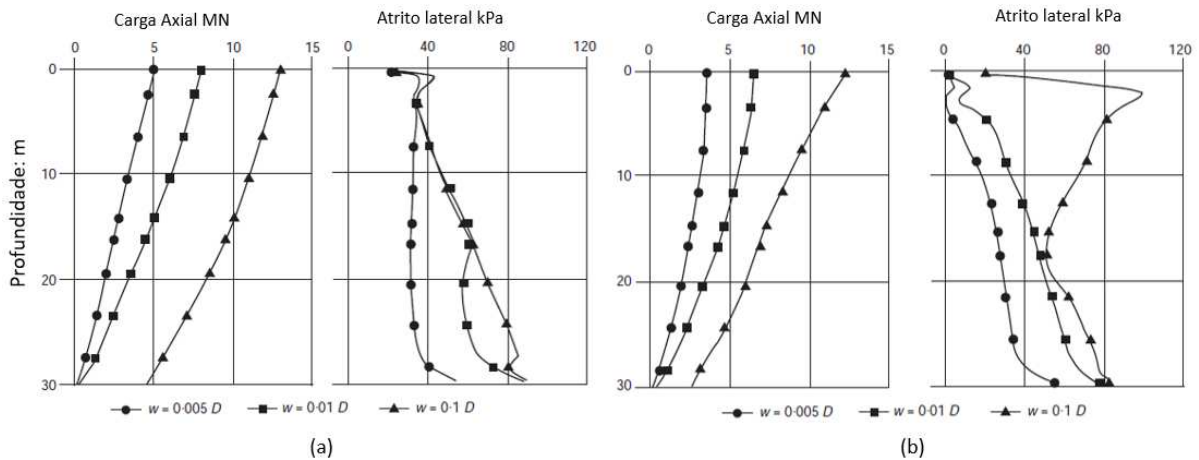


Fonte: Katzenbach et al. (2005).

O aumento da capacidade de uma fundação estaqueada devido à interação bloco-solo-estaca é causada principalmente pelo aumento da resistência do eixo da estaca que por sua vez, é induzido pelo aumento da pressão horizontal contra o eixo da estaca sob a pressão de contato bloco-solo. O efeito de contato bloco-solo é predominante na parte superior da estaca, enquanto o efeito da zona de ruptura da estaca é predominante na parte inferior (LONG, 1993).

Esse comportamento pode ser verificado a partir da comparação entre o comportamento de uma estaca isolada unitária e de uma única estaca no radier estaqueado apresentado na Figura 10. Observa-se que para maiores deslocamentos (w), e conseqüentemente maiores cargas, a estaca do radier estaqueado (Figura 10 b) apresenta uma maior mobilização de atrito lateral na parte superior da estaca em consequência da presença do radier, ou seja, a transferência de cargas pelo contato do radier com o solo provoca um aumento do nível de tensões no solo gerando maior mobilização do atrito lateral com maior intensidade no topo da estaca próximo ao radier.

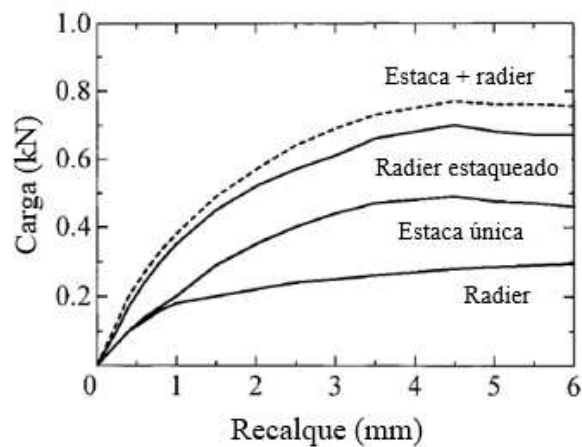
Figura 10 – Influência da interação estaca-radier na distribuição da carga axial e atrito lateral em uma (a) estaca isolada única e uma (b) estaca no radier estaqueado.



Fonte: Modificado de Katzenbach, Arslan e Moormann (2000).

Outro aspecto fundamental a ser destacado é o comportamento carga vs recalque do radier estaqueado. No seu estudo, Wu, Chai e Huang (2002) emprega a análise numérica para estudar fundações em um solo composto por argila mole fundamentado na interação entre estaca e radier. Comparando as curvas carga vs recalque em diferentes tipos de fundações apontadas na Figura 11, nota-se que a capacidade de suporte do radier estaqueado é menor que a capacidade de suporte do radier isolado e das estacas quando somadas separadamente. Vale ressaltar ainda que o recalque de uma estaca no grupo é maior do que o recalque de uma estaca isolada possuindo ambas, a mesma carga de trabalho.

Figura 11 - Comportamento carga vs recalque em diferentes tipos de fundações.

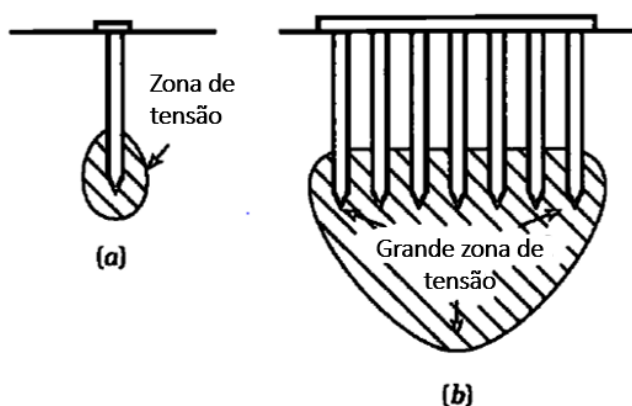


Fonte: Wu, Chai e Huang (2002).

Isso pode ser explicado pelo efeito resultante do grupo de estacas, que ao transmitirem ao solo as cargas que lhes são aplicadas, geram uma sobreposição de tensões, nas quais o recalque de uma estaca do grupo de estacas normalmente não é equivalente ao recalque de uma estaca isolada considerando uma mesma carga por estaca.

Essa sobreposição de tensões pode ser verificada na Figura 12 em que o autor comparou uma estaca isolada com o grupo de estacas. Observa-se que para uma estaca isolada, apenas uma pequena zona de solo compreensível é submetida a tensão vertical (Figura 12 a), enquanto que no grupo de estacas (Figura 12 b), esta área é bem maior, ou seja, o efeito de grupo gera um bulbo (zona) de tensões considerável que pode resultar em maiores recalques.

Figura 12 - Comparação de zonas de tensão sob (a) estaca isolada e (b) grupo de estacas.



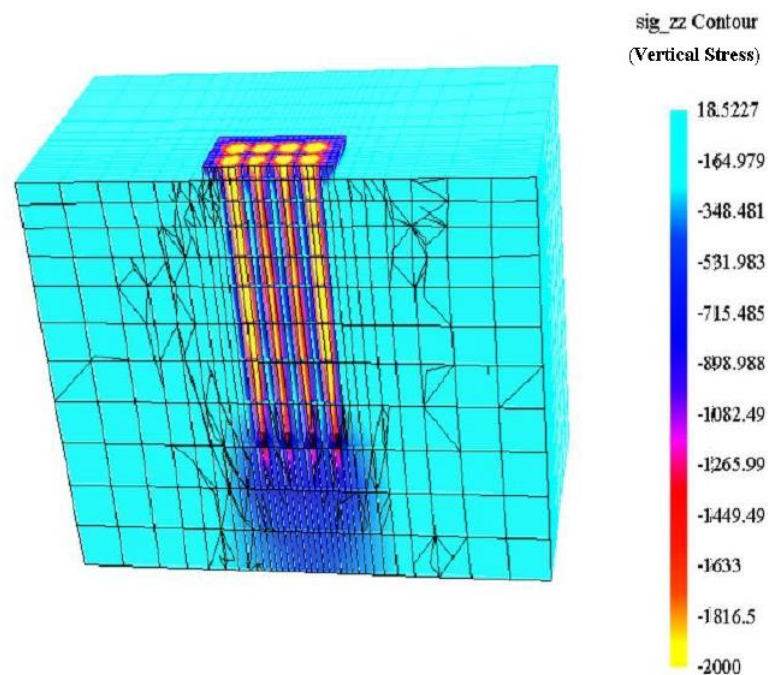
Fonte: Tomlinson (2001).

A partir de uma análise tridimensional (3D) pelo Método dos Elementos Finitos é possível constatar a existência do bulbo de tensões localizado na ponta das estacas. A vantagem da análise 3D é que se pode observar a mobilização detalhada do sistema de fundação, como na Figura 13. Nota-se uma maior tensão próxima à ponta das estacas (em azul escuro na imagem) indicando o bulbo de tensões proveniente do efeito de grupo.

O efeito resultante do grupo de estacas sobre a capacidade de carga máxima é expresso geralmente através de um fator de eficiência de grupo (η) dependente da quantidade de estacas. As premissas para o cálculo do fator de eficiência de grupo podem ser consultadas na subseção 2.6.2.1.

Esse “efeito de grupo” entre estacas pode ser compreendido por duas ideias principais: a primeira, comprovada pelos autores: Ottaviani (1975) e Pressley e Poulos (1986), em que a capacidade de carga última do grupo não é necessariamente a soma das capacidades das estacas individuais dentro do grupo; e em segundo lugar, o recalque do grupo não é equivalente ao recalque de uma estaca isolada considerando a mesma carga média de uma estaca no grupo.

Figura 13 - Região de bulbo de tensões provocado por um radier estaqueado.



Fonte: Novak, Reese e Wang (2005)

Convém salientar que os diferentes efeitos provocados pela interação solo-estrutura no comportamento do radier estaqueado devem ser levados em consideração para a elaboração de um projeto seguro e econômico. Alguns destes principais efeitos são resumidos por Katzembach, Arslan e Moormann (2000):

- No radier estaqueado, o comportamento de carga nas estacas em grupo é significativamente diferente do comportamento de uma estaca única;
- A interação estaca-radier acarreta no aumento das tensões verticais e horizontais no solo;
- A força de atrito nas estacas depende das tensões residuais do solo.

Sabe-se que os recalques podem influenciar na maneira que as cargas se distribuem entre os elementos de fundação. Por exemplo, em recalques pequenos, as estacas são responsáveis por

uma grande parcela de carga, mas quando o recalque é grande o suficiente para mobilizar a capacidade de carga total das estacas, uma parcela considerável da carga será transferida diretamente do bloco ao solo. Depois disso, o compartilhamento de carga entre o bloco e as estacas se torna quase constante (LONG, 1993).

Como já mencionado, a relevância em considerar a capacidade de carga do bloco é uma das principais características que define o radier estaqueado. O conceito de responsabilizar uma parcela da transferência de carga ao elemento superficial de fundação é cada vez mais aceita. Desta maneira, as estacas podem ser projetadas para auxiliar na redução do recalque e não ser exclusivamente responsável por toda capacidade de carga do sistema.

Tendo consciência dessa complexidade, apresenta-se na subseção 2.3.1 vários estudos que comprovam que o elemento superficial exerce uma relativa participação na transferência de cargas pelo contato radier/bloco-solo. Isso é observado desde casos reais, quanto em análises numéricas em que a fundação superficial pode suportar até 66% do carregamento total.

2.3.1 Efeito de contato bloco-solo

No Brasil, há estudos desde os anos 90 onde já se estudava a contribuição do contato bloco-solo em fundações estaqueadas. No estudo experimental realizado por Carvalho (1994) no campus da USP foi comprovado que o contato bloco-solo assume uma parcela de transmissão de cargas ao solo, juntamente com as estacas.

No mundo, encontram-se vários estudos e casos de obra que relacionam o compartilhamento de carga entre o elemento superficial de fundação e as estacas. No Quadro 2 é apresentado alguns casos de obras com suas respectivas parcelas de cargas provenientes da fundação superficial (radier) e estacas.

Levando em consideração os diversos fatores, como perfil de solo, quantidade, espaçamento e comprimento das estacas, e espessura do radier que podem influenciar no comportamento de uma fundação estaqueada, observa-se que o percentual de carga contribuinte do radier varia de 4 a 51% para as diferentes estruturas. Reitera-se que em algumas torres, as fundações foram projetadas como grupo de estacas (marcados em asterisco no Quadro 2), mas se comportaram como um radier estaqueado, pois há uma parcela de carga sustentada pelo radier. Isso

provavelmente elevou o fator de segurança destas fundações pois o radier passa a compartilhar cargas que em projeto eram responsabilidade apenas do grupo de estacas.

Quadro 2- Casos históricos de fundações estaqueadas.

Torre	Estrutura		Parcela da carga (%)		Instrumenta do	Recalque (mm)
	altura	andares	Estaca	Radier		
Messe-Torhaus, Frankfurt	130m	30	75	25	Sim	-
Messturn, Frankfurt	256m	60	57	43	Sim	144
Westend 1, Frankfurt	208m	-	49	51	Sim	120
Petronas, Kuala Lumpur *	450m	88	85	15	Sim	40
QV1, Perth, West Australia	-	42	70	30	-	40
Treptower, Berlin	121m	-	55	45	Sim	73
Sony Center, Berlin	103m	-	-	-	Sim	30
ICC, Hong Kong*	490m	118	70	30	-	-
Commerzbank, Frankfurt*	300m	-	96	4	Sim	19
Skyper, Frankfurt	153m	-	63	27	Sim	55

Fonte: Long (2010).

Garcia (2015) investigou experimental e numericamente o mecanismo de distribuição e transferência de cargas, bem como as parcelas contribuintes de cada elemento (estaca e radier) na capacidade do radier estaqueado. Pela dificuldade de representar fielmente o contato entre os elementos de fundação e o solo, os resultados numéricos apresentaram valores relativamente diferentes dos experimentais, resultando numa média de 36% da contribuição do contato bloco-solo para os resultados numéricos, contra 21% para os resultados experimentais.

Esse efeito também foi observado por Macedo (2017), em suas análises numéricas tridimensionais baseadas em provas de carga estática em fundações sob solo arenoso, os resultados numéricos divergiram de 10 a 20% dos resultados experimentais. Com relação a transferência de cargas, o autor apresenta uma contribuição de mais de 41% resultante do contato bloco-solo.

É importante enfatizar o estudo realizado por Freitas (2018) sobre fundações estaqueadas para aerogeradores em solo composto por arenito consolidado. Em uma das suas análises, a autora verificou que a fundação superficial foi responsável por 66% da transferência de carga total do sistema. O que demonstra mais uma vez a desvantagem em não considerar a capacidade de transferência de cargas direta do elemento superficial ao solo.

Como apresentado, esses estudos comprovam que levar em consideração a parcela de carga provenientes do contato bloco-solo é extremamente relevante. É de suma importância a consideração deste contato no projeto, pois leva a um aumento da capacidade de carga (LIMA, 2007) independentemente do tipo de solo: argila ou areia, (GARCIA; ALBUQUERQUE; FREITAS NETO, 2014) além da redução nos recalques totais e diferenciais (EL-MOSSALLAMY; LUTZ; DUERRWANG, 2009; FATTAH; AL-MOSAWI; AL-ZAYADI, 2014; LIMA, 2007; PRAKOSO; KULHAWY, 2001; RANDOLPH, 1994) e uma melhor redistribuição de carga entre as estacas (LIMA, 2007). Além do mais, o contato bloco-solo permite reduzir o custo (EL-MOSSALLAMY; LUTZ; DUERRWANG, 2009; FREITAS, 2018; GARCIA, 2015; KATZENBACH et al., 2005; OH et al., 2009; POULOS, 2001), além de favorecer no tempo de execução da obra (FREITAS, 2018).

Observa-se, portanto, múltiplos casos de aplicação para fundações em radier estaqueado nas diversas estruturas em que o radier participa substancialmente com uma parcela da carga total, podendo este, ser responsável pela maior transferência de cargas em relação às estacas. Convém salientar que contato bloco solo é uma variável de extrema importância que deve ser levada em consideração nos projetos de fundações estaqueadas para as mais diversas estruturas de pequeno, médio e grande porte.

Entretanto a parcela de carga resultante do contato radier-solo é dependente, além de outros fatores, do perfil de solo existente sob o radier. Em virtude disso, alguns perfis de solo podem se apresentar mais propícios que outros, elevando ou reduzindo a capacidade de carga do radier alterando, portanto, o compartilhamento e transferência de cargas entre os elementos de fundação.

Perfis de solos constituídos por argila rígida ou areias densas por exemplo apresentam situações favoráveis, pois nesse caso o radier pode fornecer uma parcela significativa da capacidade de carga e rigidez necessárias, melhorando assim o desempenho da fundação (POULOS, 2001).

Em contrapartida alguns perfis de solo refletem ações desfavoráveis, como:

- N Perfis de solo contendo argila mole ou areia solta próximo à superfície, aumentando assim, a probabilidade do radier não contribuir com a capacidade de carga e rigidez;
- N Perfis de solo que possuam camadas compreensíveis moles a profundidades relativamente rasas, podem, a longo prazo apresentar recalque nas camadas subjacentes compressíveis, reduzindo a contribuição do radier na rigidez da fundação;
- N Perfis de solo que provavelmente sofrerão adensamentos, podendo resultar numa perda de contato radier-solo, aumentando assim a carga sobre as estacas, e ocasionando um maior recalque;
- N E por fim, perfis de solo que provavelmente sofrerão movimentos de expansão devido a causas externas, dado que forças de tração adicionais podem ser induzidas nas estacas devido a expansão do solo no radier (POULOS, 2001).

Sabe-se que módulo de Young do solo exerce uma significativa influência com relação aos recalques gerados no radier estaqueado. Em suas análises, Aguiar (2017) verificou que os recalques médios foram reduzidos com o aumento do módulo de Young do solo, isso se justifica devido ao fato de que elevando o módulo de Young, há uma maior resistência do solo em relação às deformações.

Cabe salientar a importância da análise completa de quaisquer que seja o tipo de solo. Segundo Bezerra (2003) o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e o nível de estratificação ao longo do fuste da estaca são as principais variáveis que influenciam no comportamento do sistema. De acordo com Garcia, Albuquerque e Freitas Neto (2014) o efeito de contato aparenta ser mais significativo nos solos predominantemente argilosos.

Considerando a substancial contribuição de carga derivada do contato bloco solo, faz-se necessário entender com mais afinco se a geometria de contato do elemento superficial de fundação com o solo pode influenciar no comportamento do radier estaqueado e de que maneira isso ocorre. Na seção 2.4 apresenta-se alguns dos trabalhos que estudam a variação dessa geometria de base do elemento superficial nas fundações estaqueadas.

2.4 EFEITO DA GEOMETRIA DO BLOCO

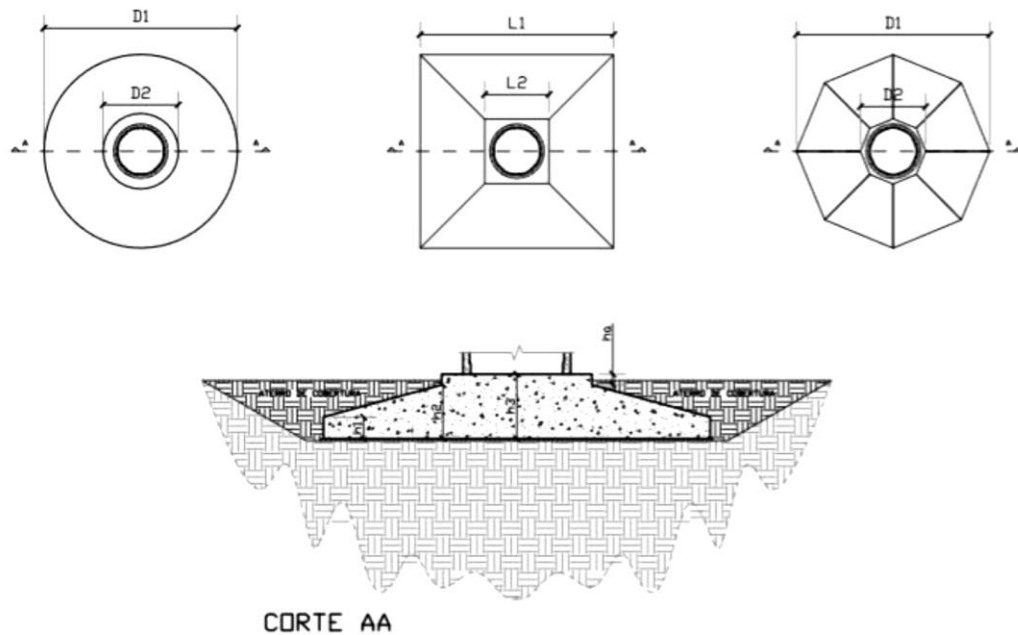
Dentre os inúmeros trabalhos existentes na literatura sobre fundações em radier estaqueado, pode-se afirmar que a maioria aborda o comportamento destas fundações fundamentado na variação dos parâmetros da estaca, (comprimento, diâmetro, espaçamento, quantidade e localização) das propriedades do solo e dos parâmetros do radier (dimensão, espessura e rigidez).

Observa-se que há uma tendência crescente em explorar a contribuição do contato bloco-solo, entretanto, a geometria do elemento superficial (bloco/radier) ainda é pouco estudada. Alguns dos trabalhos existentes na literatura que abordam a influência da geometria da fundação superficial no comportamento do sistema são apresentados nesta seção.

Por meio de análises estáticas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), Ribeiro (2017) estudou a influência da geometria de contato em fundações superficiais para aerogeradores comparando três tipos de geometrias, sendo: circular, quadrada e octogonal. De acordo com o autor, a geometria de fundações superficiais de aerogeradores é um fator que possui grande influência na eficiência da fundação, tanto com relação ao desenvolvimento de esforços internos quanto na rigidez rotacional fornecida à torre.

O estudo aborda a variação da geometria do radier, mantendo os volumes de concreto semelhantes, o desenho em planta e o corte transversal das três geometrias são detalhados na Figura 14. Dentre os resultados apresentados pelo autor pode-se citar que a fundação octogonal apresentou maior similaridade com a fundação circular por ter uma geometria semelhante entre as direções de atuação de momento fletor estudadas. A fundação quadrada apresentou os menores valores de momentos fletores máximos, indicando que essa geometria favorece a distribuição de esforços ao longo da sapata, atenuando picos de momentos encontrados na região de ancoragem da torre.

Figura 14 - Geometrias das fundações superficiais.



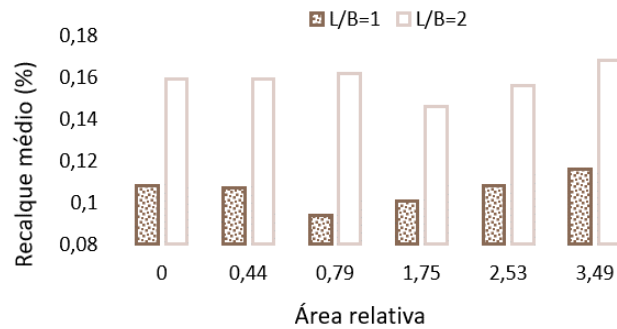
Fonte: Ribeiro (2017).

Além disso, a fundação quadrada apresentou os maiores valores de rigidez rotacional. Segundo o autor, esta eficiência é ligada somente ao formato da sapata, sem possuir relação direta com a área de contato da fundação com o solo. Entretanto, com relação a rigidez da fundação foi obtido nas fundações uma maior rigidez para a fundação circular e menor rigidez para a fundação octogonal, mas para fundações mais rígidas a sapata quadrada é mais eficiente.

Existem outros estudos que variaram a geometria do elemento superficial, entretanto não foi utilizado os mesmos parâmetros (como quantidade de estacas e área líquida de contato) em ambas as geometrias, dificultando assim uma comparação de forma justa. Aguiar (2017) por exemplo, comparou pelo MEF-3D radiers estaqueados de geometria quadrada e retangular, mas estes apresentavam áreas de base diferentes. A autora adotou uma relação entre o comprimento (L) e a largura (B) para o radier quadrado de $L/B=1$ e para o radier retangular de $L/B=2$.

Além disso o número de estacas manteve-se proporcional à área dos radiers, preservando a mesma área relativa de contato, ou seja, a relação entre a área da seção transversal das estacas e a área total do radier. Analisando o recalque percentual médio (recalque médio resultante de cada análise pelo recalque obtido pelo radier isolado) com relação a área relativa de contato das estacas (Figura 15) observa-se que para uma mesma porcentagem de área das estacas, há um maior recalque para o radier retangular com $L/B=2$.

Figura 15 - Recalque percentual médio vs área relativa das estacas.



Fonte: Adaptado de Aguiar (2017).

Balakumar (2008) realizou um estudo com fundações em radier estaqueado, grupo de estacas e radier isolado em areia através de testes em modelos de pequena escala. O autor produziu os modelos tanto do radier como das estacas em acrílico variando as geometrias da fundação de base, sendo circular, quadrada e retangular (Figura 16). Além disso, o autor variou o diâmetro, comprimento, espaçamento, quantidade e o arranjo das estacas e espessura do radier.

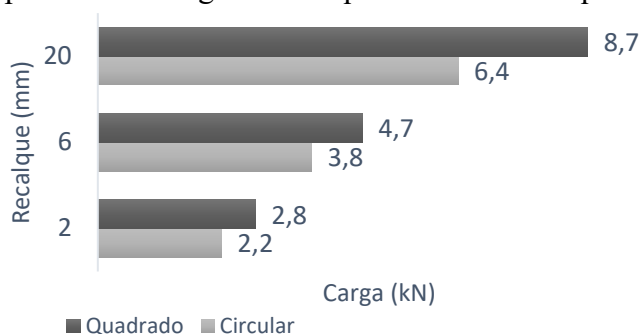
Figura 16 - Modelo de radier estaqueado em escala reduzida (circular e quadrado).



Fonte: Balakumar (2008).

O autor verificou a partir do estudo paramétrico que o comprimento e diâmetro da estaca tem um papel predominante no comportamento da fundação. Ao comparar o comportamento dos raders estaqueados quadrado e circular, foi verificado que a geometria quadrada suportou cargas maiores que a geometria circular. É demonstrado na Figura 17, o comportamento carga vs recalque dos raders estaqueados quadrado e circular com aproximadamente a mesma razão de área (a relação da área transversal das estacas sob a área do radier) tendo o radier uma espessura de 8mm e estacas com 16 cm de comprimento 1cm de diâmetro.

Figura 17- Comportamento carga vs recalque de radiers estaqueados (quadrado e circular).



Fonte: Adaptado de Balakumar (2008).

Observa-se que o radier estaqueado quadrado apresentou maiores cargas quando comparado com a geometria circular (Figura 17). Embora possua a mesma razão de área nas respectivas geometrias, foi observado que as áreas líquidas de contato radier/solo não foram equivalentes tendo em vista que a geometria quadrada apresenta uma área líquida de 28% maior que a geometria circular, além disso o radier estaqueado quadrado acomodou um maior número de estacas: 25, enquanto o radier estaqueado circular apenas 21 estacas, o que possivelmente justifica a maior carga no radier estaqueado quadrado para um mesmo recalque.

Constata-se, portanto, a presença de trabalhos que abordam a variação da geometria do elemento superficial, ressaltando a ideia de que essa geometria, bem como a relação da área total do elemento superficial e das estacas (no caso do radier estaqueado), pode provocar alterações no comportamento do sistema de fundação como: na capacidade de carga, no momento fletor, rigidez, e deslocamentos verticais. No entanto é necessário estabelecer critérios de comparação justos entre as variações geométricas do elemento superficial para uma melhor compreensão da influência da geometria no comportamento do sistema.

2.5 PROJETO DE RADIER ESTAQUEADO

É apresentado nesta seção algumas filosofias para o projeto de fundações em radier estaqueado, bem como as etapas de projeto. Nota-se que em ambas as filosofias, as estacas são predominantes na capacidade de carga total, mas o radier também responde com uma significativa parcela dessa capacidade de carga. Observa-se ainda que as etapas de projeto são diretamente ligadas com a filosofia adotada.

2.5.1 *Filosofias de Projeto*

Randolph (1994) distingue três filosofias para o projeto de fundações estacadas, sendo: abordagem convencional, “creep piling” e o controle de recalque diferencial. É considerada como abordagem convencional quando o sistema é projetado como um grupo de estacas, embora a maior parte da carga seja suportada pelas estacas, em torno de 60 a 75% possibilitando reduzir sua quantidade, uma outra parcela da carga é transferida pela fundação superficial, especialmente para a capacidade de carga máxima.

Na abordagem “creep piling” ou nomeada por Freitas Neto (2013) e Garcia (2015) como “critério de mobilização parcial ou total das estacas” a fundação é projetada como um radier, mas admite-se que o recalque total seja reduzido pela inclusão de estacas distribuídas uniformemente sob o radier, de modo que a tensão de contato entre o radier e o solo seja reduzida a valores menores que a tensão de pré-adensamento do solo.

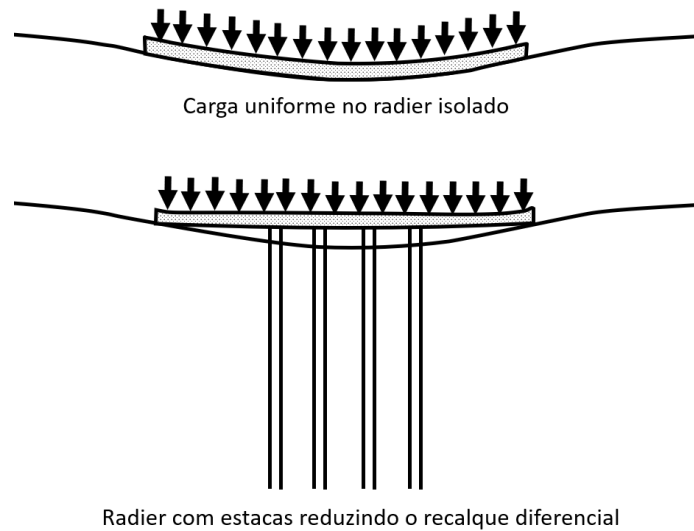
Além disso, cada estaca é projetada para trabalhar em uma capacidade da carga onde começa a ocorrer uma significativa deformação plástica ou “creep”, normalmente em cerca de 70 a 80% da sua capacidade carga máxima. Ademais, para solos sem coesão, foi demonstrado que a tensão efetiva aumenta devido ao contato bloco-solo, que conseqüentemente leva a um aumento na capacidade das estacas, e estas, passam a trabalhar abaixo da sua carga de trabalho calculada (creep).

De maneira oposta, o controle de recalque diferencial adota uma distribuição irregular das estacas sob o radier, estas por sua vez são posicionadas estrategicamente com o intuito de limitar os recalques totais e diferenciais a uma quantidade aceitável. Conforme esta filosofia, a quantidade de estacas pode ser estimada pela consideração de uma distribuição ideal de pressões de contato sob um radier rígido, além disso, são projetadas para absorver em torno de 50 a 70% da pressão média aplicada, possibilitando uma redução nos recalques diferenciais.

Nas Figuras 18 e 19, é possível visualizar esquematicamente os princípios para o controle do recalque diferencial. Para um radier isolado, dependendo do perfil de solo, ao considerar que a carga estrutural proveniente da superestrutura seja distribuída uniformemente sobre o radier, este, poderá então sofrer deformações na sua região central. Em contrapartida, ao adicionar

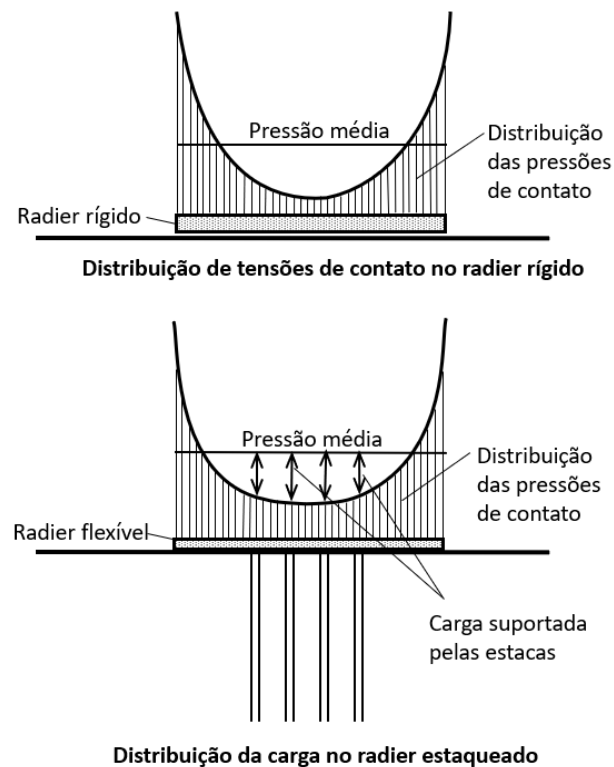
algumas estacas estrategicamente no centro do radier, provavelmente próximo da sua capacidade de carga última, verifica-se que os recalques diferenciais podem ser reduzidos.

Figura 18 - Redução de recalques diferenciais devido ao acréscimo de estacas centrais.



Fonte: Adaptado de Randolph (1994).

Figura 19 - Esquema de projeto com estacas para redução de recalques diferenciais.



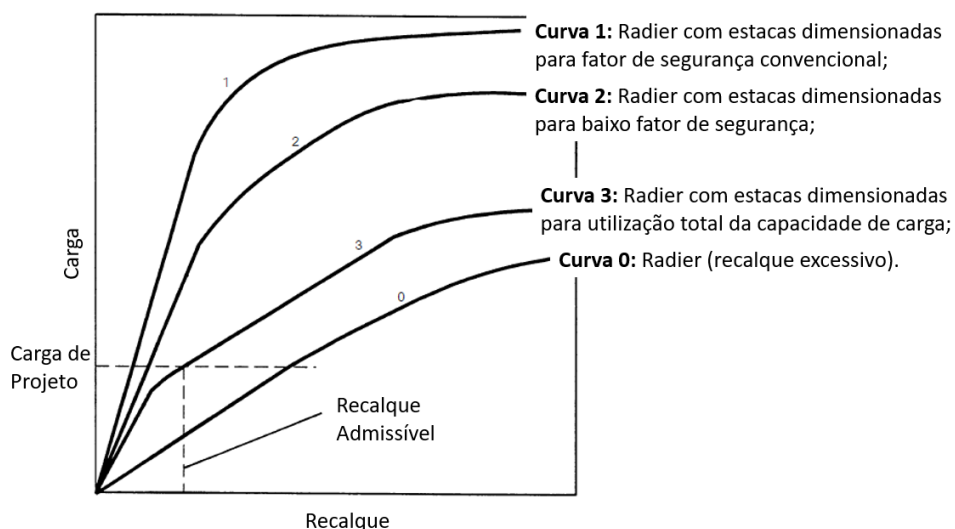
Fonte: Adaptado de Randolph (1994).

Vale ressaltar que, além destas filosofias citadas por Randolph, existe ainda uma outra versão adicional de creep piling, elaborada por Poulos (2001) que utiliza algumas ou todas as estacas do sistema trabalhando com 100% da capacidade de carga última. A partir desta concepção que surgiu o conceito de que as estacas são redutoras de recalque quando adicionadas no radier, embora ainda contribuam com a capacidade de carga última de todo o sistema de fundação.

Seguindo os conceitos das filosofias convencional e “creep piling”, Poulos (2001) demonstra na Figura 20 o comportamento carga vs recalque de alguns sistemas de fundações:

- (a) Na curva 0, observa-se que o comportamento do radier isolado, apresenta um recalque excessivo para a carga de projeto;
- (b) A curva 1 aborda a filosofia de projeto convencional, para a qual o comportamento do sistema de radier-estaca é governado pelo grupo de estacas, as quais suportam a maior parcela da carga, podendo apresentar na carga de projeto um comportamento extremamente linear;
- (c) A curva 2 representa a filosofia de “creep piling”, onde as estacas operam com um fator de segurança baixo, mas, como há menos estacas sob o radier, este transporta mais carga quando comparado com curva 1;
- (d) E por fim, a curva 3 compreende o emprego de estacas trabalhando na sua capacidade total da carga de projeto a fim de reduzir os recalques, dessa forma a curva deixa de ser linear ao nível da carga de trabalho, mas cabe salientar que o fator de segurança mostra satisfatório para a estabilidade do sistema, além de satisfazer recalques admissíveis da fundação.

Figura 20 - Curva carga vs recalque.



Fonte: Adaptado de Poulos (2001).

2.5.2 *Etapas de projeto*

Na visão de Poulos (2001) o procedimento para o projeto do radier estaqueado pode ser realizado em três etapas, sendo:

1- Estágio preliminar de projeto - Primeiramente é realizado um estudo preliminar no qual é analisado qual a viabilidade e a quantidade necessária de estacas para suprir os requisitos de projeto. É avaliado a capacidade do radier isolado geralmente estimada por meio de técnicas convencionais em termos de capacidade de carga vertical e lateral, e recalque total e diferencial. Neste caso, a filosofia de projeto a ser escolhida depende do desempenho do radier, quando a parcela de carga fornecida pelo radier é baixa, provavelmente será adotado a abordagem convencional, entretanto, se o radier apresentar capacidade de carga suficiente, mas não atender aos critérios de recalque ou recalques diferenciais, pode ser viável a filosofia “creep piling”.

2- Segundo estágio de projeto – Nessa etapa é feito um estudo mais detalhado para avaliar os requisitos de estaqueamento, bem como as características gerais e localização das estacas. É estimado os valores máximos do momento fletor, do cisalhamento e das pressões de contato, além do recalque, e requisitos de posicionamento do pilar.

3- Último estágio de projeto - Ao contrário do primeiro e segundo estágios que envolvem cálculos relativamente simples, esta última etapa de detalhamento geralmente necessita do uso de um programa de computador adequado que responde de forma racional a interação entre radier-estaca-solo, além do efeito da superestrutura. Ao viabilizar o uso da fundação em radier estaqueado, é necessária uma análise ainda mais refinada para obter informações detalhadas do projeto, a fim de estudar a distribuição dos recalques, definir uma configuração ótima e arranjo das estacas, determinar o momento fletor e cisalhamento do radier, além de cargas nas estacas, e por fim, o projeto estrutural da fundação.

2.6 MÉTODOS DE CÁLCULO

A fim de um projeto econômico e seguro de uma fundação em radier estaqueado é fundamental adotar métodos de cálculo capazes de considerar todas as interações (radier-estaca-solo) relevantes ao comportamento do sistema. De acordo com Katzenbach, Arslan e Moormann (2000), o método de cálculo deve prever de modo confiável: o comportamento carga vs recalque como um sistema global submetido à carga de trabalho da estrutura e até as cargas finais; o compartilhamento de carga entre o radier e estacas em função do recalque do sistema; e as forças internas e momentos fletores para o projeto estrutural das estacas e do radier.

Para o cálculo e projeto de um radier estaqueado é possível encontrar na literatura, inúmeros métodos, desde os simplificados até os mais complexos. Dentre os métodos simplificados pode-se citar as correlações empíricas, os ábacos de cálculo, métodos das fundações equivalentes e os métodos baseados na teoria da elasticidade, além destes, há os Métodos Computacionais Aproximados, onde as estacas são representadas por molas e o radier por uma placa, e por fim, os métodos Computacionais Rigorosos como o Método dos Elementos Finitos (MEF), o Método dos Elementos de Contorno (MEC) e os métodos híbridos, resultantes da combinação de métodos. De modo resumido é apresentado a seguir os diferentes métodos de cálculo e suas respectivas subdivisões.

Quadro 3 - Métodos de cálculo em radiers estaqueados.

Métodos Simplificados	Correlações Empíricas	Kishida & Meyerhof (1965); Skempton (1953); Meyerhof (1959); Vesic (1969).
	Ábacos de Cálculo	Poulos & Davis (1980).
	Método das Fundações Equivalentes	Terzaghi (1943); Poulos & Davis (1980).
	Métodos Baseados na Teoria da Elasticidade	Poulos & Davis (1980); Randolph & Worth (1978); Randolph (1994); Sales (2000).
Métodos Computacionais Aproximados	O radier é representado por uma placa e as estacas por molas	Clancy & Randolph (1993); Poulos (1994); Russo (1998) – NAPRA.
Métodos Computacionais Rigorosos	Método dos Elementos de Contorno (MEC)	Butterfield & Banerjee (1971); Kuwabara (1989); El Mossalamy & Franke (1997); Sinha (1997).
	Método dos Elementos Finitos (MEF)*	Ottaviani (1975); Farias (1993); Zhuang <i>et al.</i> (1991); Lee (1993); Wang (1995); Katzenbach <i>et al.</i> (1998), dentre outros.
	Métodos Híbridos	Poulos (1994) – GARP; Russo (1998) – NAPRA.

Fonte: Freitas Neto (2013)

2.6.1 Métodos simplificados

O método simplificado é baseado na teoria da deformabilidade para estimativa do recalque médio do conjunto (GARCIA, 2015). Quando se trata de radier estaqueado é necessário considerar as proporções relativas de carga suportadas pelo radier e estacas, além da contribuição adicional das estacas no controle dos recalques absolutos e diferenciais. A interação entre o radier e o grupo de estacas e a resposta de cada um destes elementos baseado no recalque e rigidez pode ser descrito na Equação 3 (RANDOLPH, 1994).

$$\begin{Bmatrix} w_{PG} \\ w_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k_{PG} & \alpha_{pr}/k_r \\ \alpha_{rp}/k_{PG} & 1/k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_{PG} \\ P_r \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Sendo: w_{PG} e w_r o recalque, P_{PG} e P_r a carga, e k_{PG} e k_r a rigidez, ambos em relação ao grupo de estacas e ao radier, respectivamente. Os componentes α_{pr} e α_{rp} são fatores de interação entre o radier e estaca que podem ser obtidos por:

$$\alpha_{pr} = \alpha_{rp} \frac{k_1}{k_{PG}} \quad (4)$$

Para estacas simples com bloco circular de raio r_c , o fator de interação pode ser aproximado pela fórmula:

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln(r_c/r_0)}{\zeta} \quad (5)$$

Sendo:

r_c = raio médio do radier (correspondente a área do radier pelo número de estacas);

r_0 = raio da estaca;

$\zeta = \ln(r_m / r_0)$;

$r_m = \{0,25 + \xi [2,5 \rho (1 - \nu) - 0,25] \times L$;

r_m = Raio máximo de influência da estaca;

$\xi = E_{sl} / E_{sb}$;

$\rho = E_{sav} / E_{sl}$;

ν = Coeficiente de Poisson;

L = Comprimento da estaca;

E_{sl} = Módulo de Young do solo na ponta da estaca;

E_{sb} = Módulo de Young da camada resistente da ponta da estaca;

E_{sav} = Módulo de Young médio do solo ao longo do eixo da estaca.

Para estimar o compartilhamento de carga entre o radier e as estacas, Randolph (1994) utiliza uma abordagem descrita na Equação 6 para o cálculo da rigidez do radier estaqueado (k_{PR}):

$$k_{PR} = \frac{k_{PG} + (1 - 2\alpha_{rp})k_r}{1 - \alpha_{rp}^2 (k_r/k_{PG})} \quad (6)$$

Sendo: k_{PG} = rigidez do grupo de estacas, k_r = rigidez do radier isolado e α_{rp} = fator de interação estaca-radier.

A proporção de carga transferida pelo radier é calculado da seguinte forma:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{k_r(1 - \alpha_{rp})k_r}{k_{PG} + (1 - 2\alpha_{rp})k_r} = X \quad (7)$$

Sendo: P_t = carga total aplicada e P_r = carga transferida pelo radier

Considerando tais colocações, determinando a rigidez a partir da Equação (6), Poulos (2001) demonstra um método simplificado de curva carga vs recalque para uma análise preliminar na qual a rigidez permanece em atividade até uma mobilização total da carga da estaca (Figura 21). Supondo que a mobilização da estaca coincida com a carga total aplicada, P_1 , é possível obter a capacidade de carga da estaca a partir da Equação (8) (Ponto A na Figura 21).

$$P_1 = \frac{P_{up}}{1 - X} \quad (8)$$

Sendo: P_{up} é a capacidade de carga última no grupo de estacas e x é a proporção de carga transferida pelas estacas, conforme a Equação (7).

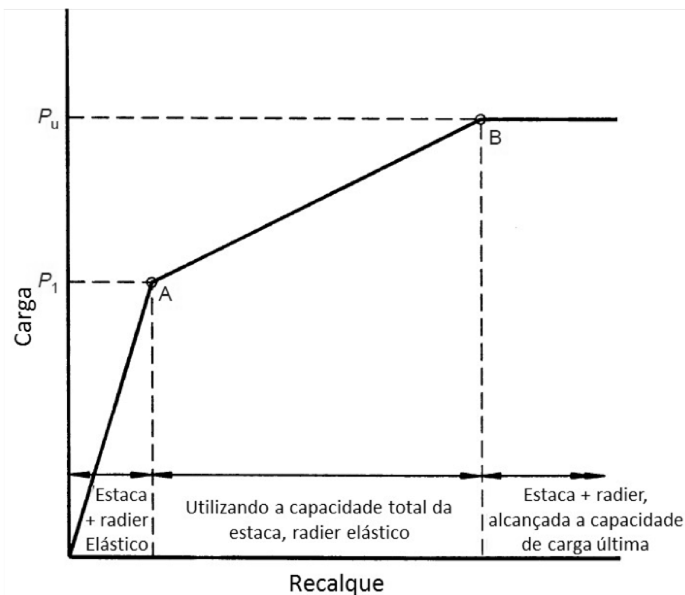
E ainda em relação a essa situação, vale mencionar que o ponto A representa a carga em que a capacidade do grupo é totalmente mobilizada. A curva anteriormente a esse ponto apresenta uma carga resultante da contribuição das estacas e o radier. Na visão de Soares, Coutinho e Cunha (2015) o recalque nessa região pode ser expresso por:

$$\rho = \frac{P}{k_{pr}} \quad (9)$$

Já entre os pontos A e B, a rigidez do sistema é exclusivamente do radier (k_r), na qual se mantém até alcançar a capacidade de carga última do radier estaqueado. O recalque pode ser calculado na Equação (10) (SOARES; COUTINHO; CUNHA, 2015). A partir do ponto B a relação carga-recalque se mantém horizontal.

$$\rho = \frac{P_A}{k_{pr}} + \frac{P - P_A}{k_r} \quad (10)$$

Figura 21 - Curva carga vs recalque simplificada.



Fonte: Adaptado de Poulos (2001)

A partir da curva carga vs recalque (Figura 21) é possível determinar diretamente a rigidez do grupo de estacas. Entretanto Fleming et al. (1992), apresentou a seguinte equação para o cálculo da rigidez de um grupo de estacas (k_{PG}):

$$k_{PG} = k_P(n)^{1-e} \quad (11)$$

Em que: n é o número de estacas e o expoente varia 0,3 a 0,5 para estaca de atrito; e $n \geq 0,6$ para estaca de ponta.

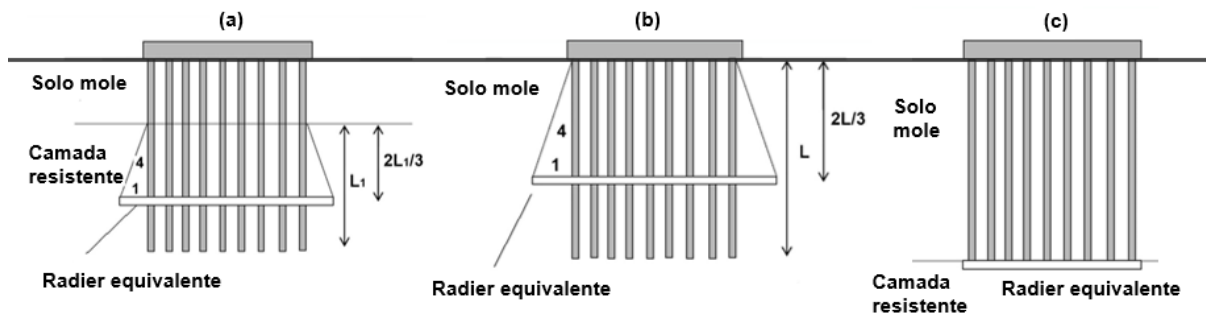
Cabe salientar que os métodos analíticos simplificados não são especificamente adequados para o cálculo do radier estaqueado, mas sim do grupo de estacas, visto que não consideram o efeito de contato bloco/solo. Entretanto, certas aproximações podem ser realizadas para a adoção destes métodos em conjunto com modelagens numéricas, como por exemplo o método do pilar equivalente.

2.6.1.1 Método do Radier equivalente

É um método alternativo para uma abordagem detalhada da interação entre cada elemento da fundação considerando a fundação como um todo. A principal vantagem do método em radier equivalente é que ele permite levar em consideração as variações de rigidez do solo abaixo do nível do radier. Isto é de fundamental importância quando há diferentes camadas de solo, como por exemplo solo mole sob as estacas (RANDOLPH, 1994).

Neste método, a fundação estaqueada é assimilada a um radier equivalente posicionado a uma determinada profundidade dependendo do perfil de solo existente, geralmente essa profundidade corresponde a 2/3 do comprimento (L) da camada de solo mole ou, se houver, da camada resistente, ver Figura 22 (a) e (b). Além disso, o radier equivalente é posicionado na ponta da estaca quando apenas a estaca é apoiada na camada resistente (Figura 22 c). Segundo Randolph (1994), a carga se propaga a partir do fuste das estacas com uma proporção 1:4 (Figura 22).

Figura 22 - Abordagem do radier equivalente para grupo de estacas.



Fonte: Adaptado de Tomlinson (2001)

A área do radier equivalente (A_{eq}) pode ser definida como:

$$A_{eq} = \left[\frac{L}{3} + (\sqrt{n} - 1)s + d \right]^2 \quad (12)$$

Em que: L = comprimento da estaca; s = espaçamento entre estacas; d = diâmetro da estaca e n = número de estacas

Como mencionado por Celik (2019), um método de cálculo com relação ao fator de influência e uma distribuição de carga sob o radier foi apresentado por Fraser e Wardle (1976). O recalque do radier equivalente pode ser calculado pela seguinte Equação:

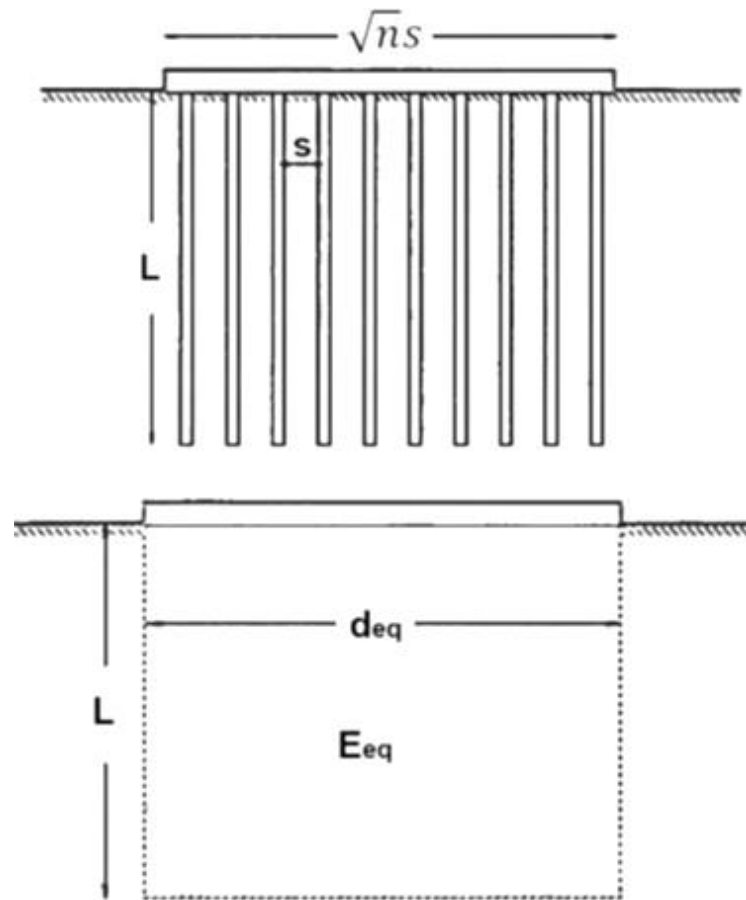
$$S_{eq} = \frac{qB(1 - \nu_s^2)}{E_s} I \quad (13)$$

Em que: q é a carga vertical procedente da superestrutura; B é a largura do radier equivalente; ν_s é o coeficiente de Poisson e E_s o módulo de Young do solo; e I é o fator de influência, onde, normalmente adota-se 0,82 para um radier quadrado rígido e 0,95 para o elástico.

2.6.1.2 Método do Pilar equivalente

O método do pilar equivalente sugerido por Poulos e Davis (1980) consiste em substituir de modo eficiente a abordagem um pilar único equivalente pelo grupo de estacas interpostas no solo (Figura 23).

Figura 23 - Substituição do grupo de estacas, ou radier estaqueado, pelo pilar equivalente.



Fonte: Randolph (1994)

Adotando uma área total coberta pelo grupo de estacas (A_g), o diâmetro do pilar equivalente (d_{eq}) consiste:

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} A_g = 1,13 \sqrt{A_g} \quad (14)$$

A área total coberta pelo grupo de estacas (A_g) de acordo com Viggiani, Mandolini e Russo (2011), conforme Figura 24, é dependente do número (n), e do espaçamento (s) entre estacas na qual pode ser calculada como:

$$A_g = ((\sqrt{n} - 1)s)^2 \quad (15)$$

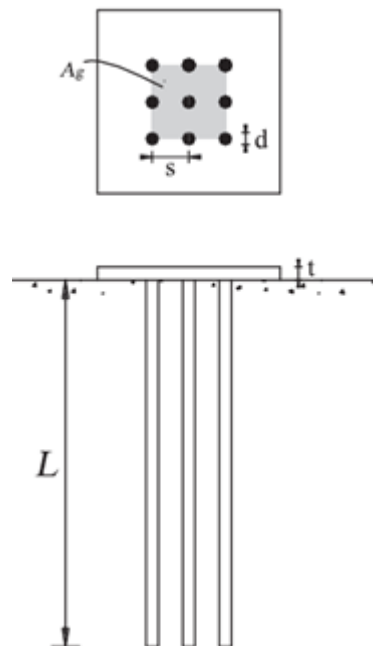
Sendo: n o número de estacas e s o espaçamento entre estacas.

Além disso, o módulo de Young do pilar equivalente pode ser calculado por:

$$E_{eq} = E_s + (E_p - E_s) \left(\frac{A_p}{A_g} \right) \quad (16)$$

Sendo: E_p é o módulo de Young das estacas; E_s é a média do módulo de Young correspondente ao solo que as estacas estão inseridas; e A_p é a soma das áreas da seção transversal das estacas.

Figura 24 - Área A_g para um pequeno radier estaqueado.



Fonte: Viggiani, Mandolini, Russo (2011)

Preferencialmente, Randolph (1994) defende a abordagem do pilar ou radier equivalente correlacionando ao índice R . Para valores $R \geq 4$, o método em radier equivalente seria ideal, enquanto para $R \leq 2$, o ideal seria a abordagem do pilar equivalente. O índice R é calculado por:

$$R = \sqrt{\frac{n s}{L}} \quad (17)$$

Em que: n , s , e L é o número, espaçamento e comprimento das estacas, respectivamente.

2.6.1.3 Resposta para uma única estaca

Randolph (1994) apresenta uma solução aproximada para a resposta de uma única estaca proposta por Randolph e Wroth (1978), esta solução permite um aumento linear de módulo de cisalhamento com a profundidade, com um valor médio de ρG_ℓ onde G_ℓ é o valor do módulo de cisalhamento em uma profundidade de $Z = L$. A resposta na cabeça de uma estaca isolada pode ser dada por:

$$\frac{P_t}{G_\ell r_0 W_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi \tanh \mu\ell L}{\zeta \mu\ell r_0}}{1 + \frac{1}{\pi\lambda} + \frac{4\eta \tanh \mu\ell L}{(1-\nu)\xi \mu\ell r_0}} \quad (18)$$

Onde: P_t e W_t são a carga e recalque no topo da estaca, respectivamente, o subscrito b corresponde a condições na ponta da estaca, demais parâmetros podem ser estipulados por:

$$\begin{aligned} \eta &= r_b/r_0 \text{ (Estacas com base alargada)} \\ \xi &= G_\ell/G_b \text{ (Estaca de ponta)} \\ \rho &= G_{avg}/G_b \text{ (Heterogeneidade do módulo do solo)} \\ \lambda &= E_p/G_\ell \text{ (Rigidez estaca/solo)} \\ \zeta &= \ln(r_m/r_0) \text{ (Raio de influência da estaca)} \\ r_m &= \{0,25 + \xi[2,5\rho(1-\nu) - 0,25]\} \ell \text{ (Raio máximo de influência)} \\ r_m &= 2,5 \cdot \rho \cdot (1-\nu) \cdot \ell \text{ (para } \xi = 1) \\ u \cdot \ell &= \sqrt{2/\zeta \cdot \gamma} \cdot (\ell/r_0) \text{ (Compressibilidade da estaca)} \end{aligned}$$

Em que: r_b é o raio na base da estaca e r_0 no topo; ν é o coeficiente de Poisson do solo; E_p é o módulo de Young do pilar equivalente, G_{avg} é o módulo de cisalhamento médio do solo.

A proporção de carga que chega na base da estaca pode ser dada pela equação 19:

$$\frac{P_b}{P_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} \cosh u\ell}{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi \tanh u\ell L}{\zeta u\ell r_0}} \quad (19)$$

Em que: P_t é a carga total empregada no topo da estaca e P_b a carga recebida na base da estaca.

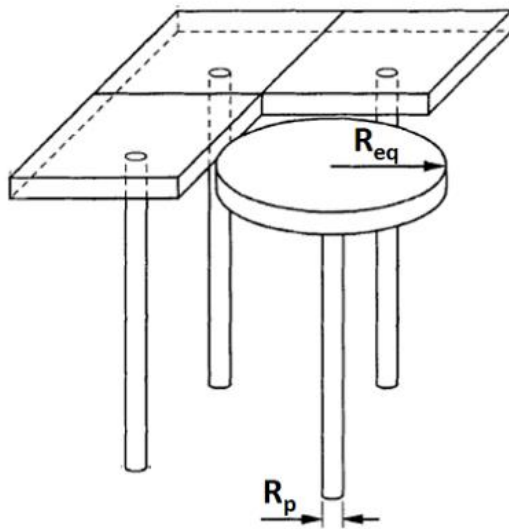
2.6.2 Interações do radier estaqueado

Sabe-se que um radier estaqueado comporta diferentes tipos de interações entre seus elementos: radier/bloco, o grupo de estacas e o solo mobilizado. O fator de interação do radier no grupo de estacas (α_{rp}), descrito por Randolph (1983) envolve uma sobreposição de recalque induzido para uma única estaca e em um radier/bloco circular, Equação (20).

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln(R_{eq}/R_0)}{\zeta} \quad (20)$$

Em que: R_{eq} corresponde ao raio equivalente a área do radier por estaca (consultar Figura 25), R_0 é o raio da estaca, para outras variáveis consultar o item 2.6.1.3.

Figura 25. Radier estaqueado dividido em unidades individuais.



Fonte: Clancy e Randolph (1993)

A partir do método para análise do radier estaqueado que permite interações entre o grupo de estacas e o radier em termos de flexibilidade, Randolph (1993, *apud* HORIKOSHI E RANDOLPH 1999) derivou a equação permitindo estimar a rigidez global do radier estaqueado (K_{pr}):

$$K_{pr} = \frac{K_p + K_r (1 - 2\alpha_{rp})}{1 - (K_r/K_p) \alpha_{rp}^2} \quad (21)$$

A rigidez de um radier retangular (K_r) pode ser calculada a partir da equação apresentada por Horikoshi e Randolph (1997 *apud* REUL; RANDOLPH 2004).

$$K_r = 5,57 \frac{E_r}{E_s} \frac{1 - \nu_s^2}{1 - \nu_r^2} \left(\frac{B}{L} \right)^{0,5} \left(\frac{t_r}{L} \right)^3 \quad (22)$$

A rigidez da estaca (K_p) pode ser calculada pela relação do módulo de Young da estaca pelo módulo de Young solo (HAIN; LEE, 1978).

$$K_p = \frac{E_p}{E_s} \quad (23)$$

Similarmente, ao explorar estes fatores de rigidez acima, é possível estimar ainda, a proporção de carga suportada pelo bloco/radier e o grupo de estacas, pela Equação (24) (RANDOLPH, 1994).

$$\frac{P_r}{P_p} = \frac{0,2}{1 - 0,8(K_r/K_p)} \frac{K_r}{K_p} \quad (24)$$

2.6.2.1 Eficiência de grupo

A rigidez de uma estaca em grupo é reduzida quando comparada com a rigidez de uma estaca isolada em consequência dos efeitos de interação. Em vista disso, esta redução pode ser aplicada usando um parâmetro de eficiência (η).

$$\eta = \frac{1}{R_s} = \frac{k_p}{nk_1} \quad (25)$$

Sendo: R_s é a taxa de recalque do grupo de estacas, k_1 é a rigidez de uma estaca única medida no topo e k_{PG} é a rigidez do grupo de estacas, dada como:

$$k_{PG} = n^{-e} k_1 \quad (26)$$

Além disso, a eficiência de grupo pode ser expressa como uma simples lei de potência em razão do número de estacas:

$$\eta = n^{-e} \quad (27)$$

Os valores do expoente “e” compreende normalmente entre 0,3 e 0,5 para estacas de atrito, mas pode chegar a 0,6 para estacas de ponta. Fleming et al (1992) citado por Randolph (1994) apresentam gráficos onde pode-se determinar o expoente por meio de um valor de base e_1 dependendo da relação do índice de esbeltez da estaca e seus fatores de correção:

$$e = e_1 \left(\frac{l}{d} \right) * c_1(E_p/G) * c_2(s/d) * c_3(\rho) * c_4(v) \quad (28)$$

As curvas para e_1 , c_1 , c_2 , c_3 , c_4 podem ser expressas por meio dos seguintes polinômios: (FLEMING et al., 1992)

$$e_1 = e_1(l/d)^3 * 4.5 * 10^{-7} - \left(\frac{l}{d} \right)^2 * 9 * 10^{-5} + \left(\frac{l}{d} \right) * 4.9 * 10^{-3} + 0.47 \quad (29)$$

$$c_1 = -(\log_{10}(\lambda))^3 * 3.8 * 10^{-2} + (\log_{10}(\lambda))^2 * 0.28 - \log_{10}(\lambda) * 0.45 + 0.85 \quad (30)$$

$$c_2 = -\left(\frac{s}{d} \right)^3 * 2.5 * 10^{-4} + \left(\frac{s}{d} \right)^2 * 9.6 * 10^{-3} - \left(\frac{s}{d} \right) * 0.13 + 1.32 \quad (31)$$

$$c_3 = -\rho^2 * 0.20 + \rho * 0.56 + 0.69 \quad (32)$$

$$c_4 = -v^2 * 0.14 - v * 0.20 + 1.07 \quad (33)$$

Tais equações são válidas para $10 \leq l/d \leq 100$, $2 \leq \lambda \leq 4$, $0,5 \leq \rho \leq 1$ e $0 \leq v \leq 0,5$.

2.6.3 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) foi considerado a primeira ferramenta para análise de uma grande variedade de problemas da engenharia (BUDHU, 2017). É uma das ferramentas mais versáteis disponíveis e popular para análises na engenharia, uma vez que os elementos podem ser arranjados e modelados em diversas formas e modelos. Além disso, o método é baseado em equações algébricas simples (BALAKUMAR, 2008).

De acordo com Sales (2000) Ottaviani (1975) foi o primeiro a abordar o MEF em 3D. Ele estudou grupos de estacas e radiers estaqueados com estacas dispostas em 3x3 e 5x3, e comparou o recalque em função da rigidez relativa entre o material do solo e das estacas e a distribuição de cargas entre estacas.

A análise de fundações compostas por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) possui grandes vantagens quando comparadas com os métodos simplificados. A investigação de uma fundação estaqueada é complexa pela necessidade de considerar a interação entre os elementos constituintes: estaca, radier e solo. O *Software* em MEF fornece elementos de contato avançados para modelar esta interação e permite o emprego de propriedades lineares ou não-lineares na obtenção de uma solução adequada (NOVAK; REESE; WANG, 2005).

A maioria dos trabalhos existentes que abrangem o tema “fundações estaqueadas”, envolvendo análises numéricas foram fundamentados por meio do método dos elementos finitos, dentre os quais pode-se citar: Balakumar (2008), Balakumar et al (2018), Poulos (2001), Mandolini (2003), Sales (2000), Bittencourt (2012), Castillo (2013), Freitas Neto (2013), Curado (2015) Perez (2017), Bittencourt (2018), Celik (2019), Garcia e Albuquerque (2021), entre outros.

Dentre as diferentes abordagens do Método dos Elementos Finitos três têm sido amplamente utilizadas: a análise tridimensional, a bidimensional como um modelo de plano de deformação equivalente e a análise como um modelo equivalente axialmente simétrico (PRESSLEY; POULOS, 1986).

Reitera-se que o método dos elementos finitos é capaz de realizar análises em fundações estaqueadas podendo ser bidimensionais ou tridimensionais. Em cada caso, os elementos finitos são usados para discretizar o radier e o solo e, portanto, é uma questão relativamente simples

levar em consideração o comportamento não linear do solo e do radier. O comportamento bifásico do solo pode ser incorporado para que seja possível calcular a dependência no tempo da distribuição e da distribuição da carga de estacas devido à consolidação do solo (HEMSLEY, 2000).

Neste trabalho realizou-se análises pelos métodos do radier e pilar equivalente, análises por um método híbrido que aborda o método do pilar equivalente em conjunto com o método dos elementos finitos bidimensional axissimétrico, e modelagens tridimensionais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Será apresentado nesse item as características geométricas das fundações estudadas bem como os parâmetros geotécnicos do solo e características mecânicas do concreto utilizados nas análises, além das ferramentas computacionais utilizadas.

3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Para avaliar a influência da geometria de contato bloco-solo em fundações estaqueadas definiu-se um arranjo único de grupo de estacas com disposição 2x2, mantendo-se a mesma área de base do bloco/radier nas geometrias: quadrado, circular e octogonal variando o tipo de fundação (radier estaqueado, grupo de estacas e radier isolado) além do espaçamento entre estacas.

A fundações em radier estaqueado PR (com contato radier-solo) e em grupo de estacas PG (sem contato bloco-solo) possuem ambas quatro estacas com 5 m de comprimento (L) e 30 cm de diâmetro (d), com variação do espaçamento entre as estacas de 4, 6 e 8 vezes seu diâmetro ($s=4d, 6d$ e $8d$). A área do radier isolado RI foi determinada com base nas respectivas áreas das fundações anteriores obedecendo o mesmo critério das geometrias e espaçamentos, por exemplo: a área da base de um radier isolado circular RIC4 é análoga à área da fundação superficial do radier estaqueado circular com espaçamento 4d, assim como para os demais espaçamentos.

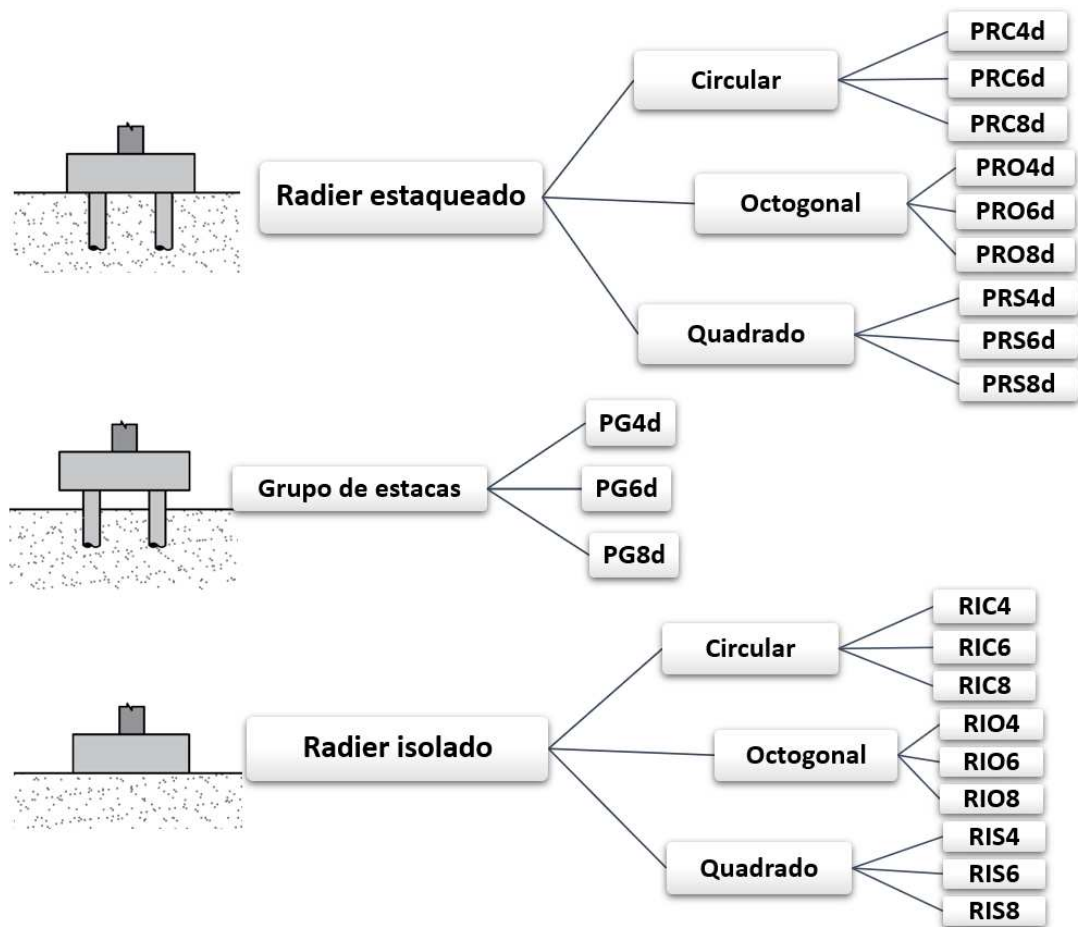
No Quadro 4 é possível consultar a área total do bloco/radier equivalente em todas as geometrias para cada espaçamento, bem como sua área líquida de contato, ou seja, a área total do bloco menos a soma da área da seção transversal das quatro estacas.

Quadro 4- Áreas de acordo com os espaçamentos entre estacas.

Espaçamentos (s)	4d	6d	8d
Área total do bloco (m ²)	4,42	8,24	13,24
Área líquida de contato -A _L (m ²)	4,14	7,96	12,96

Fonte: A autora.

Figura 26 - Fundações analisadas.



Fonte: A autora.

Nesse sentido, estudou-se 21 modelos de fundações distribuídos nas suas respectivas geometrias e tipos de fundações (Figura 26). Para uma melhor compreensão sobre os modelos analisados na presente pesquisa denominou-se para cada modelo uma nomenclatura conforme é apresentada no

Quadro 5.

Dessa forma, foi adotado a sigla PR para representar as fundações em radier estaqueado, PG para representar as fundações em grupo de estacas e RI para as fundações em radier isolado, sendo as letras S, C e O para representar as geometrias de forma quadrada, circular e octogonal, respectivamente. O espaçamento entre estacas foi representado por 4d, 6d e 8d nas fundações estaqueadas e 4, 6, e 8 para as fundações em radier isolado baseadas no elemento superficial das fundações estaqueadas.

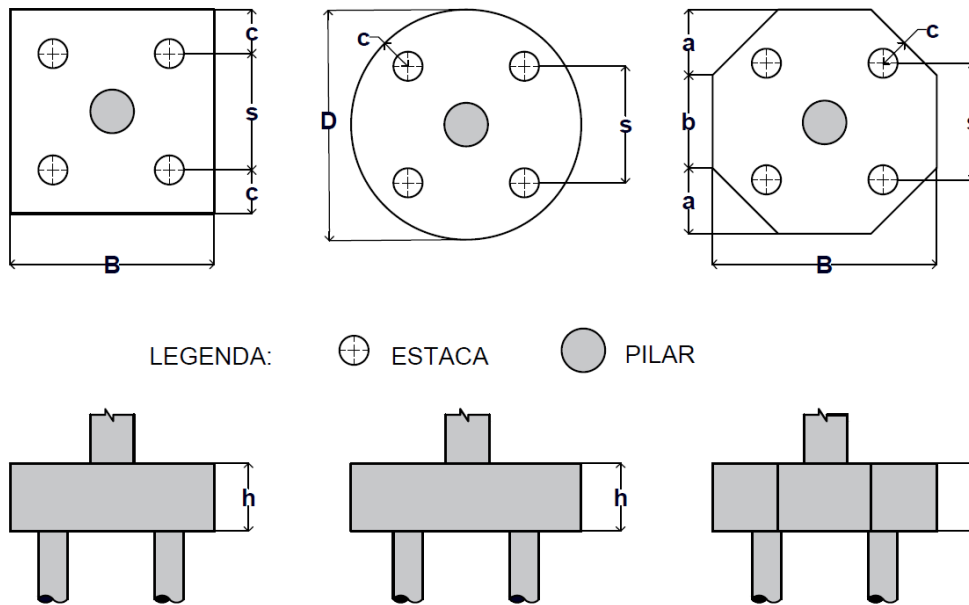
Quadro 5 - Modelos de fundações analisadas

Nomenclatura	Descrição
PRS4d	Radier estaqueado quadrado com espaçamento $s=4d$
PRS6d	Radier estaqueado quadrado com espaçamento $s=6d$
PRS8d	Radier estaqueado quadrado com espaçamento $s=8d$
PRC4d	Radier estaqueado circular com espaçamento $s=4d$
PRC6d	Radier estaqueado circular com espaçamento $s=6d$
PRC8d	Radier estaqueado circular com espaçamento $s=8d$
PRO4d	Radier estaqueado octogonal com espaçamento $s=4d$
PRO6d	Radier estaqueado octogonal com espaçamento $s=6d$
PRO8d	Radier estaqueado octogonal com espaçamento $s=8d$
PG4d	Grupo de estacas com espaçamento $s=4d$
PG6d	Grupo de estacas com espaçamento $s=6d$
PG8d	Grupo de estacas com espaçamento $s=8d$
IRS4	Radier isolado quadrado 4
IRS6	Radier isolado quadrado 6
IRS8	Radier isolado quadrado 8
IRC4	Radier isolado circular 4
IRC6	Radier isolado circular 6
IRC8	Radier isolado circular 8
IRO4	Radier isolado octogonal 4
IRO6	Radier isolado octogonal 6
IRO8	Radier isolado octogonal 8

Fonte: A autora.

São demonstrados na Figura 27 as geometrias das fundações estudadas na presente pesquisa. Outros parâmetros e detalhes dos modelos tais como dimensões, área, perímetro e cobrimento podem ser consultados no APÊNDICE A.

Figura 27 – Fundação estaqueada: quadrada, circular e octogonal, respectivamente.



Fonte: A autora.

3.1.1 Altura do bloco

Por uma questão de simplicidade, assumiu-se que toda fundação superficial analisada trabalhe como um elemento rígido. Levando em consideração a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6118 (2014) em que o ângulo de inclinação da biela (θ) deve estar compreendido entre 40° e 55° , e o Boletim 73 do CEB-FIP (1970) em que o bloco é considerado rígido quando for maior que $2/3$ da distância do eixo da estaca até a face do pilar e menor que o dobro desta distância.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014) para um bloco ou sapata de fundação ser considerado rígido é necessário atender a relação:

$$h \geq \frac{(a - a_p)}{3} \quad (34)$$

Onde: h é a altura total do bloco; a é a dimensão do bloco e a_p é a dimensão do pilar ambos na direção considerada.

Considerando estas informações, a altura total (h) do bloco/radier e seus respectivos ângulos de inclinação da biela (θ) foram definidos para todas as geometrias de base da fundação superficial, de acordo com o espaçamento entre estacas, isso significa que para um mesmo espaçamento independentemente da geometria de base adotada, a altura do bloco é a mesma conforme é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões dos blocos de acordo com o espaçamento entre estacas.

Espaçamento (s)	Altura (cm)	Ângulo de inclinação da biela ($^{\circ}$)
4d	65	48,8
6d	105	50,5
8d	145	51,2

3.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO SOLO E CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CONCRETO

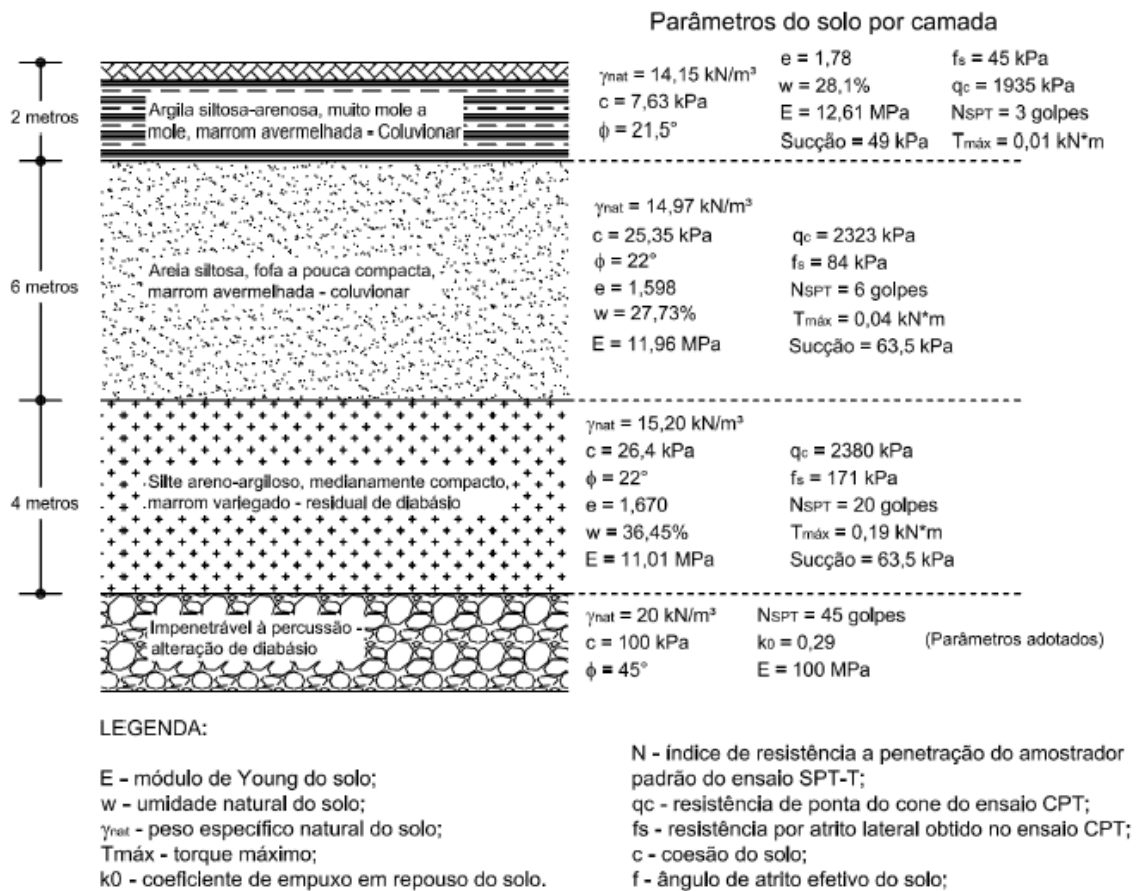
Os parâmetros geotécnicos do perfil de solo adotados bem como as características mecânicas do concreto foram embasados a partir do estudo de Garcia (2015) (Figura 28). O autor realizou análises por métodos experimentais e os comparou numericamente, com isso, os resultados desta pesquisa tendem a uma visão mais próxima da realidade visto que os parâmetros de entrada foram reajustados ao comparar os resultados experimentais com as análises numéricas.

Para obtenção dos parâmetros geotécnicos médios em cada camada de solo o autor reuniu resultados de ensaios de campo e de laboratório além de provas de carga em estacas isoladas do campo experimental da Universidade de Campinas. Para maiores detalhes acerca dos ensaios, instrumentação, caracterização e resultados consultar Garcia (2015). Ademais, alguns dos parâmetros geotécnicos não apresentados pelo autor que são necessários para realização das análises da presente pesquisa, como coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento foram obtidos por meio de correlações:

É apresentado na Tabela 2 o coeficiente de Poisson de cada camada do solo estimado a partir de valores típicos tabelados da literatura geotécnica e o módulo cisalhante (G) determinado a partir do módulo de Young (E_s) e o coeficiente de Poisson (ν) do solo, conforme Equação (35) (AMERATUNGA; SIVAKUGAN; DAS, 2016).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (35)$$

Figura 28 - Parâmetros médios do perfil geológico.



Fonte: Garcia (2015).

Tabela 2 - Módulo cisalhante (G) médio em cada perfil do solo.

Profundidade (m)	ν	G (MPa)
0 a 2	0,2	5,25
2 a 8	0,2	4,98
8 a 12	0,35	4,08
a partir de 12	0,25	40,0

Para os parâmetros de resistência e deformabilidade do concreto, ou seja, do material dos elementos da fundação adotou-se os parâmetros contidos no trabalho de Garcia (2015) uma vez

que o trabalho possui todos os parâmetros necessários para as análises. Para maiores detalhes acerca dos ensaios para obtenção dos parâmetros consultar Garcia (2015).

Na seção 3.3 verifica-se os valores empregados nos métodos equivalentes conforme cada premissa de cálculo. Nas metodologias numéricas os parâmetros foram devidamente calibrados a partir de resultados experimentais a fim de se obter um comportamento mais próximo da realidade. Os parâmetros geotécnicos foram ajustados e calibrados conforme cada metodologia de cálculo apresentada a partir das respectivas metodologias híbridas e tridimensionais. Tais informações podem ser consultados nas subseções 4.1.2 e 4.2.2.

3.3 PRINCÍPIOS ADOTADOS NOS MÉTODOS EQUIVALENTES

Para o cálculo e desenvolvimento dos métodos equivalentes, adotou-se das formulações apresentadas nos subitens da seção 2.6.1. Os valores do coeficiente de Poisson, módulo de cisalhamento e módulo de Young do solo foram estimados pela média ponderada entre cada camada de solo. Os parâmetros médios de entrada adotados para o método do Pilar Equivalente estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros geotécnicos de entrada para o método do Pilar Equivalente

Parâmetros médios do solo		
ν	0,25	-
E_p	26750	MPa
E_s	12,22	MPa
G_l	4,98	MPa
G_b	4,98	MPa
G_{avg}	5,1	MPa

Sendo: ν o coeficiente de Poisson, E_p o módulo de Young do material do pilar equivalente, E_s o módulo de Young do solo, G_l o módulo de cisalhamento a 5m de profundidade, G_b o módulo de cisalhamento na ponta da estaca, e G_{avg} foi considerado como a média ponderada entre os 10 primeiros metros do solo.

Cabe destacar que o módulo de Young do material do pilar equivalente adotado corresponde-se a um módulo de Young representativo (E_{comp}) já calculado por Garcia (2015), que considera de modo proporcional o módulo de Young do concreto e do aço conforme a equação a seguir:

$$E_{comp} = \frac{A_a E_a + A_c E_c}{A_a + A_c} \quad (36)$$

Sendo: A, a área transversal e E o módulo de Young (MN/m^2), os subscritos “a” e “c” representam o aço e o concreto, respectivamente.

Para o método do Radier Equivalente em que o radier é posicionado a uma profundidade dependente do perfil de solo existente (item 2.6.1.1). No caso do perfil de solo adotado para esta pesquisa o radier equivalente foi posicionado a 2/3 do comprimento L da camada de solo (de 0 a -12m), ou seja, a uma profundidade de -8m conforme a Figura 22 (b) tendo em vista que a ponta da estaca está posicionada acima da camada de solo mais resistente.

Os parâmetros geotécnicos do solo como por exemplo o módulo de Poisson e o módulo de Young foram obtidos a partir da média ponderada do perfil de solo, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros geotécnicos de entrada para o método do Radier Equivalente

Parâmetros médios do solo		
$\nu_{méd}$	0,25	-
E_s	11,75	MPa
I	0,82	-

Sendo: ν o coeficiente de Poisson, E_s o módulo de Young do solo, I o fator de influência.

3.4 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Para um estudo mais detalhado acerca da distribuição e transferência de cargas da fundação com relação à influência da geometria de contato bloco-solo, sem usufruir de métodos experimentais complexos que demandam muitas vezes, tempo, esforço e gastos, é imprescindível o uso de ferramentas computacionais capazes de simular comportamentos de

fundações bem próximas da realidade. Como já mencionado, este trabalho fez-se uso de dois softwares: um bidimensional, o RS2 pelo método dos elementos finitos (MEF) 2D e um tridimensional, o CESAR-LCPC pelo MEF 3D, apresentado nas subseções a seguir.

3.4.1 *Software RS2*

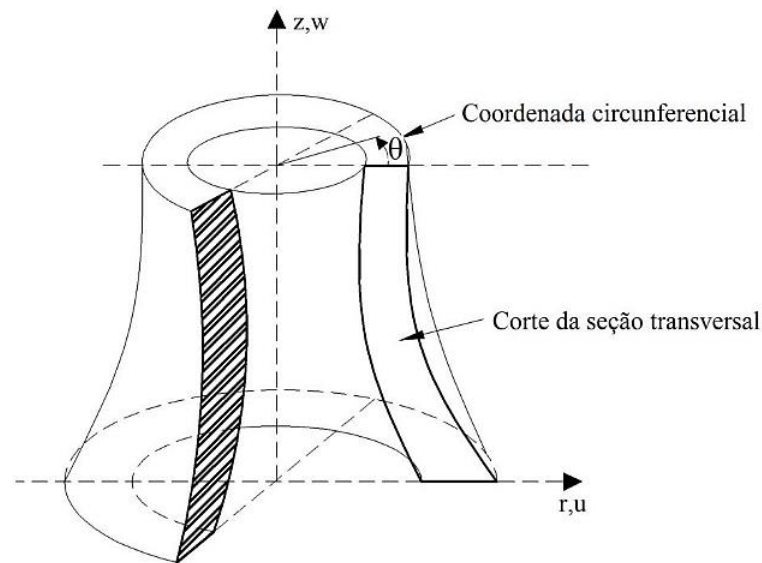
Para as análises híbridas bidimensionais foi utilizado o *software* RS2 da Rocscience. Ressalta-se que o software adotado para as análises tridimensionais (CESAR-LCPC) também é capaz de modelar bidimensionalmente, mas optou-se pelo uso das duas ferramentas, pois assim poderia simular ambas as análises simultaneamente, uma vez que havia disponibilidade de apenas uma licença de cada ferramenta. Além disso, a maior trabalhabilidade quando comparado com a facilidade do manuseio do RS2, conduziram à escolha do software RS2 para as análises bidimensionais.

O RS2 é um poderoso programa de elementos finitos 2D para aplicações em solo e rocha que pode ser usado em uma ampla gama de projetos de engenharia, incluindo projetos de escavação, estabilidade de taludes, infiltração de águas subterrâneas, e análises probabilística e dinâmica. Processadores potentes possibilitam a resolução de problemas complexos em elementos finitos de modo simples e rápido (ROCSCIENCE, 2019).

Existem dois tipos gerais de modelos que podem ser criados e analisados no RS2: a deformação plana, e a análise axissimétrica. O modelo de deformação plana supõe que as escavações tenham comprimento infinito na direção fora do plano, ou seja, a deformação na direção fora do plano é zero. Enquanto a análise axissimétrica permite analisar um modelo tridimensional simétrico de rotação em relação a um eixo central (ROCSCIENCE, 2019).

Sólidos axissimétricos ou de revolução, são sólidos gerados pela revolução de uma figura plana em 360° em torno de um eixo chamado eixo de revolução ou eixo de axissimetria, geralmente o eixo z (VAZ, 2011). Devido à simetria da geometria da estrutura e da carga em torno do eixo z todas as tensões e deformações são independentes do ângulo de rotação θ , dessa forma, o problema pode ser visto bidimensionalmente no plano rz, conforme a área de rotação, como pode ser visualizado na Figura 29 (FERREIRA, 2017).

Figura 29 - Sólido axissimétrico.



Fonte: Ferreira (FERREIRA, 2017)

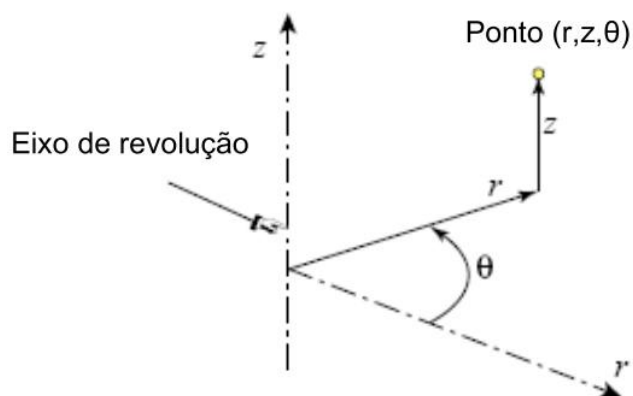
Dada a existência de um eixo de revolução, os problemas axissimétricos podem ser definidos em coordenadas cilíndricas. Na Figura 30 é possível visualizar o sistema de coordenadas globais para um problema axissimétrico (RODRIGUES, 2009).

Vale lembrar que o modelo abordado neste trabalho é o modelo axissimétrico. Embora as fundações estudadas sejam tridimensionais, os parâmetros de entrada são transformados para duas dimensões a partir de um eixo de revolução, mais detalhes acerca desse método são explanados no item 4.1.

3.4.2 Software CESAR-LCPC

O software CESAR-LCPC tem se mostrado capaz de prever comportamentos de fundações com um alto nível de confiabilidade, este, é um software de elementos finitos para a análise estrutural concebido e verificado pelo instituto IFSTTAR (anteriormente conhecido como LCPC - Central Bridges e Roadworks Laboratory). Criado em 1983 com o intuito de atender os padrões de engenharia civil, o software é dedicado a obras subterrâneas, obras civis, mecânica dos solos, hidrogeologia e desafios ambientais. Em 2003, a “itech” entrou para a equipe de desenvolvimento do software e traz sua experiência na concepção de interfaces de usuário poderosas e acessíveis. Assim, a estreita colaboração entre IFSTTAR e “itech” traz CESAR como um software profissional, tanto em análises 2D como em 3D (CESAR, 2019).

Figura 30- Sistema de coordenadas cilíndricas (r, z, θ) .



Fonte: Rodrigues (2009)

O software possibilita a realização de análises numéricas tridimensionais baseadas no Método dos Elementos Finitos, promovendo a obtenção das tensões e deformações em cada elemento da malha. Esta malha de elementos finitos pode ser montada com a liberdade de escolha e nível de refinamento necessário para cada problema. É indicado para aplicação em projetos de estruturas subterrâneas, pavimentos e aterros, projetos de fundações superficiais e profundas, para análises de recalques e ruptura do solo (FREITAS NETO, 2013).

Ressalta-se que este software também foi adotado para o estudo de fundações em radier estaqueado por outros autores brasileiros como Pezo (2013), Castillo (2013), Garcia (2015) e Freitas Neto (2013) o que assegura a eficiência do programa.

Vale destacar o extenso estudo de validação do CESAR-LCPC, realizado por Freitas Neto (2013) em que demonstra concordância entre casos analisados no software com resultados encontrados na literatura. O autor comparou desde modelos mais simples como uma estaca única até casos mais complexos como radiers estaqueados com grande quantidade de estacas. As análises realizadas pelo autor, comprovam que o software CESAR-LCPC pode apresentar resultados semelhantes aos resultados existentes na literatura por outros autores e por outras metodologias, especialmente àqueles estudos realizados pelo método dos elementos finitos. Para maior detalhes acerca desse estudo comparativo, consultar Freitas Neto (2013).

4 MODELAGEM NUMÉRICA

A amplitude dos avanços científicos nas últimas décadas somado com o desenvolvimento de ferramentas computacionais mais complexas possibilitou a simulação confiável de diversos sistemas na área da geotecnia utilizando modelos numéricos. Bittencourt (2018) complementa que estas ferramentas associadas aos ensaios de campo contribuem para a análise do comportamento dos sistemas de fundação, como no radier estaqueado, pois obtém uma maior precisão nos resultados acerca dos comportamentos mecânicos do sistema.

“A modelagem numérica é uma técnica baseada no cálculo numérico utilizada para validar ou refutar propostas de modelos conceituais a partir de observações ou derivados de teorias anteriores” (PEZO, 2013, p. 15). O uso da modelagem numérica na geotecnia por exemplo, vem sendo cada vez mais recorrente, uma vez que quando comparado aos estudos experimentais são geralmente mais econômicos além de permitir refazer simulações que experimentalmente pode ser impossível quando se trata da geotecnia.

As fundações em radier estaqueado são amplamente estudadas pela metodologia numérica no meio científico. É evidente que estudos numéricos podem realmente simular comportamentos de modelos de fundações bem próximos da realidade. Existem diversos estudos comparativos em que validam comportamentos obtidos experimentalmente por meio de simulações numéricas em como nos estudos realizados por Garcia (2015), Garcia e Albuquerque (2019), Pezo (2013), Freitas Neto (2013), Janda et al., (2009) e um grande número de autores.

Entretanto, para realizar uma modelagem relativamente confiável é necessário respeitar algumas particularidades, como por exemplo, verificar se o programa está respondendo de forma adequada, se os limites ou condições de contorno do problema não estão interferindo no comportamento do sistema, se o modelo de comportamento do solo escolhido descreve o maciço do solo, ou se a densidade da malha adotada é capaz de simular tal comportamento seguramente com um tempo de processamento ótimo.

Independentemente do método escolhido, a credibilidade de uma análise depende da realização de testes de validação e convergência. Esta, é uma das etapas mais importantes do estudo, pois somente assim pode-se certificar que as ferramentas adotadas estão sendo manipuladas

corretamente. É importante enfatizar que todas as análises realizadas nesta pesquisa foram certificadas e validadas, desde os métodos simplificados equivalentes até, principalmente, os métodos numéricos.

Na presente pesquisa adotou-se de dois tipos de modelagens numéricas, a análise híbrida axissimétrica e a análise tridimensional, os detalhes relativos ao processo metodológico destas análises são abordados nos próximos itens.

4.1 ANÁLISE HÍBRIDA

É uma nova técnica para resolver problemas de fundações em radier estaqueado que está sendo amplamente empregada no meio geotécnico. Fundamentada na análise bidimensional axissimétrica de um radier estaqueado imerso ao solo, em que todo o sistema (estacas + solo) é convertido primeiramente em um único pilar equivalente, este modelo possibilita analisar por exemplo, um problema tridimensional a partir de uma estrutura axial em duas dimensões.

Um dos primeiros trabalhos a estudar fundações em radier estaqueado pelo método dos elementos finitos bidimensionais foi Hooper (1973). De acordo com o autor foi a primeira vez que a junção das medições em campo com os resultados das análises numéricas possibilitou uma compreensão mais clara acerca do comportamento de um radier estaqueado.

Diante desse contexto nota-se que uma grande parte da literatura geotécnica emprega o método dos elementos finitos bidimensionais para o estudo da fundação em radier estaqueado, como: Meena e Nimbalkar (2019), Celik (2019), Kiran et al., (2018), Elwakil e Azzam (2016), Garcia (2015), Wulandaria e Tjandra (2015), Maharaj e Anshuman (2014), Algulin e Pedersen (2014), Ryltenius (2011), Mendonça e Paiva (2003), Prakoso e Kulhawy (2001), e Horikoshi e Randolph (1999). O que demonstra o nível de confiabilidade desse modelo de estudo.

Na análise híbrida assim como nos métodos equivalentes, a geometria da fundação superficial não é considerada uma vez que todo o conjunto (estaca + solo) é transformado em um único pilar circular equivalente. Ressalta-se que as dimensões desse pilar dependem exclusivamente do espaçamento, quantidade e comprimento das estacas, não sendo levado em consideração

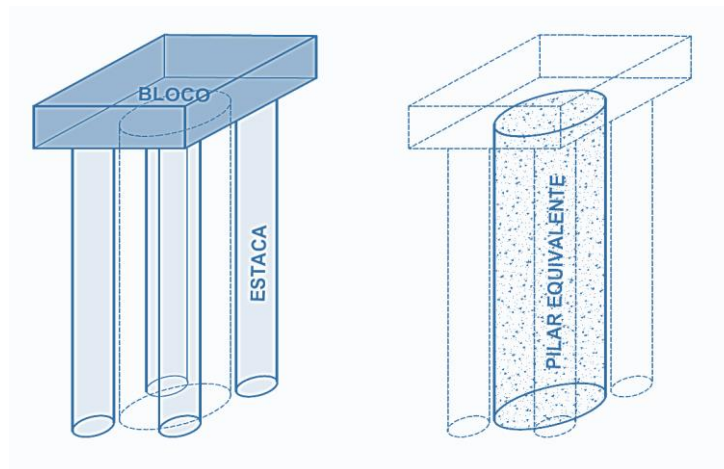
nem a geometria, nem a altura ou quaisquer outros parâmetros geométricos da fundação superficial.

Vale ressaltar que Randolph (1994) adota os métodos equivalentes para fundações estaqueadas do tipo grupo de estacas, o que leva a compreensão de que a contribuição do elemento superficial de fundação (bloco) nos métodos equivalentes é desconsiderada. Dessa forma, entende-se que o cálculo a partir dos métodos equivalentes bem como na metodologia híbrida é tratada exclusivamente para fundações do tipo grupo de estacas, em que o bloco tem a função exclusiva de transferir a carga dos pilares para os elementos de fundação profunda.

É importante ainda citar que o software adotado nas análises híbridas bidimensionais foi o *software RS2 da Rocscience*. Salienta-se que o *software CESAR-LCPC* é capaz de realizar análises bidimensionais, mas devido a uma menor disponibilidade e acesso ao *CESAR-LCPC*, além de uma maior complexidade no manuseio da ferramenta, adotou-se o *software RS2*.

Em vista disso a modelagem híbrida foi realizada, portanto, a partir da conversão da fundação estaqueada em um “pilar único”, ou seja, todo o conjunto radier + estacas + solo foi transformado em um pilar único equivalente de um diâmetro equivalente D_{eq} , (Figura 31) também com propriedades equivalentes, como por exemplo o módulo de Young do sistema. Ressalta-se que essa metodologia foi comparada, testada e validada a partir de resultados de trabalhos disponíveis na literatura, detalhada no item 4.1.1.

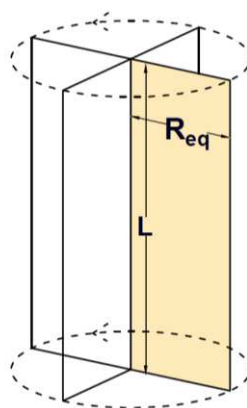
Figura 31 – Conversão do radier estaqueado em pilar equivalente.



Fonte: A autora.

Para definir as dimensões da fundação modelada no software, primeiramente obteve-se o raio equivalente a partir do método do pilar equivalente (conforme equações do item 2.6.1.2) delimitando a geometria, para que esta, quando posicionada em torno de um eixo de revolução, represente fielmente o modelo de fundação, como pode ser observado na Figura 32. Nesta, é possível visualizar o modelo 2D, em destaque, que ao ser rotacionado em 360° reproduz o formato de um pilar equivalente.

Figura 32 – Representação axissimétrica do pilar equivalente.

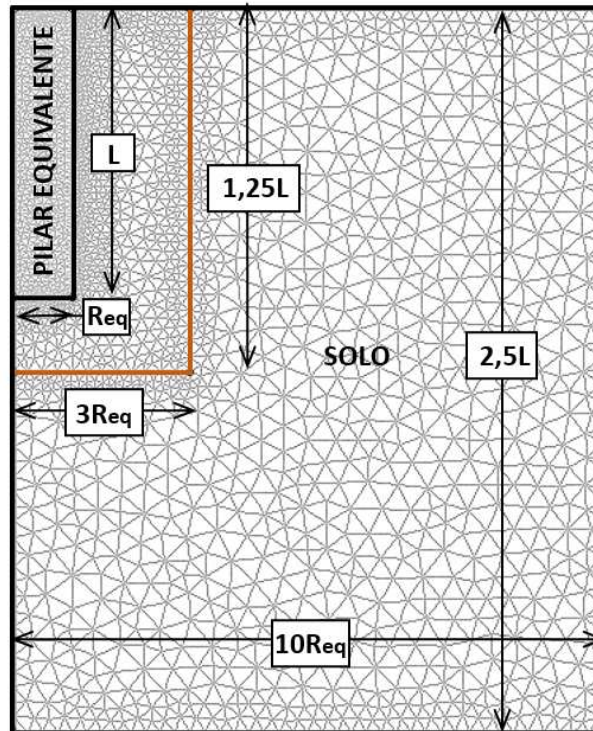


Fonte: A autora.

Uma vez desenhado a geometria da fundação a ser analisada no programa fez-se necessário definir os limites externos do problema, ou seja, um campo de malha aceitável que não interfira nos resultados das análises. Consequentemente, quanto mais amplo esse campo, maior será o tempo de processamento. Nesta pesquisa, as dimensões das condições de contorno foram adotadas proporcionalmente às dimensões do pilar equivalente (Figura 33) fundamentado no trabalho realizado por Celik (2019), em que adotou aproximadamente 10 vezes o raio equivalente (R_{eq}) para a largura e para a profundidade 2,5 vezes o comprimento da estaca.

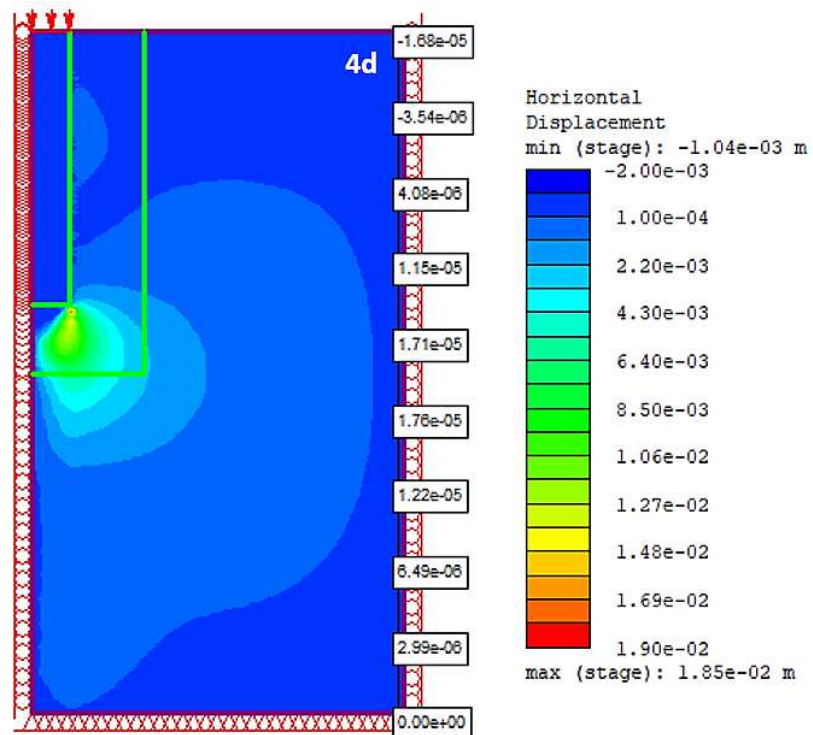
Os limites externos foram investigados de modo a assegurar o mínimo de prejuízo técnico na representação do comportamento do pilar equivalente. Para toda a extensão do limite lateral direito, constata-se que os deslocamentos obtidos por cada malha conforme a profundidade do problema não ultrapassaram milésimos de milímetros em todos os espaçamentos estudados conforme as Figuras 34, 35 e 36. Dessa forma, considerou-se que os deslocamentos resultantes nos limites externos da malha são aceitáveis, permitindo assim, o estudo do comportamento da fundação com maior segurança.

Figura 33 – Condições de contorno.



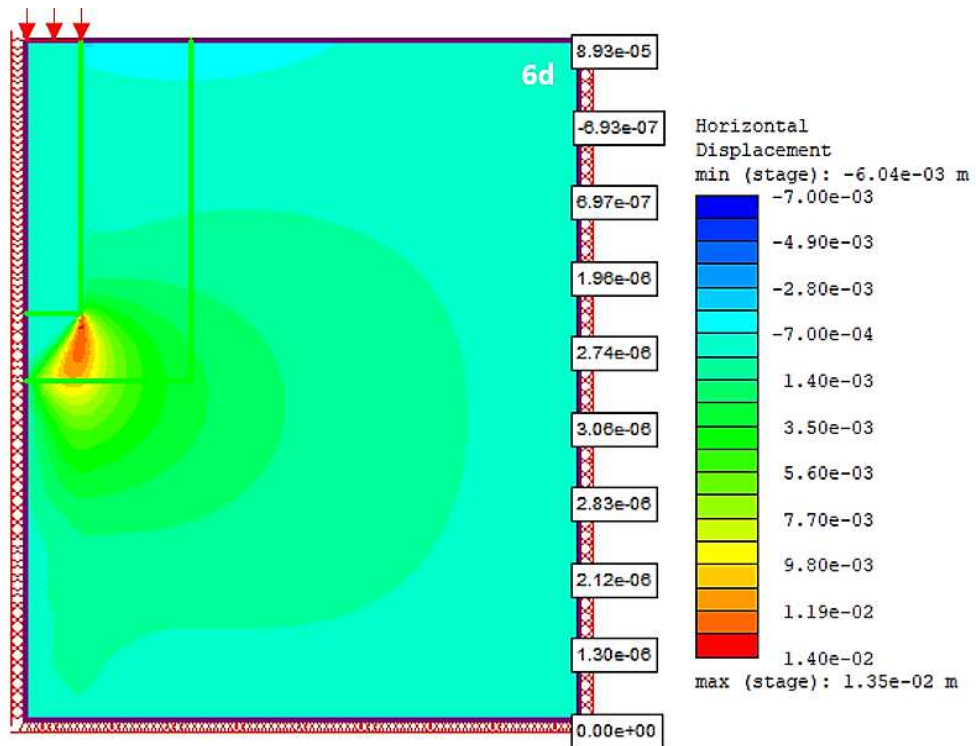
Fonte: A autora.

Figura 34 – Deslocamentos horizontais nas extremidades do modelo híbrido com $s=4d$.



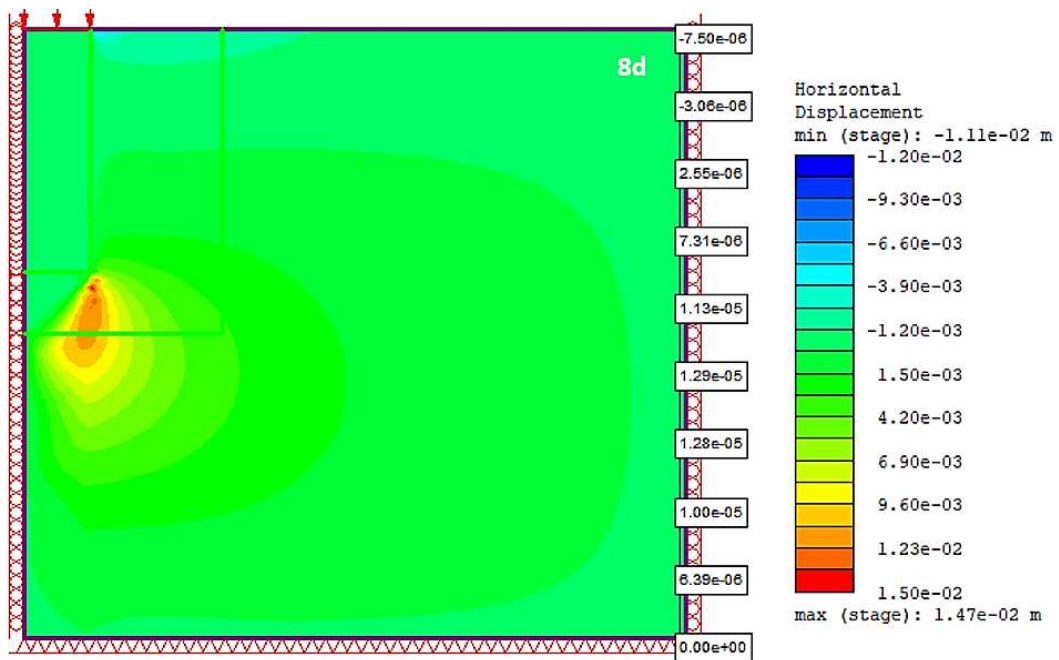
Fonte: A autora.

Figura 35 - Deslocamentos horizontais nas extremidades do modelo híbrido com $s=6d$.



Fonte: A autora.

Figura 36 - Deslocamentos horizontais nas extremidades do modelo híbrido com $s=8d$.



Fonte: A autora.

No método numérico os resultados são dependentes da densidade da malha adotada, ou seja, à medida que a malha é refinada resultados mais acurados são obtidos. Contudo, como observado por Pezo (2013), ao aumentar a densidade dos pontos da modelagem, a velocidade da análise numérica eleva gradativamente. Portanto, faz-se necessário obter um nível de refinamento ótimo de forma que o grau de densidade da malha não afete no comportamento do sistema e nem onere o tempo de processamento.

A economia analítica pode ser obtida adotando grandes elementos em regiões onde se espera que os gradientes de deformação sejam menores como por exemplo, próximo aos limites laterais, e elementos menores precisam ser posicionados em locais em que os gradientes de deformação estejam mais elevados ou em regiões de concentração de tensão (WOOD, 2004).

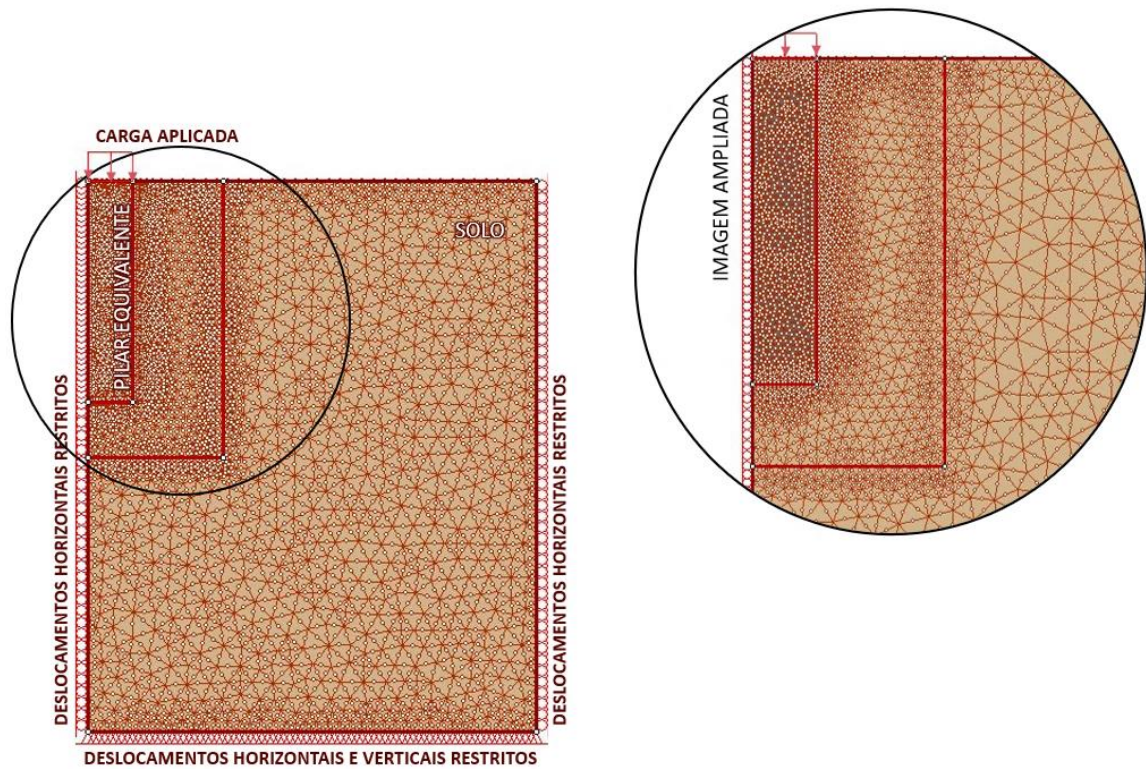
Nesse sentido foi adotado um processo de otimização de malha a fim de reduzir o tempo de processamento no qual consiste em um maior refinamento da malha na região em torno do pilar equivalente e nas regiões de interface entre os diferentes materiais: entre o pilar equivalente e o solo, a fim de garantir resultados mais precisos (Figura 37). As dimensões dessa área densificada foram proporcionais ao pilar equivalente como pode-se observar na Figura 33. Ressalta-se que esta técnica foi baseada em Celik (2019), Wood (2004) e utilizada por Abdel-Azim, Abdel-Rahman e El-Mossallamy (2020).

Esse modelo de malha adotado nas análises é composto por elementos do tipo triangular de 6 nós, constituído por três nós no canto e três no meio conforme é apresentado na Figura 38. Um resumo quanto a densidade da malha adotada e sua quantidade de elementos e nós adotado por cada modelo é apresentado na Tabela 5.

As seguintes condições para os limites de fronteira foram adotadas em todos os modelos híbridos: nas faces laterais do modelo (esquerda e direita) foi atribuído como indeslocável na direção horizontal sendo permitido o deslocamento vertical, enquanto a base do modelo foi considerada como indeslocável em ambas as direções, horizontal e vertical (Figura 37).

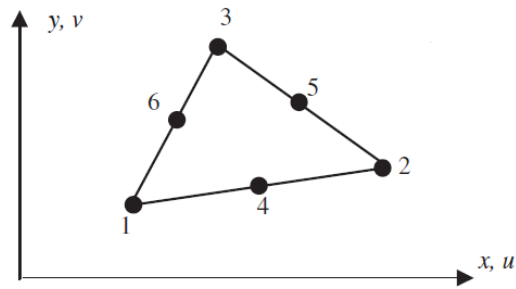
Em seguida, para aplicar as propriedades mecânicas dos elementos é imprescindível definir um modelo que represente o solo e a fundação. Para as propriedades mecânicas do solo é fundamental um modelo de comportamento que descreva o comportamento geral do maciço com relação a perturbações internas e externas.

Figura 37 – Refinamento da malha em torno do pilar equivalente.



Fonte: A autora.

Figura 38 – Elemento triangular de 6 nós.



Fonte: Liu e Quek (2003).

Tabela 5 – Densidade da malha adotada nas análises.

Espaçamento	Dimensão da malha (m x m)	Quantidade	
		Elementos	Nós
4d	6,77 x 12,48	2462	5093
6d	10,16 x 12,48	4071	8348
8d	13,54 x 12,48	5209	10556

Cada modelo possui um critério de ruptura específico, o modelo de Morh-Coulomb pode simular o solo se comportando inicialmente como elástico linear e posteriormente no estado plástico quando a máxima obliquidade de tensão é alcançada. No modelo Morh-Coulomb, o solo é simulado como elástico-rígido-plástico com uma ruptura à longo prazo (BUDHU, 2017).

Ou seja, baseia-se na ideia de que o fenômeno macroscópico do escoamento pode ser resultante do atrito entre as partículas do material, sendo a superfície de escoamento em função da coesão e do ângulo de atrito do solo. A plastificação do material, portanto, ocorre quando se alcança a máxima tensão de cisalhamento (TAVARES, 2019).

Para simular o comportamento do solo e da fundação nas análises numéricas híbridas adotou-se como critério de ruptura o modelo Morh-Coulomb, que é comumente adotado por vários autores para o estudo de fundações estacadas como em Ghalesari (2016), Mahmood, Al-Wakel e Hani (2017), Tradigo, Pisanò e Prisco (2016), Garcia (2015) e Pezo (2013). Cabe enfatizar que para o comportamento do solo adotou-se o material do tipo plástico e para o pilar equivalente foi utilizado o tipo elástico.

Posteriormente aplicou-se as propriedades mecânicas dos materiais. Para o perfil do solo, foi necessário realizar testes a fim de se obter os parâmetros necessários para a análise. Nesse sentido, o comportamento carga vs recalque de um estudo que engloba análises tridimensionais e resultados experimentais de fundações em radier estacado foi retroanalisado, ajustando os parâmetros geotécnicos até que as curvas carga vs recalque se mostrassem o mais próximas. As propriedades adotadas no pilar equivalente e solo podem ser consultadas na subseção 4.1.2.

Por fim, aplicou-se no topo do pilar equivalente a tensão uniformemente distribuída em cada modelo, é importante enfatizar que estas tensões foram transformadas pelas cargas pontuais (Pt) apresentadas nos resultados.

Apresenta-se nos itens a seguir os testes de validação da ferramenta e calibração das propriedades geotécnicas para as análises híbridas.

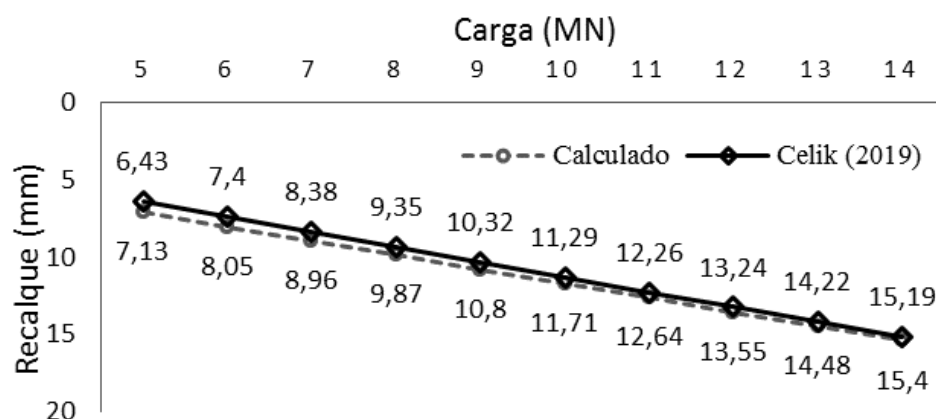
4.1.1 Testes de validação do modelo híbrido

Previamente ao emprego desse método, foram realizados testes para certificar se a resposta desse sistema realmente se comporta como o esperado e se a metodologia está sendo manipulada corretamente. Neste modelo, a validação foi realizada a partir de resultados apresentados por Celik (2019), onde estudou o comportamento de fundações estacadas para diferentes arranjos e condições por diferentes métodos de cálculo, variando entre outros parâmetros, o comprimento e espaçamento entre estacas, além das propriedades do solo.

O autor combinou a abordagem em pilar equivalente com o uso da análise bidimensional axissimétrica pelo MEF, evidenciando que a abordagem híbrida pode ser considerada como um método de cálculo aceitável para estimar recalques em radier estacado especialmente sob solos arenosos.

O método híbrido foi verificado, portanto, a partir da curva carga vs recalque apresentada por Celik (2019). Obteve-se adequada concordância entre os resultados, apresentando diferenças máximas entre os recalques de 0,7 mm. Na Figura 39 pode observar que os resultados alcançados foram extremamente próximos, constatando a viabilidade da metodologia de cálculo e confiabilidade no manuseio da ferramenta adotado nesta pesquisa.

Figura 39- Curvas carga vs recalque pela análise híbrida.



Fonte: A autora.

4.1.2 Calibração das propriedades geotécnicas

Para uma maior confiabilidade na previsão do comportamento dos sistemas de fundações é imprescindível uma adequada estimativa dos parâmetros geotécnicos adotados nos modelos constitutivos, que, de acordo com Freitas Neto (2013) é uma das principais limitações na previsão do comportamento de fundações.

As propriedades geotécnicas do solo foram fundamentadas nas curvas carga vs recalque do radier estaqueado e grupo de estacas analisado por Garcia (2015). Foi realizado diversos estudos comparativos entre a modelagem híbrida e os resultados experimentais por meio de provas de carga instrumentadas e a modelagem numérica tridimensional apresentados pelo autor, a fim de calibrar o modelo híbrido e validar os parâmetros geotécnicos adotados nas análises.

O modelo selecionado é um radier estaqueado e um grupo de estacas, ambos compostos por 4 estacas (2 x 2), com 5 m comprimento, 0,25 m de diâmetro e espaçadas por 1,25 m ($s=5d$). Os parâmetros de resistência e deformabilidade do concreto empregados na análise podem ser consultados na Tabela 8.

As curvas carga vs recalque obtidas a partir da análise híbrida com os mesmos parâmetros geotécnicos obtidos por meio dos ensaios laboratoriais apresentado por Garcia (2015) não se apresentou satisfatório quando comparado com as curvas obtidas pelo autor. Nesse sentido, foram realizados diversos testes no *software RS2*, alternando os parâmetros geotécnicos de entrada para possibilitar o ajuste da curva carga vs recalque a fim de se obter uma melhor similaridade entre os resultados.

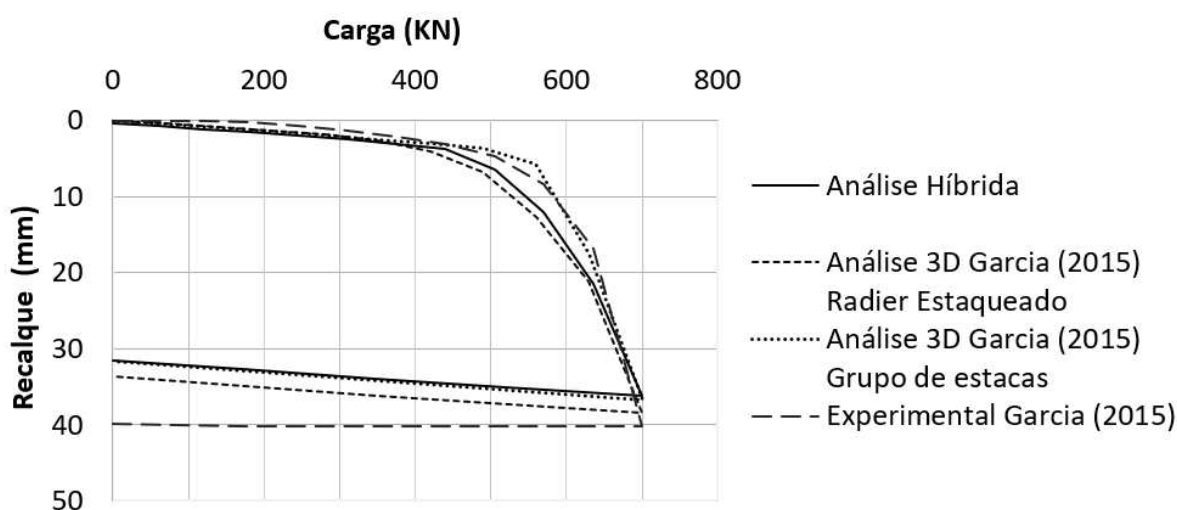
No modelo numérico tridimensional o autor tentou reproduzir os resultados experimentais com aplicação das cargas através do pilar de aplicação de carga com suas respectivas propriedades mecânicas. No entanto, no modelo híbrido a carga foi aplicada sob toda a área transversal do pilar equivalente com suas propriedades equivalentes.

A calibração do modelo híbrido teve por objetivo prever o comportamento carga vs recalque de tal forma que os parâmetros resultantes das retroanálises possibilitassem replicar o comportamento nos modelos de fundações estudados nesta pesquisa com maior precisão nos

resultados. Um comparativo entre as curvas apresentadas por Garcia (2015) e a resultante das análises híbridas pode ser visualizado na Figura 40.

Nesta figura, é possível observar que os resultados se mostraram relativamente semelhantes, nota-se que a análise híbrida apresentou maior similaridade principalmente com os resultados obtidos pela análise tridimensional da fundação em radier estaqueado. Além disso, as curvas carga vs recalque apresentaram maior concordância nos primeiros estágios de carregamento até aproximadamente a 71% da carga máxima prevista, assimilando-se ao trecho elástico linear do solo.

Figura 40 - Curvas carga vs recalque experimental e numérico de Garcia (2015) e híbrido.



Fonte: A autora.

Verifica-se ainda, uma maior variação nos deslocamentos obtidos nos últimos estágios de carregamento bem como no descarregamento, o que pode ser justificado pela influência do comportamento elastoplástico do solo em que parte das deformações geradas no maciço são permanentes, dificultando assim, a previsão do comportamento.

Diante desse contexto vale destacar que a análise híbrida axissimétrica é capaz de gerar estimativas de deslocamentos consistentes e próximas da realidade quando o método é validado e calibrado corretamente. Na Tabela 6 é possível consultar os parâmetros geotécnicos resultantes das retroanálises híbridas e as propriedades do material da fundação que foram replicados para todos os modelos estudados pela metodologia híbrida da presente pesquisa.

Tabela 6. Parâmetros do solo e da fundação utilizados nas análises híbridas.

Parâmetros do solo e da fundação	
Peso específico do solo, γ (kN/m ³)	14,8
Coefficiente de Poisson do solo, ν	0,3
Módulo de Young do solo, E_s (MPa)	25
Ângulo de atrito do solo, ϕ	6
Coesão do solo, C_s (KPa)	14
Módulo de cisalhamento do solo na camada superior, G_t (MPa)	9,6
Módulo de cisalhamento do solo na camada abaixo das estacas, G_b (MPa)	9,6
Módulo de cisalhamento médio do solo, G_{avg} (MPa)	9,6
Peso específico da fundação, γ (kN/m ³)	25
Coefficiente de Poisson da fundação, ν	0,2
Módulo de Young da estaca, E_p (MPa)	26750
Ângulo de atrito da fundação, ϕ_c	60
Coesão da fundação, C_c (KPa)	300

4.2 ANÁLISE TRIDIMENSIONAL

Para alcançar o principal objetivo desta pesquisa, que é verificar se a geometria de contato bloco-solo influencia no comportamento das fundações estacadas e de que modo esta geometria pode interferir no comportamento, é indispensável a realização de análises tridimensionais capazes de investigar o mecanismo de transferência de cargas entre os elementos da fundação e o solo.

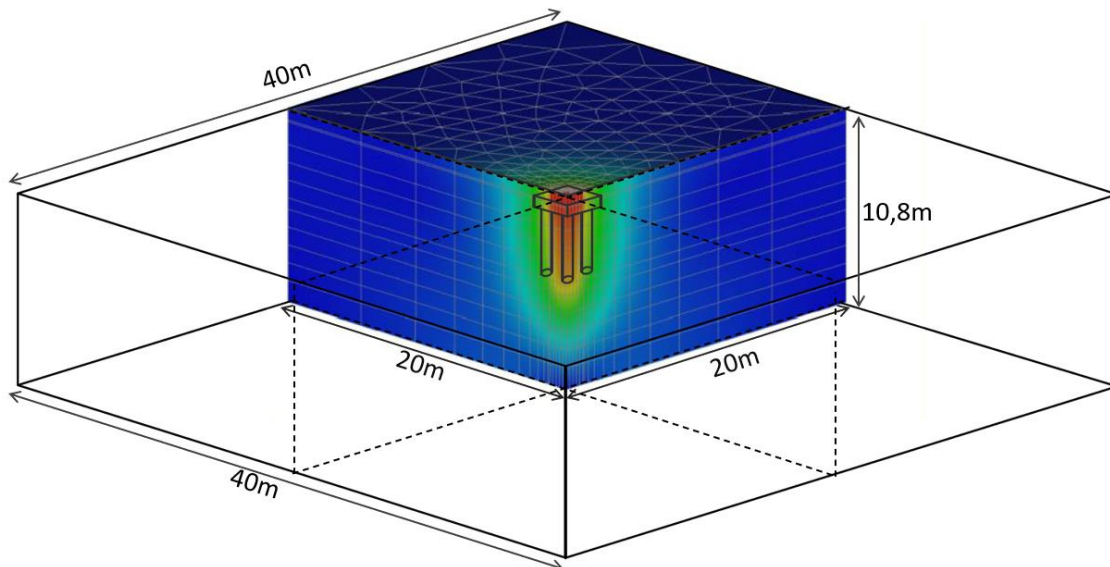
Ao contrário da análise híbrida (pilar equivalente + análise axissimétrica bidimensional), em que o contato bloco solo não é prestigiado, ou melhor, a fundação é tratada como uma estaca única equivalente, na análise tridimensional é possível investigar não só o contato entre bloco/radier e o maciço de solo, no caso do radier estacado, bem como a parcela de carga contribuinte por cada elemento da fundação, além da influência de cada elemento de fundação sobre o outro e a distribuição de cargas ao longo das estacas.

Segundo Freitas Neto (2013) o tempo de processamento de uma modelagem tridimensional pode representar um dos principais obstáculos quando se trata de análises numéricas podendo levar horas e até dias para o processamento. Esse tempo de processamento pode ser elevado por

diversos fatores, como por exemplo, o tamanho do campo de malha adotado, o nível de refinamento desta malha, a quantidade de elementos e nós, entre outros fatores. Logicamente, quanto maior o tamanho e a densidade da malha, maior o tempo de processamento.

Dentro deste contexto, com o intuito de reduzir o tempo e o esforço computacional, foi modelado a partir da simetria apresentada por cada modelo de fundação, apenas $\frac{1}{4}$ do problema, resultando numa economia de processamento em aproximadamente 75%. Na Figura 41 pode ser observado o semiespaço de malha modelada ($\frac{1}{4}$) em relação às dimensões totais do problema.

Figura 41 - $\frac{1}{4}$ do modelo tridimensional do radier estaqueado quadrado modelado.



Fonte: A autora.

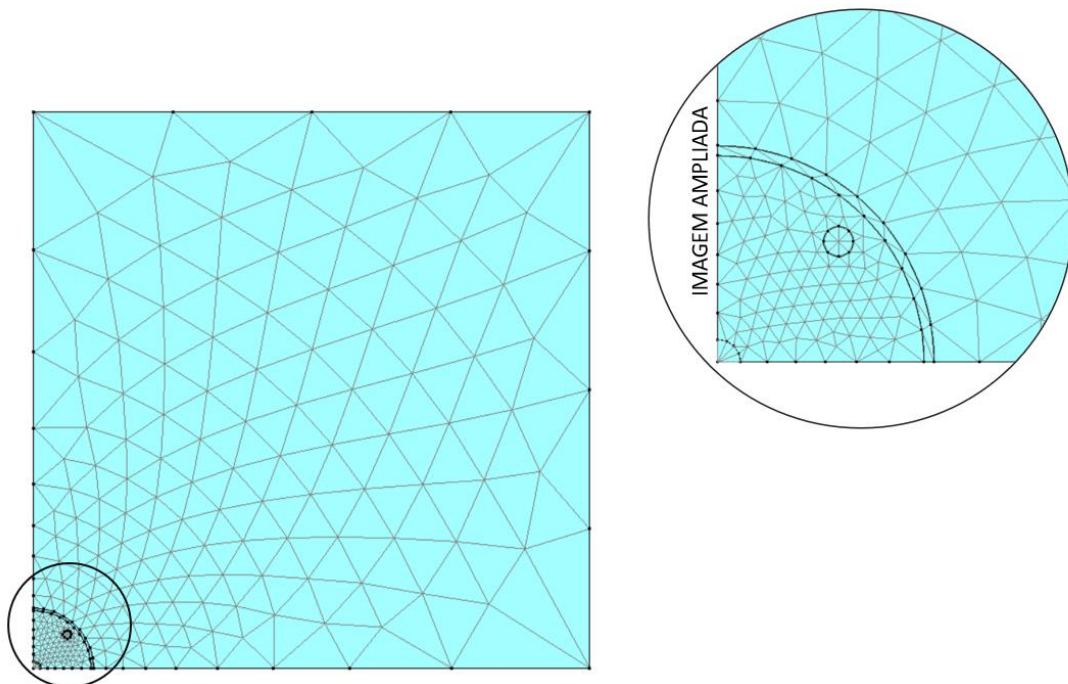
Os limites externos do semiespaço da malha foram estabelecidos com o propósito de certificar que não haja nenhum prejuízo técnico na representação do comportamento da fundação. Realizou-se, portanto, testes de convergência para malhas com dimensões proporcionais a 10 e 20 vezes a largura do radier. A fim de definir um único campo de malha para todos os modelos estudados, optou-se pela fundação com maior dimensão em planta, ou seja, a fundação com geometria circular e espaçamento $8d$, resultando em semiespaço de malha de 10×10 m e 20×20 m para $\frac{1}{4}$ do problema.

Foram medidos, portanto, os deslocamentos horizontais alcançados nas extremidades de cada malha conforme a profundidade do problema. Para a malha de 10×10 m os deslocamentos

máximos foram da ordem de 0 a 0,003 mm e para a malha de 20 x 20 m os deslocamentos máximos não ultrapassaram 0,001 mm. Dessa forma, ambas dimensões de malha apresentaram um recalque aceitável que não exerce influência significativa no comportamento do sistema, contudo, para elevar a margem de segurança fez-se uso da malha com dimensão 20 x 20 m (Figura 41).

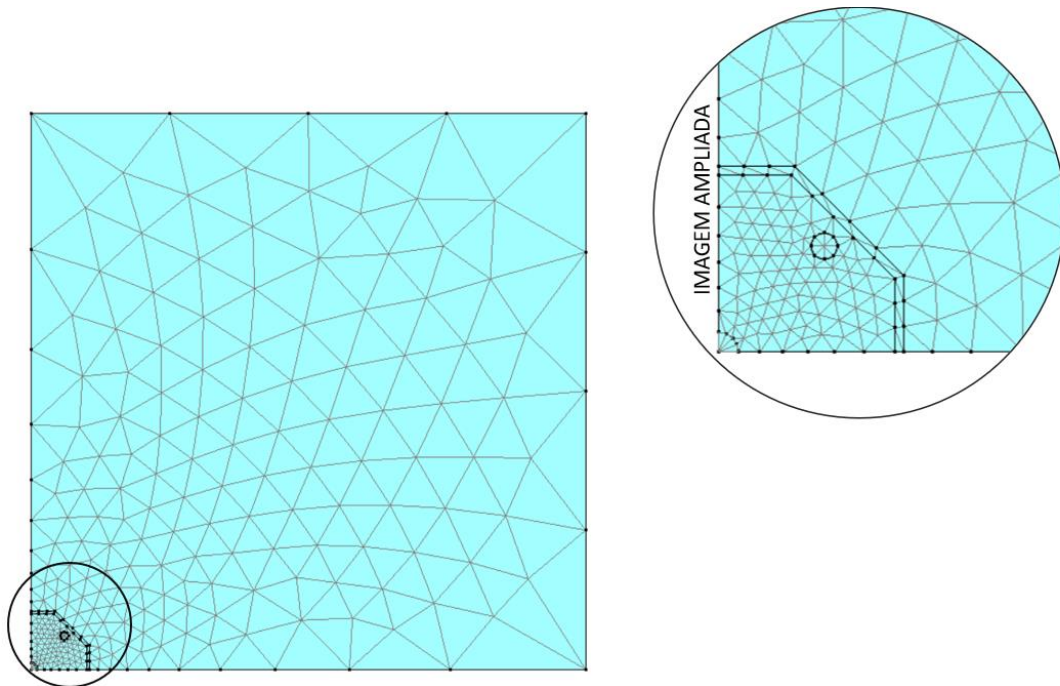
Para a densidade da malha no modelo tridimensional, assim como no modelo híbrido, foi adotado um maior refinamento em torno dos elementos de fundação (pilar, estaca e bloco/radier) apresentando uma menor densidade nas extremidades opostas, conforme pode-se visualizar nos modelos circular, octogonal e quadrado das Figuras 42, 43 e 44, respectivamente. Ressalta-se que foi realizado testes de otimização e refinamento da malha para uma densidade ótima, visto que malhas consideravelmente densas elevam o tempo de processamento e que o aumento excessivo da densidade não justifica a diferença mínima nos deslocamentos obtidos.

Figura 42 – Densidade da malha no radier estaqueado circular (PRC8d).



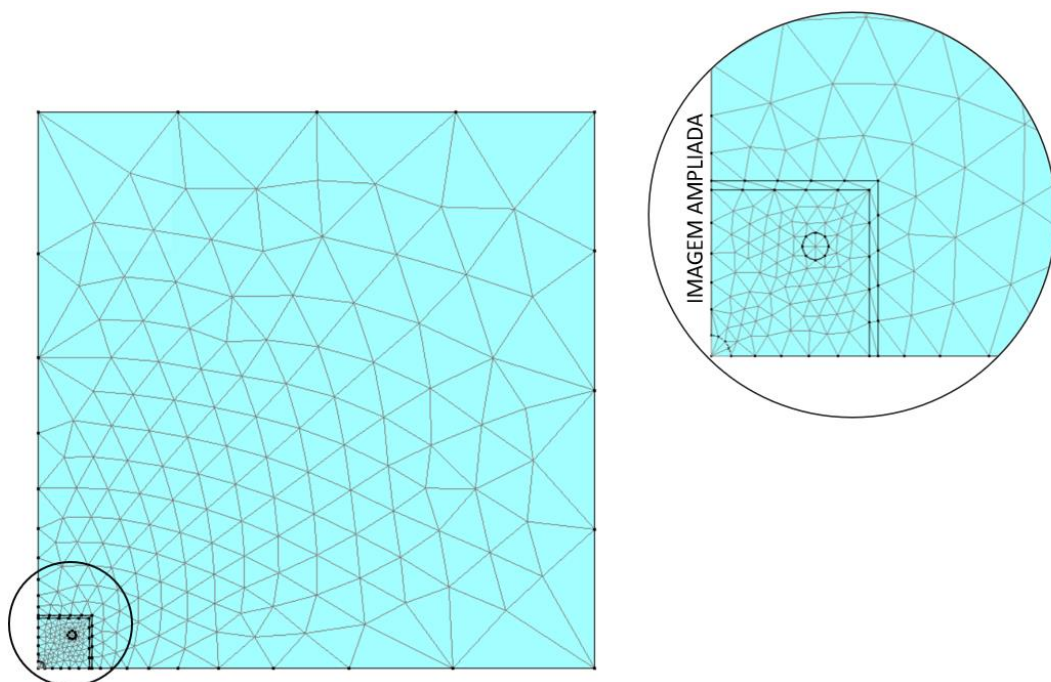
Fonte: A autora.

Figura 43 -Densidade da malha no radier estaqueado octogonal (PRO8d).



Fonte: A autora.

Figura 44 - Densidade da malha no radier estaqueado quadrado (PRS8d).

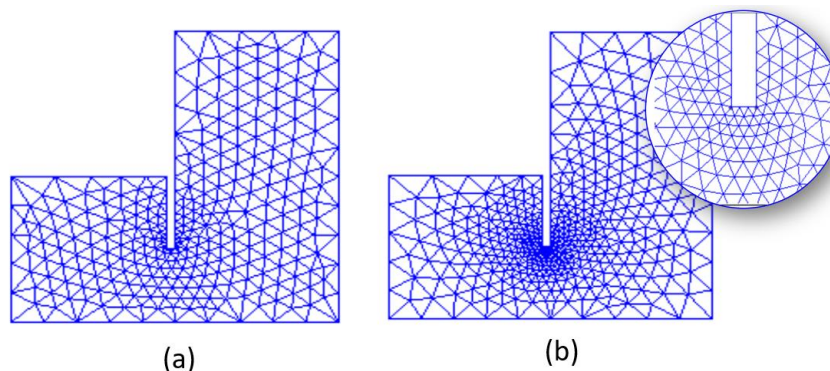


Fonte: A autora.

Dentro desse contexto é importante enfatizar que as malhas podem ser elaboradas a partir de três tipos de funções apresentadas pelo CESAR-LCPC: a função linear, a cúbica e a quadrática. Cada tipo de malha apresenta um nível mais fino de detalhes à medida que o grau da função

aumenta. Na Figura 45 é possível visualizar a diferença na densidade das malhas com interpolação linear e quadrática,

Figura 45 – Tipos de malhas com função: (a) Linear (b) Quadrática.



Fonte: CESAR (2019)

No seu estudo, Pezo (2013) analisa a influência da densidade da malha nos resultados ao comparar a interpolação das malhas nos formatos linear e quadrática. O autor observou que a malha composta pela função quadrática apresentou resultados mais precisos quando comparado à malha linear nos valores de tensão e recalque. Além disso, segundo Freitas Neto (2013) as análises com elementos lineares levam um tempo e esforço de processamento menor, mas não compensam as possíveis falhas nas previsões do comportamento carga vs recalque e transferência de cargas entre os elementos da fundação quando comparado com as análises com elementos quadráticos.

Considerando tais colocações, as malhas adotadas nas análises da presente pesquisa foram construídas com interpolação quadrática de elementos triangulares, gerando um elemento volumétrico do tipo pentaédrico, extrudadas em camadas de no máximo um metro de profundidade, resultando numa profundidade total de 10,8 metros para todos os modelos, definido conforme o perfil de solo selecionado, tal qual, apresenta um material impenetrável a partir dos 10,8 metros de profundidade.

Para os diferentes tipos de fundações, adotou-se estruturas compostas por quantidades de nós e elementos equivalentes entre cada modelo geométrico de fundação de acordo com cada espaçamento, a fim de proporcionar a menor discrepância entre as diferentes geometrias de base. A quantidade de nós e elementos adotada em cada análise tridimensional nos seus respectivos espaçamentos pode ser consultada na Tabela 7.

Tabela 7 - Densidade da malha tridimensional.

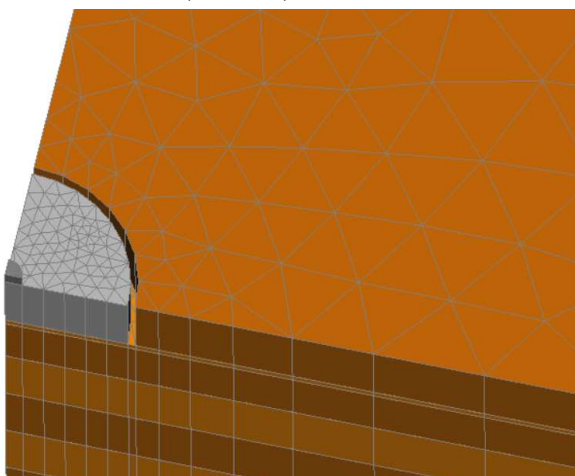
Espaçamento	Geometria	Quantidade	
		Nós	Elementos
	Círculo	12774	4492
	Octógono	12608	4444
	Quadrado	12672	4468
	Círculo	13964	4924
	Octógono	13260	4660
	Quadrado	13670	4828
	Círculo	16524	5884
	Octógono	17458	6220
	Quadrado	17292	6172

Além disso, nas fundações estudadas em radier estaqueado e radier isolado, considerou-se que somente a base da fundação superficial permaneça em contato com o solo desprezando, portanto, as “paredes” laterais do radier/bloco, a fim de permitir analisar a influência apenas da geometria de base. Além do mais, as três geometrias apresentam áreas de base iguais, mas apresentam diferentes perímetros e áreas laterais para cada espaçamento adotado.

É importante salientar que considerar ou não as diferentes áreas laterais de contato radier/bloco e solo, especialmente para alcançar os principais objetivos da presente pesquisa pode prejudicar a compatibilização entre os resultados das diferentes geometrias de base. Dessa forma, para garantir que a fundação superficial, no radier estaqueado e isolado, transfira as cargas diretamente ao solo apenas pela sua área de base foi deixado uma lacuna lateral entre a fundação superficial e o solo para que as laterais do radier/bloco não contatem com o solo, conforme pode se observar nas Figuras 46, 47 e 48.

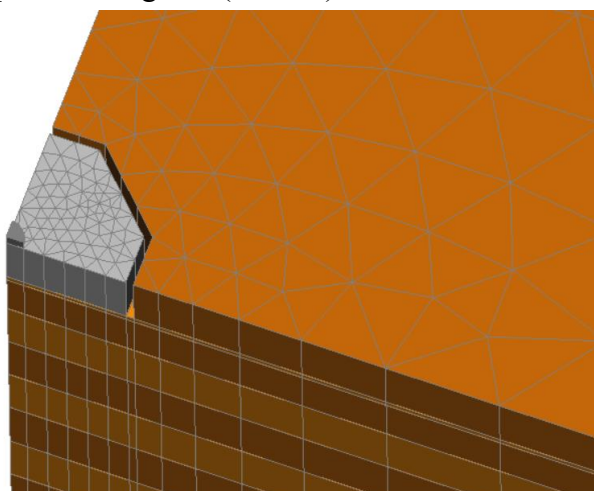
Exclusivamente para as fundações do tipo grupo de estacas, o bloco foi totalmente isolado do contato do solo a fim de garantir o conceito da fundação de que o bloco possui função exclusiva de transferir a carga do pilar para as estacas. Assim, além da lacuna de solo nas laterais do bloco, para as análises do grupo de estacas foi removida uma pequena camada de solo abaixo do bloco de 10 cm, conforme as Figuras 49, 50 e 51.

Figura 46 - Radier estaqueado circular (PRC6d).



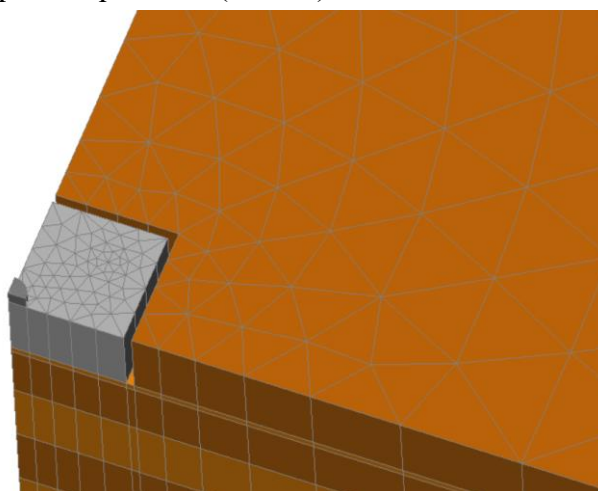
Fonte: A autora.

Figura 47 - Radier estaqueado octogonal (PRO6d).



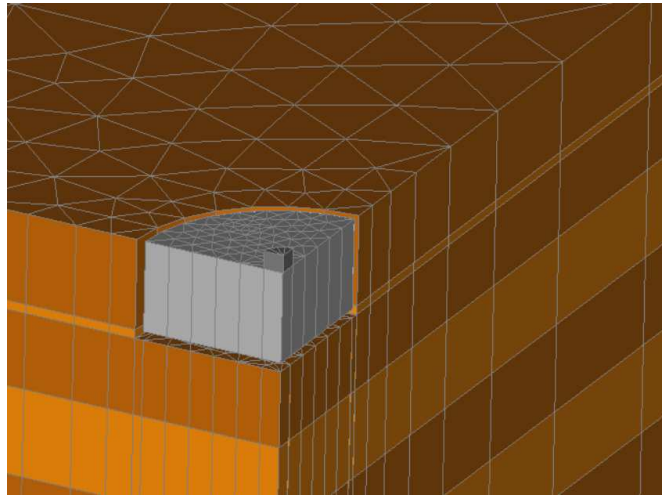
Fonte: A autora.

Figura 48 - Radier estaqueado quadrado (PRS6d).



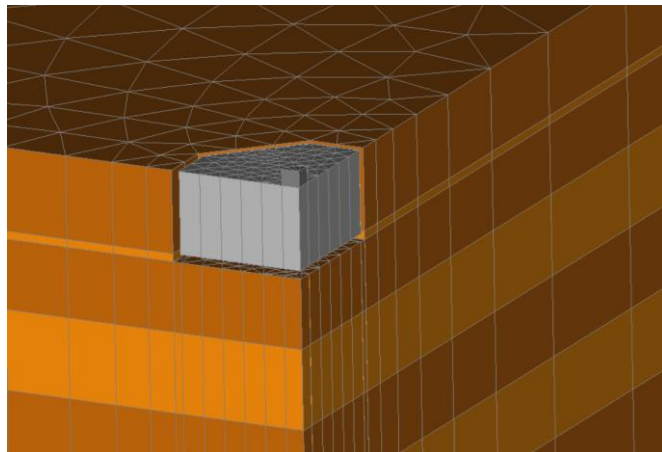
Fonte: A autora.

Figura 49 - Grupo de estacas circular (PGC6d).



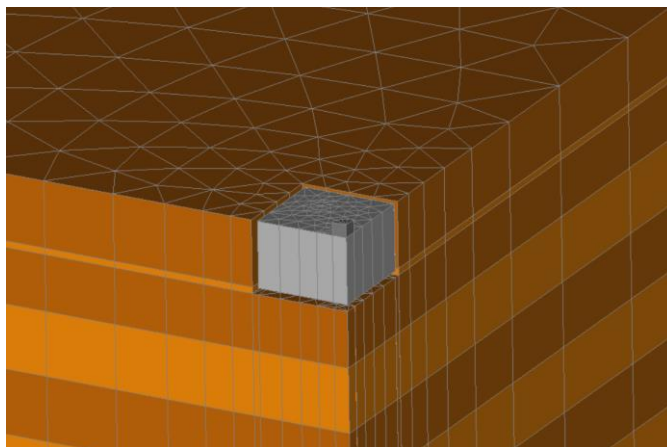
Fonte: A autora.

Figura 50 - Grupo de estacas octogonal (PGO6d).



Fonte: A autora.

Figura 51 - Grupo de estacas quadrangular (PGS6d)



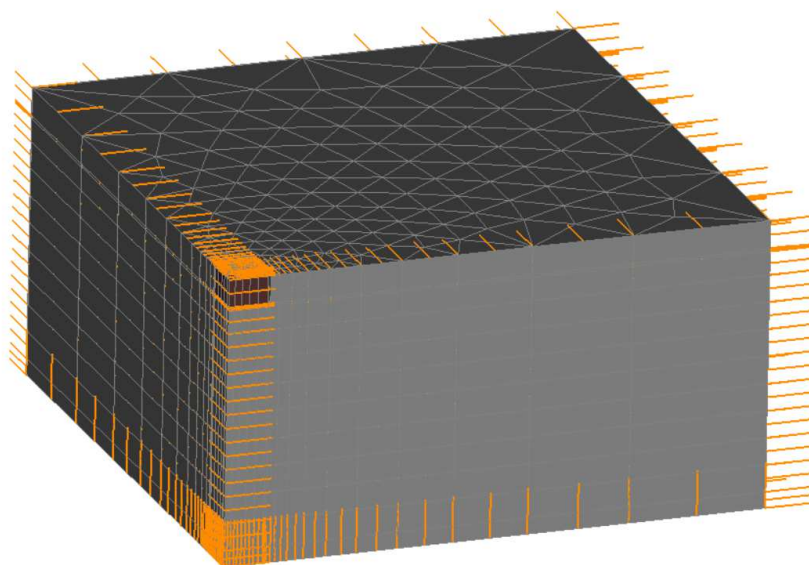
Fonte: A autora.

É importante enfatizar que para a análise tridimensional, assim como na análise híbrida adotou-se o modelo de comportamento Morh-Coulomb para simular o solo em consonância com diversos autores, como já mencionados anteriormente no item 4.1. Lembrando que esse modelo de comportamento é amplamente utilizado em análises geotécnicas (WOOD, 2004).

A biblioteca do CESAR-LCPC dispõe de vários modelos constitutivos indicados para seus respectivos tipos de materiais, para os elementos estruturais da fundação, como o radier e estacas, adotou-se o modelo Plástico Parabólico para representar o comportamento frágil do concreto, bem como Garcia (2015), Freitas Neto (2013). Todos os parâmetros necessários para a análise podem ser consultados na subseção 4.2.2. Além disso, como módulo de cálculo, dentre as várias opções disponíveis na biblioteca do software, adotou-se o módulo estático TCNL em que se baseia na resolução de problemas de contato entre sólidos elastoplásticos a fim de uma melhor reprodução do real contato entre a interface dos elementos de fundação e solo.

Com relação as condições de contorno, adotou-se as configurações padrão do software CESAR-LCPC ao clicar em “Side and bottom supports” em que se restringe os deslocamentos horizontais para as laterais verticais do modelo e restringe os deslocamentos verticais para a base inferior, como pode visualizar na Figura 52.

Figura 52 - Condições de contorno (PRS6d).



Fonte: A autora.

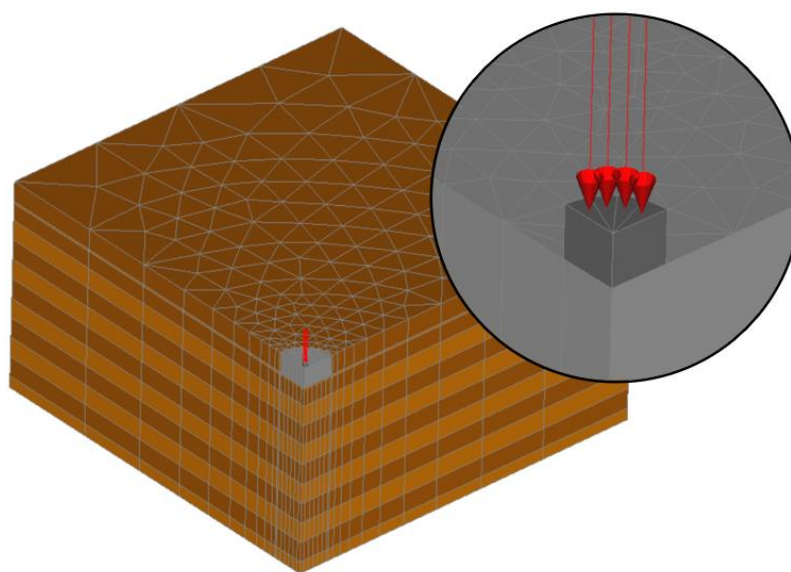
Em todas os modelos tridimensionais, a carga foi aplicada uniformemente distribuída sobre $\frac{1}{4}$ de um pilar de 45 cm de diâmetro (Figura 53) nos 15 estágios: divididos em 11 estágios de carregamento (sendo de 0% a 100% da carga a cada 10%) e 4 estágios de descarregamento (75%, 50%, 25% e 0%) a fim de elaborar curvas carga vs recalque com maior riqueza de detalhes.

Destaca-se mais uma vez, a importância da realização de testes de validação da ferramenta e calibração das propriedades mecânicas e geotécnicas do problema. Na análise tridimensional, todos estes foram verificados e validados conforme os itens 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1 Testes de validação do software CESAR-LCPC

Como apresentado anteriormente na sub seção 3.4.2, constata-se que o software CESAR-LCPC é capaz de simular modelos de fundações com um alto nível de confiabilidade, como verificado anteriormente por outros autores como Pezo (2013), Castillo (2013), Garcia (2015) e Freitas Neto (2013). Entretanto, fez-se necessário certificar se a ferramenta adotada estava sendo manipulada corretamente e se os resultados obtidos estavam sendo interpretados adequadamente.

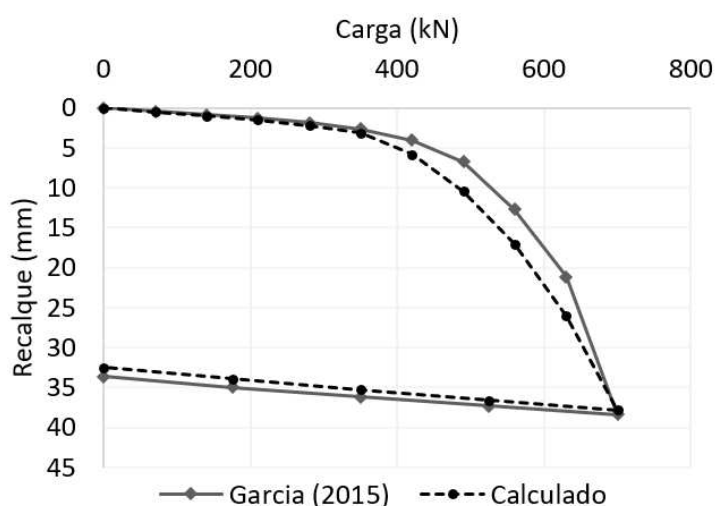
Figura 53 – Carga aplicada no topo de $\frac{1}{4}$ do pilar.



Fonte: A autora.

Nesse sentido, os resultados numéricos de uma fundação em radier estaqueado composto por quatro estacas sob o solo do campo experimental da UNICAMP (Campinas-SP) apresentado por Garcia (2015) foi retro analisado numericamente e comparado com as curvas carga vs recalque obtidas por análise tridimensional pelo mesmo autor. Na Figura 54 é possível observar que o comportamento carga recalque apresentou resultados próximos aos resultados do autor, especialmente nos primeiros estágios de carregamento. Demonstrando a confiabilidade no manuseio da ferramenta e interpretação de dados, além da capacidade do software na previsão de comportamentos.

Figura 54 - Curvas carga vs recalque (comparação).



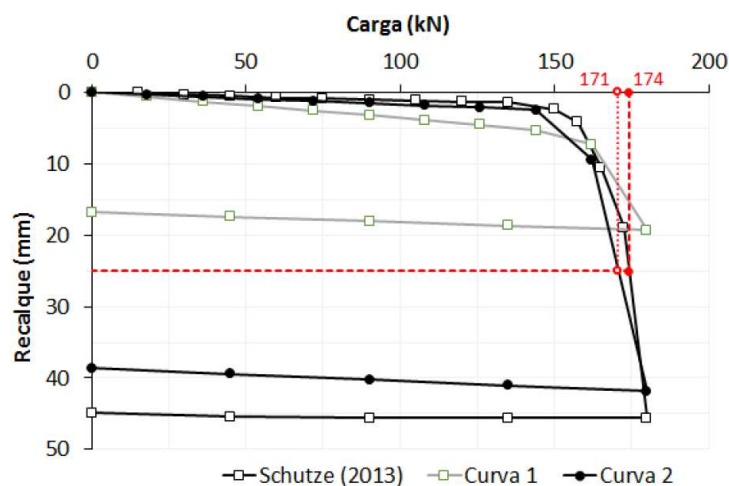
Fonte: A autora.

4.2.2 Calibração do modelo e propriedades geotécnicas

Todos os parâmetros de entrada para as análises tridimensionais já haviam sido previamente aferidos e calibrados por Garcia (2015) por meio de comparações entre resultados de uma fundação em estaca isolada obtidos em prova de carga por Schulze (2013) e análises numéricas pelo software CESAR-LCPC. Destaca-se que Schulze (2013) realizou testes em prova de carga no mesma área geográfica do trabalho de Garcia (2015) e, conseqüentemente no mesma tipologia de solo adotada para a presente pesquisa. Dessa forma, uma fundação em estaca isolada, com 5,0 m comprimento e 0,25 m de diâmetro foi retro analisada, inicialmente com os parâmetros resultantes de ensaios de laboratório e *insitu*, e em seguida calibrados com a ferramenta numérica. Para maiores detalhes consultar Garcia (2015).

As curvas carga vs recalque apresentadas pelo autor podem ser visualizadas na Figura 55, nesta é possível visualizar a concordância obtida entre os resultados retro analisados (da curva 2) e os resultados experimentais retirados na literatura. Observa-se (nas linhas tracejadas) as cargas de ruptura convencionada a um recalque correspondente a 10% do diâmetro nominal da estaca, resultando numa diferença percentual entre a carga convencionada de ruptura experimental e numérica em 1,7%.

Figura 55 - Curva carga vs recalque experimental e numérica de estaca única.



Fonte: Garcia (2015)

Dentro desse contexto, ao realizar os testes de validação para as análises 3D da ferramenta CESAR-LCPCv50, apresentada no item 4.2.1, percebeu-se um pequeno distanciamento entre os resultados apresentados pelo autor e os resultados obtidos. Após análises, concluiu-se, que o autor havia arredondado os parâmetros mecânicos do concreto apresentados, bem como simplificado as propriedades geotécnicas do solo, tais parâmetros foram verificados e corrigidos com os arquivos originais das análises apresentadas pelo próprio autor. Os parâmetros geotécnicos do solo e mecânicos do concreto ajustados e utilizados nas respectivas análises desta pesquisa são apresentados na Figura 56 e na Tabela 8.

Figura 56 – Parâmetros geotécnicos do solo adotados nas análises 3D.

Camada 1	-2m	$\gamma=14 \text{ kN/m}^3$ $E=23 \text{ MPa}$ $\nu=0,33$ $C=7 \text{ kPa}$ $\phi=10 \text{ deg}$
Camada 2	-10,8m	$\gamma=15 \text{ kN/m}^3$ $E=24 \text{ MPa}$ $\nu=0,33$ $C=10 \text{ kPa}$ $\phi=10 \text{ deg}$
LEGENDA:		
γ - peso específico do material E - módulo de deformabilidade ν - Coeficiente de Poisson		
C - Coesão do solo ϕ - Ângulo de atrito		

Fonte: A autora.

Tabela 8 - Parâmetros do material das estacas e radier adotados nas análises 3D.

Parâmetros do concreto		
γ	25	kN/m^3
E	25	GPa
ν	0,20	-
R_c	30000	kPa
R_t	3000	kPa

Fonte: Adaptado de Garcia (2015)

Sendo que γ é o peso específico do material, E é o módulo de Young, ν é Coeficiente de Poisson, R_c é a resistência à compressão simples e R_t é a resistência à tração do material.

Dessa forma, é possível verificar satisfatória concordância entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados apresentados numericamente, permitindo expandir os parâmetros geotécnicos “calibrados” nas retroanálises para os modelos de fundações estudados na presente pesquisa com uma maior confiança na previsão dos resultados.

5 RESULTADOS

Apresenta-se nesse capítulo os resultados das análises realizadas pelos métodos equivalentes (radier e pilar equivalente), pela análise híbrida 2D e análise tridimensional. É importante destacar que tanto os métodos equivalentes quanto a metodologia híbrida não levam em consideração nenhum parâmetro geométrico do bloco e, conseqüentemente a geometria deste bloco. Estes métodos foram adotados, portanto, para comparar os resultados frente a uma análise tridimensional, previamente validada e calibrada a partir de resultados experimentais, que leva em consideração os aspectos relacionados à geometria da fundação.

Para todos os métodos de cálculo abordados, o critério de ruptura foi convencionado fundamentado nas recomendações estabelecidas por Décourt (1996) e pelo Eurocode EN 1997-2 (2007) correspondente a uma carga equivalente à deformação de 10% do diâmetro da estaca. Ressalta-se que essa é uma metodologia comumente utilizada tanto no Brasil de acordo com Bittencourt (2018), quanto no mundo segundo Quaresma et al. (1998).

Cabe salientar que existem duas categorias de ruptura: a física e a convencional. A ruptura física é definida como o limite da relação entre o acréscimo de recalque da ponta da estaca pelo acréscimo de carga tendendo ao infinito (HACHICH et al., 1999). Ou ainda, é a carga correspondente a um valor de rigidez nulo, quando a relação entre a carga aplicada e o recalque obtido resulte a zero (DÉCOURT, 2008).

Todavia, a ruptura convencional (quando a fundação não apresenta ruptura nítida) pode ser estabelecida como a carga equivalente à deformação da ponta (ou topo) da estaca em 10% do seu diâmetro (DÉCOURT, 1996). Neste trabalho, como o diâmetro das estacas são de 30 cm, a carga de ruptura convencional é, portanto, a carga correspondente à um recalque de 30mm. Apresenta-se na seção 5.1 os resultados obtidos para os métodos equivalentes.

5.1 MÉTODOS EQUIVALENTES

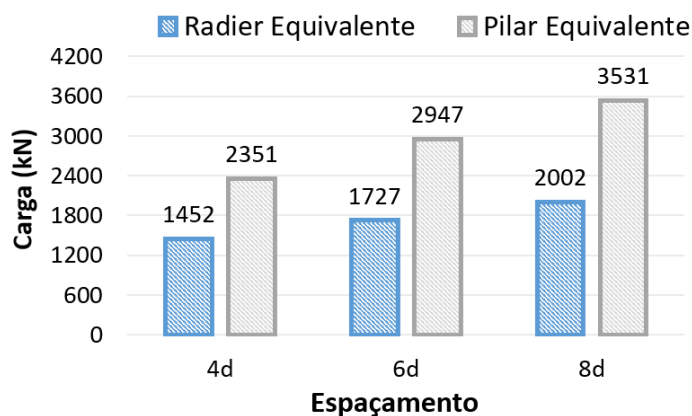
Como já mencionado, para os métodos do Pilar equivalente e do Radier equivalente em que não consideram nenhum parâmetro ou dimensões referentes ao elemento superficial de fundação, foram analisadas apenas três modelos de fundações estaqueadas nos seus respectivos

espaçamentos (4d, 6d e 8d) a fim de comparar com os resultados obtidos a partir dos métodos: híbrido e tridimensional e verificar a aplicabilidade dos métodos simplificados.

Ressalta-se que nas fundações analisadas pelo método do pilar equivalente em que o grupo de estacas é transformado numa estaca única de grande diâmetro, a carga de ruptura foi convencionada em 10% do diâmetro das estacas do grupo de estacas, e não pelo diâmetro equivalente resultante da metodologia do método, com o intuito de estipular um critério único de comparação entre os diferentes métodos de cálculo.

Ao convencionar a carga de ruptura nos métodos equivalentes a um recalque de 30 mm, obtém-se os seguintes resultados na Figura 57. Observa-se que o método do pilar equivalente apresenta cargas maiores que o radier equivalente, chegando em diferenças percentuais de 62%, 71% e até 76% da carga de ruptura convencionada para os espaçamentos de 4d, 6d e 8d respectivamente.

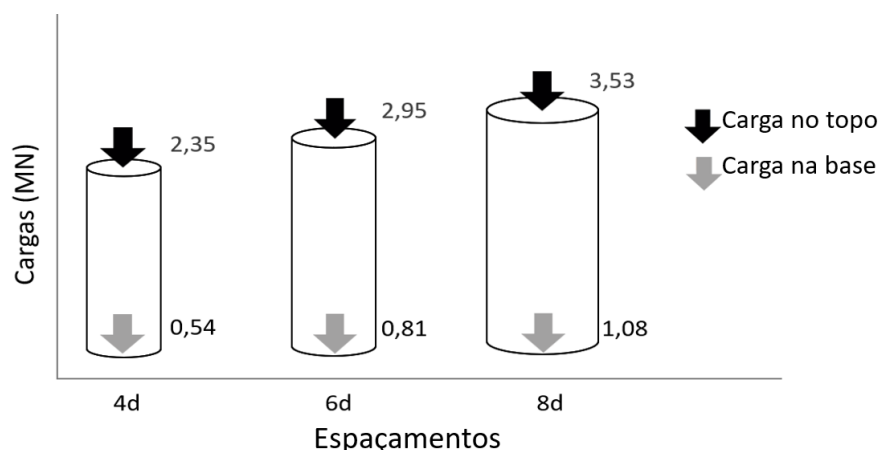
Figura 57 – Cargas de ruptura convencionada nos métodos equivalentes e seus respectivos espaçamentos.



Fonte: A autora.

A partir do método do pilar equivalente (Equação 19) foi possível analisar a proporção de carga que chega na base da estaca (P_b/P_t), demonstrando que o aumento do espaçamento promove concomitantemente o aumento da carga resistida pela ponta da estaca equivalente. Pode-se visualizar na Figura 58 as cargas convencionadas de ruptura no topo do pilar equivalente (P_t), e as cargas que atingem a base (P_b). Conforme a carga total aplicada no topo da estaca aumenta com o aumento do espaçamento (s/d), as proporções de carga (P_b/P_t) para os respectivos espaçamentos 4d, 6d e 8d se elevam de 24% para 28% e 31% respectivamente.

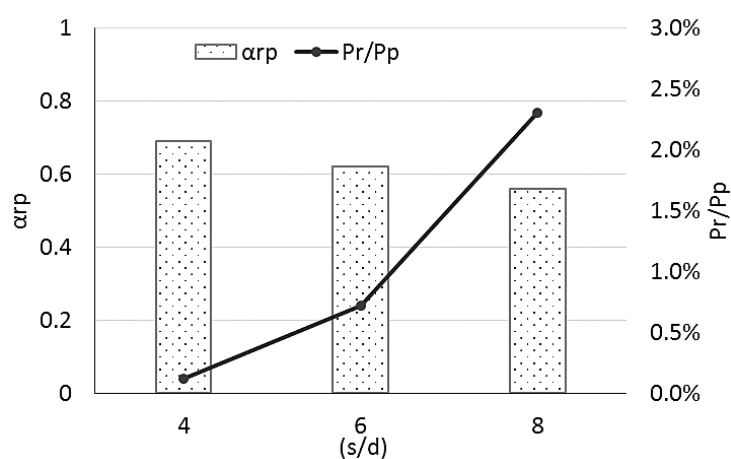
Figura 58 – Carga de ruptura convencionada na base e no topo do pilar equivalente.



Fonte: A autora.

Devido a tais considerações foi certificado a partir da Equação (24) que o aumento do espaçamento (s/d) e conseqüentemente o aumento da área líquida de contato radier/solo, ou seja, a área total do radier menos a soma das áreas transversais das quatro estacas possibilitaram um crescimento na proporção de carga resistida entre o radier e o grupo de estacas (P_r/P_p), conforme a Figura 59 que pode ser justificado devido ao aumento da capacidade de carga do radier, proveniente do aumento da transferência de carga direta do radier para o solo.

Figura 59 - Fator de interação entre o grupo de estacas e o radier e proporção de carga resistida pelo radier e o grupo de estacas (P_r/P_p).



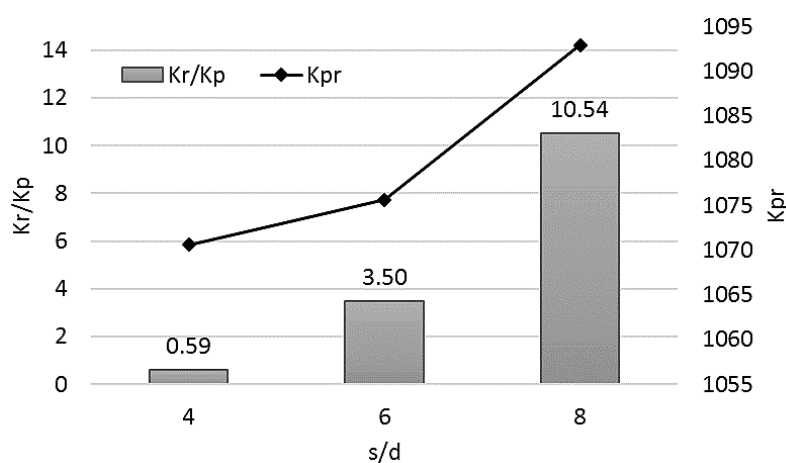
Fonte: A autora.

O inverso acontece ao analisar o fator de interação do radier no grupo de estacas, o fator α_{rp} este, é reduzido à medida que aumenta o espaçamento (s/d) e a área líquida de contato do

radier/solo, (Figura 59) que pode ser devido à redução da parcela de carga transportada pelas estacas ao solo elevando assim a contribuição de carga do radier.

Além de outros fatores, o aumento do espaçamento possibilita o aumento da rigidez global do radier estaqueado (K_{pr}) conforme a Figura 60. Nesta, verifica-se que o aumento do espaçamento pode reduzir a interação entre estacas, provocando um aumento na rigidez do grupo (K_p) e, conseqüentemente um aumento na rigidez global do sistema de fundação (K_{pr}),

Figura 60 - Rigidez versus espaçamento.



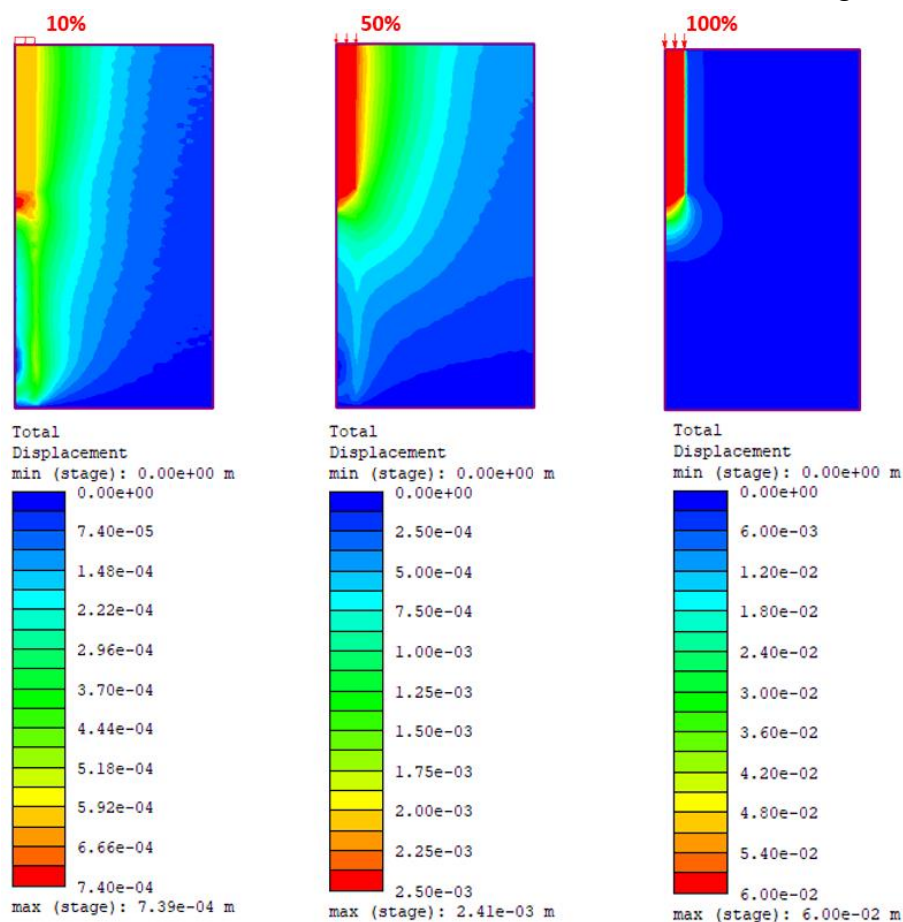
Fonte: A autora.

Os resultados obtidos a partir da metodologia híbrida que reúne o método do pilar equivalente com o método dos elementos finitos bidimensional é apresentado na seção 5.2.

5.2 MÉTODO HÍBRIDO

Na metodologia híbrida é possível traçar as curvas carga vs recalque geradas a partir de um recalque máximo aproximado entre 50 e 60 mm. Para isso, aplicou-se 10 estágios de carregamento (de 10% a 100%) e 4 de descarregamento (75%, 50%, 25% e 0%) nos três espaçamentos estudados, 4d, 6d e 8d. A evolução dos deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises a 10, 50 e 100% do carregamento máximo adotado para as fundações estaqueadas com espaçamentos de 4d, 6d e 8d pode ser observada nas Figuras 61, 62 e 63, respectivamente.

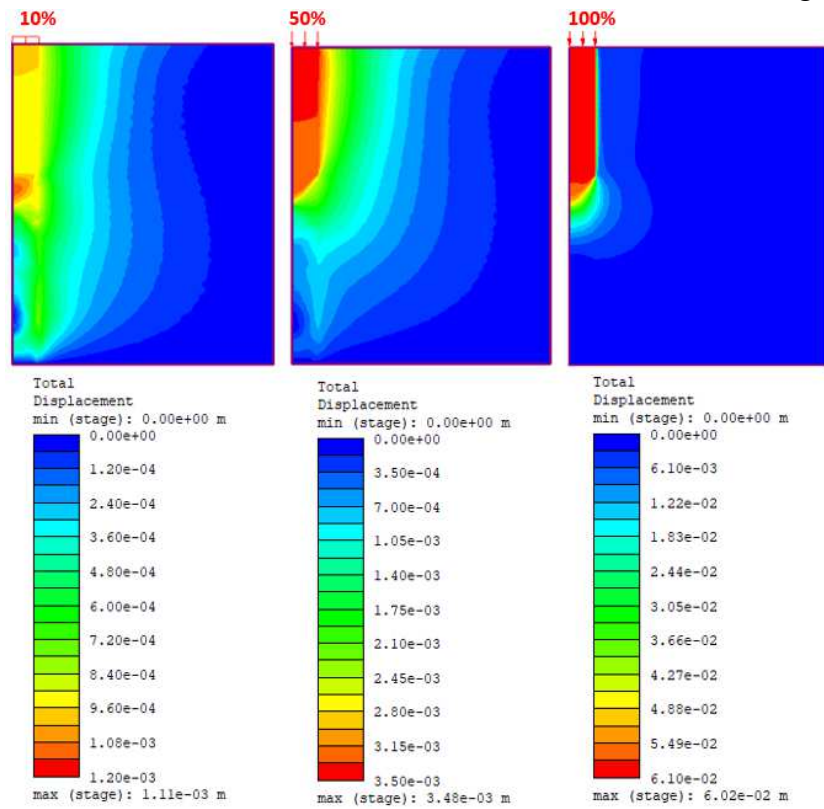
Figura 61 - Deslocamentos no modelo híbrido 4d a 10%, 50% e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

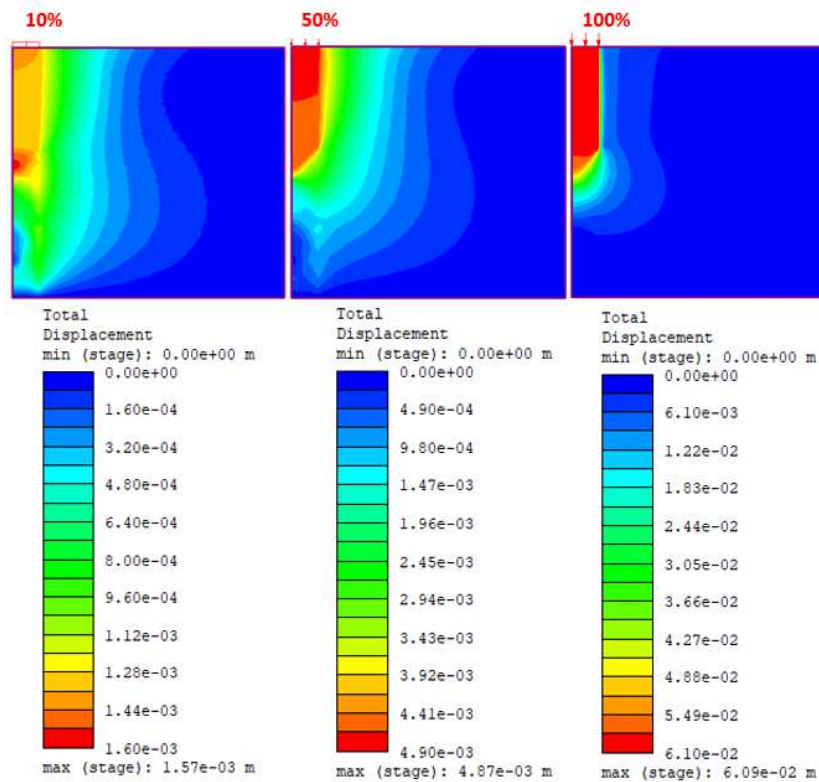
Os modelos híbridos atingiram, portanto, carregamentos máximos de 646 kN para o espaçamento 4d, 1040 kN para o 6d, e 1469 kN para o espaçamento 8d. Na Figura 64 verificam-se que os deslocamentos máximos a 100% do carregamento foram aproximadamente 60 mm para ambos os espaçamentos.

Figura 62 - Deslocamentos no modelo híbrido 6d a 10%, 50% e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

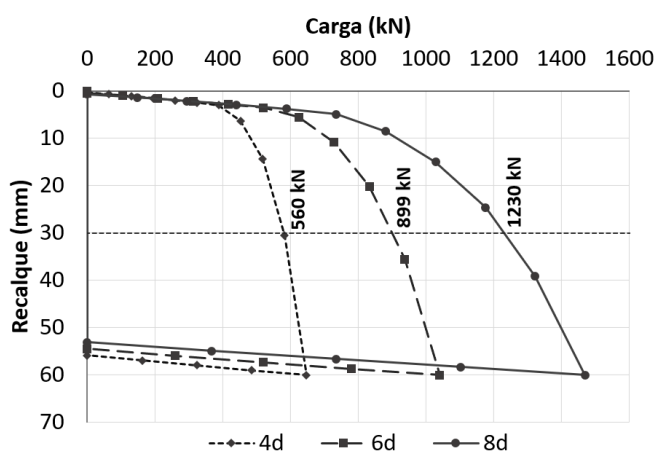
Figura 63 - Deslocamentos no modelo híbrido 8d a 10%, 50% e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

Como esperado, em concordância com os métodos equivalentes, na metodologia híbrida maiores espaçamentos promoveram maiores carregamentos, como pode-se observar nas curvas carga vs recalque apresentadas na Figura 64. Nesta mesma figura, verifica-se que a carga de ruptura convencionada para um deslocamento correspondente a 10% do diâmetro, resulta em 560 kN para o espaçamento 4d, 899 kN para o 6d e 1230 kN para o espaçamento 8d.

Figura 64 - Comportamento carga vs recalque na análise híbrida.

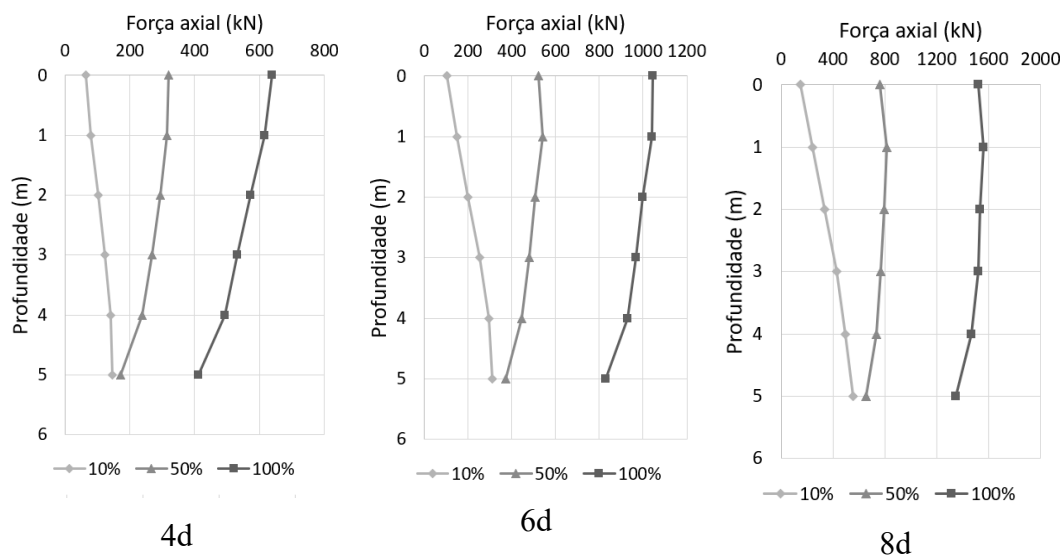


Fonte: A autora.

Além disso, analisou-se a transferência de carga axial ao longo do pilar equivalente, os gráficos apresentados nas Figuras 65 e 66 referem-se à transferência de carga axial média e à mobilização do atrito lateral para níveis de cargas iguais a 10, 50 e 100% da carga máxima de ensaio. Para todos os espaçamentos observa-se no primeiro estágio de carregamento (a 10% da carga última) que a carga axial é mobilizada da ponta para o topo da estaca equivalente. Tendência inversa é verificada ao elevar a carga aplicada para 50% e 100% do carregamento, onde a transferência de cargas ocorre do topo para a ponta.

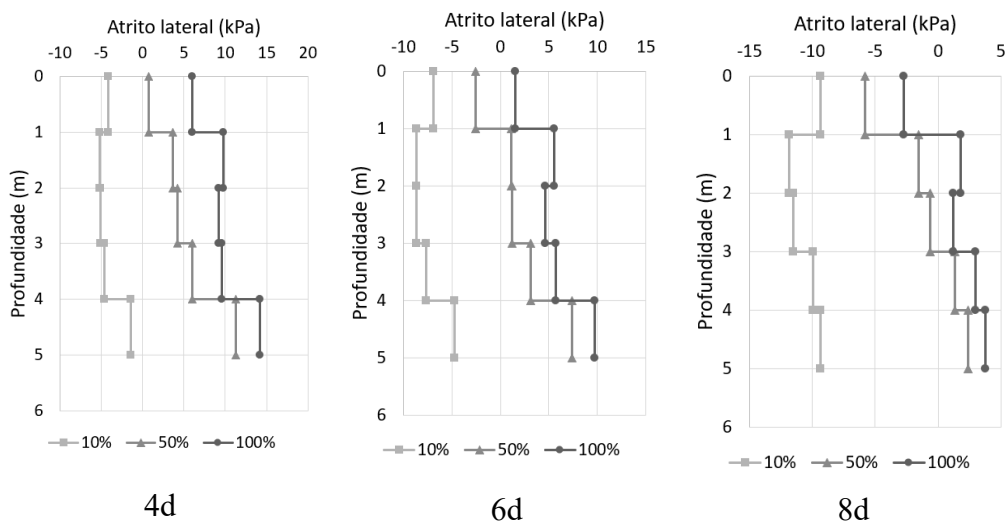
Pode-se afirmar que os resultados referentes à transferência de cargas refletem aos resultados da distribuição do atrito lateral ao longo do pilar equivalente. Conforme é observado na Figura 66, a mobilização do atrito lateral a 10% do carregamento se mantém negativo para todos os espaçamentos, e à medida que a carga aumenta a participação do atrito lateral sofre uma variação no comportamento apresentando tendência semelhante em ambos os espaçamentos entre estacas. Ao contrário dos espaçamentos 4d e 6d, no espaçamento 8d observa-se uma predominância do atrito negativo ao longo do fuste da estaca.

Figura 65 - Transferência de carga média ao longo do comprimento da estaca nos espaçamentos: 4d, 6d e 8d.



Fonte: A autora.

Figura 66 - Força de atrito lateral ao longo do comprimento da estaca.



Fonte: A autora.

Na seção 5.3 são apresentados os resultados provenientes das análises numéricas tridimensionais.

5.3 MÉTODO TRIDIMENSIONAL

Após o processamento dos modelos tridimensionais, os resultados são computados e exibidos pelo programa de forma rápida. Tais resultados podem ser visualizados e extraídos a partir de

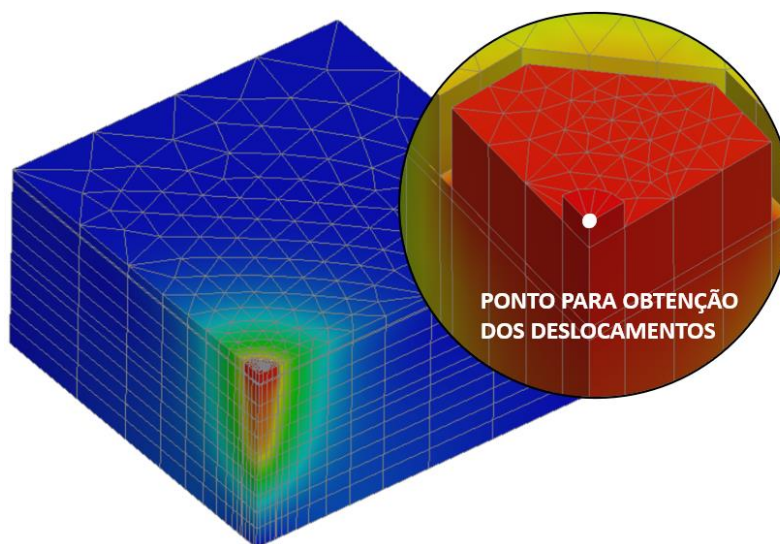
pontos ou linhas e salvos como documento de texto para posterior análise e apresentação de forma clara e precisa por meio de gráficos ou tabelas. Entretanto, a forma e o modo de obtenção dos resultados gerados pela ferramenta numérica podem induzir à coleta e interpretação de dados de forma equivocada, podendo gerar resultados incoerentes.

Dessa forma, faz-se necessário atentar para as premissas adotadas na obtenção de cada dado de saída com o intuito de alcançar maior uniformidade e coerência nos resultados. Os quais foram extraídos a partir das seguintes condições:

5.3.1 Obtenção dos dados de saída

O software CESAR-LCPC possui duas maneiras para obtenção de resultados: através de pontos, ou por meio de linhas que ligam dois ou mais pontos. A escolha de qual meio é dependente de qual resposta se deseja obter. Os deslocamentos totais máximos, por exemplo, de cada modelo de fundação foram obtidos a partir de um único ponto localizado no topo do pilar de aplicação da carga (Figura 67).

Figura 67 – Localização do ponto para obtenção dos deslocamentos totais.

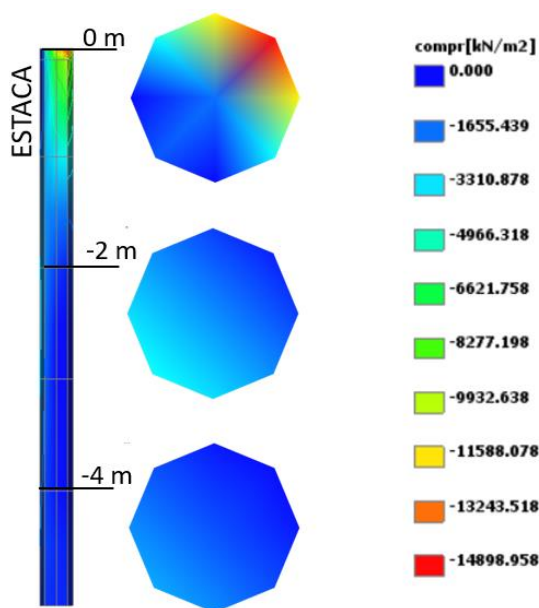


Fonte: A autora.

Com relação à transferência de carga axial na estaca, observou-se que é necessário mais de uma linha de pontos para obtenção dos resultados com maior representatividade e confiança. Na Figura 68 é possível visualizar o efeito de compressão em alguns cortes transversais na estaca a 0, -2 e -4 m de profundidade, do radier estaqueado PRC6d submetido a 100% da carga de

ensaio. Observa-se que a tensão de compressão na seção transversal da estaca não é constante ao longo da sua área, ou seja, em uma mesma seção é possível encontrar diferentes valores de tensão.

Figura 68 - Corte transversal na estaca a 0, -2 e -4m de profundidade no PRC6d a 100% do carregamento.



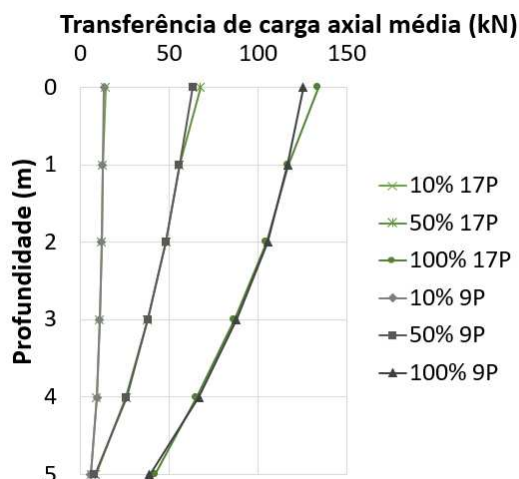
Fonte: A autora.

Isso demonstra que a adoção de uma única linha de pontos para coleta de dados pode não representar adequadamente todo o sistema, podendo assim, conduzir a resultados não representativos de toda a seção. Barbosa (2018) por exemplo, analisou os resultados em estacas obtidos por análise tridimensional com quantidade de pontos em 5, 9 e 17 da seção transversal da estaca. O autor observou uma diferença em cerca de 18% entre os valores obtidos com 5 e 9 pontos, e ao comparar 9 e 17 pontos essa diferença é minimizada em 3%.

Diante do exposto acima, realizou-se testes de convergência entre diferentes quantidades de linhas com o intuito de certificar resultados com maior acurácia e uniformidade. Na Figura 69 é possível comparar os resultados obtidos pela média entre 9 e 17 linhas distribuídas em torno da seção transversal da estaca ao longo da sua profundidade. Verifica-se que os resultados obtidos estão próximos, apresentando uma diferença máxima de 7% na região próxima do topo da estaca em que provavelmente está submetida a uma zona de elevada variação de resultados

devido à influência relativa do bloco, associada à transição de carga entre elementos de maior e menor seção.

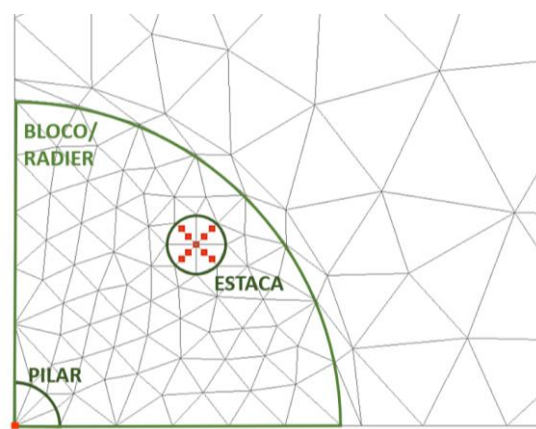
Figura 69 – Transferência de carga axial média obtidas com 9 e 17 linhas.



Fonte: A autora.

Assim, para a presente pesquisa todos os dados acerca da transferência de cargas ao longo da profundidade da estaca foram obtidos a partir da média entre as nove linhas distribuídas no fuste da estaca, destacadas na vista superior de um dos modelos analisados da Figura 70. Ressalta-se que não foi adotado os 17 pontos uma vez que a diferença percentual obtida entre 9 e 17 pontos é desprezível tendo em vista o exaustivo esforço adicional para acrescentar mais linhas.

Figura 70 - Localização de pontos para obtenção de dados.



Fonte: A autora.

Importante enfatizar que nas análises prévias para as fundações estaqueadas acerca da distribuição e transferência de cargas entre os elementos da fundação e o solo, verificou-se que a porcentagem de carga transferida pela ponta da estaca apresentou valores incomuns quando comparado com os resultados observados na literatura, atingindo valores em torno de 30 a 50% do carregamento total. Isso provavelmente acontece pelo fato de que o programa por si só não é capaz de abranger os aspectos construtivos e as particularidades encontradas no processo de execução de uma estaca escavada.

Dessa forma, para simular essas particularidades foi adotado, portanto, um material menos resistente subjacente à ponta da estaca para representar a problemática construtiva das estacas escavadas, resultando na presença de solo amolgado no fundo da perfuração. Ressalta-se que esse artifício foi adotado por Freitas Neto (2013), Garcia (2015) e Garcia e Albuquerque (2019).

Os resultados das análises tridimensionais para o radier estaqueado e grupo de estacas estão divididos de acordo com cada espaçamento estudado nas respectivas subseções:

5.3.2 *Radier estaqueado e grupo de estacas com espaçamento 4d*

Apresenta-se nessa subseção os resultados para as fundações em radier estaqueado e grupos de estacas com espaçamento entre estacas de quatro vezes o seu diâmetro (120cm).

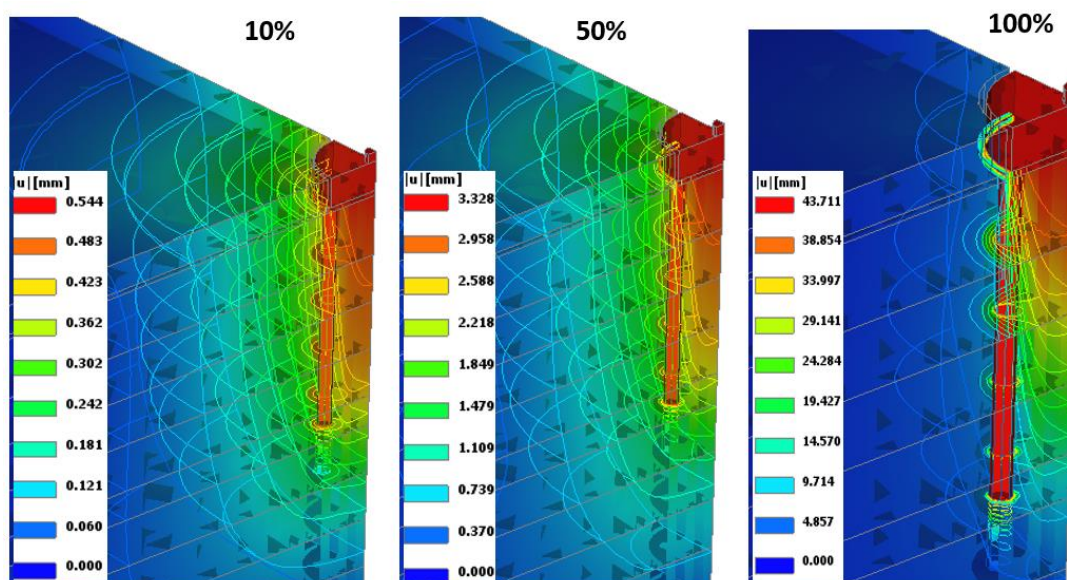
5.3.2.1 Radiers estaqueados: PRC4d, PRO4d e PRS4d

Para os radiers estaqueados com espaçamento 4d a carga máxima de ensaio alcançada foi de 867 kN em todas as geometrias. Vale enfatizar que essa carga foi padronizada a partir de recalques estipulados na faixa de 40 a 60 mm para todas as análises tridimensionais. Dessa forma, para cada espaçamento estudado, foi aplicado cargas máximas equivalentes para as três geometrias de base: circular, octogonal e quadrada. A partir de uma carga máxima encontrada para uma geometria, essa carga foi replicada para as outras geometrias com o intuito de uniformizar os parâmetros de comparação.

Nas Figuras 71, 72 e 73 são apresentadas a evolução dos deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises a 10% (87 kN), 50% (433 kN) e 100% (867 kN) do carregamento

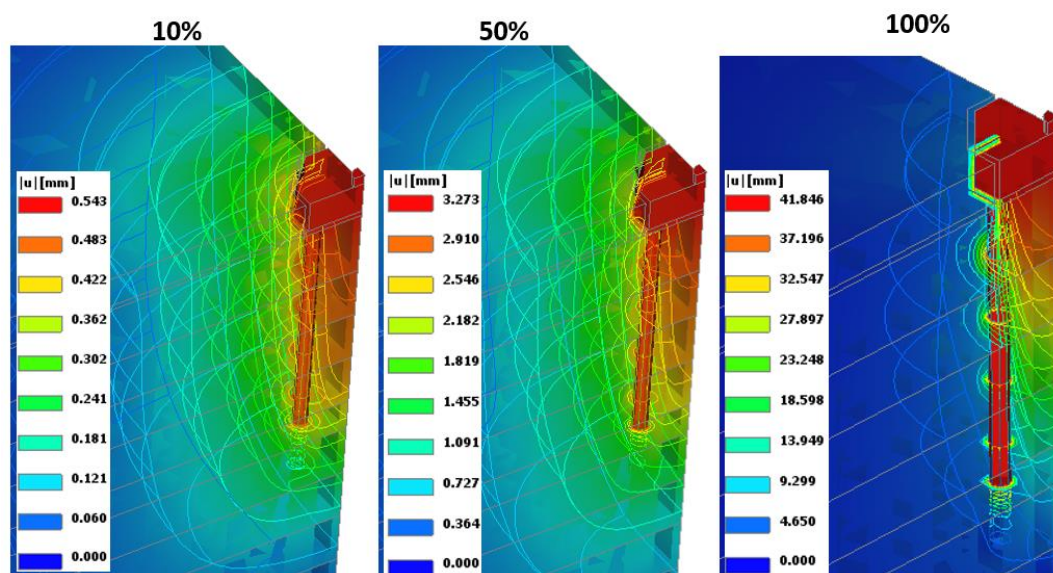
máximo adotado para os radiers estaqueados: circular PRC4d, octogonal PRO4d e quadrado PRS4d, respectivamente.

Figura 71 - Deslocamentos no PRC4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



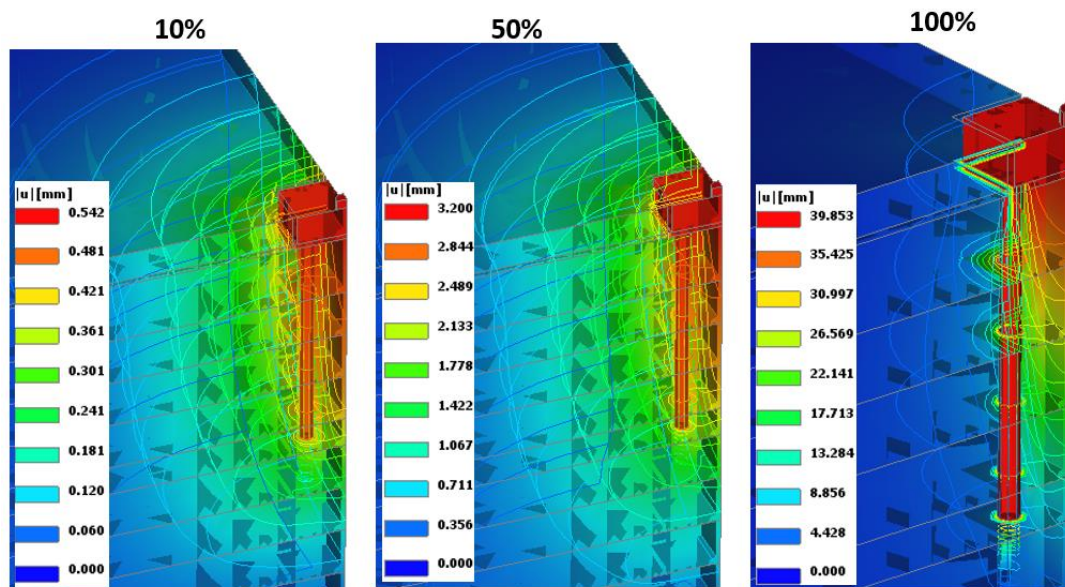
Fonte: A autora.

Figura 72 - Deslocamentos no PRO4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

Figura 73 - Deslocamentos no PRS4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

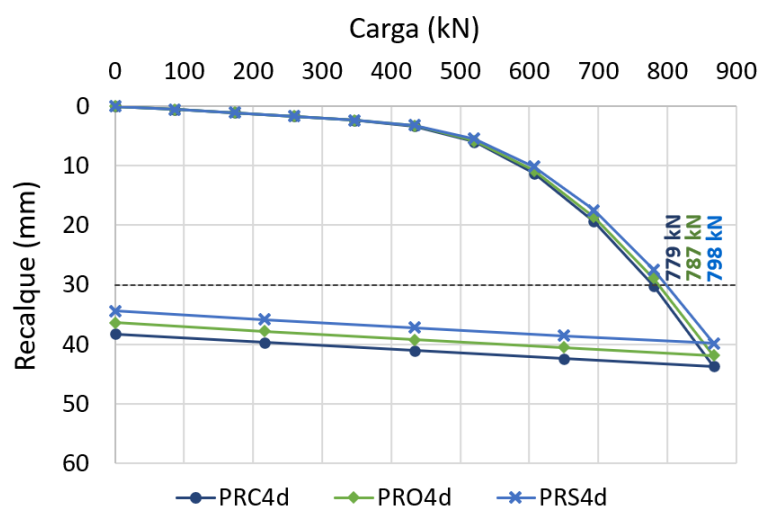
Ressalta-se que pode haver alguma pequena variação visual entre os resultados das figuras, pois a graduação de cores e linhas de destaque são dependentes da posição e do ângulo de exposição da vista do problema, podendo estas, ser exaltadas ou esmaecidas com uma pequena mudança na posição do problema tridimensional. No entanto, o ângulo de apresentação de cada modelo foi adequado com o intuito de uma melhor exposição e análise dos resultados. Cabe salientar que os resultados extraídos e apresentados nos gráficos são independentes desse posicionamento do modelo 3D.

Em todas as geometrias verificam-se que o maior grau de deslocamento é encontrado na região interna imediatamente abaixo do radier estaqueado (Figuras 71, 72 e 73). Nota-se que essa mobilização dissipa gradualmente ao longo do fuste até ponta da estaca, indicando o bulbo de tensões resultante do contato radier-solo em que apresenta uma maior intensidade quando se eleva a carga aplicada a 100% do carregamento. Além disso, observa-se uma mobilização do solo abaixo da ponta da estaca que é proveniente da menor resistência do solo nessa região (na qual foi empregada para simular as características de uma estaca escavada).

Nota-se que os resultados entre as geometrias de base apresentam certa similaridade quando comparados visualmente, entretanto, percebe-se que a mobilização no solo abaixo dos limites externos (borda) do radier acompanha o perímetro geométrico do radier com maior intensidade a 100% do carregamento.

O comportamento carga vs recalque ao longo dos 11 estágios de carregamento (de 0, a 100%) e 4 de descarregamento (75%, 50%, 25% e 0%) entre as diferentes geometrias de base da fundação em radier estaqueado com espaçamento 4d, são apresentados na Figura 74. Observa-se que as curvas apresentam resultados extremamente próximos nas diferentes geometrias de base especialmente nos estágios iniciais de carregamento, mas ao elevar a carga aplicada essas curvas manifestam-se uma tendência de afastamento.

Figura 74 -Curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados PRC4d, PRO4d e PRS4d.



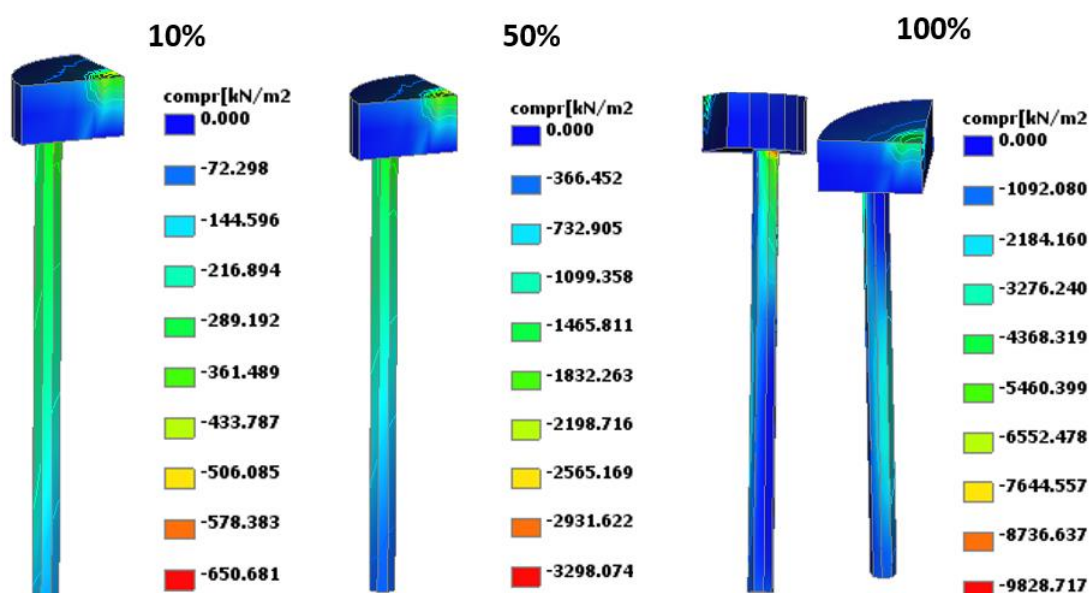
Fonte: A autora.

A partir de 50% da carga de ensaio, por exemplo, o radier estaqueado quadrado apresenta menores deslocamentos quando comparado às outras geometrias, exibindo uma diferença de 4% em relação a geometria circular e 2% em relação a geometria octogonal. Essa diferença é elevada conforme aumenta o carregamento. Em sua totalidade (100%) verifica-se uma diferença de 10% entre as geometrias quadrada e circular, e de 5% entre as geometrias quadrada e octogonal. Essa concepção aponta que maiores cargas é equivalentes à uma maior diferença entre os recalques obtidos nas respectivas geometrias de base para esse espaçamento.

Com relação à carga de ruptura convencionalizada a um recalque especificado em 10% do diâmetro da estaca, o radier estaqueado quadrado (PRS4d) apresenta uma maior carga de ruptura, com 798 kN seguido pelas geometrias de base octogonal (PRO4d) com 787 kN e circular (PRC4d) com 779 kN, totalizando uma diferença percentual máxima entre as cargas convencionalizadas de 2%.

As tensões de compressão distribuídas nos elementos de fundação dos radiers estaqueados circular PRC4d, octogonal PRO4d e quadrado PRS4d podem ser observadas nas Figuras 75, 76 e 77, respectivamente. Comparando as diferentes geometrias, observa-se uma variação entre as tensões máximas de compressão, apresentando maior divergência ao aproximar da carga máxima de ensaio (867 kN). Além disso, verifica-se nas fundações superficiais (radiers), que as tensões de compressão são predominantes em torno da região sob o pilar de aplicação da carga, no qual esse efeito é replicado na extremidade do topo da estaca oposta a esse pilar, observando uma maior incidência a 100% do carregamento.

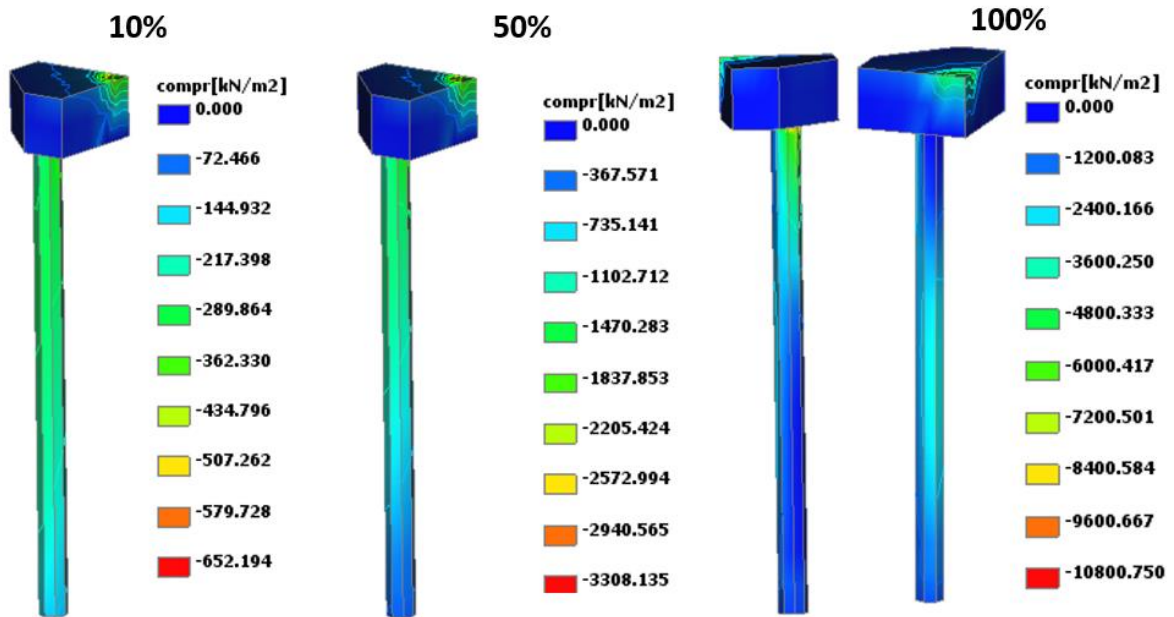
Figura 75 - Compressão no PRC4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

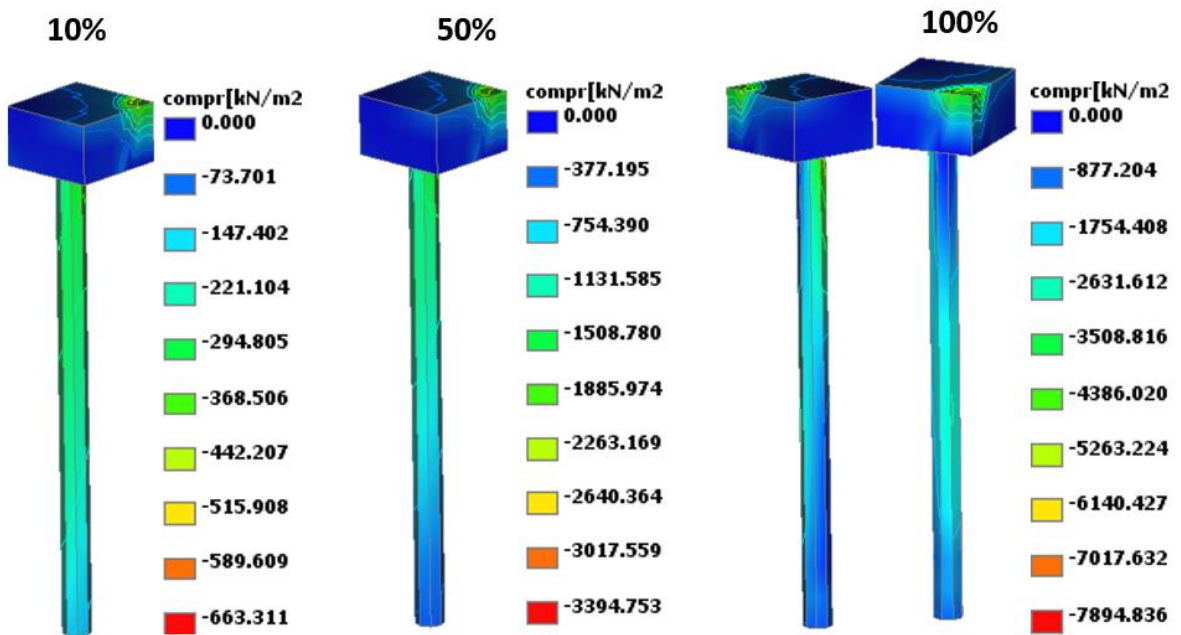
Dentro desse contexto, é possível observar nas Figuras 78, 79 e 80 a transferência de carga axial média e de atrito lateral ao longo do fuste para uma estaca de cada um dos radiers estaqueados circular, octogonal e quadrado a 10, 50 e 100% do carregamento. Nota-se que os resultados entre as três geometrias apresentam valores semelhantes apenas nos primeiros estágios de carga, indicando a baixa influência do radier nesses estágios, entretanto, a 100% do carregamento os resultados se dissipam: enquanto o PRO4d apresenta um maior valor de carga axial média e consequentemente maior mobilização do atrito lateral nos primeiros metros da estaca, o PRS4d apresenta os menores valores. Para maiores detalhes acerca da transferência de carga axial média ao longo da estaca em todos os estágios de carregamento consultar o APÊNDICE C.

Figura 76 - Compressão no PRO4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



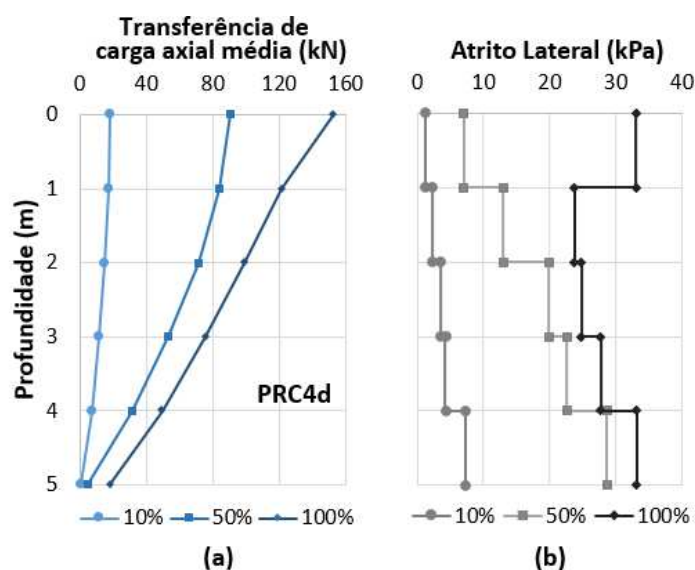
Fonte: A autora.

Figura 77 - Compressão no PRS4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



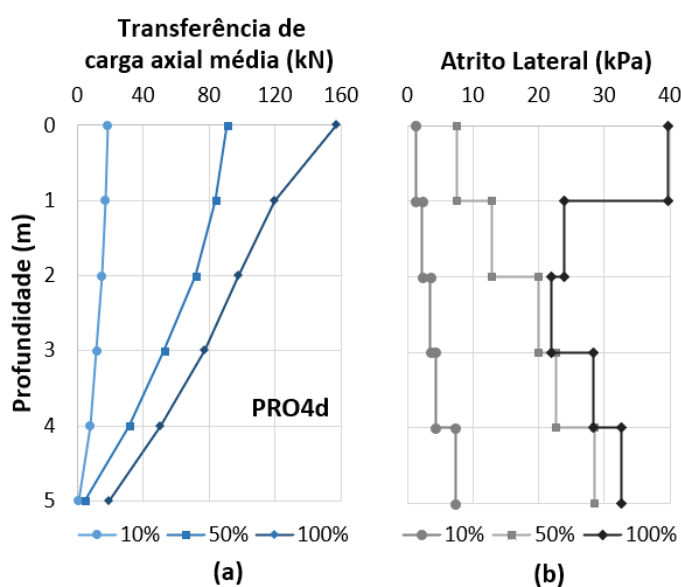
Fonte: A autora.

Figura 78- Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRC4d.



Fonte: A autora.

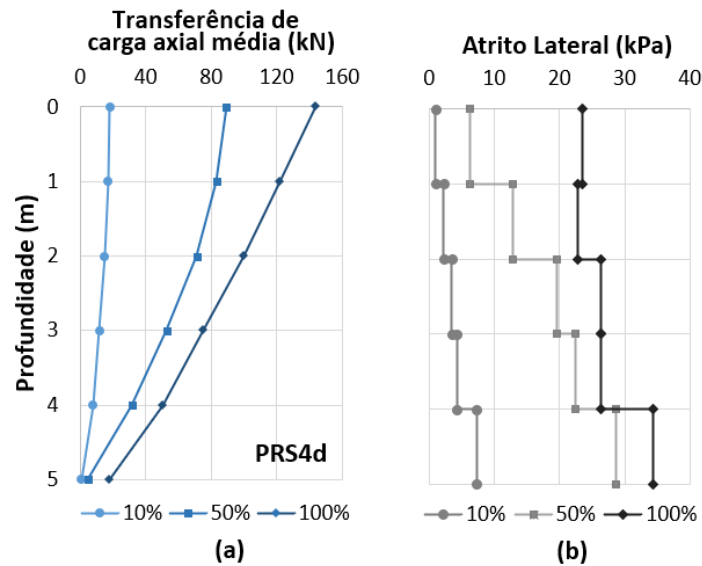
Figura 79 – Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRO4d.



Fonte: A autora.

Essa maior mobilização da carga axial média e atrito lateral na região da estaca imediatamente abaixo do elemento superficial é justificada pela presença do radier, ou seja, a transferência de cargas pelo contato do radier-solo provoca um aumento do nível de tensões no solo gerando uma maior mobilização do atrito lateral. Observa-se, portanto, que a mudança da geometria do elemento superficial altera a natureza da transferência de cargas da estaca ao solo, provocando uma alteração na mobilização do atrito lateral da estaca, e conseqüentemente alterando todo o mecanismo de transferência de cargas do sistema.

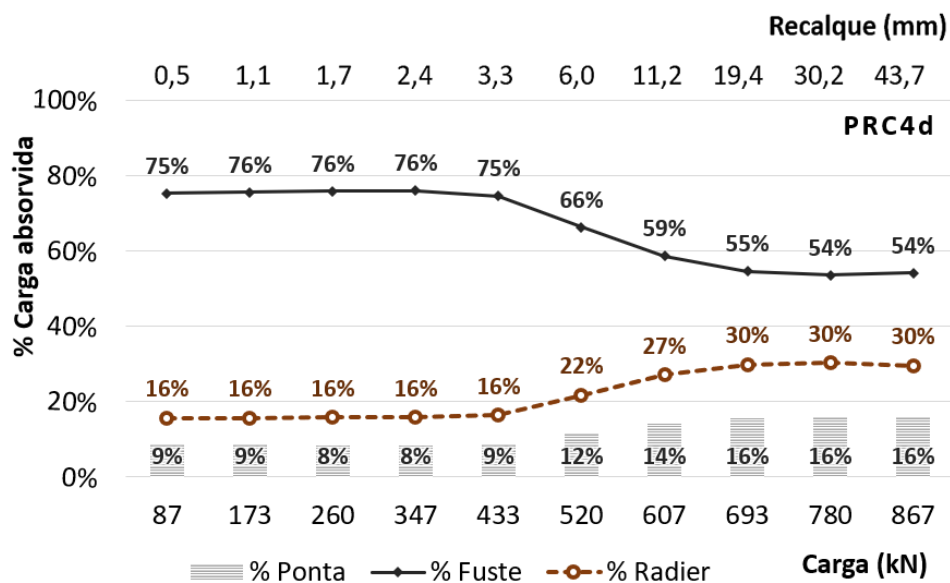
Figura 80- Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRS4d.



Fonte: A autora.

Esse comportamento pode ser melhor visualizado a partir dos gráficos de distribuição percentual de cargas entre o radier e as estacas ao longo dos estágios de carregamento, nos radiers estaqueados: circular (Figura 81) octogonal (Figura 82) e quadrado (Figura 83) onde verifica-se que os menores valores de capacidade de carga axial média e de atrito lateral do PRS4d é correspondente a uma maior parcela de carga absorvida pelo radier, quando comparado com outras geometrias.

Figura 81– Distribuição de cargas no radier estaqueado circular PRC4d.



Fonte: A autora.

Figura 82- Distribuição de cargas no radier estaqueado octogonal PRO4d.

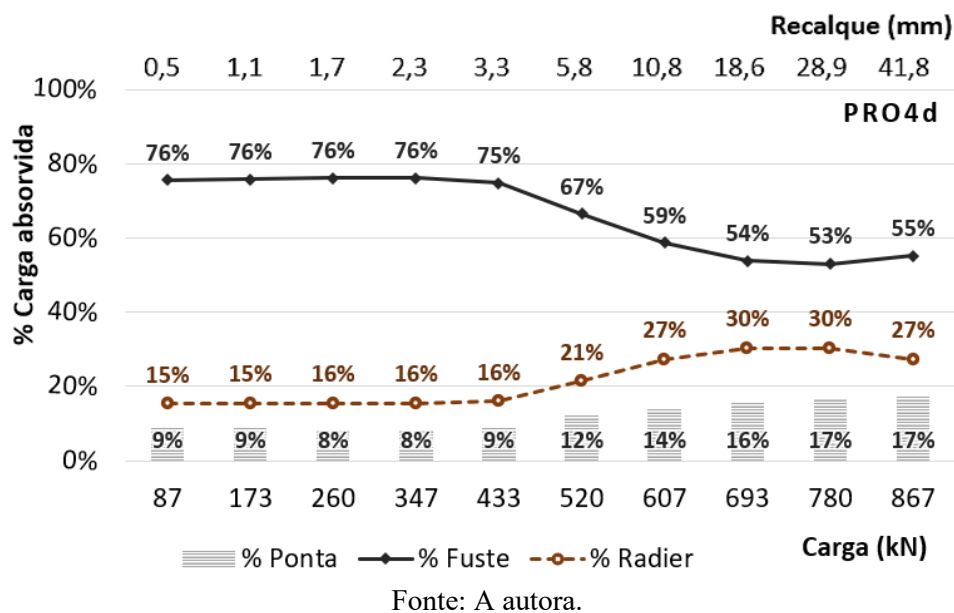
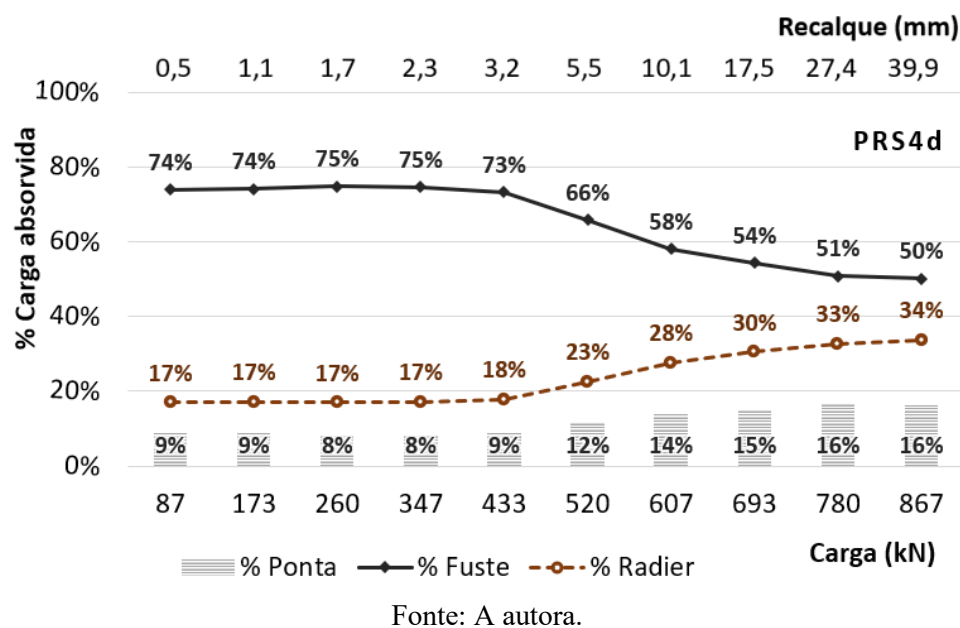


Figura 83 -Distribuição de cargas no radier estaqueado quadrado PRS4d.



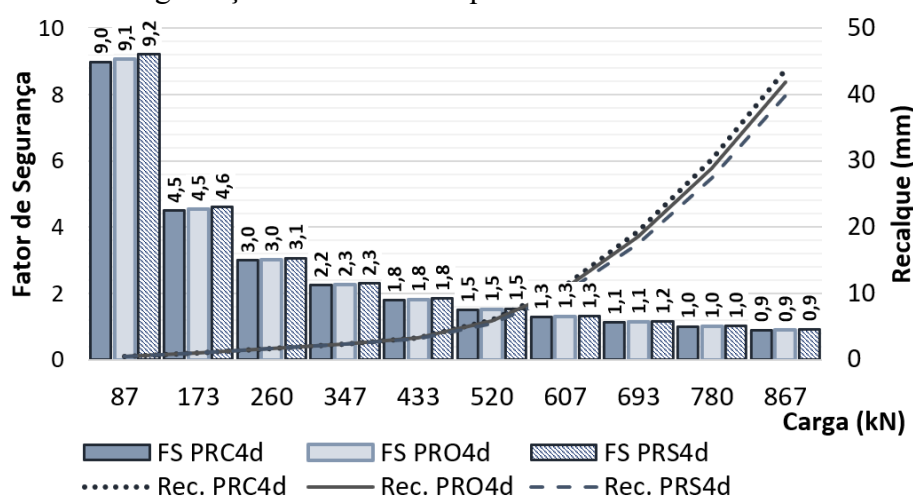
Para todos os radiers estaqueados com espaçamento 4d observa-se que a porcentagem de carga absorvida pelo fuste das estacas se mostra predominante quando comparado com a parcela de carga da ponta e do radier em todos os estágios de carregamento. Além disso, constata-se um crescimento da transferência de cargas pela área lateral da estaca até 50% do carregamento (433 kN) com um recalque de aproximadamente 3,3 mm, onde, a partir deste estágio há uma mudança na transferência de cargas.

Verifica-se que após 50% do carregamento (433 kN) a redução da carga absorvida pelo fuste produz um aumento da capacidade de ponta ao mesmo tempo que a carga absorvida pelo contato radier-solo aumenta. Esse comportamento apresenta-se com maior intensidade no PRS4d, onde há uma maior participação do bloco na transferência de cargas ao solo desde os primeiros estágios, quando comparado com as outras geometrias de base.

Em termos de tensão, considerando que a tensão absorvida pelo radier é a razão entre a carga absorvida pelo contato radier solo e a área líquida de contato (área total do radier menos a área da seção transversal das quatro estacas), para 100% do carregamento os valores de tensão do radier resultam em 62 kPa para o PRC4d, 57 kPa para o PRO4d e 71 kPa para o PRS4d.

O fator de segurança para cada incremento de carga foi embasado na carga de ruptura convencionada em 10% do diâmetro da estaca para cada modelo de fundação. Para os radiers estaqueados com espaçamento 4d verifica-se na Figura 84 que o fator de segurança (FS) é semelhante em cada geometria de base. Observa-se que o fator de segurança se reduz a 1,5 a 60% (520 kN) da carga de ensaio, indicando o esgotamento da fundação a 100% da carga de ensaio (867 kN) com um FS < 1.

Figura 84 – Fator de segurança nos radiers estaqueados s=4d.



Fonte: A autora.

Para um melhor entendimento acerca da influência da geometria de contato do radier-solo, analisou-se fundações: em radier estaqueado, com a base do radier em contato direto com o solo, e em grupo de estacas, possuindo ambas as mesmas dimensões e propriedades do radier estaqueado, porém com supressão do contato bloco solo. Esse contato foi eliminado por meio

de uma lacuna de 10 cm criada entre a base do bloco e o solo. Os recalques máximos atingidos pela fundação não ultrapassaram 60 mm. Os resultados para as fundações em grupo de estacas, são apresentados a seguir.

5.3.2.2 Grupo de estacas, PG4d

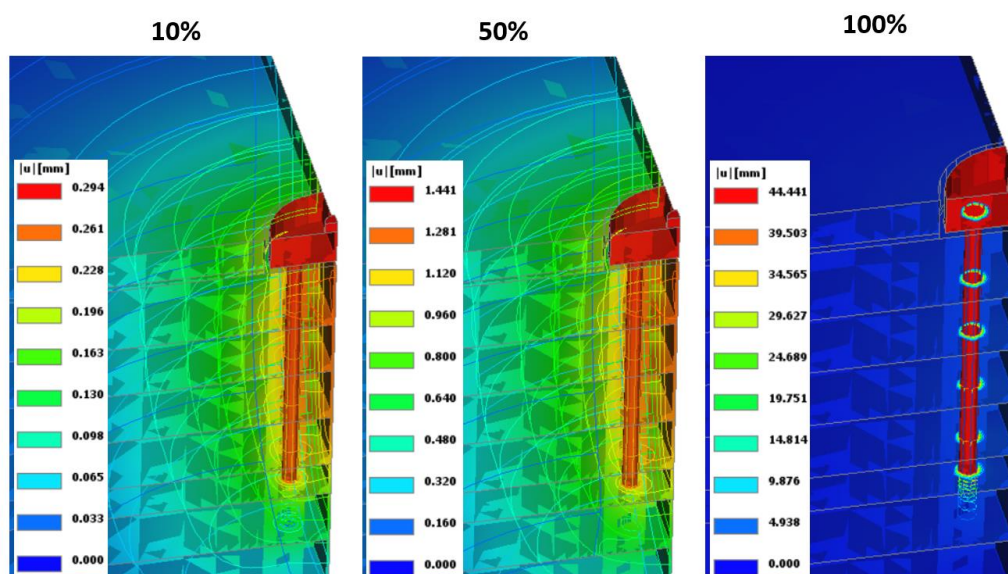
Para as fundações do tipo grupo de estacas em que o bloco é suprimido do contato com o solo a variação da geometria de base não interfere no comportamento da fundação, uma vez que apenas as estacas suportam toda a carga e o bloco participa apenas na distribuição e transferência de cargas às estacas. Salienta-se que para manter um critério de comparação neutro, os elementos do grupo de estacas apresentam as mesmas dimensões e propriedades que os elementos do radier estaqueado em cada espaçamento estudado.

Dessa forma, as fundações em grupo de estacas foram analisadas a partir de uma única geometria de bloco circular, considerando esta, representativa para todas as fundações em que o elemento superficial não apoia no solo. Para o grupo de estacas com espaçamento 4d obteve-se uma carga máxima de ensaio de 430 kN, padronizada a partir de recalques determinados entre 40 e 60 mm.

A evolução dos deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises no grupo de estacas pode ser verificada na Figura 85, na qual verifica-se que os deslocamentos máximos são de 0,29 mm, 1,44 mm e 44,44 mm para 10% (43 kN), 50% (215 kN) e 100% (430 kN) do carregamento máximo adotado, nessa ordem. Nesta figura é observado que a mobilização do solo se conserva em torno do fuste e da ponta da estaca com maior intensidade ao aproximar do carregamento máximo aplicado tendo em vista que no grupo de estacas a distribuição de cargas é efetuada somente pelas estacas a partir da sua área lateral e ponta.

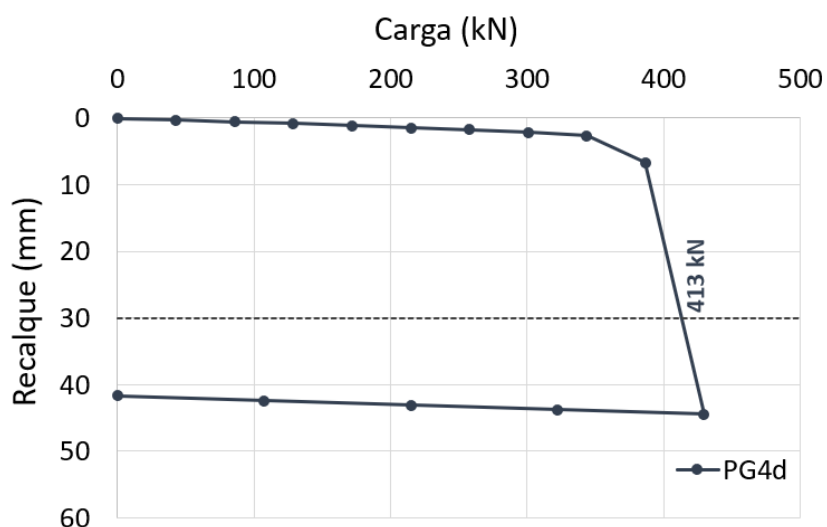
Na Figura 86 é possível observar o comportamento carga vs recalque ao longo dos 11 estágios de carregamento (de 0% a 100%) e 4 de descarregamento (75%, 50%, 25% e 0) para o grupo de estacas com espaçamento 4d. Verifica-se que a carga de ruptura convencionada a um recalque especificado em 10% do diâmetro da estaca (30mm) resulta em 413 kN. Verifica-se que até 70% do carregamento, ou seja, 344 kN os deslocamentos não ultrapassaram 3 mm, apresentando a partir deste estágio um crescimento acentuado, no qual salta de 6,7mm com 386 kN para um deslocamento de 44,4 mm a uma carga de 430 kN.

Figura 85 - Deslocamentos no PG4d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

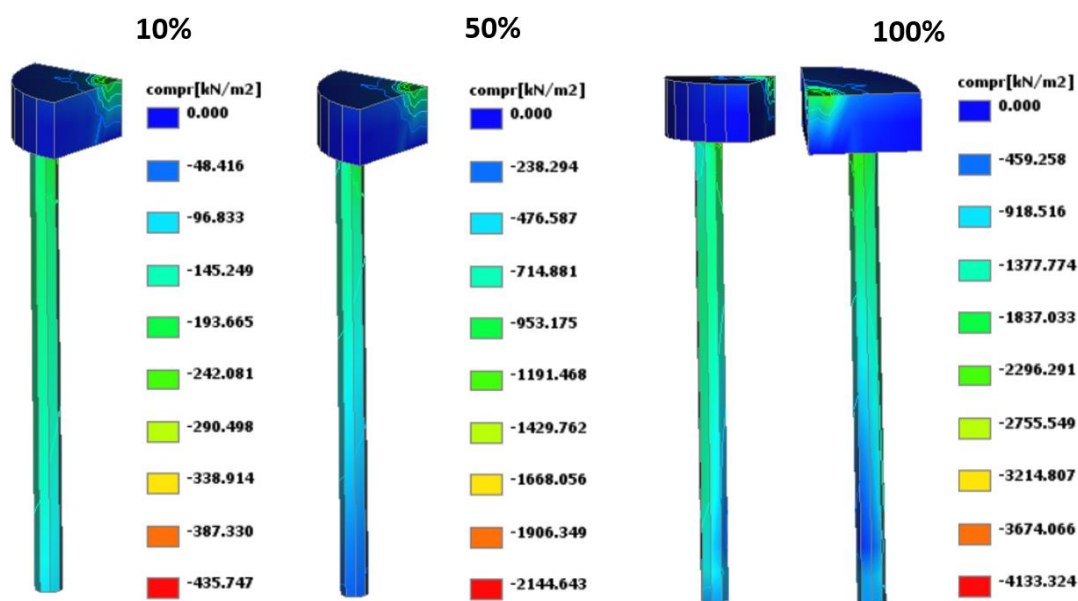
Figura 86- Curvas carga vs recalque do grupo de estacas com espaçamento 4d.



Fonte: A autora.

As tensões de compressão distribuídas nos elementos do grupo de estacas são apresentadas na Figura 87. Nota-se que o efeito de compressão é predominante na região em torno do bloco sob o pilar de aplicação da carga onde é replicado com maior incidência na extremidade do topo da estaca oposta a esse pilar, principalmente a 100% do carregamento. Os valores da tensão máxima de compressão se elevam de 436 kPa a 2145 kPa e 4133 kPa para 10, 50 e 100% da carga de ensaio, respectivamente.

Figura 87 - Compressão no grupo de estacas (PG4d) a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.

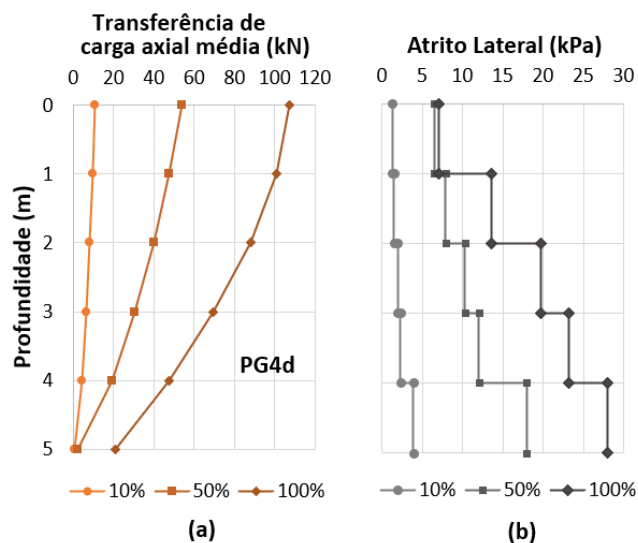


Fonte: A autora.

É notável a partir da Figura 87 que as tensões de compressão se dissipam conforme aumenta a profundidade da estaca, identificado pelas cores mais “frias”. Esse comportamento pode ser constatado na Figura 88 acerca da transferência de carga axial média e de atrito lateral ao longo do fuste de uma das estacas do grupo, no qual verifica-se que a distribuição do atrito lateral segue um formato triangular apresentando uma mobilização crescente do topo para a ponta da estaca. Verifica-se ainda que o crescimento da carga axial média e mobilização do atrito lateral nos primeiros metros da estaca no PG é menos acentuado do que no PR pelo fato da ausência das tensões adicionais que anteriormente eram causadas pelo contato radier-solo. Para maiores detalhes acerca da transferência de carga axial média ao longo da estaca em todos os estágios de carregamento consultar o APÊNDICE C.

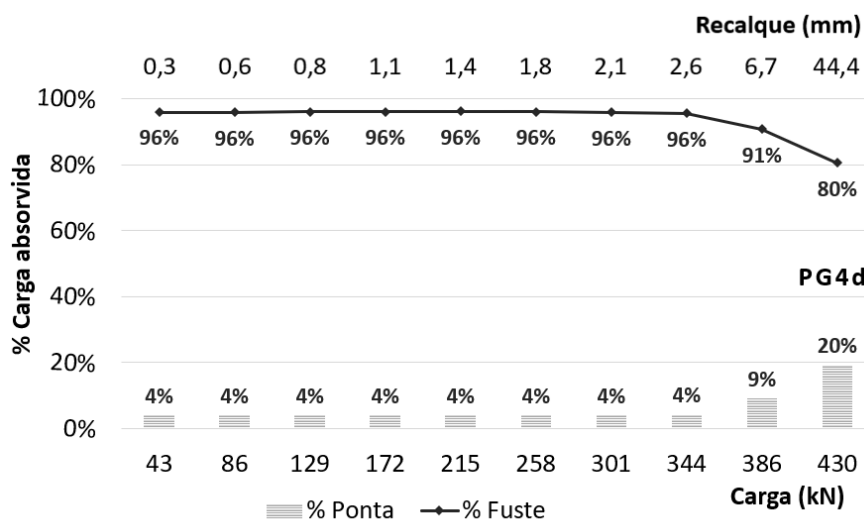
Com essas informações, é possível esboçar a distribuição percentual de cargas entre a ponta e o fuste das estacas ao longo dos estágios de carregamento apresentados na Figura 89, onde verifica-se que a carga absorvida pelo fuste e ponta das estacas se mantém constante até 80% da carga aplicada, ou seja, 344 kN. A partir desta, observa-se um aumento na resistência de ponta atribuída a uma elevação brusca dos recalques, alcançando no último estágio de carregamento, um recalque de 44 mm correspondente a 20% de carga absorvida pela ponta.

Figura 88- Transferência de cargas em uma estaca do grupo de estacas (PG4d).



Fonte: A autora.

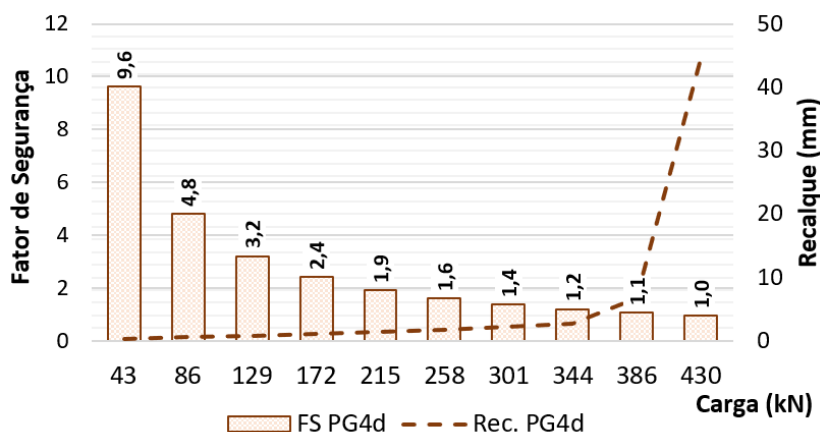
Figura 89 – Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG4d).



Fonte: A autora.

O fator de segurança para cada incremento de carga foi fundamentado na carga de ruptura convencional em 10% do diâmetro da estaca para cada modelo de fundação. No grupo de estacas com espaçamento 4d observa-se na Figura 90 que o fator de segurança se reduz a 1,6 a 60% (258 kN) da carga, atingindo um FS = 1 a 100% da carga de ensaio (430 kN).

Figura 90 - Fator de segurança no grupo de estacas com espaçamento 4d.



Fonte: A autora.

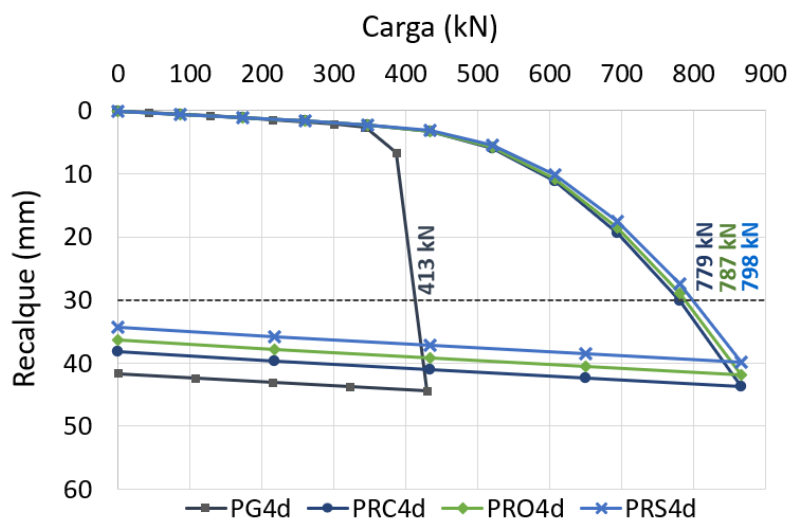
5.3.2.3 Comparação entre o radier estaqueado e o grupo de estacas (4d)

São relacionados nesta subseção os resultados comparativos entre as fundações estaqueadas com contato radier-solo (radier estaqueado) e sem contato bloco-solo (grupo de estacas) com espaçamento 4d.

Dessa forma, a partir da Figura 91 é possível confrontar o comportamento carga vs recalque destas fundações, no qual observa-se que o grupo de estacas suportou cargas bem menores que o radier estaqueado quando comparado a um mesmo recalque. É válido salientar que a única diferença entre as características geométricas, os parâmetros geotécnicos e mecânicos, e as metodologias construtivas adotadas no modelo tridimensional entre o PR e o PG é exclusivamente a presença ou ausência do solo sob a área de base do radier.

Analisando as curvas carga vs recalque entre os radies estaqueados e grupo de estacas verifica-se que até 344 kN as curvas se sobrepõem, o que evidencia a baixa participação do elemento superficial na transferência de cargas do radier estaqueado nesses primeiros estágios de carregamento. A partir dessa carga, quando o grupo de estacas atinge 80% da carga de ensaio observa-se um crescimento repentino no recalque do grupo de estacas que é característico desse tipo de fundação, e ao mesmo tempo, a curva do radier estaqueado segue uma tendência tênue até atingir o carregamento máximo, evidenciando o aumento da parcela de carga suportada pelo radier.

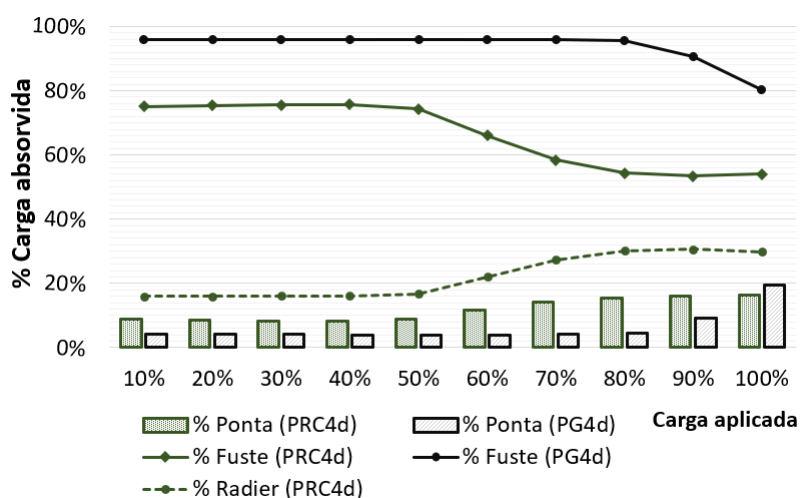
Figura 91 – Comparação entre as curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados (PR) e grupo de estacas (PG) com espaçamento 4d.



Fonte: A autora.

Esse comportamento pode ser verificado a partir da Figura 92 que retrata a distribuição de cargas entre os elementos do radier estaqueado e do grupo de estacas conforme os estágios de carregamento. Nesta, é possível observar que a ausência do contato radier solo no grupo de estacas possibilitou uma maior porcentagem de carga absorvida pelo fuste das estacas quando comparado com o radier estaqueado.

Figura 92 – Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG4d) e no radier estaqueado (PRC4d).

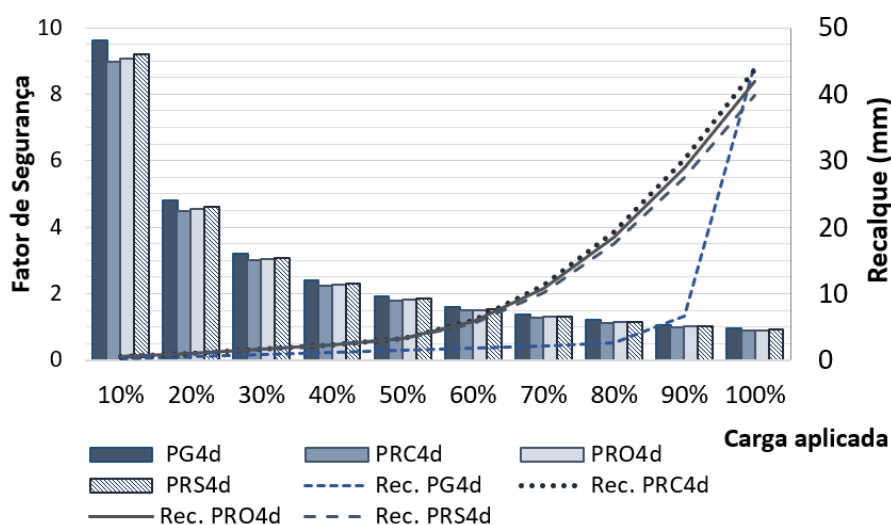


Fonte: A autora.

Além disso, verifica-se em termos de porcentagem de carga que há uma maior mobilização do atrito lateral no grupo de estacas representado pela elevada parcela de carga absorvida pelo fuste quando comparado ao radier estaqueado, na qual a transferência de cargas passa a ser compartilhada com o radier, e este absorve uma parcela significativa de carga ao longo dos estágios de carregamento.

Baseado nesse contexto, afirma-se que o elemento superficial de fundação quando em contato com o solo altera significativamente o modo de transferência de cargas entre os elementos da fundação, permitindo uma maior capacidade de carga do sistema. Todavia, ao comparar os fatores de segurança (Figura 93), verifica-se que o grupo de estacas apresenta resultados sensivelmente maiores que nos radiers estaqueados.

Figura 93 – Comparação do Fator de Segurança entre o grupo de estacas (PG4d) e radiers estaqueados (PR4d).



Fonte: A autora.

5.3.3 Radiers estaqueados e grupo de estacas com espaçamento 6d

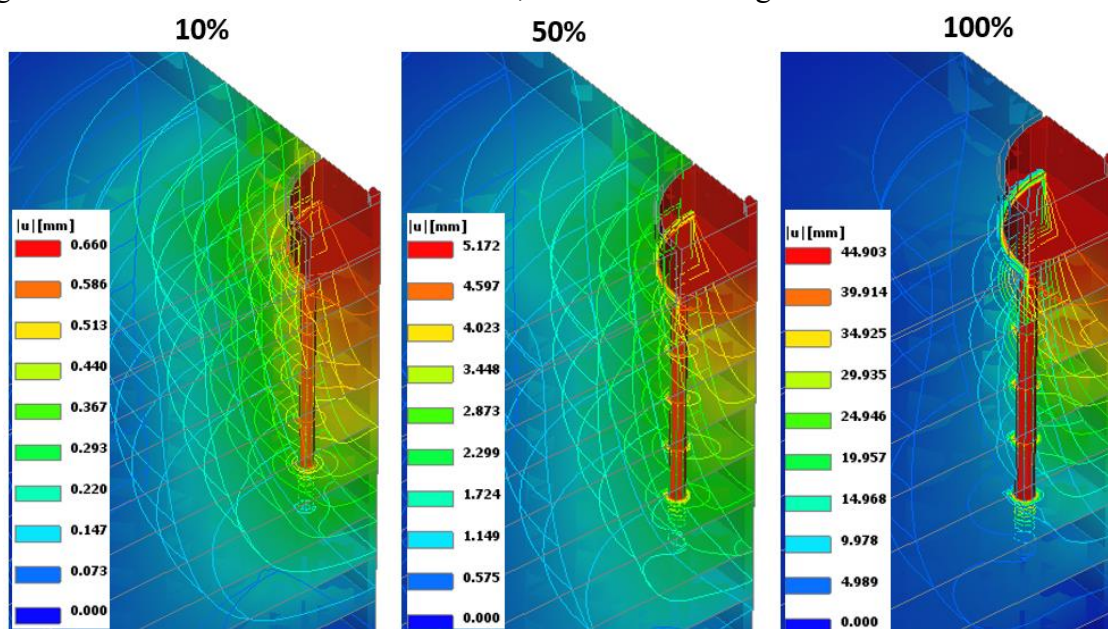
Apresentam-se nesta subseção os resultados para as fundações estaqueadas com espaçamento 6d ($s=180$ cm).

5.3.3.1 Radiers estaqueados: PRC6d, PRO6d e PRS6d

Nos radiers estaqueados com espaçamento 6d a carga máxima de ensaio alcançada foi de 1304 kN para as três geometrias de base: circular, octogonal e quadrada. Vale destacar que essa carga foi padronizada a partir de recalques determinados na faixa de 40 a 60 mm, e assim, replicada em todas as geometrias com o intuito de uniformizar os parâmetros de comparação.

As Figuras 94, 95 e 96 apresentam a evolução dos deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises a 10% (130 kN), 50% (652 kN) e 100% (1304 kN) do carregamento máximo adotado para os radiers estaqueados: circular PRC6d, octogonal PRO6d e quadrado PRS6d, respectivamente.

Figura 94 - Deslocamentos no PRC6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



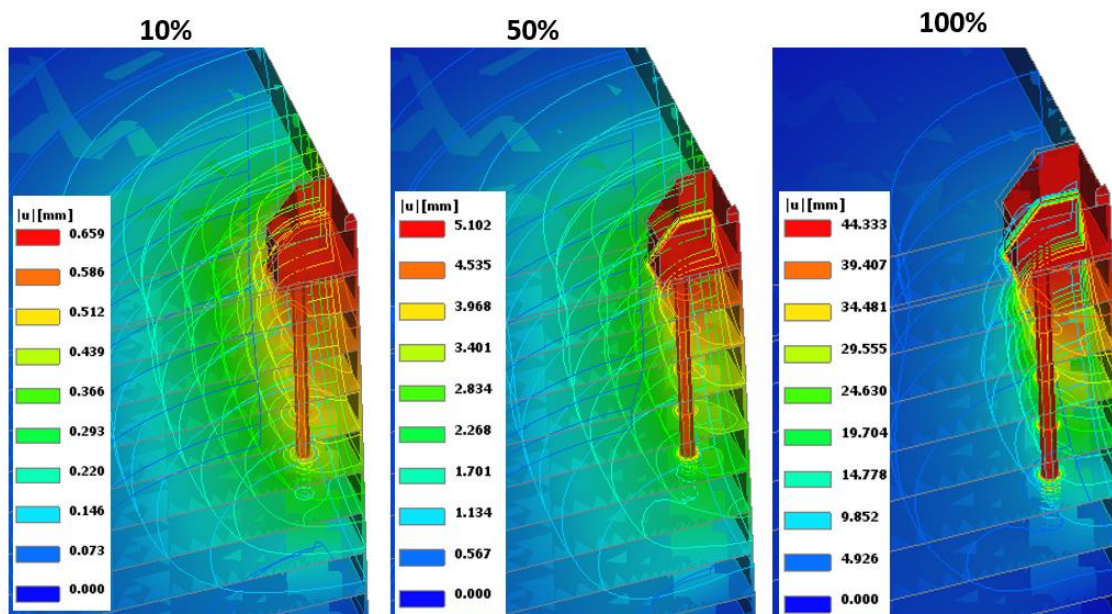
Fonte: A autora.

Na Figura 97 visualiza-se o comportamento carga vs recalque ao longo dos 11 estágios de carregamento (de 0% a 100%) e 4 de descarregamento (75%, 50%, 25% e 0%) entre as diferentes geometrias de base da fundação em radier estaqueado com espaçamento 6d. Ao comparar com o espaçamento 4d, observa-se que o espaçamento 6d apresentou curvas menos divergentes ao variar a geometria de base.

Entretanto para esse espaçamento, o radier estaqueado quadrado (PRS6d) apresenta uma maior carga de ruptura convencional a um recalque especificado em 10% do diâmetro da estaca (30 mm) com 1151 kN, seguida pelas geometrias de base octogonal (PRO6d) e circular (PRC6d)

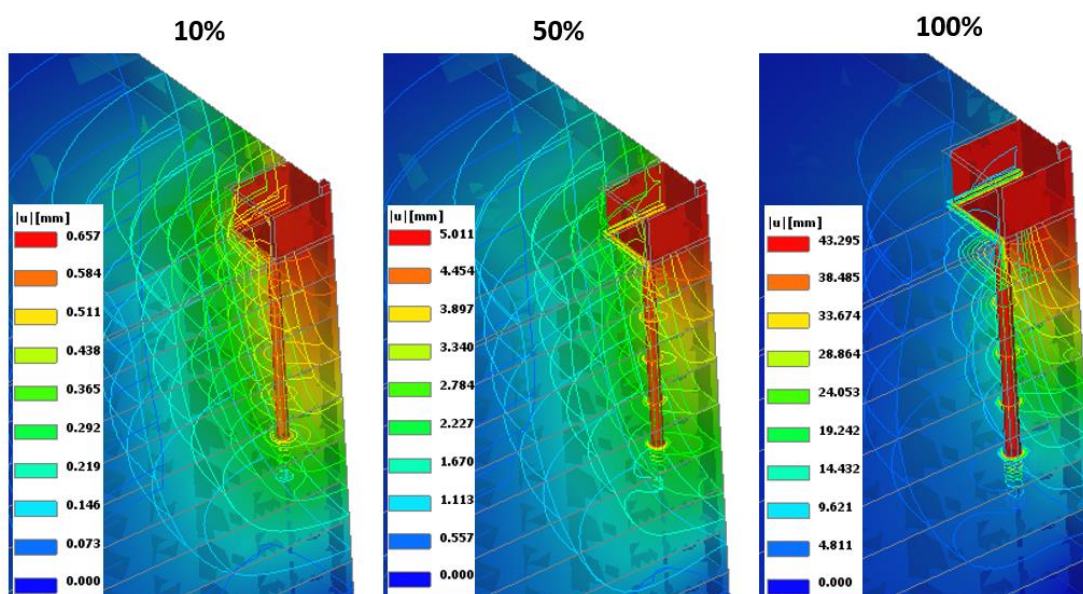
com valores de 1140 kN e 1135 kN, respectivamente, totalizando uma diferença percentual máxima entre as cargas convencionadas em cerca de 1,4%.

Figura 95 - Deslocamentos no PRO6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

Figura 96 - Deslocamentos no PRS6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.

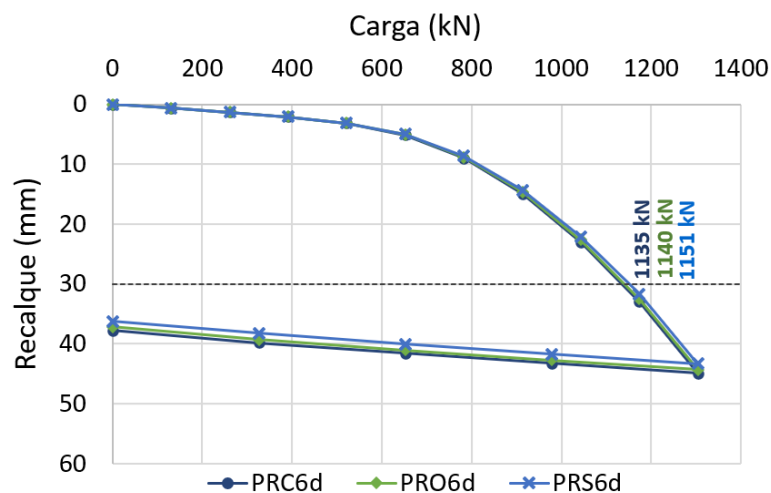


Fonte: A autora.

Com relação aos recalques obtidos, observa-se pelas curvas que os recalques para o espaçamento 6d ostentaram valores mais próximos entre as diferentes geometrias que os PRs com espaçamento 4d. A 100% da carga de ensaio (1304 kN), por exemplo, o radier estaqueado

quadrado (PRS6d) apresenta menores deslocamentos quando comparado à outras geometrias exibindo uma diferença de 3,6% em relação a geometria circular, 2,3% entre as geometrias quadrada e octogonal e 1,3% entre as geometrias circular e octogonal.

Figura 97 - Curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados PRC6d, PRO6d e PRS6d.

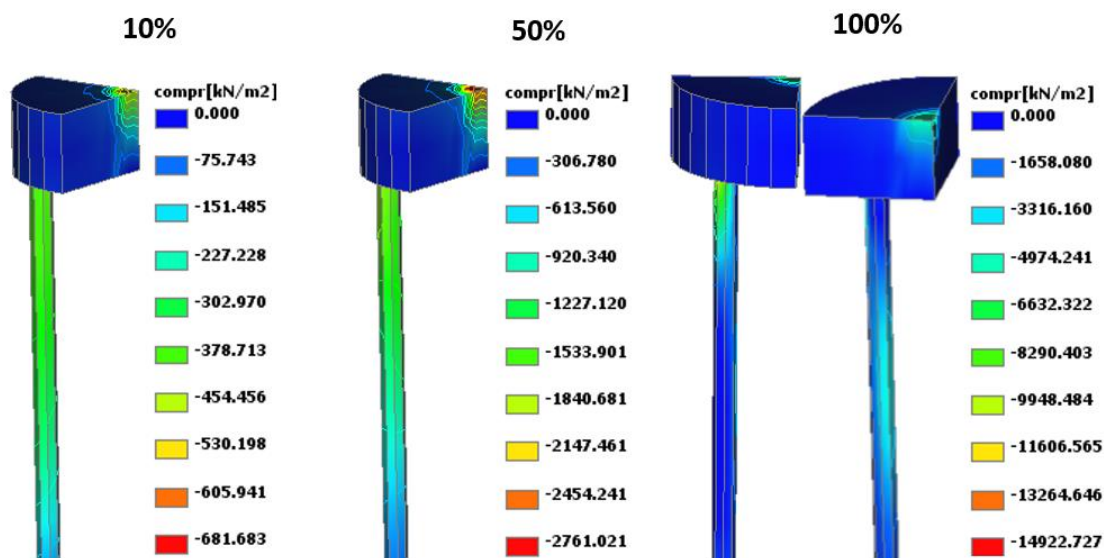


Fonte: A autora.

As tensões de compressão distribuídas nos elementos da fundação dos radiers estaqueados circular PRC6d, octogonal PRO6d e quadrado PRS6d podem ser observadas nas Figuras 98, 99 e 100, respectivamente. Comparando as diferentes geometrias, observa-se uma variação entre os valores de compressão apurando uma maior divergência ao aproximar a totalidade da carga de ensaio (1304 kN). Além disso, verifica-se nas fundações superficiais (radiers), que as tensões de compressão são predominantes em torno da região sob o pilar de aplicação da carga e que esse efeito é replicado na extremidade do topo da estaca oposta a esse pilar, apresentando uma maior incidência a 100% do carregamento.

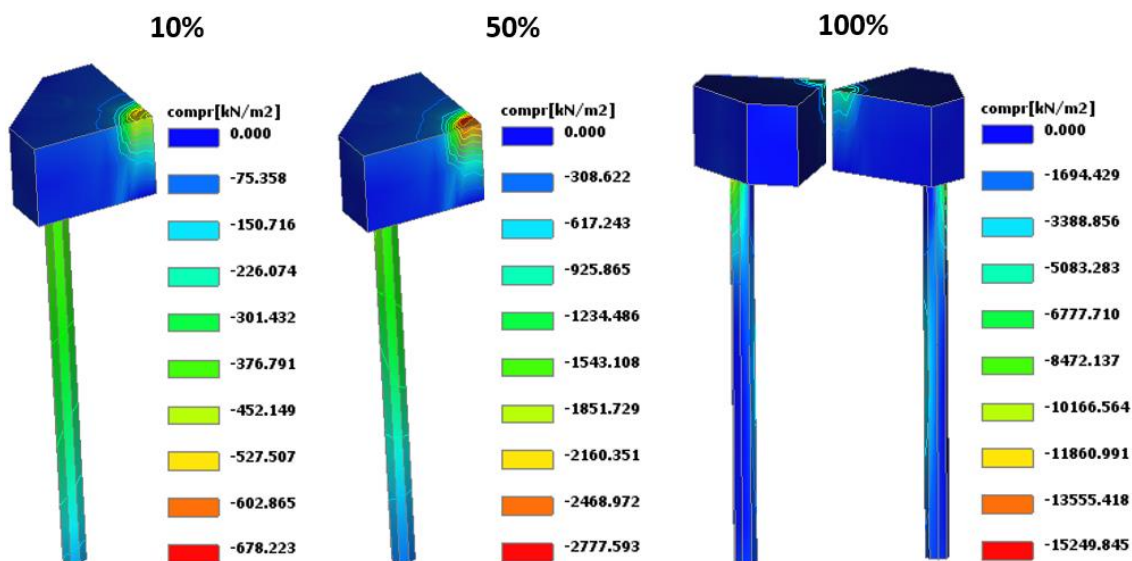
Nas Figuras 101, 102 e 103 são apresentados os gráficos de transferência de carga axial média e de atrito lateral ao longo do fuste para uma estaca de cada um dos radiers estaqueados circular, octogonal e quadrado, respectivamente em 10, 50 e 100% do carregamento. Nota-se que os resultados entre as três geometrias apresentam valores semelhantes para os primeiros estágios de carga, indicando a baixa influência do radier, entretanto estes se divergem substancialmente a 100% do carregamento. Para maiores detalhes acerca da transferência de carga axial média ao longo da estaca em todos os estágios de carregamento consultar o APÊNDICE C.

Figura 98 - Compressão no PRC6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

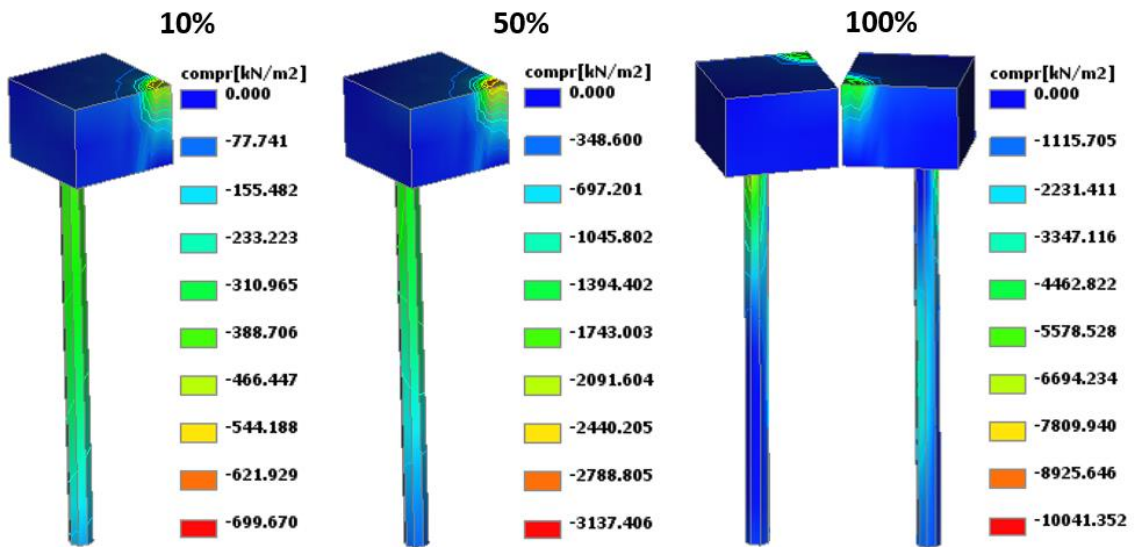
Figura 99 - Compressão no PRO6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

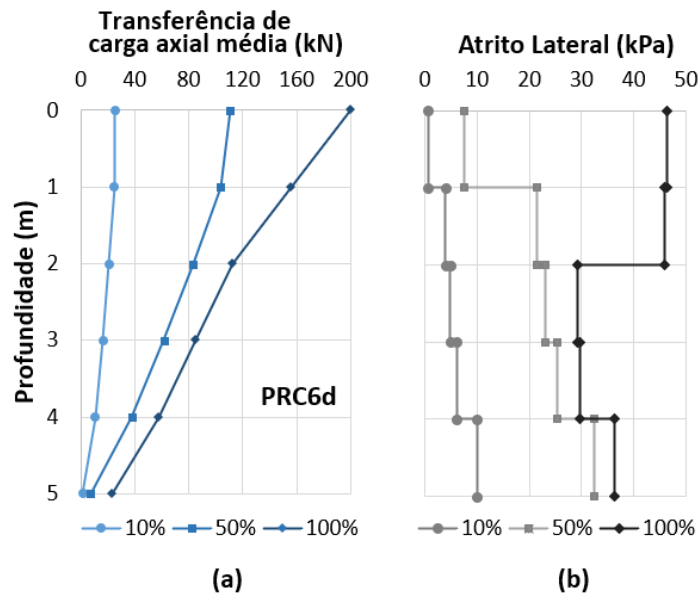
Essa maior mobilização da carga axial média e atrito lateral nos primeiros metros da estaca das fundações em radier estaqueado é em consequência da presença do radier, em que nesse caso, a geometria quadrada apresentou menor influência no comportamento das estacas quando comparado às outras geometrias, ou seja, a transferência de cargas pelo contato radier-solo na geometria quadrada provocou um menor aumento do nível de tensões no solo, gerando uma menor mobilização do atrito lateral quando comparado às outras geometrias de base.

Figura 100 - Compressão no PRS6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



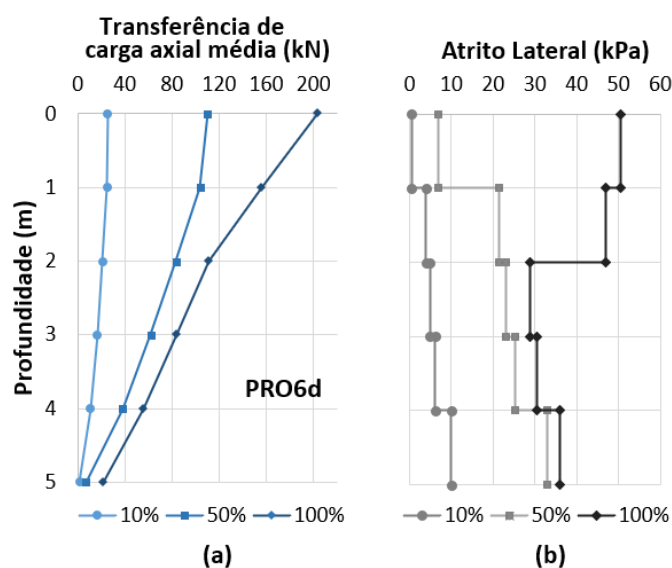
Fonte: A autora.

Figura 101 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado circular PRC6d.



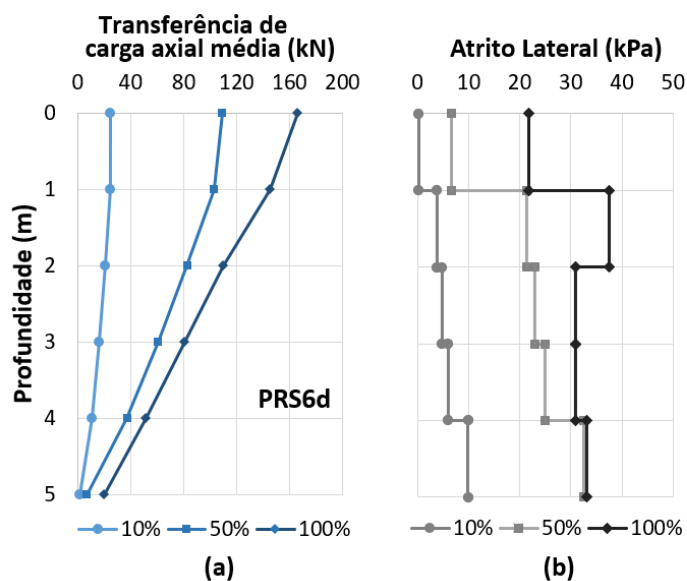
Fonte: A autora.

Figura 102 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado octogonal PRO6d.



Fonte: A autora.

Figura 103 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado quadrado PRS6d.

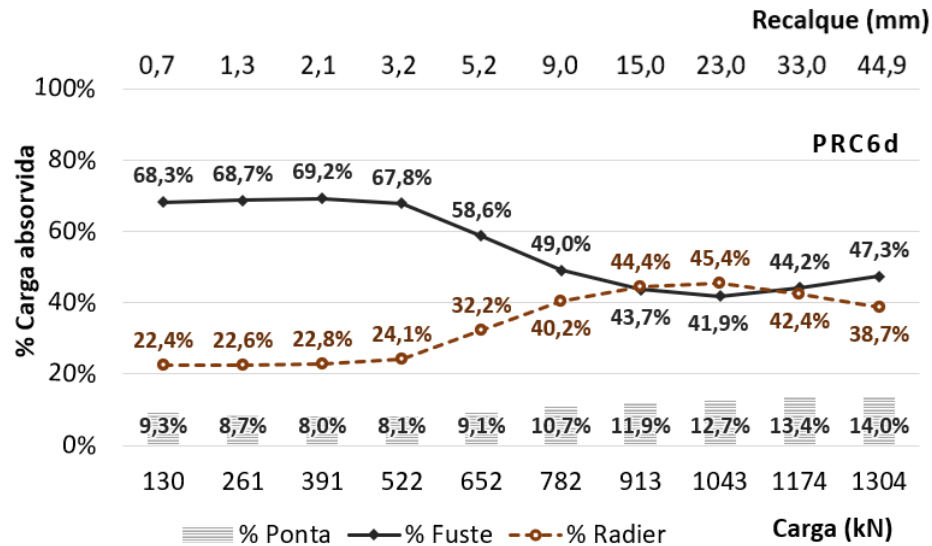


Fonte: A autora.

Constata-se, portanto, que a geometria do elemento superficial altera a natureza de transferência de cargas da estaca, provocando uma mudança na mobilização do atrito lateral que, por sua vez, modifica a parcela de contribuição do radier no sistema de fundação. Esse comportamento pode ser constatado a partir dos gráficos de distribuição percentual de cargas entre o radier e as estacas ao longo dos estágios de carregamento nas três geometrias estudadas: circular (Figura 104) octogonal (Figura 105) e quadrado (Figura 106) onde verifica-se que os menores valores

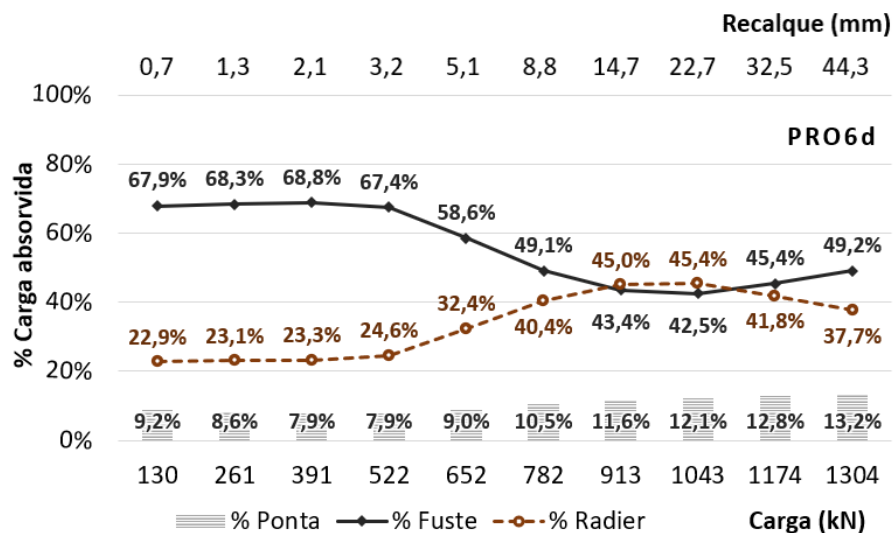
de capacidade de carga axial média e atrito lateral exibido pelo PRS6d corresponde a uma maior parcela de carga absorvida pelo radier quando comparado com outras geometrias.

Figura 104 – Distribuição de cargas no radier estaqueado circular PRC6d.



Fonte: A autora.

Figura 105 - Distribuição de cargas no radier estaqueado octogonal PRO6d.

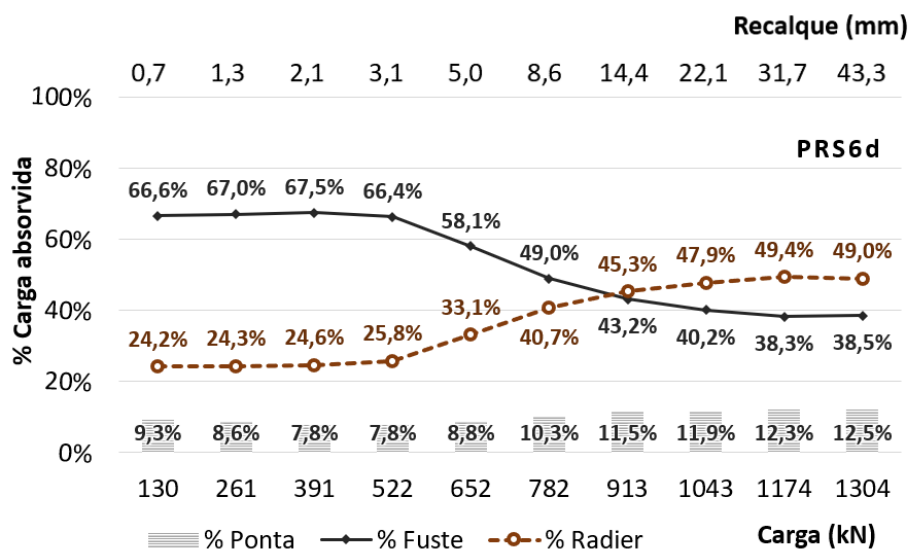


Fonte: A autora.

Para todos os radiers estaqueados com espaçamento 6d observa-se que há uma constância na transferência de cargas de 10% (130 kN) até 40% (522 kN) do carregamento em todas as geometrias, onde, a partir deste estágio há uma mudança na transferência de cargas anteriormente suportadas pelo fuste da estaca para o radier. Verifica-se após 522 kN que a

redução da carga absorvida pelo fuste produz um aumento da capacidade de ponta ao mesmo tempo que a carga absorvida pelo contato radier-solo aumenta.

Figura 106 - Distribuição de cargas no radier estaqueado quadrado PRS6d.

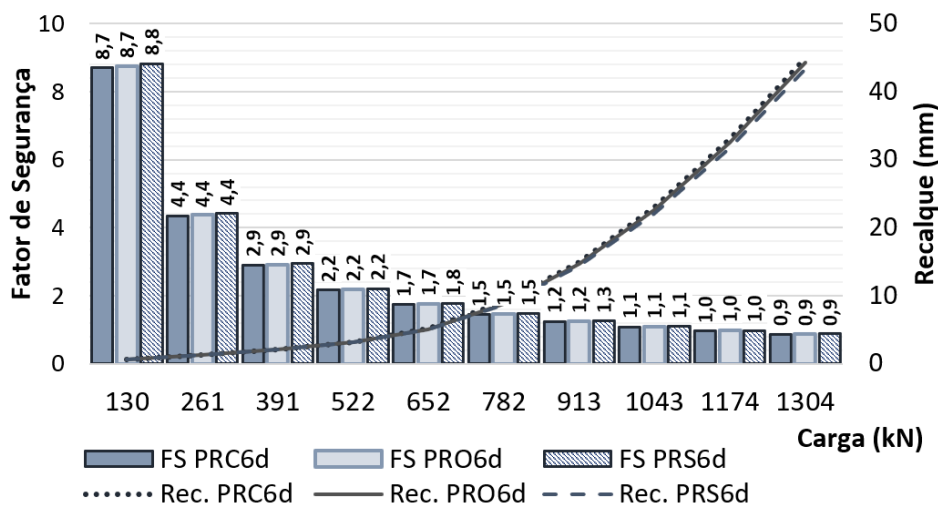


Fonte: A autora.

Observa-se que a porcentagem de carga absorvida pelo fuste das estacas se mostra predominante até 60% do carregamento (782 kN) em todas as geometrias, quando comparado com a parcela de carga da ponta e do radier. A parcela de carga absorvida pelo radier cresce gradativamente ao longo dos estágios de carregamento, ultrapassando a porcentagem de ponta em 913 kN (70% do carregamento), com um recalque de 15 mm.

Considerando que a tensão absorvida pelo radier é a razão entre a carga absorvida pelo contato radier-solo e a área líquida de contato. Para 100% do carregamento os valores de tensão do radier resultam em 63 kPa para o PRC6d, 62 kPa para o PRO6d e 80 kPa para o PRS6d.

O fator de segurança para cada incremento de carga foi embasado na carga de ruptura convencionada em 10% do diâmetro da estaca. Para os radiers estaqueados com espaçamento 6d verifica-se na Figura 107 que os fatores de segurança (FS) são equivalentes nas diferentes geometrias de base. Observa-se em todas as geometrias que o fator de segurança se reduz a 1,5 a 60% (782 kN) da carga de ensaio, atingindo o esgotamento da fundação a 100% da carga de ensaio (1304 kN) com um FS < 1.

Figura 107 – Fator de segurança nos radiers estaqueados com espaçamento $s=6d$.

Fonte: A autora.

Apresenta-se na subseção 5.3.3.2 os resultados das fundações do tipo grupo de estacas para um espaçamento entre estacas de $6d$.

5.3.3.2 Grupo de estacas, PG6d

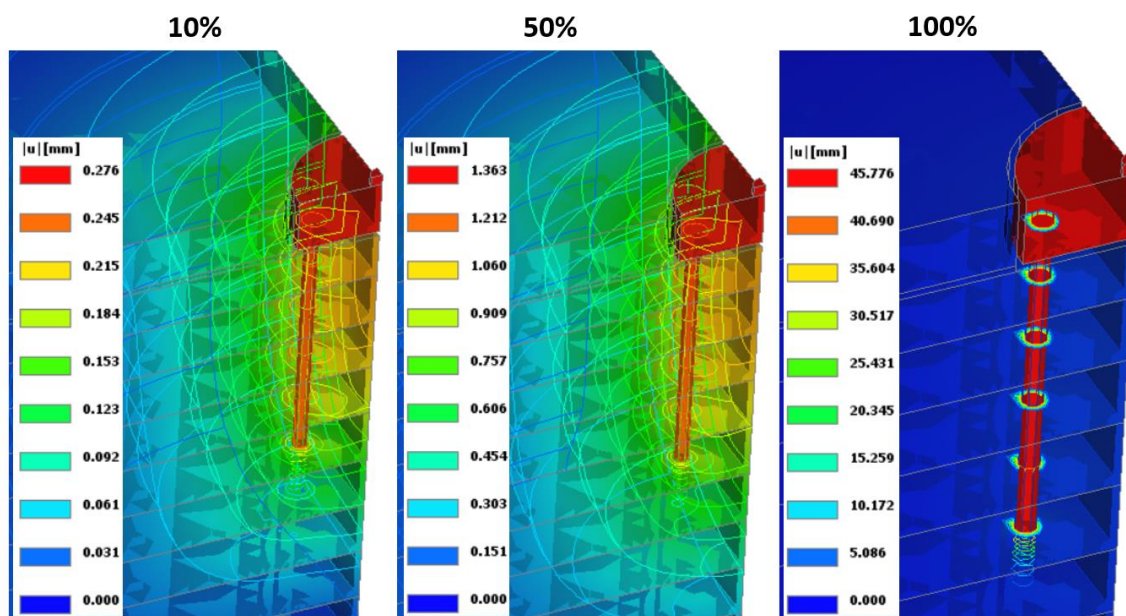
Como já mencionado, para as fundações do tipo grupo de estacas em que o bloco é suprimido do contato com o solo, a variação da geometria de base não influencia no comportamento da fundação uma vez que apenas as estacas suportam toda a carga e o bloco participa apenas na distribuição e transferência de cargas às estacas. Dessa forma, as fundações em grupo de estacas foram analisadas a partir de uma única geometria de bloco circular, considerando esta, representativa a todas as geometrias em que o elemento superficial foi desconectado do solo.

Para o espaçamento $6d$ obteve-se uma carga máxima de ensaio em 485 kN, padronizada a partir de recalques determinados na faixa de 40 a 60 mm. A Figura 108 apresenta a evolução dos deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises a 10% (49 kN), 50% (243 kN) e 100% (485 kN) do carregamento adotado para o grupo de estacas PG6d, acarretando deslocamentos máximos de 0,27 mm, 1,36 mm e 45,77 mm, respectivamente.

Nesta figura (Figura 108), ao contrário do radier estaqueado, observa-se que a mobilização do solo se conserva em torno do fuste e da ponta da estaca com maior intensidade ao aproximar do carregamento máximo aplicado tendo em vista que no grupo de estacas a transferência de

cargas ao solo é efetuada somente a partir da área lateral e ponta das estacas. Ou seja, a região imediatamente abaixo do radier que anteriormente era submetida ao bulbo de tensões provenientes do bloco, agora é intensificado apenas em torno da estaca.

Figura 108 - Deslocamentos no PG6d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.

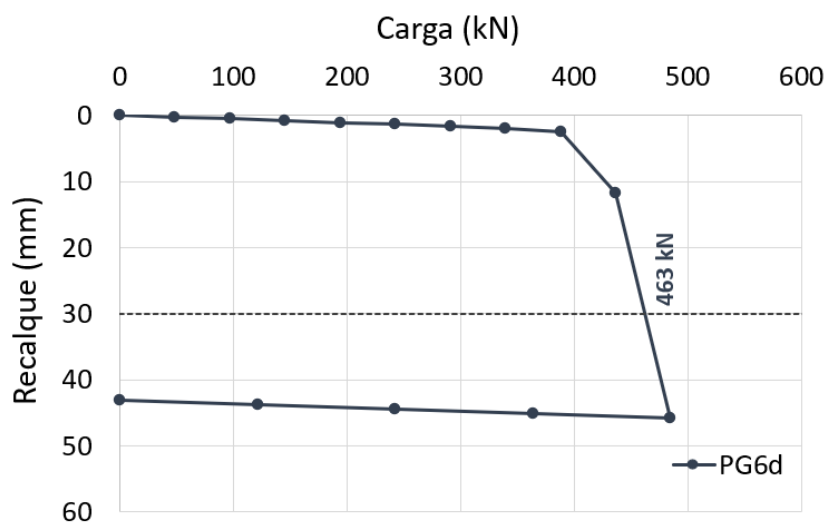


Fonte: A autora.

Na Figura 109 é possível observar o comportamento carga vs recalque ao longo dos 11 estágios de carregamento (de 0% a 100%) e 4 de descarregamento (75%, 50%, 25% e 0%) para o grupo de estacas com espaçamento $6d$, onde a carga de ruptura convencional resulta em 463 kN. Verifica-se que até 80% do carregamento, ou seja, 388 kN os deslocamentos não ultrapassaram 2,5 mm, apresentando a partir deste estágio um crescimento acentuado saltando de 11,8 kN com um carregamento de 437 kN para 45,8 mm em 100% da carga de ensaio.

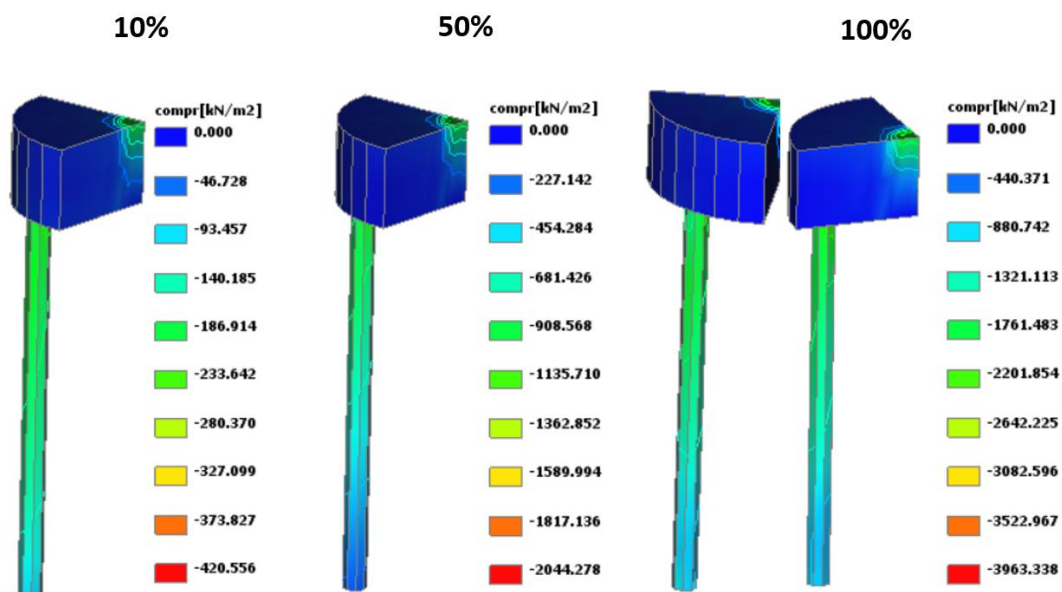
As tensões de compressão distribuídas nos elementos do grupo de estacas são apresentadas na Figura 110. Nota-se que o efeito de compressão é predominante na região em torno do bloco sob o pilar de aplicação da carga onde é replicado com maior incidência na extremidade do topo da estaca oposta a esse pilar, principalmente a 100% do carregamento. Os valores da tensão máxima de compressão se elevam de 421 kPa a 2044 kPa e 3963 kPa para 10%, 50% e 100% da carga de ensaio, respectivamente.

Figura 109 - Curvas carga vs recalque do grupo de estacas com espaçamento 6d.



Fonte: A autora.

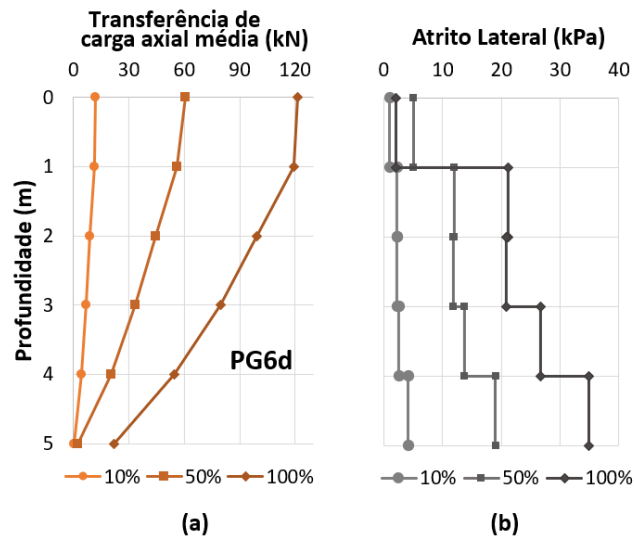
Figura 110 - Compressão no grupo de estacas (PG6d) a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

Observa-se que as tensões se dissipam conforme aumenta a profundidade da estaca, esse comportamento pode ser constatado na Figura 111 de transferência de carga axial média e de atrito lateral ao longo do fuste para uma das estacas do grupo. Onde verifica-se uma mobilização crescente do atrito lateral do topo para a ponta mais expressivamente a 50% e 100% do carregamento. Para maiores detalhes acerca da transferência de carga axial média ao longo da estaca em todos os estágios de carregamento consultar o APÊNDICE C.

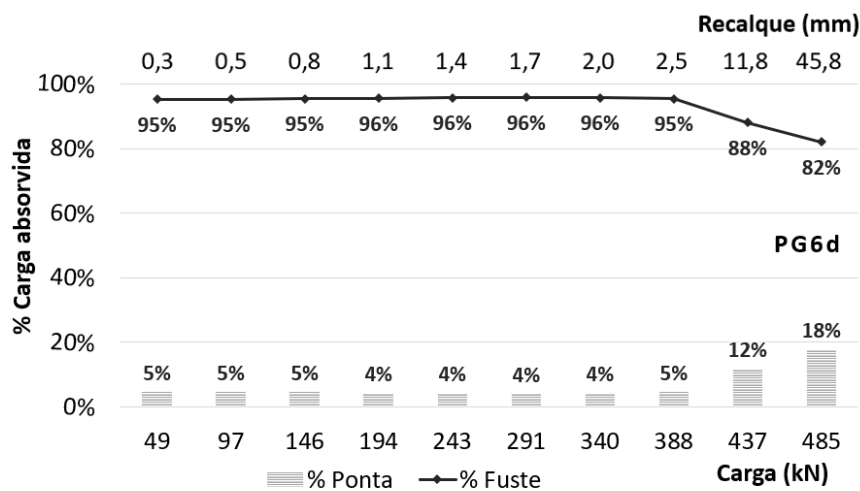
Figura 111- Transferência de cargas em uma estaca do grupo de estacas (PG6d).



Fonte: A autora.

Nesse sentido é possível esboçar a distribuição percentual de cargas entre a ponta e o fuste das estacas ao longo dos estágios de carregamento apresentadas na Figura 112, onde verifica-se que a resistência de ponta das estacas permuta entre 4% e 5% até 80% da carga aplicada, ou seja, 338 kN. A partir desta, observa-se uma redução da mobilização por atrito lateral, e conseqüentemente um aumento na resistência de ponta, alcançando 18% com uma carga aplicada de 485 kN e um recalque de 45,8 mm.

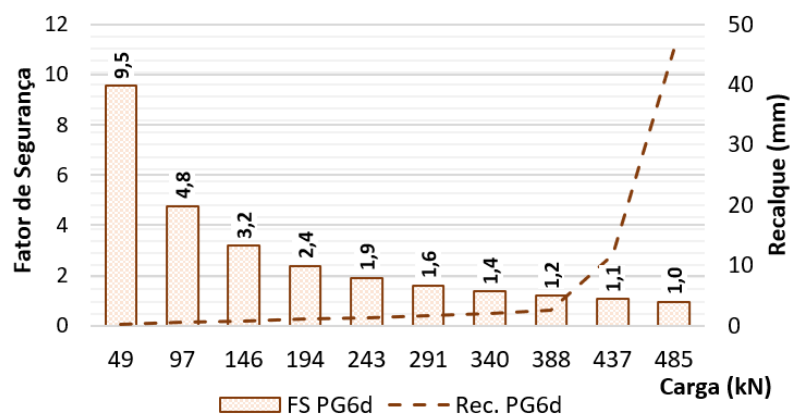
Figura 112 - Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG6d).



Fonte: A autora.

O fator de segurança para cada incremento de carga foi embasado na carga de ruptura convencional (10% do diâmetro da estaca) para cada modelo de fundação. Para o grupo de estacas com espaçamento 6d verifica-se na Figura 113 que o fator de segurança (FS) se reduz a 1,6 em 60% (291 kN) da carga de ensaio, atingindo um FS =1 a 100% da carga (485 kN).

Figura 113 - Fator de segurança no grupo de estacas com espaçamento 6d.



Fonte: A autora.

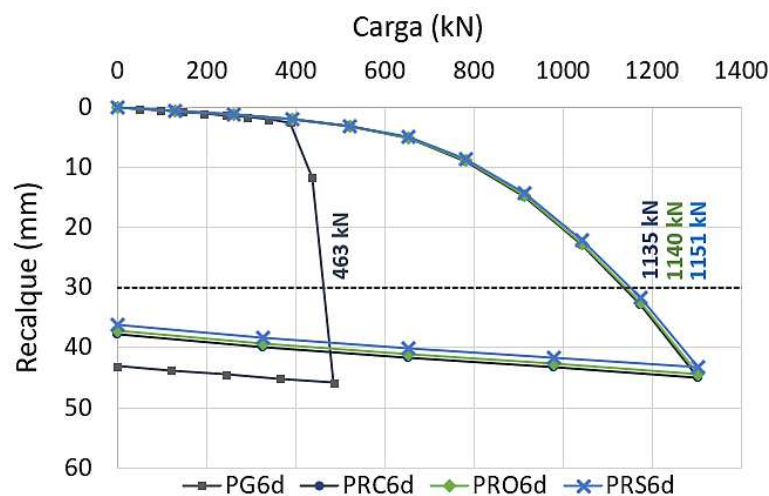
É apresentado na próxima subseção, os resultados comparativos entre o radier estaqueado (com contato radier-solo) e o grupo de estacas (sem contato bloco-solo) com espaçamento 6d.

5.3.3.3 Comparação entre o radier estaqueado e o grupo de estacas (6d)

O comportamento carga vs recalque das fundações em radier estaqueado e em grupo de estacas pode ser comparado na Figura 114. Assim como no espaçamento 4d, no espaçamento 6d verifica-se que o grupo de estacas suportou cargas bem menores que o radier estaqueado. É válido salientar que a única diferença entre as fundações é exclusivamente a presença ou ausência de uma camada de 10 cm de solo sob a área de base do radier.

Nesta mesma figura, observa-se que até aproximadamente 390 kN as curvas carga vs recalque se sobrepõem, o que evidencia a baixa participação do elemento superficial na transferência de cargas do radier estaqueado nesses primeiros estágios de carregamento. A partir dessa carga, quando o grupo de estacas ultrapassa 80% da carga de ensaio observa-se um crescimento repentino no recalque do grupo de estacas, enquanto a curva do radier estaqueado segue uma tendência tênue até atingir o carregamento máximo.

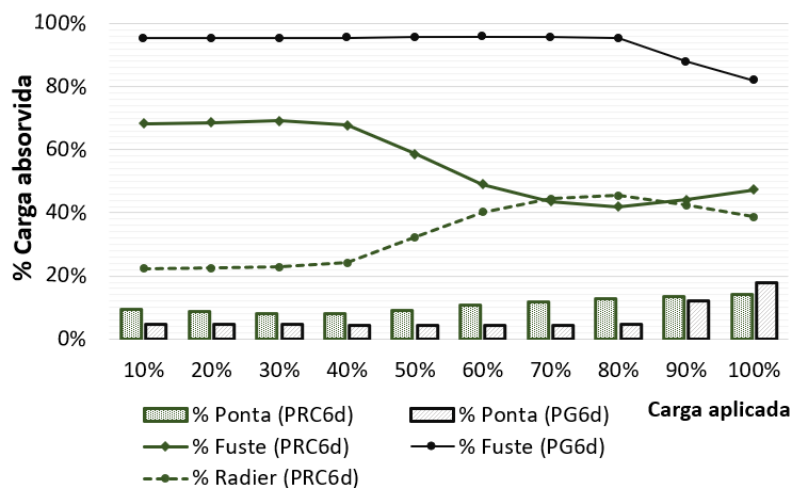
Figura 114 - Comparação entre as curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados e grupo de estacas com espaçamento 6d.



Fonte: A autora.

Apresenta-se na Figura 115 a distribuição de cargas entre os elementos de cada fundação conforme os estágios de carregamento. Neste, é possível observar que a porcentagem de carga do fuste das estacas no radier estaqueado sofre uma redução expressiva a exatamente 80% do carregamento (388 kN) quando apresenta um crescimento repentino do recalque observado na Figura 114. Enquanto no radier estaqueado, ao ultrapassar os 40% do carregamento total, a redução da carga absorvida pelo fuste é replicada ao elemento superficial do radier estaqueado, onde, a 80% da carga chega a suportar uma maior parcela do carregamento.

Figura 115 – Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG6d) e no radier estaqueado (PRC6d).

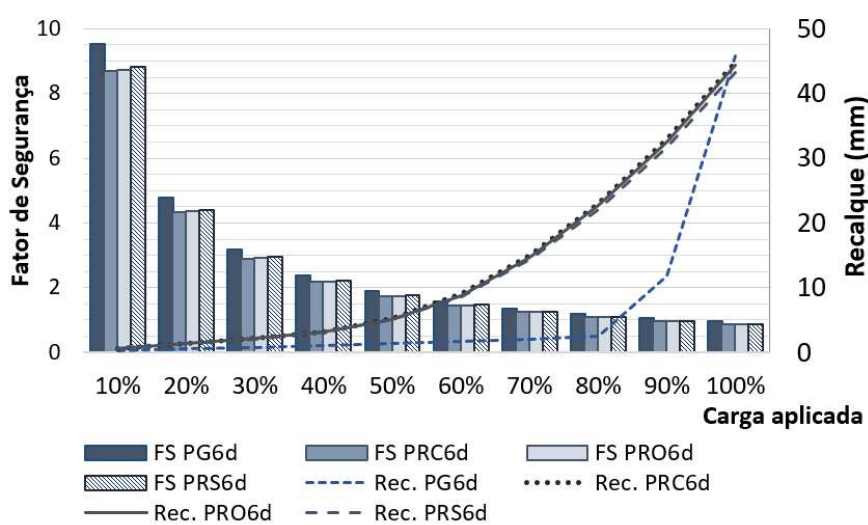


Fonte: A autora.

Neste, é possível observar que a ausência do contato radier solo no grupo de estacas possibilitou uma maior porcentagem de carga absorvida pelo fuste das estacas quando comparado com o radier estaqueado. Verifica-se em termos de porcentagem de carga que há uma maior mobilização do atrito lateral no grupo de estacas representado pela elevada parcela de carga absorvida pelo fuste quando comparado ao radier estaqueado, na qual a transferência de cargas passa a ser compartilhada com o radier, e este absorve uma significativa parcela de carga ao longo dos estágios de carregamento.

Baseado nesse contexto, afirma-se que o elemento superficial de fundação quando em contato com o solo altera significativamente o modo de transferência de cargas entre os elementos da fundação, permitindo uma maior capacidade de carga do sistema. Todavia, ao comparar os fatores de segurança (Figura 116), verifica-se que o grupo de estacas apresenta resultados sensivelmente maiores quando comparados com os radiers estaqueados.

Figura 116 – Fatores de segurança para os radiers estaqueados (PR6d) e grupo de estacas (PG6d).



Fonte: A autora.

5.3.4 Radiers estaqueados e grupo de estacas com espaçamento 8d

É apresentado nesta subseção os resultados referentes aos radiers estaqueados e grupo de estacas com espaçamento 8d (240 cm).

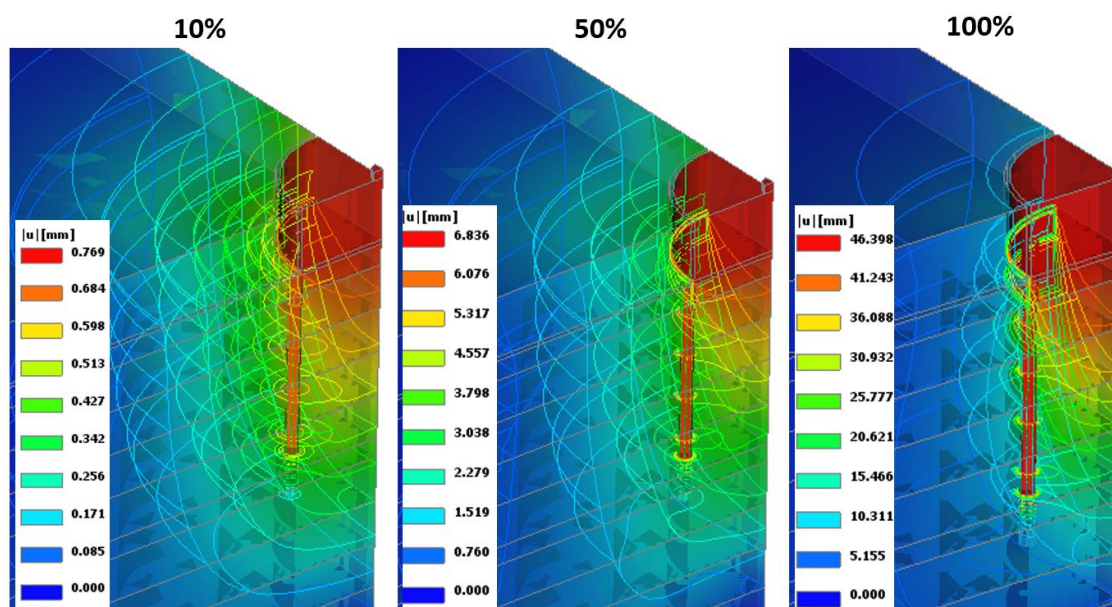
5.3.4.1 Radiers estaqueados: PRC8d, PRO8d e PRS8d

Para os radiers estaqueados com espaçamento $8d$ a carga máxima de ensaio alcançada foi de 1800 kN para todas as geometrias. Vale enfatizar que essa carga foi padronizada a partir de recalques máximos estipulados na faixa de 40 a 60 mm e a partir da carga última encontrada para uma geometria, esta foi replicada para as outras geometrias com o intuito de uniformizar os parâmetros de comparação.

As Figuras 117, 118 e 119 apresentam a evolução dos deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises respectivamente para os radiers estaqueados: circular PRC8d, octogonal PRO8d e quadrado PRS8d a 10% (180 kN), 50% (900 kN) e 100% (1800 kN) do carregamento máximo adotado.

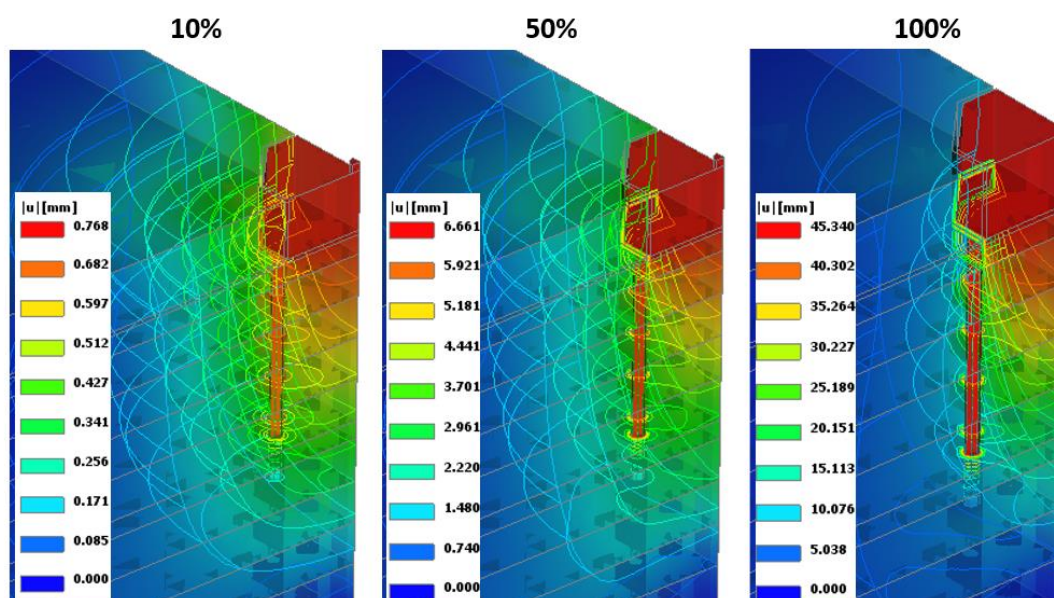
Em todas as geometrias (Figuras 117, 118 e 119) verificam-se que o maior grau de deslocamento é encontrado na região interna imediatamente abaixo do radier estaqueado. Nota-se que essa mobilização dissipa gradualmente ao longo do fuste até a ponta da estaca, indicando o bulbo de tensões resultante do contato do radier-solo apresentando uma maior intensidade quando se eleva a carga aplicada a 100% do carregamento. Além disso, observa-se uma mobilização do solo abaixo da ponta da estaca que é proveniente da menor resistência do solo nessa região, na qual foi empregada para simular as características de uma estaca escavada.

Figura 117 - Deslocamentos no PRC8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



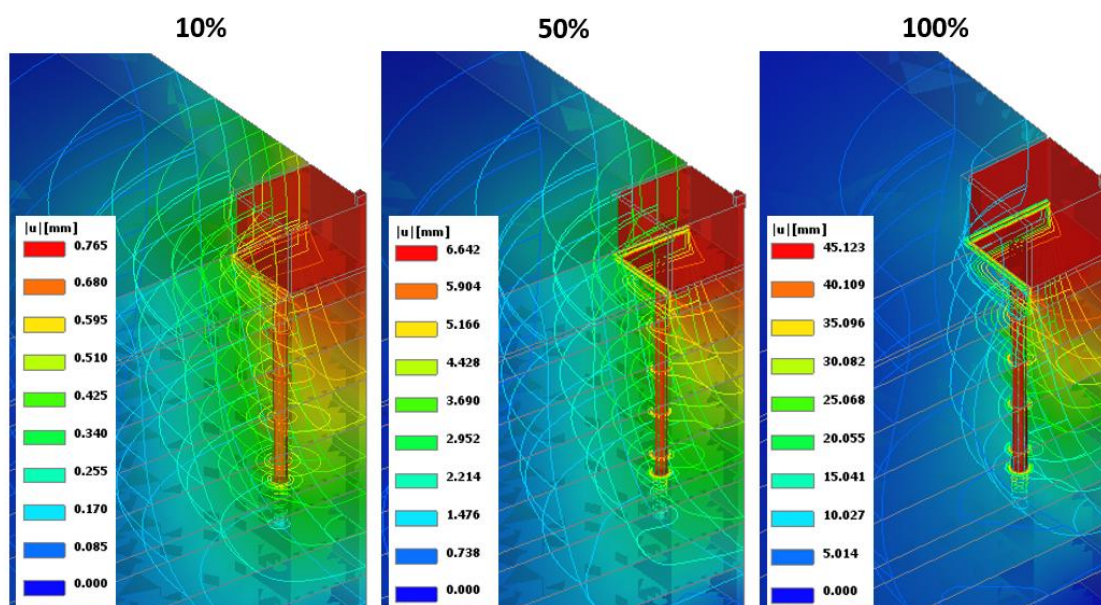
Fonte: A autora.

Figura 118 - Deslocamentos no PRO8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

Figura 119 - Deslocamentos no PRS8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.

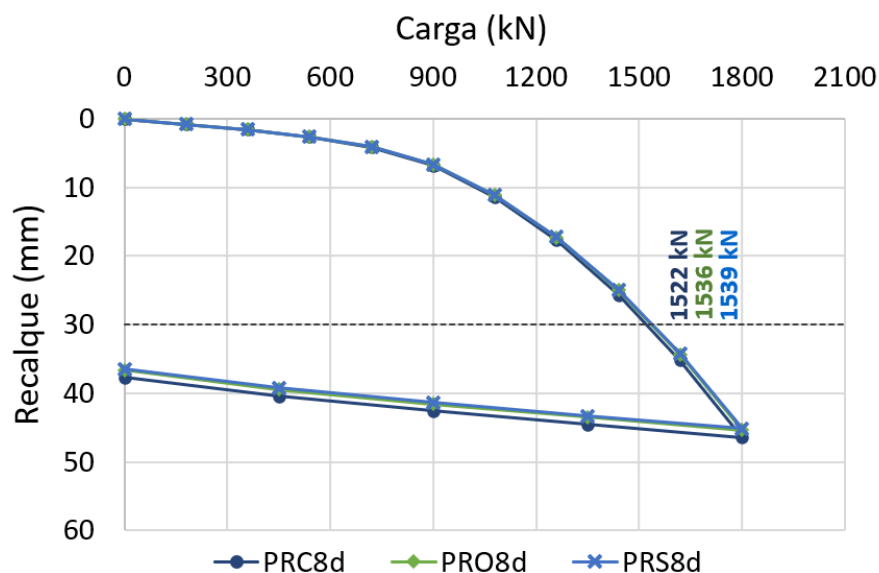


Fonte: A autora.

O comportamento carga vs recalque ao longo dos 11 estágios de carregamento (de 0% a 100%) e 4 de descarregamento (75%, 50%, 25% e 0%) entre as diferentes geometrias de base da fundação em radier estaqueado com espaçamento 8d, são apresentados na Figura 120. Quando

comparadas com os espaçamentos 4d e 6d observa-se que no espaçamento 8d as curvas apresentam resultados mais próximos com a variação da geometria.

Figura 120 - Curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados PRC8d, PRO8d e PRS8d.

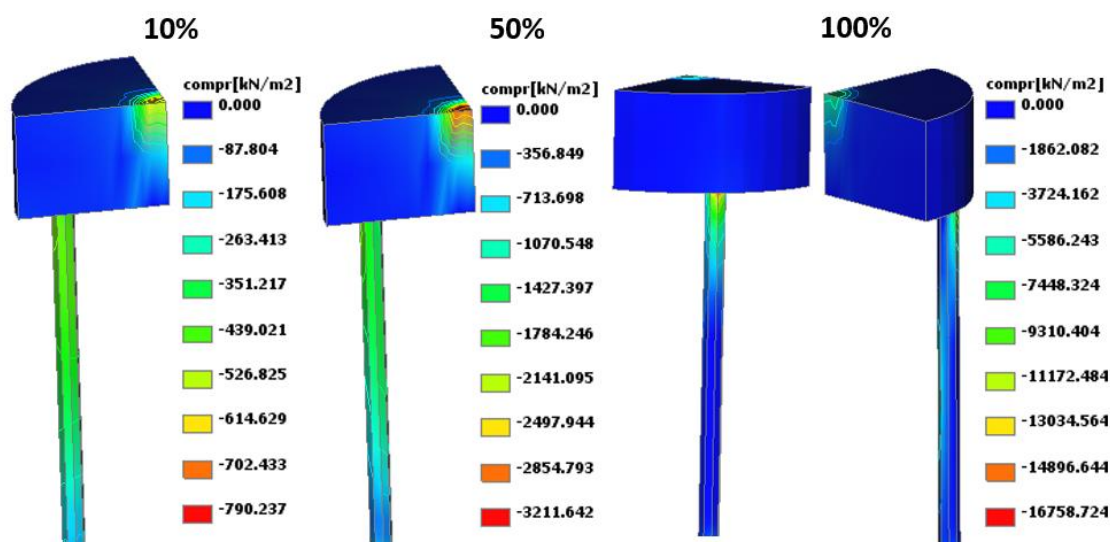


Fonte: A autora.

Com relação à carga de ruptura convencionalizada a um recalque especificado em 10% do diâmetro da estaca, verifica-se que o radiér estaqueado quadrado (PRS8d) apresenta uma maior carga de ruptura, com 1539 kN seguido pelas geometrias de base octogonal (PRO8d) com 1536 kN e circular (PRC8d) com 1522 kN, totalizando uma diferença percentual máxima entre as cargas convencionalizadas de 1,1%. Constata-se, portanto, que a variação entre as cargas convencionalizadas para as diferentes geometrias estudadas são valores muito pequenos que podem ser considerados insignificantes na escala da geotecnia. Para se ter uma ideia, a diferença entre os recalques máximos a 100% do carregamento não ultrapassaram 1,3 mm.

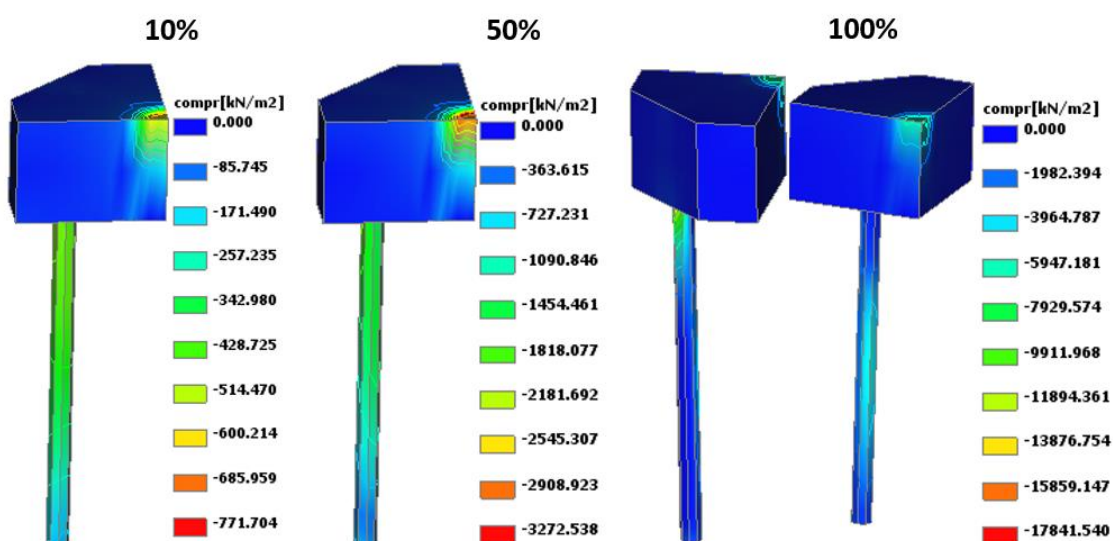
As tensões de compressão distribuídas nos elementos de fundação dos radiers estaqueados circular PRC8d, octogonal PRO8d e quadrado PRS8d podem ser observadas nas Figuras 121, 122 e 123, respectivamente. Comparando as diferentes geometrias, observa-se uma variação entre as tensões máximas de compressão apresentando maior divergência ao aproximar da carga máxima de ensaio (1800 kN). Além disso, verifica-se nas fundações superficiais (radiers), que as tensões de compressão são predominantes em torno da região sob o pilar de aplicação da carga, no qual esse efeito é replicado na extremidade do topo da estaca oposta a esse pilar, apresentando uma maior incidência a 100% do carregamento.

Figura 121 - Compressão no PRC8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

Figura 122 - Compressão no PRO8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.

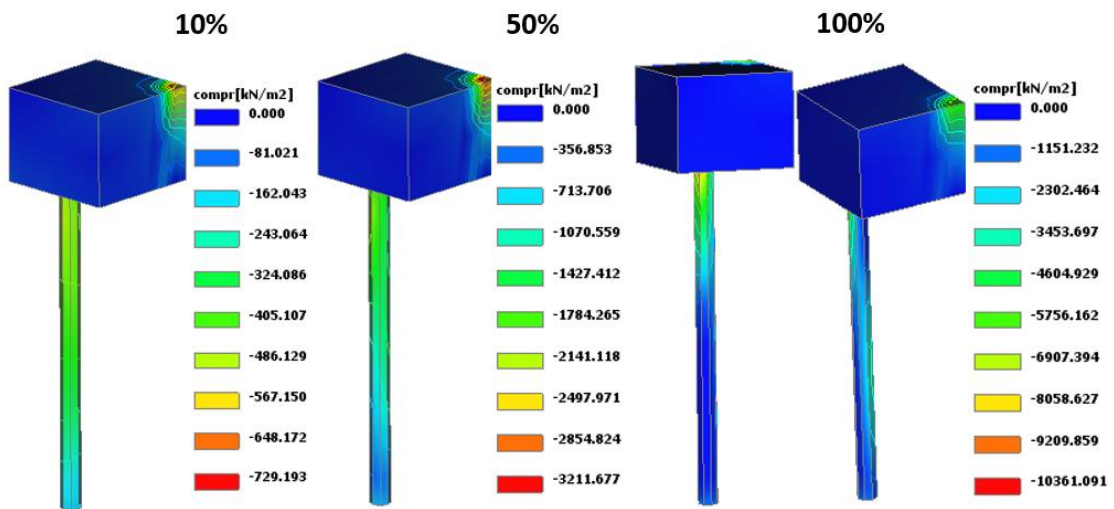


Fonte: A autora.

Nas Figuras 124, 125 e 126, são apresentados os gráficos de transferência de carga axial média e de atrito lateral ao longo do fuste para uma estaca de cada um dos radiers estaqueados circular, octogonal e quadrado respectivamente em 10%, 50% e 100% do carregamento. A partir destas, observa-se que os resultados entre as três geometrias apresentam valores semelhantes apenas nos primeiros estágios de carga indicando a baixa influência do radier nesses estágios, entretanto, ao aumentar o carregamento os resultados se dissipam. Ao contrário dos

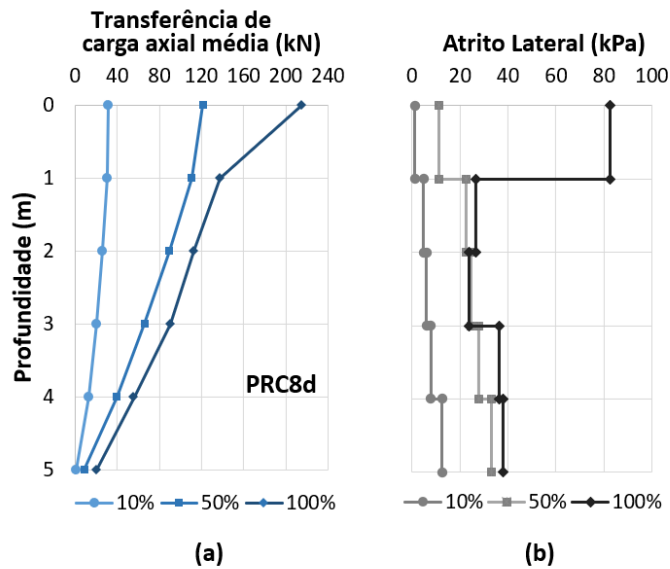
espaçamentos 4d e 6d, no espaçamento 8d verifica-se uma tendência no esgotamento da mobilização do atrito lateral mais expressivo nas geometrias circular e octogonal a partir do primeiro metro da estaca, evidenciado pela analogia entre as retas do atrito lateral a 50% e 100% do carregamento. Para maiores detalhes acerca da transferência de carga axial média ao longo da estaca em todos os estágios de carregamento consultar o APÊNDICE C.

Figura 123 - Compressão no PRS8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



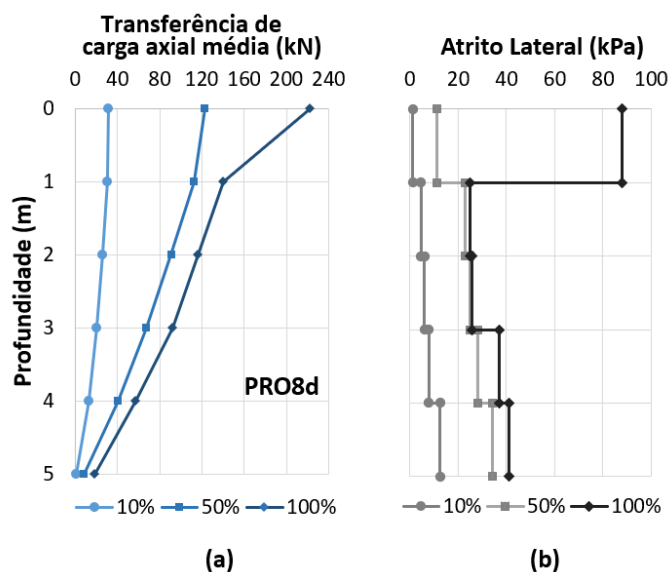
Fonte: A autora.

Figura 124- Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRC8d.



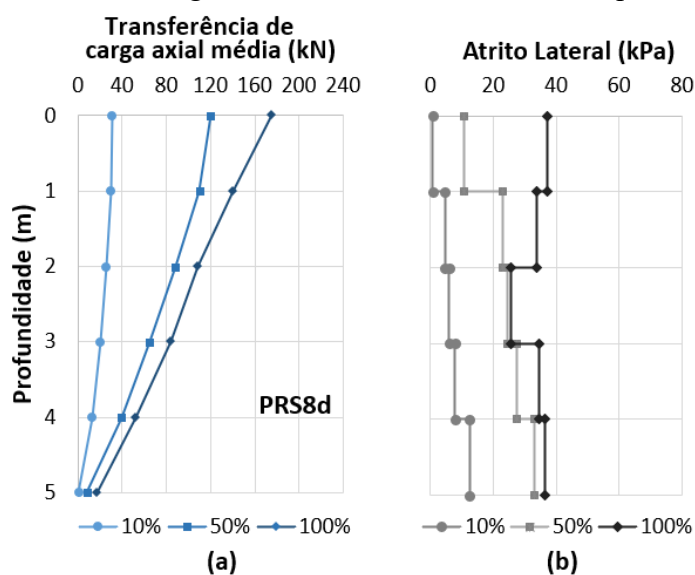
Fonte: A autora.

Figura 125 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRO8d.



Fonte: A autora.

Figura 126 - Transferência de cargas em uma estaca do radier estaqueado PRS8d.

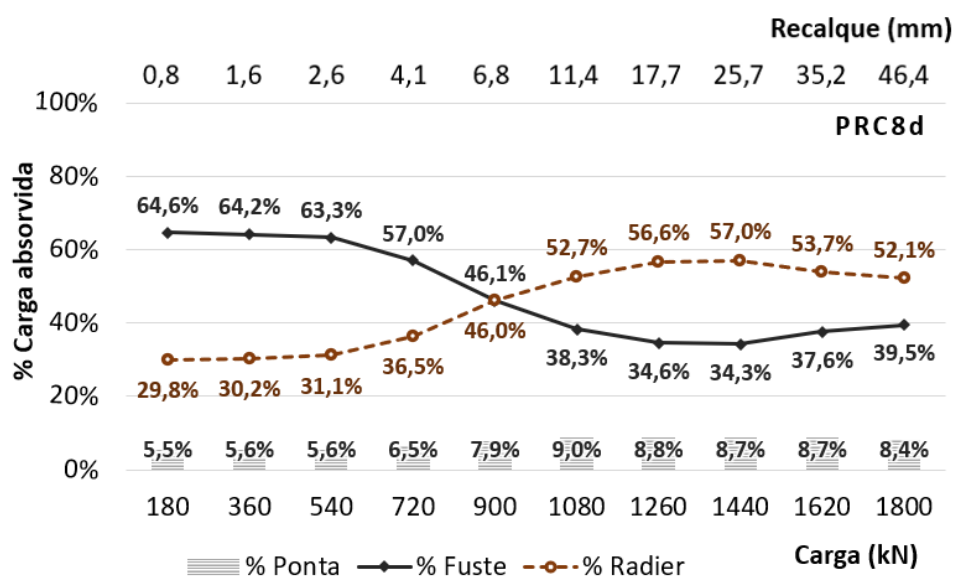


Fonte: A autora.

Entretanto, observa-se uma maior mobilização da carga axial média e atrito lateral na região da estaca imediatamente abaixo do elemento superficial devido à presença do radier. Assim como no espaçamento 6d, neste, a geometria quadrada apresentou uma menor influência no comportamento das estacas quando comparado às outras geometrias, ou seja, a transferência de cargas pelo contato radier-solo na geometria quadrada provocou um menor aumento do nível de tensões no solo, resultando numa menor mobilização do atrito lateral quando comparado à outras geometrias de base.

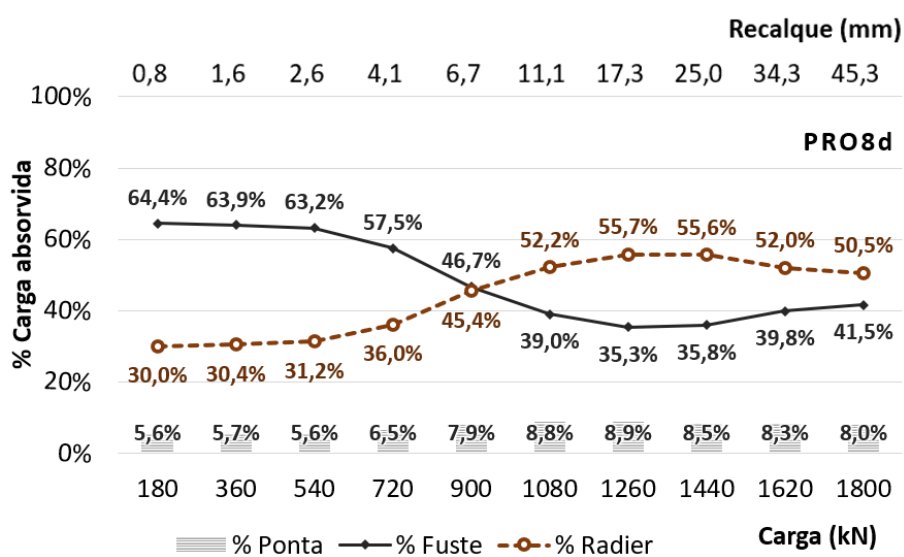
Esse comportamento pode ser melhor visualizado a partir dos gráficos de distribuição percentual de cargas entre o radier e as estacas ao longo dos estágios de carregamento, para os radiers estaqueados: circular (Figura 127) octogonal (Figura 128) e quadrado (Figura 129) onde verifica-se que os menores valores de capacidade de carga axial média e de atrito lateral do PRS8d é correspondente a uma maior parcela de carga absorvida pelo radier, quando comparado com outras geometrias.

Figura 127 - Distribuição de cargas no radier estaqueado circular PRC8d.



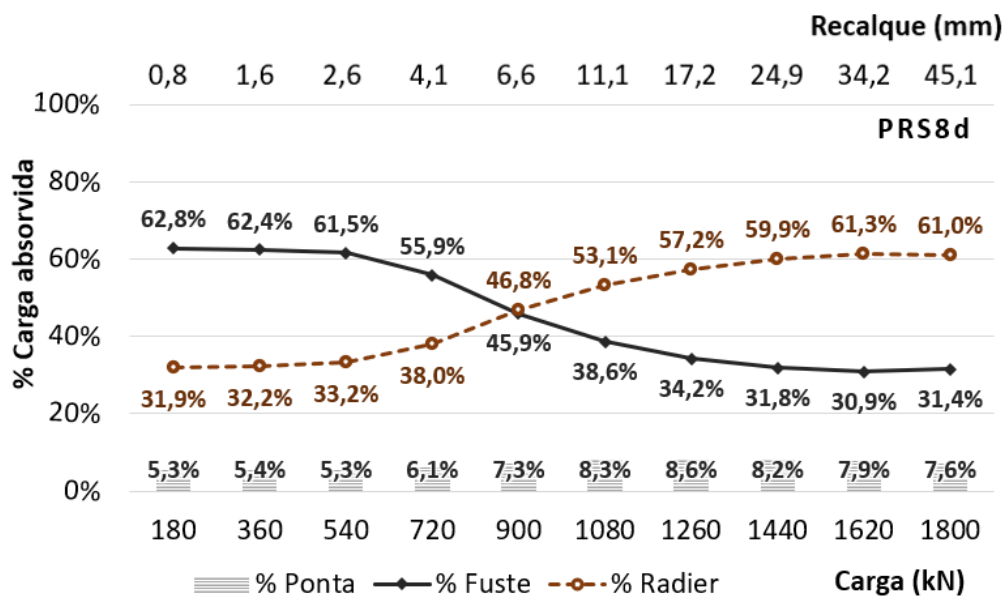
Fonte: A autora.

Figura 128- Distribuição de cargas no radier estaqueado octogonal PRO8d.



Fonte: A autora.

Figura 129 - Distribuição de cargas no radier estaqueado quadrado PRS8d.



Fonte: A autora.

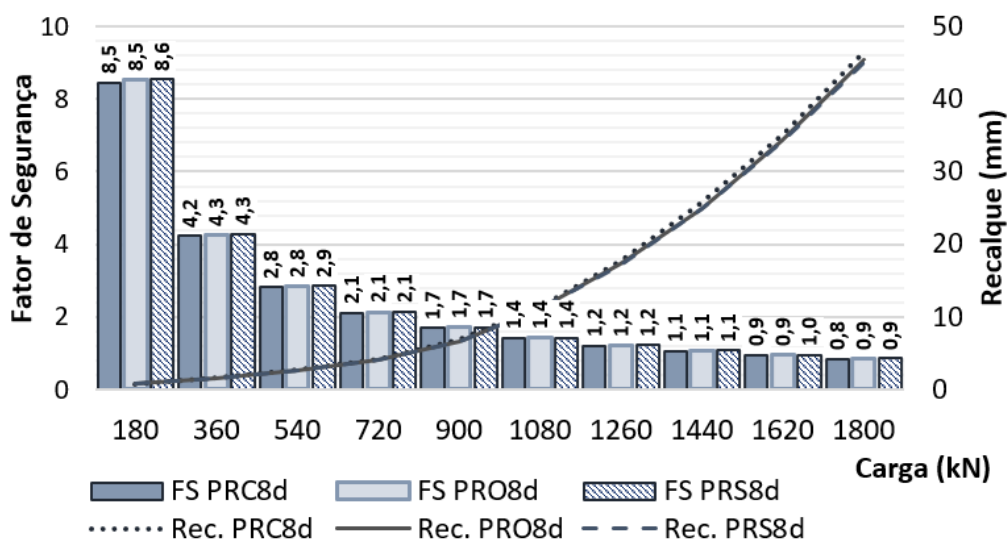
Para todos os radiers estaqueados com espaçamento 8d verifica-se que a carga absorvida pelo radier supera a porcentagem de carga absorvida pelo fuste a partir de 50% do carregamento (900 kN), com um recalque de aproximadamente 6,8 mm, a redução da carga absorvida pelo fuste produz um aumento da capacidade de ponta ao mesmo tempo que a carga absorvida pelo contato radier-solo também aumenta. Esse comportamento apresenta-se com maior intensidade no PRS8d, onde há uma maior participação do bloco na transferência de cargas ao solo desde os primeiros estágios quando comparado com as outras geometrias de base.

Em termos de tensão, considerando que a tensão absorvida pelo radier é a razão entre a carga absorvida pelo contato radier solo e a área líquida de contato, para 100% do carregamento os valores de tensão do radier resultam em 72 kPa para o PRC8d, 70 kPa para o PRO8d e 85 kPa para o PRS8d.

O fator de segurança para cada incremento de carga foi embasado na carga de ruptura convencionada em 10% do diâmetro da estaca para cada modelo de fundação. Para os radiers estaqueados com espaçamento 8d verifica-se na Figura 130 que o fator de segurança (FS) é semelhante em cada geometria de base.

Observa-se que o fator de segurança se reduz a 1,7 a 50% (900 kN) da carga de ensaio para todas as geometrias, e indica o esgotamento da fundação com um FS < 1 a 90% da carga de ensaio (1620 kN) para as geometrias circular e octogonal e a 100% da carga de ensaio (1800 kN) para a geometria quadrada.

Figura 130 - Fator de segurança nos radiers estaqueados s=8d.



Fonte: A autora.

Além das fundações em radier estaqueado foi analisado também as fundações em grupo de estacas, apresentadas na subseção 5.3.4.2.

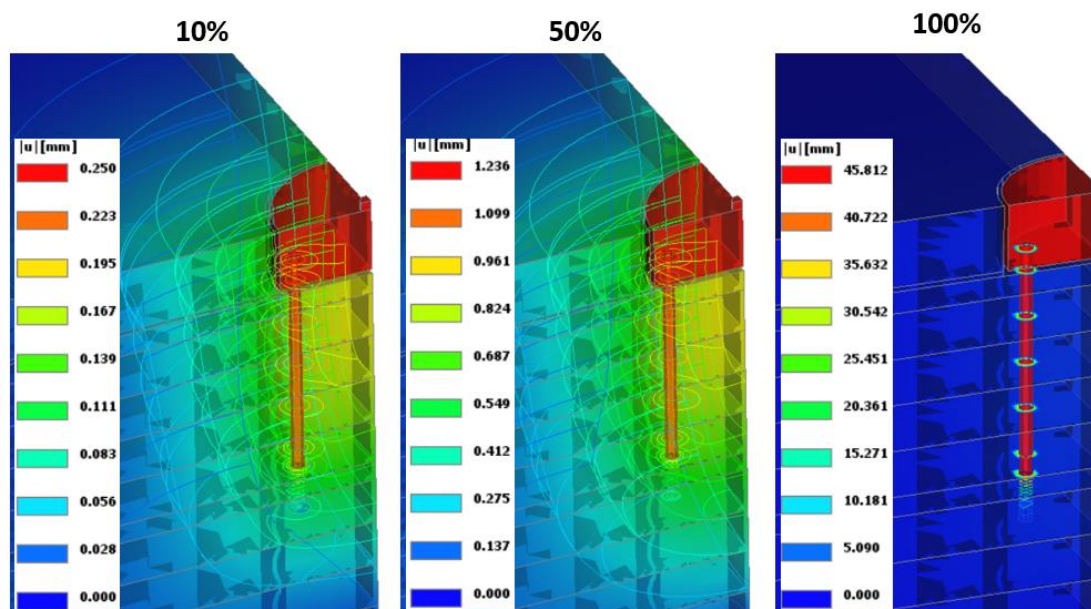
5.3.4.2 Grupo de estacas, PG8d

Como já mencionado, para as fundações do tipo grupo de estacas em que o bloco é suprimido do contato com o solo, a variação da geometria de base não interfere no comportamento da fundação uma vez que apenas as estacas suportam toda a carga e o bloco participa apenas na distribuição e transferência de cargas às estacas. Assim como nos outros espaçamentos, no espaçamento 8d o grupo de estacas foi estudado a partir de uma única geometria de bloco circular, considerando esta, representativa uma vez que o elemento superficial permanece desconectado do solo.

Para esse espaçamento, obteve-se uma carga máxima de ensaio em 430 kN, padronizada a partir de recalques determinados entre 40 e 60 mm. A evolução dos deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises no grupo de estacas pode ser verificada na Figura 131, na qual

verifica-se deslocamentos máximos de 0,25 mm, 1,23 mm e 45,81 mm para 10% (50 kN), 50% (250 kN) e 100% (500 kN) do carregamento adotado, nessa ordem.

Figura 131 - Deslocamentos no PG8d a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



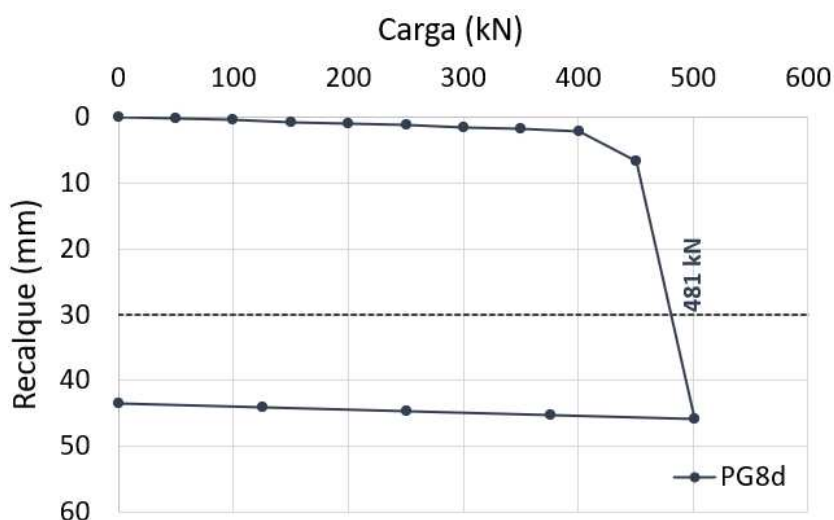
Fonte: A autora.

Conforme os outros espaçamentos analisados, observa-se que a mobilização do solo se conserva em torno do fuste e da ponta da estaca com maior intensidade no carregamento máximo aplicado, tendo em vista que no grupo de estacas a distribuição de cargas é efetuada apenas pelas estacas a partir da sua área lateral e ponta. A região imediatamente abaixo do radier que anteriormente era submetida a um grande bulbo de tensões provenientes do bloco, agora é intensificado apenas em torno da estaca.

Na Figura 132 é possível observar o comportamento carga vs recalque ao longo dos 11 estágios de carregamento (de 0% a 100%) e 4 de descarregamento (75%, 50%, 25% e 0%) para o grupo de estacas com espaçamento 4d. Verifica-se que a carga de ruptura convencional a um recalque especificado em 10% do diâmetro da estaca (30mm) resulta em 481 kN.

Seguindo o comportamento dos outros espaçamentos, neste nota-se que até 70% do carregamento, ou seja, 400 kN os deslocamentos não ultrapassaram 2,3 mm, apresentando a partir deste estágio um crescimento acentuado, no qual salta de 6,7mm com 386 kN para um deslocamento de 45,8 mm a uma carga de 500 kN.

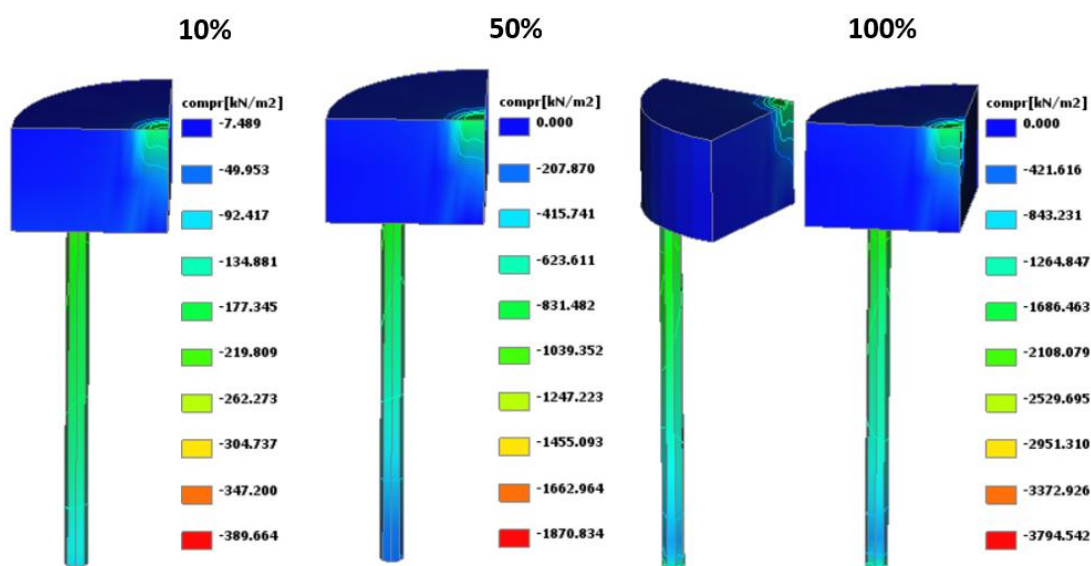
Figura 132- Curvas carga vs recalque do grupo de estacas com espaçamento 8d.



Fonte: A autora.

As tensões de compressão distribuídas nos elementos do grupo de estacas são apresentadas na Figura 133. Nota-se que o efeito de compressão é predominante na região em torno do bloco sob o pilar de aplicação da carga onde é replicado com maior incidência na extremidade do topo da estaca oposta a esse pilar, principalmente a 100% do carregamento. Os valores da tensão máxima de compressão se elevam de 390 kPa a 1871 kPa e 3795 kPa para 10%, 50% e 100% da carga de ensaio.

Figura 133 - Compressão no grupo de estacas (PG8d) a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.

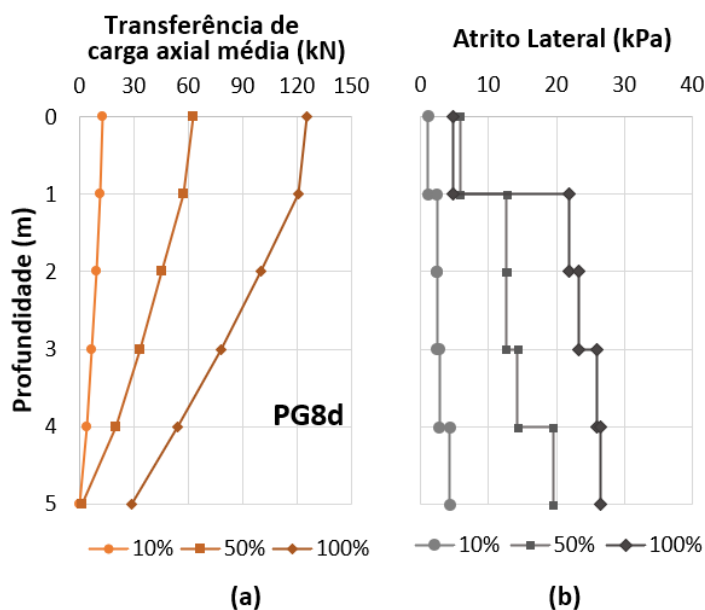


Fonte: A autora.

É notável que as tensões de compressão se dissipam conforme aumenta a profundidade da estaca. Esse comportamento pode ser constatado na Figura 134 acerca da transferência de carga axial média e de atrito lateral ao longo do fuste de uma das estacas do grupo, no qual verifica-se que o crescimento da carga axial média nos primeiros metros da estaca no PG é menos acentuado do que no PR devido à ausência das tensões adicionais que anteriormente eram causadas pelo contato radier-solo.

A partir da Figura 134, verifica-se uma mudança no comportamento do grupo de estacas quando comparado aos gráficos de transferência de carga e atrito lateral dos espaçamentos 4d e 6d, onde anteriormente apresentavam uma tendência triangular de mobilização do atrito da ponta para o topo da estaca, porém no espaçamento 8d observa-se uma constância nos resultados ao longo do fuste a partir do primeiro metro da estaca. Para maiores detalhes acerca da transferência de carga axial média ao longo da estaca em todos os estágios de carregamento consultar o APÊNDICE C.

Figura 134 - Transferência de cargas em uma estaca do grupo de estacas (PG8d).

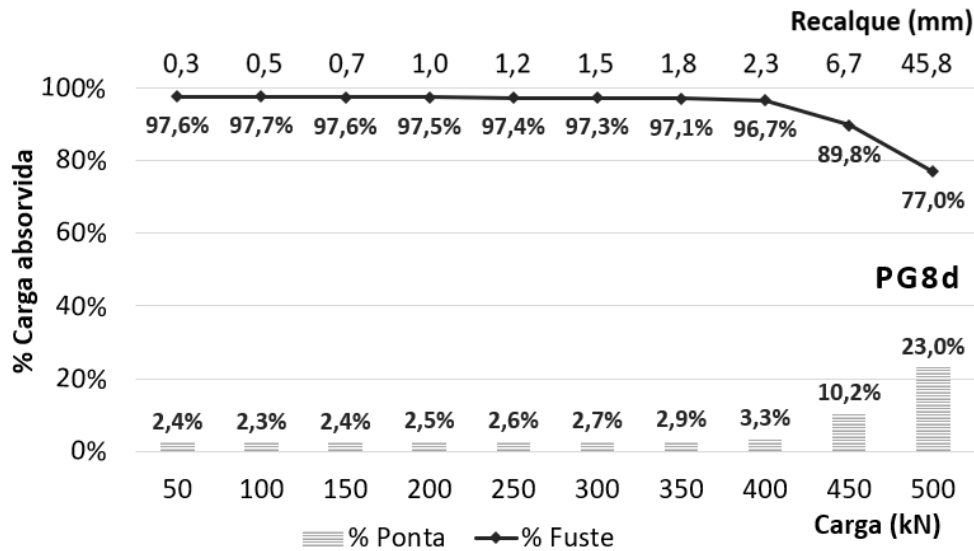


Fonte: A autora.

Com estes resultados, é possível esboçar a distribuição percentual de cargas entre a ponta e o fuste das estacas ao longo dos estágios de carregamento apresentados na Figura 135, onde verifica-se que a carga absorvida pelo fuste e ponta das estacas se mantém constante até 80% da carga aplicada, ou seja, 400 kN. A partir desta, observa-se um aumento acentuado na

resistência de ponta, bem como uma elevação brusca nos recalques alcançando, no último estágio de carregamento, 23% de carga absorvida pela ponta com um recalque de 45,8 mm.

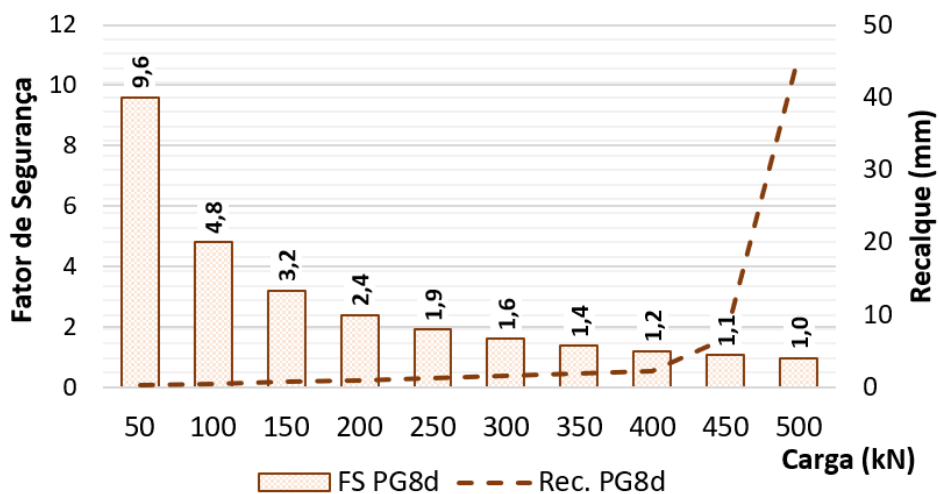
Figura 135 - Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG8d).



Fonte: A autora.

O fator de segurança para cada incremento de carga foi fundamentado na carga de ruptura convencional em 10% do diâmetro da estaca para cada modelo de fundação. No grupo de estacas com espaçamento 8d observa-se na Figura 136 que o fator de segurança se reduz a 1,6 a 60% (300 kN) da carga, atingindo um FS =1 a 100% da carga de ensaio (500 kN).

Figura 136 - Fator de segurança no grupo de estacas com espaçamento $s=8d$.



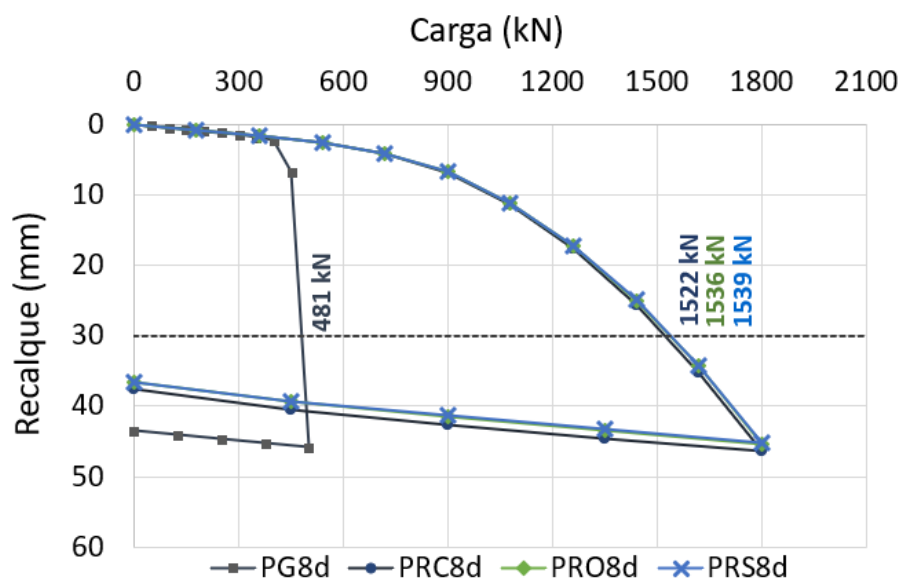
Fonte: A autora.

É apresentado na subseção 5.3.4.3, os resultados comparativos entre o radier estaqueado e o grupo de estacas com espaçamento 8d.

5.3.4.3 Comparação entre o radier estaqueado e o grupo de estacas (8d)

Em consonância com os espaçamentos 4d e 6d, nesse espaçamento o grupo de estacas também apresenta cargas menores que a fundação em radier estaqueado, conforme pode ser observado na Figura 137. Tal comportamento se justifica devido à presença do radier que passa a compartilhar as cargas que antes eram suportadas apenas pelo grupo de estacas.

Figura 137 – Comparação entre as curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados (PR) e grupo de estacas (PG) com espaçamento 8d.

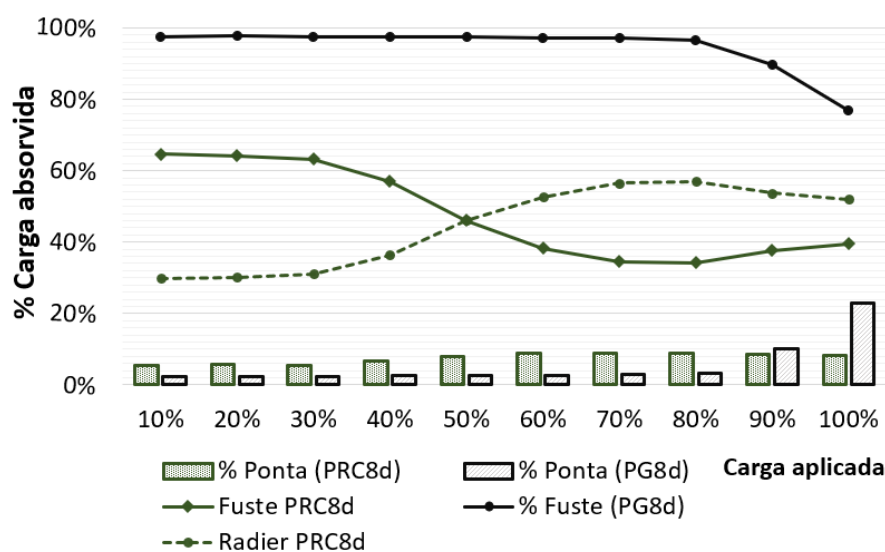


Fonte: A autora.

Comparando as curvas carga vs recalque entre os radiers estaqueados e grupo de estacas verifica-se que até 340 kN as curvas se sobrepõem, o que evidencia a baixa participação do elemento superficial na transferência de cargas do radier estaqueado nesses primeiros estágios de carregamento. A partir dessa carga, quando o grupo de estacas atinge 80% da carga de ensaio, observa-se um crescimento repentino no recalque do grupo de estacas ao mesmo tempo que a curva do radier estaqueado segue uma tendência tênue até atingir o carregamento máximo.

A distribuição de cargas entre os elementos de cada fundação conforme os estágios de carregamento é apresentada na Figura 138. Na qual observa-se em termos de porcentagem de carga que há uma maior mobilização do atrito lateral no grupo de estacas representado pela elevada parcela de carga absorvida pelo fuste quando comparado ao radier estaqueado.

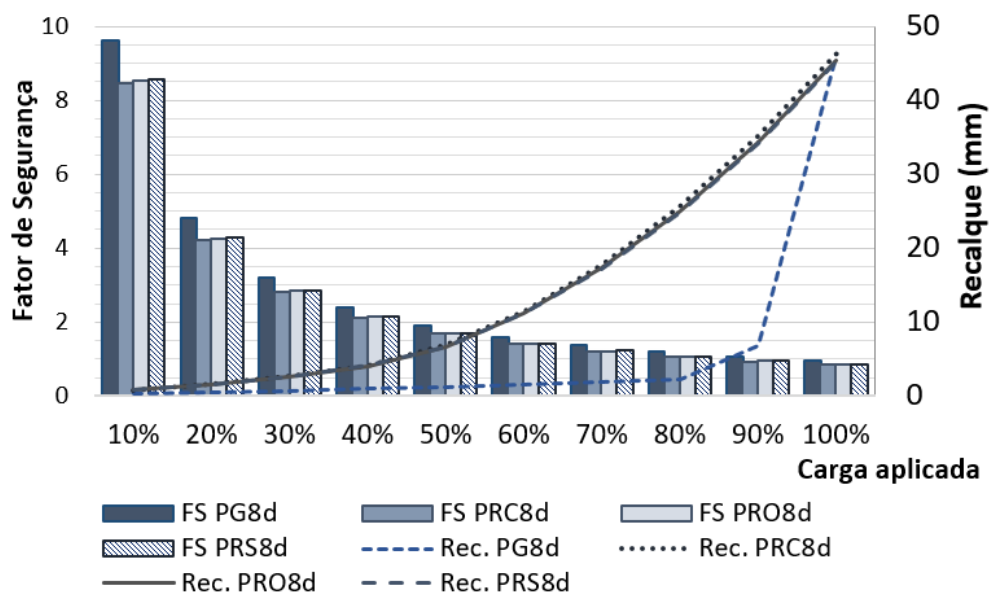
Figura 138 – Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG8d) e no radier estaqueado (PRC8d).



Fonte: A autora.

Baseado nesse contexto, observa-se que o elemento superficial de fundação quando em contato com o solo altera significativamente o modo de transferência de cargas entre os elementos da fundação, permitindo uma maior capacidade de carga do sistema. Todavia, ao comparar os fatores de segurança (Figura 139), verifica-se que o grupo de estacas apresenta resultados sensivelmente maiores em consonância com os espaçamentos 4d e 6d.

Figura 139 – Comparação do Fator de Segurança entre o grupo de estacas (PG8d) e radiers estaqueados (PR8d).



Fonte: A autora.

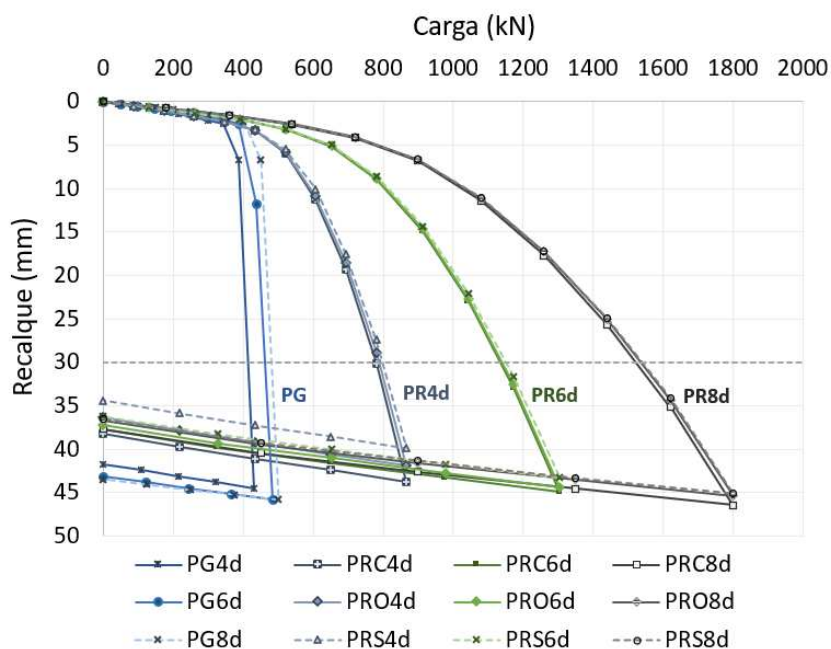
6 COMPILAÇÃO DAS SIMULAÇÕES E DISCUSSÕES

A fim de obter um melhor entendimento acerca das fundações em radier estaqueado e grupo de estacas por diferentes metodologias de cálculo, desde as simplificadas às metodologias tridimensionais, resume-se nesse capítulo uma compilação entre os principais resultados obtidos nas análises desta pesquisa.

6.1 ANÁLISE TRIDIMENSIONAL

O comportamento carga vs recalque das fundações em radier estaqueado e grupo de estacas modeladas tridimensionalmente foram sintetizados na Figura 140 para uma melhor percepção e comparação entre as diferentes fundações nos seus respectivos espaçamentos entre estacas. Nesta, observa-se que a capacidade de carga das fundações em radier estaqueado é substancialmente maior que no grupo de estacas em virtude da contribuição do contato bloco-solo na fundação.

Figura 140 – Curvas carga vs recalque dos radiers estaqueados (PR) e grupo de estacas (PG).



Fonte: A autora.

Tendo como base a carga de ruptura convencionada a 10% do diâmetro da estaca (30 mm) constata-se uma redução na capacidade de carga entre os radiers estaqueados (PR) e grupos de

estacas (PG) relacionado a supressão do contato bloco-solo, que conforme analisado anteriormente, proporciona um aumento significativo da capacidade de carga do sistema de fundação. Para o espaçamento $4d$ essa redução da capacidade de carga entre o PR e PG resulta em 73%, chegando em 79% para o $s=6d$ e 84% para o $s=8d$.

De modo geral, o aumento do espaçamento e conseqüentemente o aumento da área líquida de contato entre o radier e o solo produz resultados mais divergentes entre os diferentes espaçamentos no radier estaqueado do que no grupo de estacas. Isso pode ser justificado, pois, no radier estaqueado além da complexa interação entre estacas, que eleva as tensões no solo em torno das estacas proveniente do contato bloco-solo, há ainda a influência do elemento superficial, no qual o aumento do espaçamento eleva sua área líquida de contato intensificando assim a participação do radier no sistema.

Nota-se, portanto, que a variação do espaçamento está diretamente ligada à resposta carga vs recalque no qual o aumento do espaçamento entre estacas é diretamente proporcional à uma maior capacidade de carga do sistema e menores deslocamentos, assim como os resultados observados por Celik (2019), Kumar e Kumar (2018), Cho et al. (2012), Tran, Kimura e Boonyatee (2012) e Small e Zhang (2006).

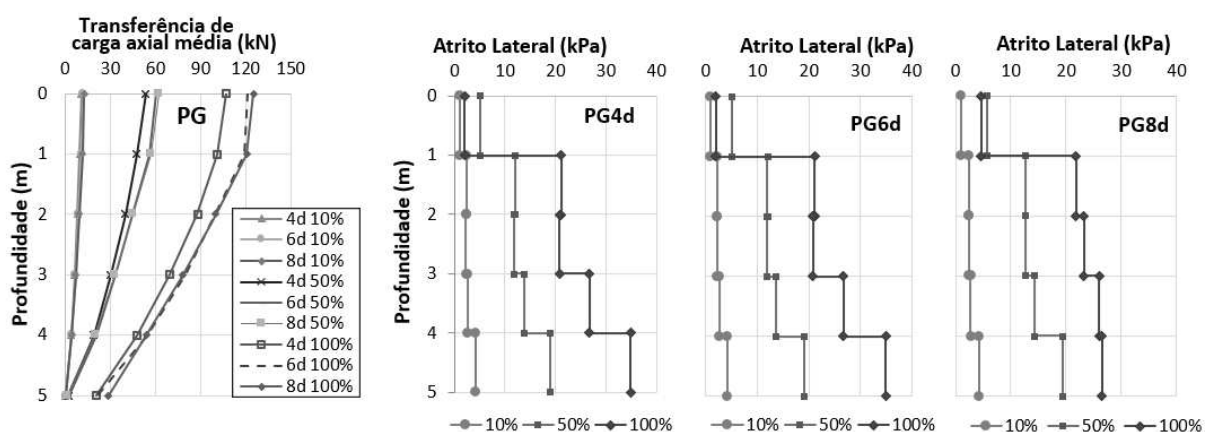
Em grupos de estacas com pequenos espaçamentos, as tensões adicionais provenientes de outra estaca são mais intensas. Sabe-se que quanto menor a distância entre estacas, maior é a sobreposição do bulbo de tensões. Naturalmente ao elevar essa distância menor será as tensões adicionais provocadas por uma estaca vizinha, e conseqüentemente menor será o recalque adicional provocado por outra estaca. Como destaca Nguyen, Jo e Kim (2013): um espaçamento entre estacas pequeno causa grandes recalques adicionais provenientes de outra estaca, mas quando esse espaçamento é grande o recalque adicional provocado por outra estaca torna-se pequeno e o comportamento destas estacas tendem ao comportamento de uma estaca única.

Ainda sobre a Figura 140, observa-se que a resposta carga vs recalque é mais intensa com o aumento do espaçamento nos radiers estaqueados do que no grupo de estacas. Baseado na carga de ruptura convencionada a 10% do diâmetro da estaca, verifica-se um aumento de 69% na capacidade de carga do radier estaqueado ao elevar o espaçamento de $s=4d$ para $s=6d$, e de 75% entre os espaçamentos $s=6d$ e $s=8d$.

Para o grupo de estacas, constata-se que a variação da carga entre os espaçamentos $s=4d$ e $s=6d$ é maior do que quando comparado com a variação entre $6d$ e $8d$. Tendo como base a carga de ruptura convencionada a 10% do diâmetro da estaca (30 mm) verifica-se que a taxa de incremento entre os espaçamentos $s=4d$ e $s=6d$ resulta em aproximadamente 12% enquanto do espaçamento $s=6d$ pro $s=8d$ essa carga eleva-se apenas 4% (Figura 140) o que indica que há um valor de espaçamento ótimo no qual o aumento do espaçamento não justifica o baixo rendimento da capacidade de carga no grupo de estacas.

Esse comportamento se reflete nos diagramas de transferência de carga axial média das fundações em grupos de estacas. Na Figura 141 observa-se que a distribuição de cargas a 100% da carga de ensaio entre os espaçamentos $s=4d$ e $s=6d$ apresentam-se mais afastados do que quando se eleva de $s=6d$ para $s=8d$, no qual se observa uma sobreposição das curvas no $s=6d$ e $s=8d$ com uma maior participação de resistência ponta no espaçamento $8d$ indicado pela maior parcela de carga que chega na ponta da estaca (5 m).

Figura 141 – Comparação entre os grupos de estacas: (PG) transferência de cargas axial média para $s=4d$, $6d$ e $8d$, (PG4d) atrito lateral para $s=4d$, (PG6d) atrito lateral para $s=6d$ e (PG8d) atrito lateral para $s=8d$.

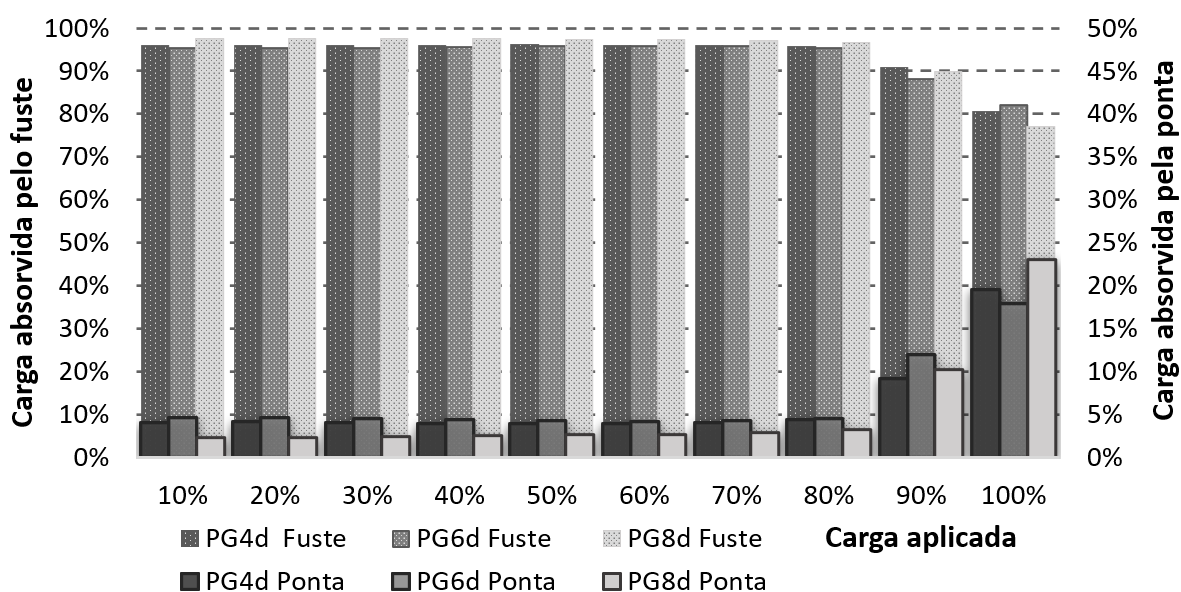


Fonte: A autora.

Em termos de mobilização do atrito lateral verifica-se que os espaçamentos $s=4d$ e $s=6d$ seguem a mesma tendência triangular de mobilização da ponta para o topo da estaca, ao contrário do espaçamento $s=8d$ em que se observa uma constância na mobilização do atrito lateral ao longo do fuste a partir do primeiro metro da estaca (Figura 141).

É apresentado na Figura 142 a distribuição de carga absorvida pelo fuste e ponta dos grupos de estacas onde a parcela de resistência lateral se mantém predominante em todos os espaçamentos até cerca de 80% da carga de ensaio, onde, a partir deste carregamento o atrito lateral é reduzido ao mesmo tempo que eleva a parcela da resistência de ponta, de maneira mais expressiva no espaçamento 8d atingindo cerca de 23% de carga absorvida pela ponta.

Figura 142 – Distribuição de cargas no grupo de estacas (PG) s=4d, s=6d e s=8d.

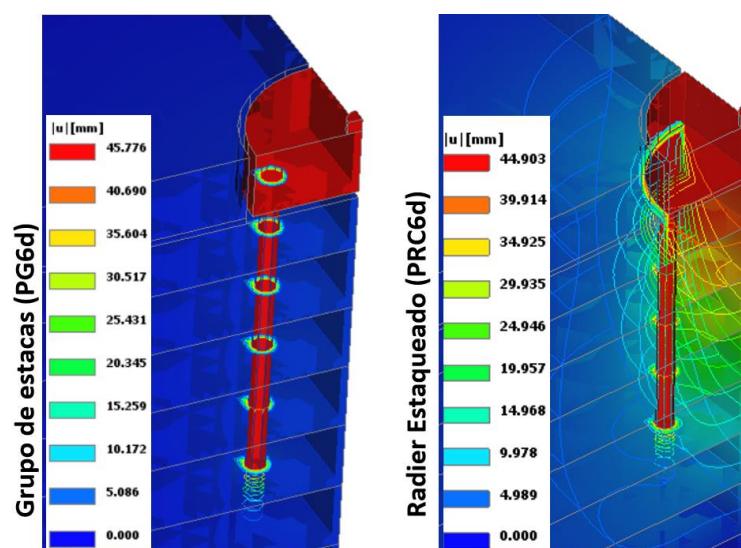


Fonte: A autora.

Ao considerar o contato bloco-solo percebe-se uma mudança significativa no sistema de fundação. Enquanto nas fundações do tipo grupo de estacas o bloco possui apenas a função estrutural de unir as estacas, no radier estaqueado o bloco não só contribui na capacidade de carga do sistema como também altera todo o mecanismo de distribuição e transferência de cargas entre os elementos de fundação e o solo, elevando a carga axial e mobilização do atrito lateral conforme é detalhado em seguida.

Uma das melhores características da análise tridimensional é a possibilidade de visualizar a mobilização dos esforços internos e externos em torno da estrutura da fundação. Na Figura 143 é possível comparar os deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises no radier estaqueado e grupo de estacas com espaçamento s=6d. A qual se mostra representativa para todos os espaçamentos, pois a mesma tendência de mobilização foi verificada para os outros espaçamentos conforme apresenta-se na subseção 5.3.

Figura 143 – Deslocamentos totais no PRC6d e PG6d a 100% da carga de ensaio.



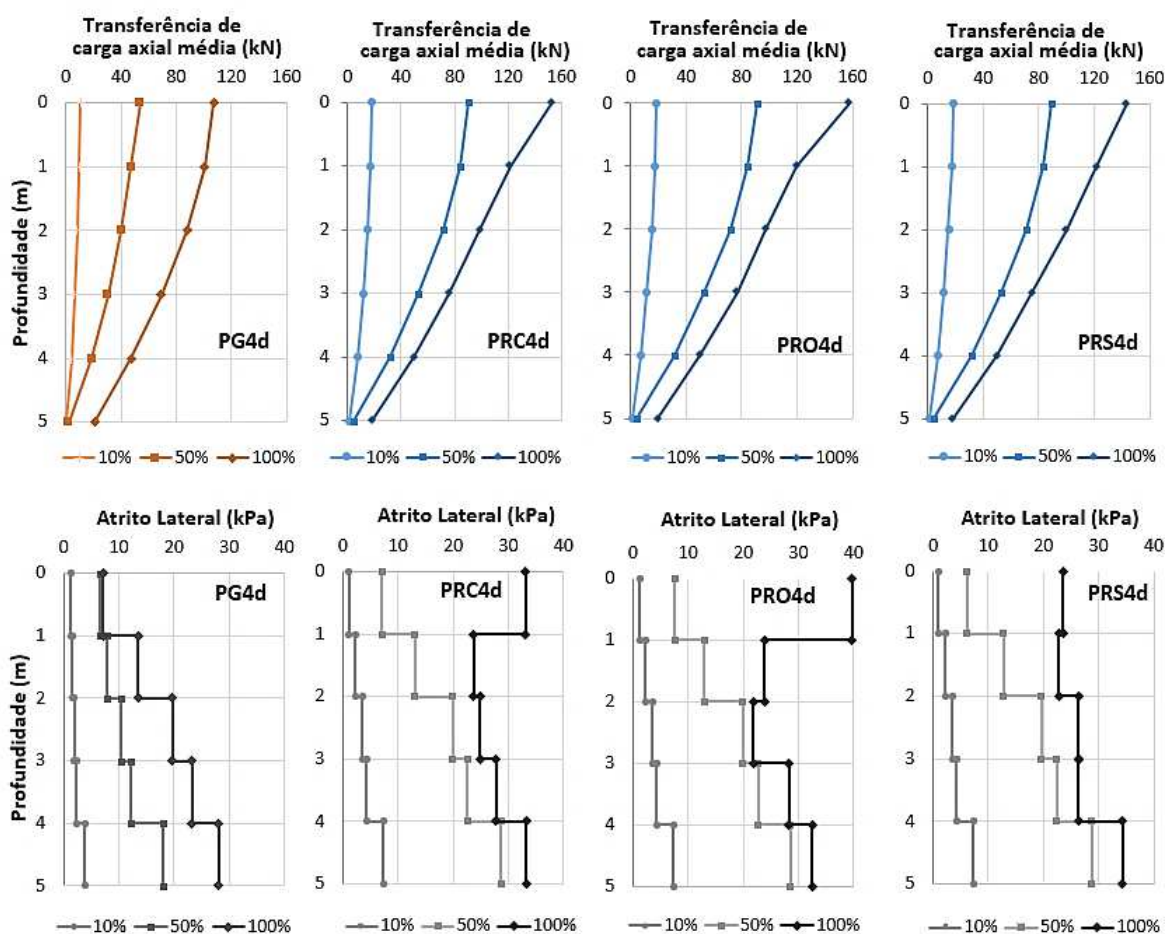
Fonte: A autora.

Nesta figura, verifica-se uma mudança drástica no comportamento quando o bloco é obstruído do contato com o solo. A região imediatamente abaixo do radier que anteriormente era submetida a um grande bulbo de tensões provenientes do contato bloco-solo, no grupo de estacas é intensificado apenas em torno do fuste e ponta da estaca, uma vez que nesta fundação o bloco é totalmente isolado do contato com o solo. Importante enfatizar que essa maior mobilização do solo localizada na região abaixo da ponta da estaca é proveniente da menor resistência do solo nessa região, a qual foi adotada para simular as características reais de uma estaca escavada.

Esse comportamento pode ser constatado a partir dos diagramas de transferência de carga axial média e de atrito lateral, no qual foram organizados e ajustados em gráficos de mesma escala com o intuito de facilitar a comparação entre os resultados. Nas Figuras 144, 145 e 146 é possível observar que o elemento superficial de fundação altera significativamente a natureza de transferência de cargas das estacas quando este, o bloco, passa a ter contato direto com o solo e favorece na capacidade de carga do sistema.

Verifica-se que esse contraste entre o PG e PR fica mais evidente nos primeiros metros da estaca, onde os valores de carga axial média e mobilização do atrito lateral são mais expressivos no radier estaqueado do que no grupo de estacas, provavelmente devido às tensões adicionais provenientes do contato bloco-solo.

Figura 144 – Comparativo entre curvas de transferência de cargas e atrito lateral entre o grupo de estacas (PG) e os radiers estaqueados (PR) $s=4d$.

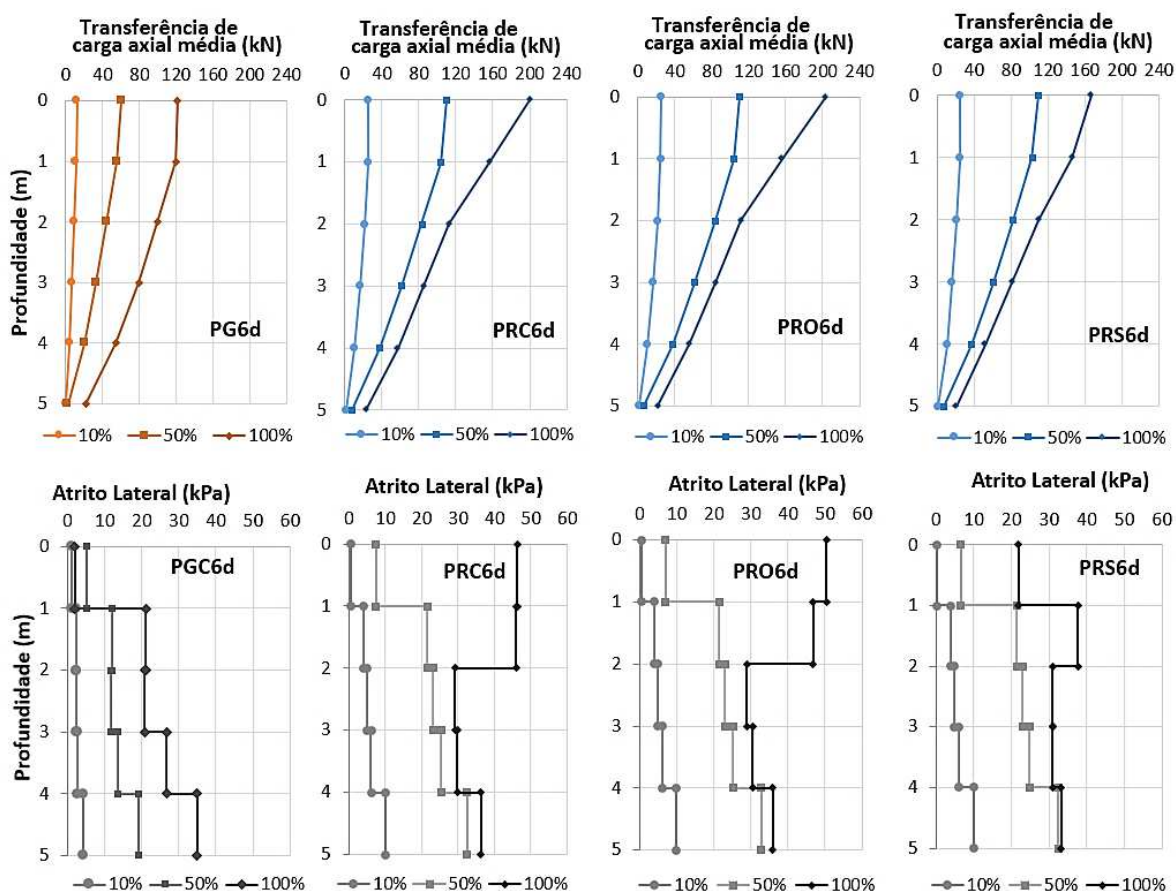


Fonte: A autora.

Pode-se verificar no gráfico de transferência de carga axial média que a mobilização da resistência de ponta mobiliza-se mais no grupo de estacas do que no radier estaqueado. Este, por sua vez apresenta um ganho na carga axial média na região da estaca imediatamente abaixo do bloco, entretanto se reduz mais intensamente ao longo do fuste quando comparado com o grupo de estacas.

Com relação a mobilização do atrito lateral, verifica-se que a mobilização até 50% da carga de ensaio no radier estaqueado segue uma tendência semelhante ao grupo de estacas especialmente para os espaçamentos $4d$ e $6d$. Tal comportamento está relacionado à baixa influência do elemento superficial na capacidade de carga total do sistema, no qual até esse estágio de carregamento sua parcela de carga absorvida não ultrapassa 18% da carga total do sistema.

Figura 145 - Comparativo entre curvas de transferência de cargas e atrito lateral entre o grupo de estacas (PG) e os radiers estaqueados (PR) s=6d.



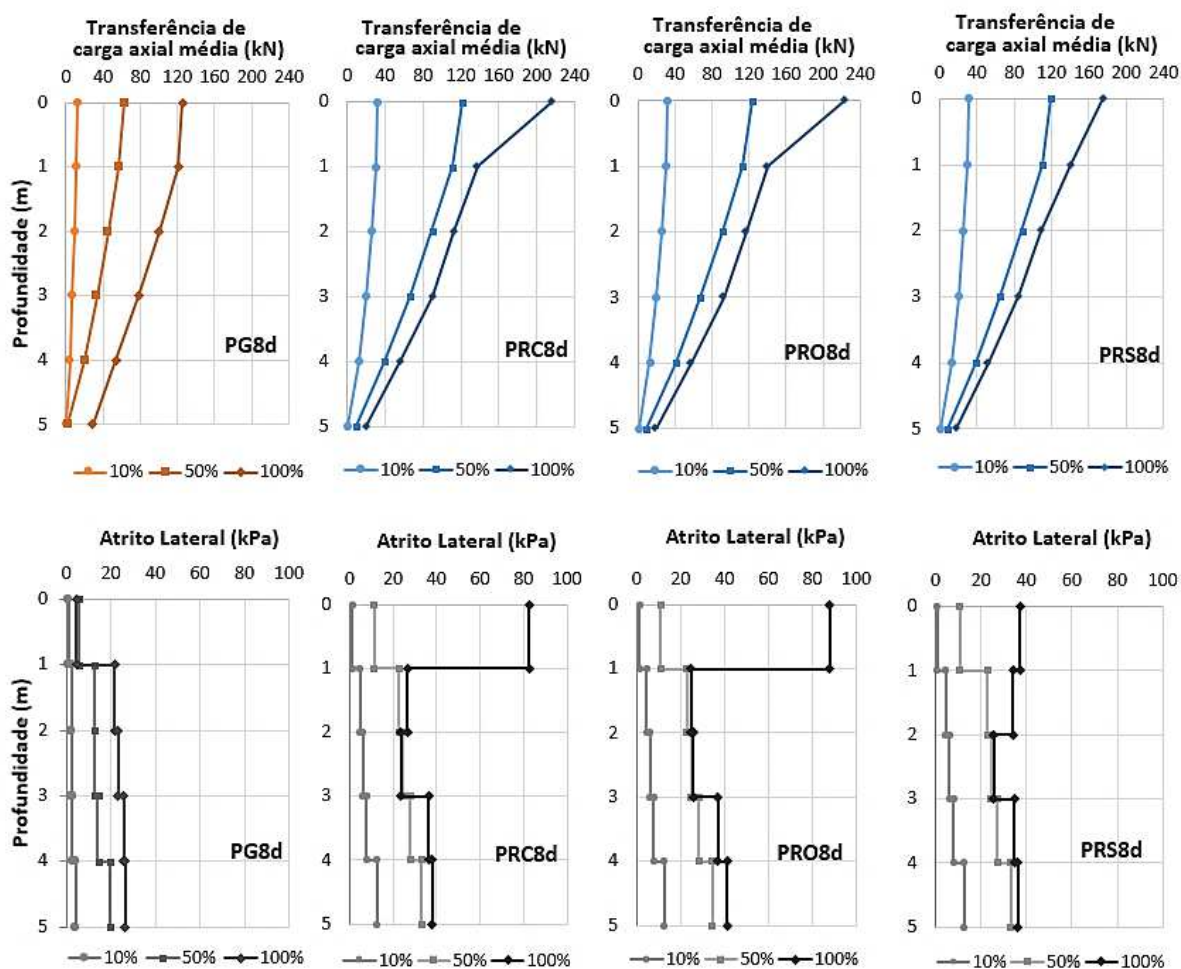
Fonte: A autora.

Entretanto, com o aumento do carregamento aplicado e consequentemente dos deslocamentos obtidos, a intensificação da participação de carga absorvida pelo contato bloco-solo no radier estaqueado, bem como a geometria do bloco altera o diagrama do atrito lateral das estacas, que passa a apresentar um crescimento na mobilização do atrito lateral nos primeiros metros da estaca com maior intensidade nos radiers estaqueados circular e octogonal.

Quando comparado as diferentes geometrias de base no radier estaqueado verifica-se a seguinte tendência no comportamento: as geometrias circular e octogonal apresentam uma maior similaridade na mobilização do atrito lateral no topo da estaca, no qual mostram uma diferença percentual de 17% para o espaçamento 4d, 8% para o s=6d e 6% para o s=8d, contudo, observa-se um comportamento discrepante quando se compara com a geometria quadrada, a qual apresenta os menores valores quando comparado com as outras geometrias.

Comparando os valores extremos de atrito lateral na região da estaca imediatamente abaixo do bloco, ou seja, entre a geometria quadrada (menores valores) e a octogonal (menores valores), verifica-se diferenças de 41%, 57% e 58% para os espaçamentos 4d, 6d e 8d, respectivamente.

Figura 146 - Comparativo entre curvas de transferência de cargas e atrito lateral entre o grupo de estacas (PG) e os radiers estaqueados (PR) $s=8d$.



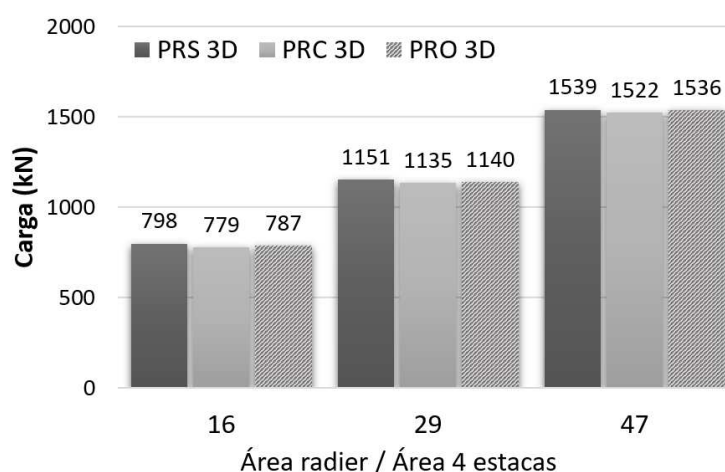
Fonte: A autora.

Ressalta-se que a transferência de cargas para as estacas com espaçamento 8d exibe um comportamento distinto quando comparado com os menores espaçamentos. No grupo de estacas $s=8d$ observa-se uma maior constância nos valores de resistência lateral ao longo do fuste da estaca. Entretanto, nos radiers estaqueados com $s=8d$ observa-se uma influência mais expressiva do radier na transferência de cargas no primeiro metro da estaca quando comparado com os outros espaçamentos.

Em resumo, nas fundações em radier estaqueado verifica-se que a carga axial média no primeiro metro da estaca é dependente do espaçamento entre estacas e, conseqüentemente da geometria de base do radier, que por sua vez, está diretamente ligado à parcela de carga absorvida pelo radier e estacas. Ou seja, a variação da geometria de base do radier estaqueado promove uma mudança na distribuição e transferência de cargas nos elementos de fundação em todos os espaçamentos estudados principalmente a 100% do carregamento.

Na Figura 147 visualiza-se as cargas de ruptura convencionada a um recalque estimado a 10% do diâmetro da estaca no método tridimensional. Em termos de comportamento carga vs recalque verifica-se que a mudança na geometria de contato bloco-solo não apresenta nenhuma alteração significativa no comportamento mesmo quando se eleva a proporção de carga radier e estacas.

Figura 147 - Carga convencionada de ruptura em relação à área de contato do radier/estacas.



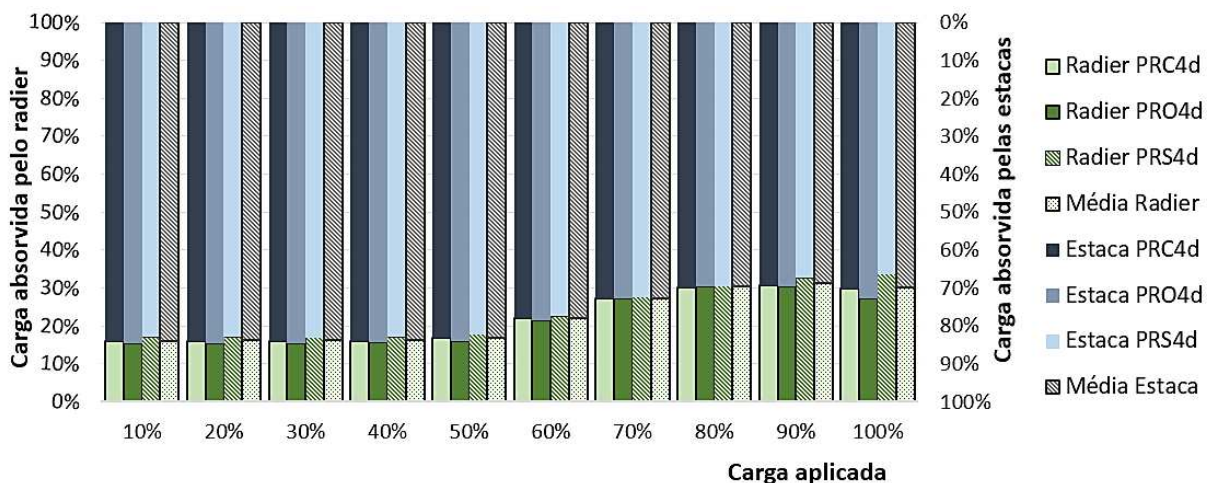
Fonte: A autora.

Entretanto, a mudança da geometria interfere profundamente na distribuição e transferência de cargas entre os elementos de fundação do radier estaqueado. Nesse caso, a carga aplicada é distribuída aos elementos da fundação e transferida ao solo por meio do fuste e ponta das estacas além da área líquida de contato radier e solo. Nas Figuras 148, 149 e 150 é possível observar a contribuição de cada elemento da fundação nos espaçamentos 4d, 6d e 8d, respectivamente.

De modo geral, nota-se uma baixa participação de carga do radier nos primeiros estágios de carregamento para todas as geometrias e espaçamentos estudados onde há a predominância da capacidade pelas estacas, em que, conforme eleva-se a carga aplicada, há uma redução da

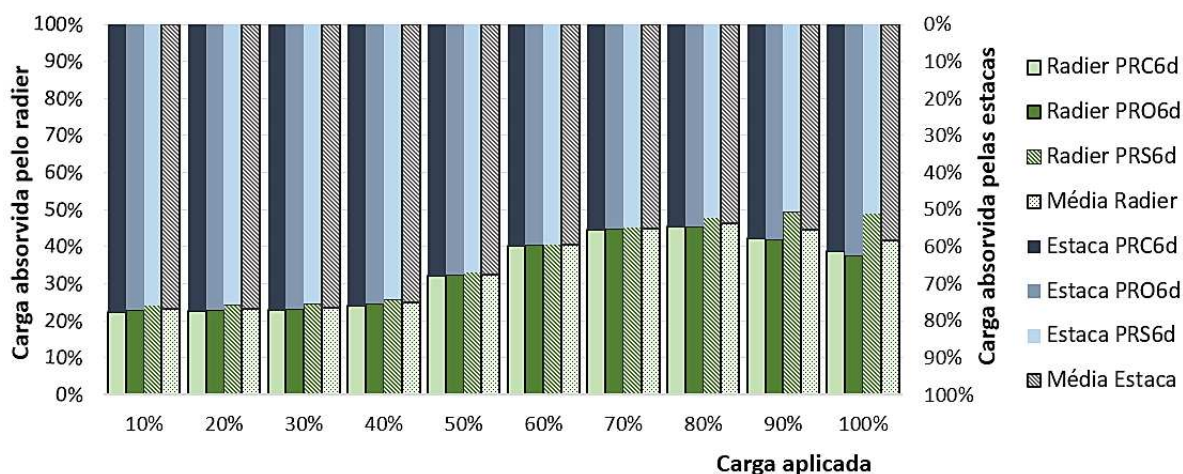
parcela de carga suportada pelas estacas e consequentemente uma maior parcela da carga é absorvida pelo radier.

Figura 148 - Distribuição de cargas nos raders estaqueados circular (C), octogonal (O) e quadrado (S) com $s=4d$.



Fonte: A autora.

Figura 149 – Distribuição de cargas nos raders estaqueados circular (C), octogonal (O) e quadrado (S) com $s=6d$.

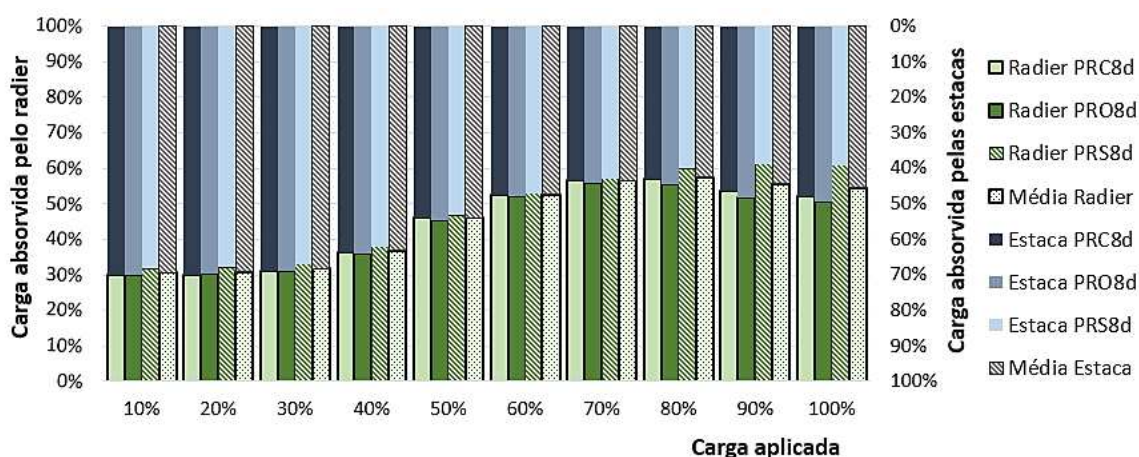


Fonte: A autora.

No espaçamento $4d$, verifica-se uma predominância da carga absorvida pelas estacas em todas as geometrias e estágios de carregamento, chegando a ser responsável em média por 70% da carga no último estágio. Esse mesmo desempenho é observado no espaçamento $6d$, porém, o radier passa a ser responsável por uma maior parcela de carga no último estágio de carregamento quando comparado ao $s=4d$ (42% e 58% para as estacas). Contudo, no

espaçamento 8d a parcela de carga absorvida pelo radier supera a parcela de carga absorvida pelas estacas a partir de 60% do carregamento, onde o radier passa a ser responsável em média por 53% da carga, chegando a uma carga absorvida média pelo radier de 55% no último estágio de carregamento.

Figura 150 - Distribuição de cargas nos radies estaqueados circular (C), octogonal (O) e quadrado (S) com $s=8d$.



Fonte: A autora.

No radier estaqueado, independente do espaçamento entre estacas, a escolha da geometria do elemento superficial pode alterar a parcela de carga absorvida pelo radier e pelas estacas. Logo, verifica-se em todos os espaçamentos que a geometria de base quadrada absorve uma maior parcela de carga pelo radier do que as geometrias: circular e octogonal. Estas, por sua vez apresentam resultados mais próximos em termos de distribuição de carga quando comparado com a geometria quadrada.

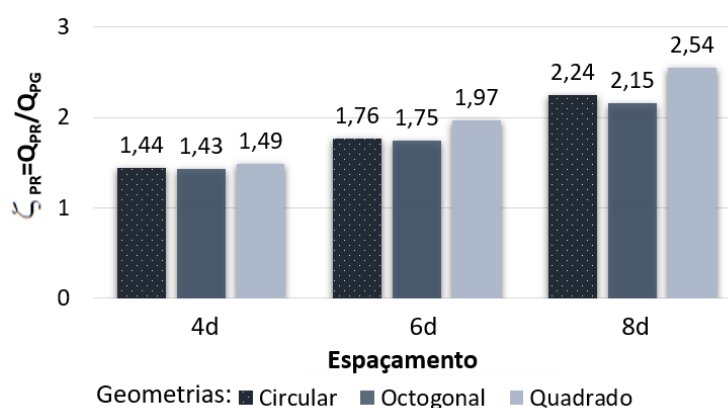
Considerando as cargas absorvidas pelo radier a 100% do carregamento, verifica-se no $s=4d$ uma redução em torno de 9% entre a geometria circular e octogonal enquanto para os espaçamentos 6d e 8d há uma redução de apenas 3%. Entre as geometrias quadrada e octogonal, em que apresentam maior discrepância entre os resultados, verifica-se uma diferença em cerca de 19%, 23% e 17% nas cargas absorvidas pelos elementos da fundação nos espaçamentos 4d, 6d e 8d, respectivamente.

Nesse sentido, é possível calcular o aumento da capacidade de carga da fundação devido o contato bloco-solo (ζ_{PR}) a partir da relação entre a capacidade de carga total do radier

estaqueado (Q_{PR}) e da parcela do grupo de estacas (Q_{PG}) a um recalque estipulado em 10% do diâmetro da estaca. Na Figura 151 é possível verificar que os valores de ζ_{PR} se elevam com o aumento do espaçamento entre estacas, isso se dá provavelmente em consequência do aumento da área líquida de contato radier solo.

Entretanto, em termos de capacidade de carga entre o radier estaqueado e o grupo de estacas observa-se que a mudança na geometria de base do elemento superficial apresenta uma pequena variação na proporção de carga do sistema devido à maior ou menor parcela de carga suportada pelas estacas conforme se altera a geometria.

Figura 151 – Relação da capacidade de carga (ζ_{PR}) entre o PR e PG nos espaçamentos 4d, 6d e 8d.

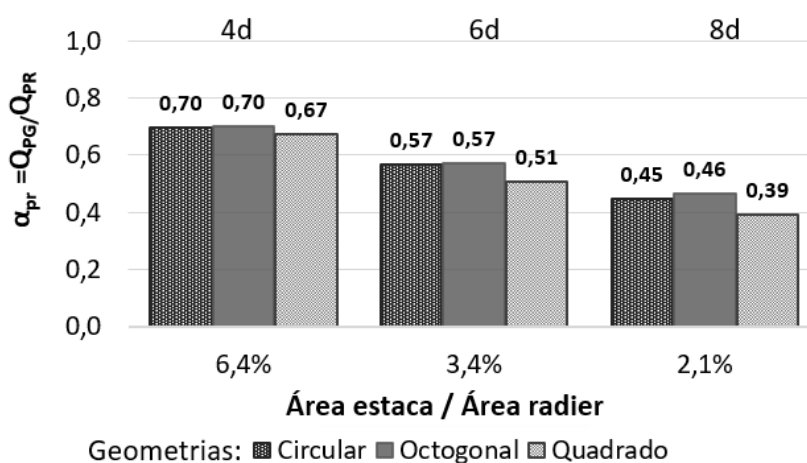


Fonte: A autora.

Na Figura 152 é possível verificar a proporção de carga suportada pelas estacas no radier estaqueado em função da razão da área transversal das 4 estacas sobre a área líquida do radier a um recalque convencionalizado a 10% do diâmetro da estaca. Nesta, observa-se que há uma redução progressiva da proporção de carga suportada pelas estacas conforme se eleva a área superficial do radier.

Sobre o fator α_{PR} quanto mais próximo de um, mais a fundação tende a se comportar como grupo de estacas como no espaçamento 4d. De modo contrário, quanto mais próximo a zero, mais se assemelha ao comportamento da fundação em radier isolado como se observa no $s=8d$. Nesse sentido, observando as geometrias de contato do elemento superficial nota-se uma pequena variação na geometria quadrada, o que indica uma maior parcela de carga absorvida pelo radier principalmente quando se eleva a área do radier (espaçamento).

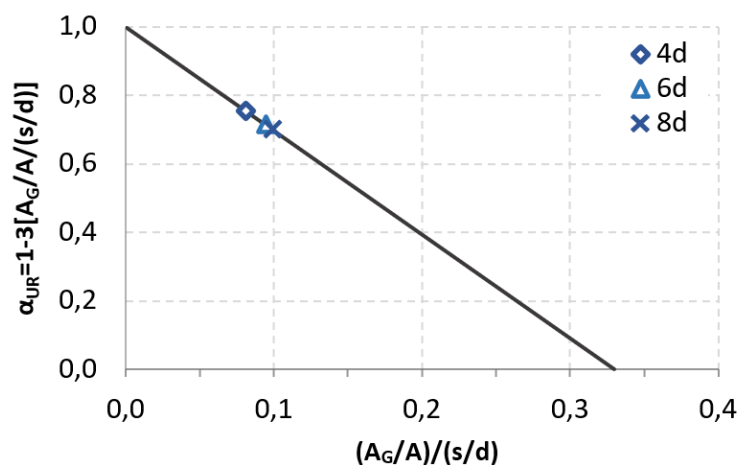
Figura 152 - Proporção de carga absorvida pelas estacas a 100% do carregamento nos radiers estaqueados circular (C), octogonal (O) e quadrado (S).



Fonte: A autora.

Os resultados obtidos para as fundações em radier estaqueado correlacionando o fator de eficiência α_{UR} com a relação $(A_G/A)/(s/d)$ apresentado por De Sanctis e Mandolini (2006), pode ser observado na Figura 153. Nesta relação, entende-se o comportamento do radier estaqueado está compreendido entre $0 < \alpha_{UR} \leq 1$. Para fundações em radier isolado com $A_G/A=0$ o fator de eficiência resulta-se em um $\alpha_{UR}=1$, e por outro lado, em sistemas que as estacas são uniformemente distribuídas sobre a área do radier, com valores de A_G/A próximos a um, e com espaçamento entre estacas dentro do convencional (em torno de $s=3d$), o componente α_{UR} se aproxima de 0, ou seja, tende ao comportamento de um grupo de estacas.

Figura 153 – Relação entre α_{UR} e $(A_G/A)/(s/d)$ nos radiers estaqueados com $s=4, 6$ e $8d$.



Fonte: A autora.

Como esperado, para os radiers estaqueados estudados, com um menor espaçamento entre estacas o comportamento do sistema tende ao grupo de estacas, e ao elevar esse espaçamento o sistema tende ao comportamento de um radier isolado (Figura 153). Resultados próximos dessa linha de tendência foram apresentados por De Sanctis e Mandolini (2006), Soares et al, (2015), Garcia e Albuquerque (2019).

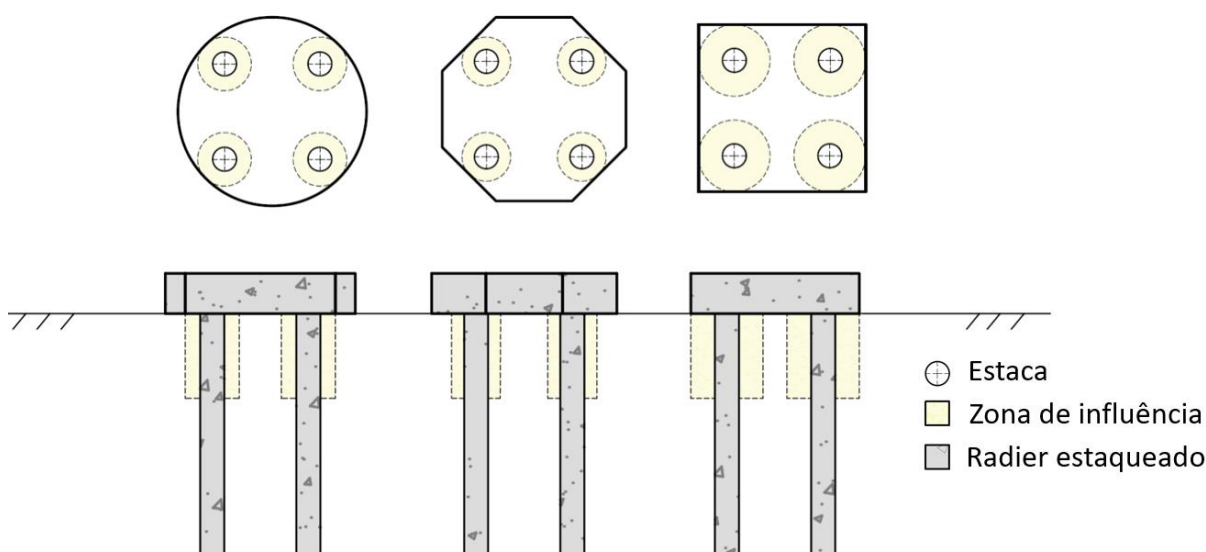
Em resumo, para as fundações em radier estaqueado com as mesmas características adotadas nesta pesquisa foi comprovado que a mudança na geometria de contato boco-solo não apresenta alteração considerável na capacidade de carga geral do sistema. Entretanto verifica-se que em termos de distribuição e transferência de cargas entre os elementos da fundação e o solo, verifica-se uma mudança considerável no comportamento em consequência da geometria de contato bloco-solo. Entende-se, portanto, que a escolha da geometria do elemento superficial no radier estaqueado pode impactar de modo considerável no desempenho das estacas, elevando ou reduzindo a capacidade de cargas do grupo de estacas do sistema.

Com relação aos radiers estaqueados analisados é importante lembrar mais uma vez que para um mesmo espaçamento manteve-se constante todos os parâmetros geotécnicos do solo, as características mecânicas do concreto e, principalmente todas as dimensões da estaca como quantidade, diâmetro e comprimento, além das dimensões do radier como área líquida de contato e espessura.

Diante desse contexto, constata-se uma relação entre a parcela de carga absorvida pelas estacas e a uma área (zona) radial de influência em torno do fuste da estaca exatamente sob a base do elemento superficial, a qual impacta diretamente no maior ou menor valor de carga axial especialmente na região subjacente ao radier. Reitera-se que para garantir um mesmo espaçamento entre estacas e mesma área de base do radier para as três geometrias, o cobrimento entre o centro da estaca e o limite externo do radier apresentam valores diferentes.

Na Figura 154, é possível visualizar a zona de influência em torno do fuste da estaca influenciada pelo contato bloco-solo, a qual impacta na maior ou menor parcela de carga suportada pelo radier e pelas estacas. Destaca-se que essa zona de influência tende a uma profundidade em torno de 10% da tensão aplicada no contato bloco solo

Figura 154 – Zona de influência nas diferentes geometrias do radier estaqueado.



Fonte: A autora.

Conforme aumenta o espaçamento, a diferença entre a área de influência nas diferentes geometrias é intensificado. Em termos percentuais, para maiores espaçamentos ($s=8d$) constata-se que a geometria circular representa cerca de 29% da área de influência da geometria quadrada, enquanto na geometria octogonal esse valor chega a 19% com relação à geometria quadrada. Todos os valores correspondentes à essa área transversal de influência obtidas radialmente a partir do cobrimento de cada sistema (destacadas na Figura 154) e sua proporção em relação a área do radier são resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Proporção da área de influência nas diferentes geometrias e espaçamentos do radier estaqueado.

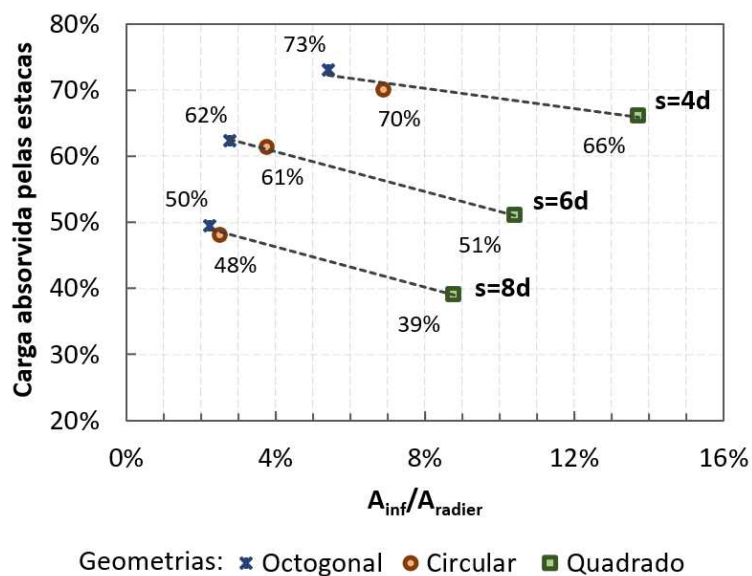
s	Circular		Octogonal		Quadrado	
	Área inf. (m ²)	Área inf./Área radier (%)	Área inf. (m ²)	Área inf./Área radier (%)	Área inf. (m ²)	Área inf./Área radier (%)
4d	0,29	5,4%	0,22	7%	0,57	13,7%
6d	0,30	2,8%	0,22	4%	0,83	10,4%
8d	0,33	2,2%	0,29	3%	1,14	8,8%

Observa-se na geometria quadrada que a estaca se apresenta mais centralizada no interior do bloco quando comparado às outras geometrias, apresentando uma maior zona de influência em torno do fuste da estaca provocado pelo maior cobrimento. Entretanto constata-se uma menor

colaboração na capacidade de carga pelas estacas e maior parcela de carga pelo contato radier-solo quando comparado às outras geometrias (Figuras 155 e 156).

Tendência oposta é verificada para a geometria de base octogonal, esta por sua vez, apresenta uma menor área de influência em relação às geometrias quadrada e octogonal, porém a parcela de carga contribuinte da mobilização das estacas é maior quando comparado às outras geometrias. Como já mencionado anteriormente, nota-se uma tendência próxima entre as geometrias circular e octogonal, observado pela maior proximidade dos pontos nos gráficos das Figuras 155 e 156, que provavelmente está ligado à essa área de influência.

Figura 155 – Relação entre carga absorvida pelas estacas e a proporção da área de influência pela área do bloco nos radiers estaqueados com $s=4$, 6 e 8d.

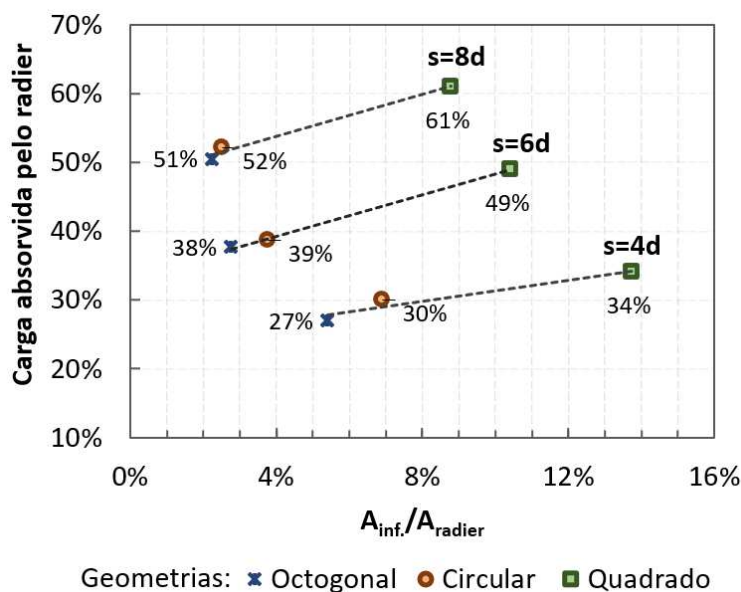


Fonte: A autora.

Dessa forma, constata-se que a variação da geometria na distribuição e transferência de cargas entre os elementos da fundação o solo realmente pode ser influenciado pelo cobrimento da estaca sobre o radier, bem como pela proporção entre essa área de influência e a área de contato do elemento superficial ao solo.

Além das fundações em radier estaqueado e grupos de estacas, analisou-se inclusive as fundações em radier isolado (sem estacas), para obter um melhor entendimento acerca da influência da geometria de base das fundações, principalmente na resposta em termos de capacidade de carga.

Figura 156 – Relação entre carga absorvida pelo radier e a proporção da área de influência pela área do bloco nos radiers estaqueados com $s=4, 6$ e $8d$.



Fonte: A autora.

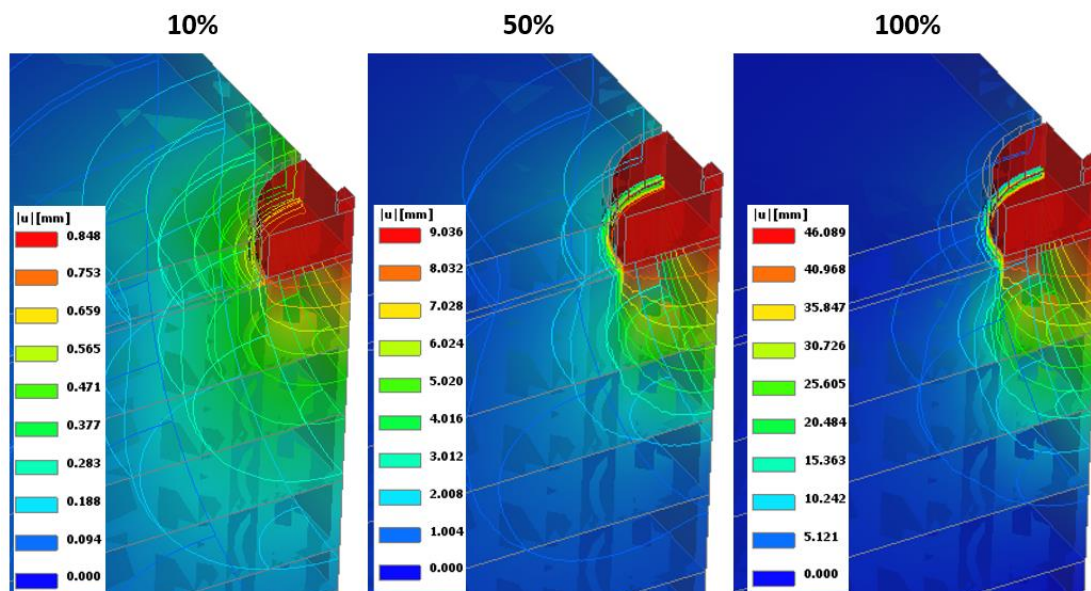
É importante salientar que as dimensões geométricas do radier isolado é correspondente às dimensões das fundações em radier estaqueado e grupo de estacas de acordo com o espaçamento, ou seja, a área da base de um radier isolado, por exemplo, do radier circular RIC4 é análoga à área da fundação superficial do radier estaqueado circular com espaçamento $4d$ (PRC4d), assim como a área do RIC6 é correspondente ao PRC6d, e assim sucessivamente.

A evolução dos deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises a 10% (63,6 kN), 50% (318 kN) e 100% (636 kN) do carregamento máximo adotado para o radier isolado circular RIC4 é apresentado na Figura 157. Nesta observa-se que a mobilização dos deslocamentos se conserva exclusivamente em torno do radier e esse comportamento segue a mesma tendência de mobilização em todos os outros modelos geométricos analisados. A evolução dos deslocamentos para os outros casos de radier isolado pode ser consultado no APÊNDICE D.

O comportamento carga vs recalque ao longo dos 11 estágios de carregamento (de 0% a 100%) e 4 de descarregamento (75%, 50%, 25% e 0%) entre as diferentes geometrias e dimensões do radier isolado são apresentados nas Figuras 158, 159 e 160. Assim como observado para as fundações em radier estaqueado, no radier isolado, verifica-se uma constância entre as curvas

carga vs recalque ao variar a geometria de base da fundação em todos os espaçamentos estudados, o que constata que a mudança das geometrias: circular, octogonal e quadrada no RI, assim como no PR não afeta no comportamento do sistema em termos de carga vs recalque.

Figura 157 - Deslocamentos no RIC4 a 10% 50% e 100% da carga de ensaio.



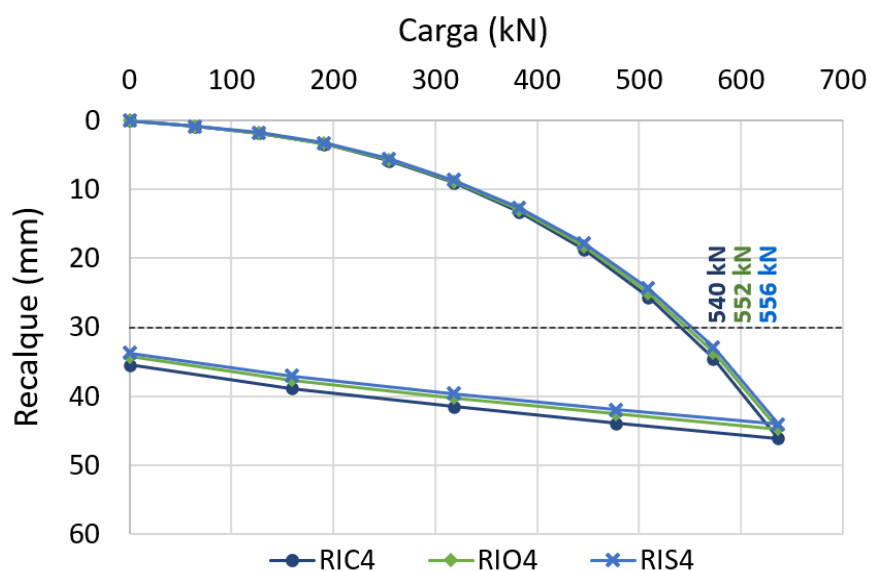
Fonte: A autora.

Com o intuito de manter o mesmo critério de comparação entre os diferentes tipos de fundações, determinou-se, portanto, para os radiers isolados a mesma carga de ruptura correspondente à 10% do diâmetro da estaca utilizada nas fundações estaqueadas, ou seja, 30 mm. Para os radiers isolados correspondentes ao espaçamento $4d$ (Figura 158) verifica-se que a geometria quadrada (RIS4) apresenta uma maior carga de ruptura, com 556 kN seguido pelas geometrias de base octogonal (RIO4) com 522 kN e circular (RIC4) com 540 kN, totalizando uma diferença percentual máxima entre as cargas convencionadas de 3%. Nessa mesma ordem, verifica-se que os radiers isolados apresentaram valores de tensão em 126 kPa (RIS4), 125 kPa (RIO4) e 122 kPa (RIC4).

Ao aumentar a área do radier, correspondente ao espaçamento $6d$ das fundações estaqueadas (Figura 159) verifica-se a mesma tendência no comportamento em que a geometria quadrada (RIS6) apresenta uma maior carga de ruptura, com 935 kN seguido pelas geometrias de base octogonal (RIO6) com 923 kN e circular (RIC4) com 917 kN, totalizando uma diferença

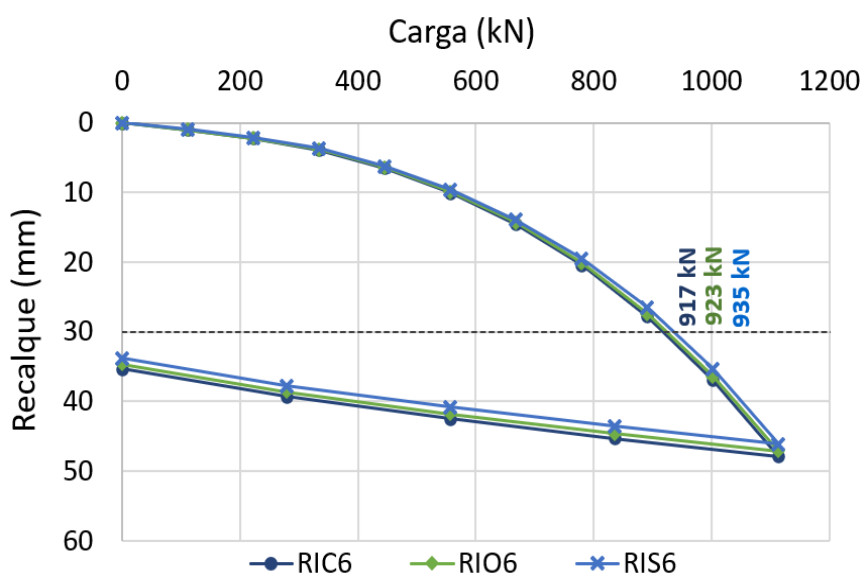
percentual máxima entre as cargas convencionadas extremas de 2%. Verifica-se que os radiers isolados apresentaram valores de tensão em 113 kPa (RIS4), 112 kPa (RIO4) e 111 kPa (RIC4).

Figura 158 - Curvas carga vs recalque dos radiers isolados RIC4, RIO4 e RIS4.



Fonte: A autora.

Figura 159 - Curvas carga vs recalque dos radiers isolados RIC6, RIO6 e RIS6.

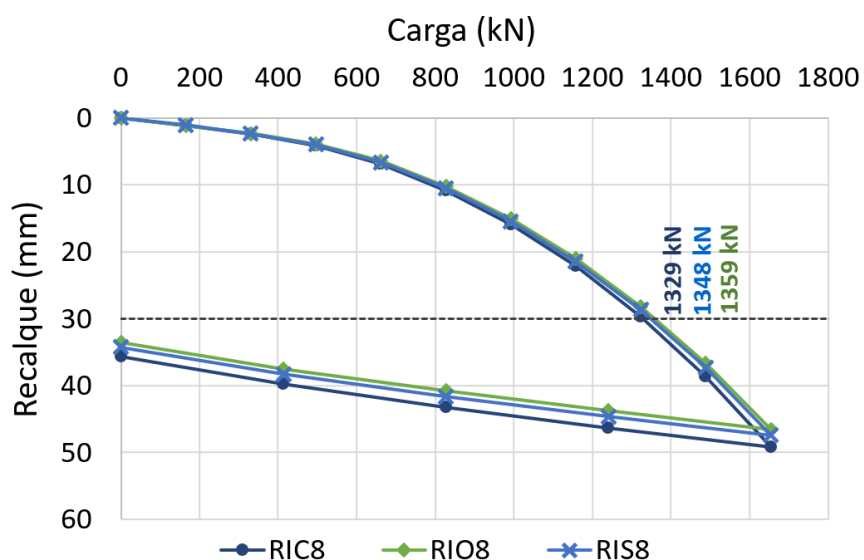


Fonte: A autora.

Para os radiers isolados correspondentes ao espaçamento $8d$ das fundações estaqueadas (Figura 160) observa-se uma mudança na carga de ruptura, em que que a geometria octogonal (RIO8) apresenta uma maior carga de ruptura, com 1359 kN seguido pelas geometrias de base quadrada

(RIS8) com 1348 kN e circular (RIC8) com 1329 kN, totalizando uma diferença percentual máxima entre as cargas convencionadas de 2%. Nessa mesma ordem, verifica-se que os radiers isolados apresentaram valores de tensão aproximadamente em 103 kPa (RIS4), 103 kPa (RIO4) e 100 kPa (RIC4).

Figura 160 - Curvas carga vs recalque dos radiers isolados RIC8, RIO8 e RIS8.

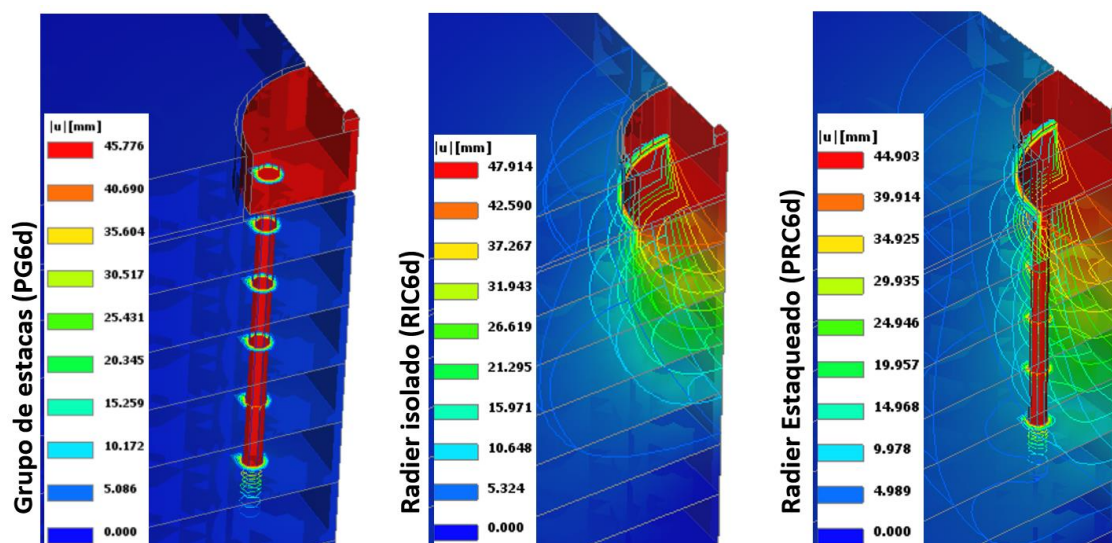


Fonte: A autora.

Assim como nas fundações em radier estaqueado, no radier isolado verifica-se que a variação da geometria, nas diferentes dimensões (espaçamentos) estudadas produz uma baixa variação nas cargas de ruptura convencionada de no máximo 3%, sendo considerada irrelevante na escala geotécnica.

Um comparativo entre os deslocamentos obtidos após o processamento das análises a 100% do carregamento entre as fundações em grupo de estacas, radier isolado e radier estaqueado é apresentado na Figura 161. Nesta, verifica-se uma diferença na mobilização do solo, onde, no grupo de estacas há uma mobilização apenas em torno do fuste e ponta da estaca. Para o radier isolado verifica-se uma pequena mobilização gradativa abaixo do radier, e no radier estaqueado percebe-se a união do comportamento das duas fundações: em grupo de estacas e em radier isolado, apresentando mobilização abaixo do radier e em torno do fuste e ponta da estaca

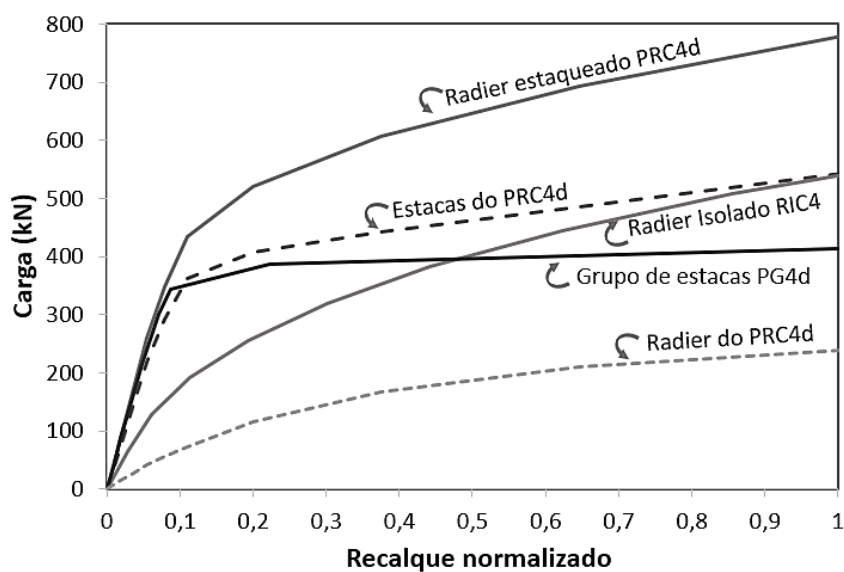
Figura 161 – Deslocamentos nas diferentes fundações a 100% do carregamento.



Fonte: A autora.

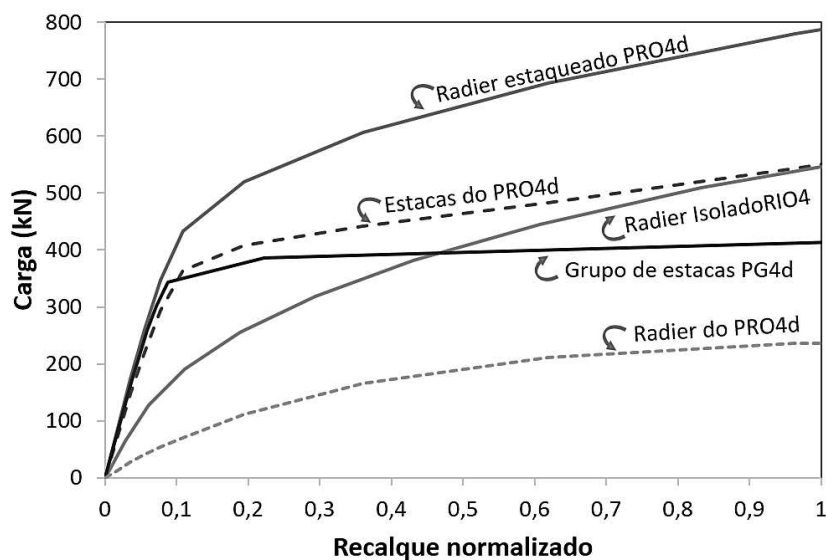
As curvas carga vs recalque normalizado para as fundações estudadas nesta pesquisa pelo modelo tridimensional são sintetizadas nos gráficos das Figuras 162 a 170. Nestas, comparou-se fundações em radier estaqueado (PR), grupo de estacas (PG) e radier isolado (RI), além das curvas obtidas separadamente para os elementos do radier estaqueado, divididas entre o radier e o grupo de estacas.

Figura 162 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI circular 4d.



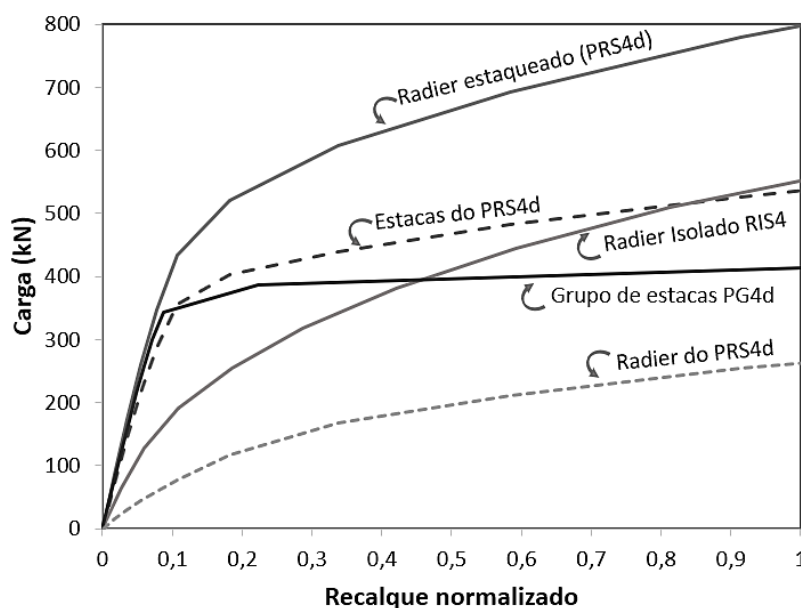
Fonte: A autora.

Figura 163 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI octogonal 4d.



Fonte: A autora.

Figura 164 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI quadrado 4d.

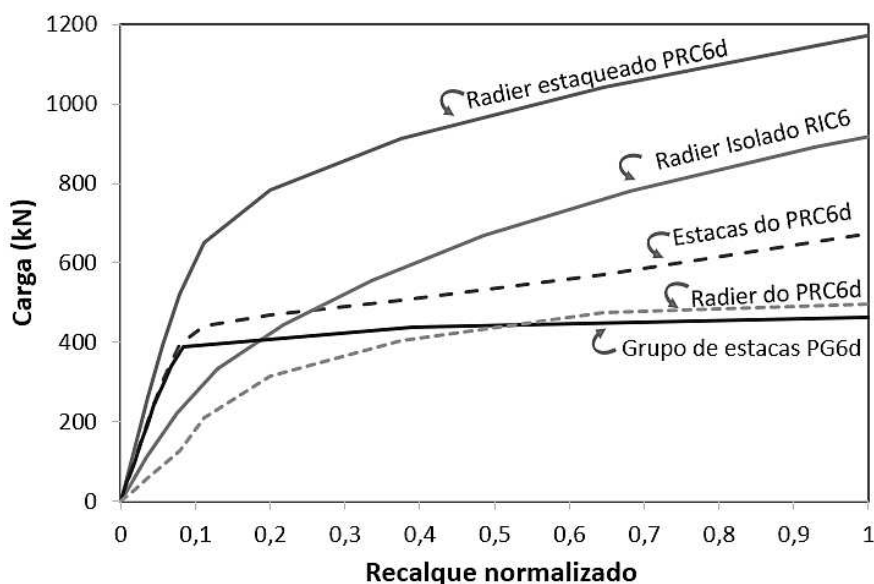


Fonte: A autora.

De modo geral, para todas as geometrias e espaçamentos estudados verifica-se que o radier estaqueado apresenta uma maior capacidade de carga, seguida pela fundação em radier isolado e, apresentando os menores valores, as fundações em grupo de estacas. É importante destacar uma mudança expressiva no comportamento quando se compara a parcela de carga resultante do grupo de estacas isolado no sistema (possuindo contato bloco-solo) com as fundações em

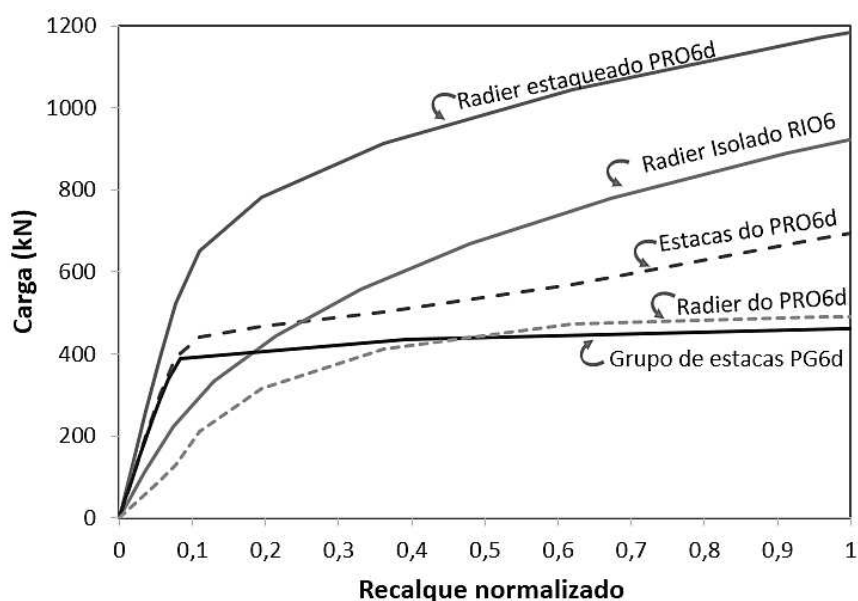
grupo de estacas, (com o bloco suprimido do contato com o solo), além do comportamento entre o radier isolado do sistema com a fundação em radier isolado sem a presença das estacas (RI).

Figura 165 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI circular 6d.



Fonte: A autora.

Figura 166 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI octogonal 6d.

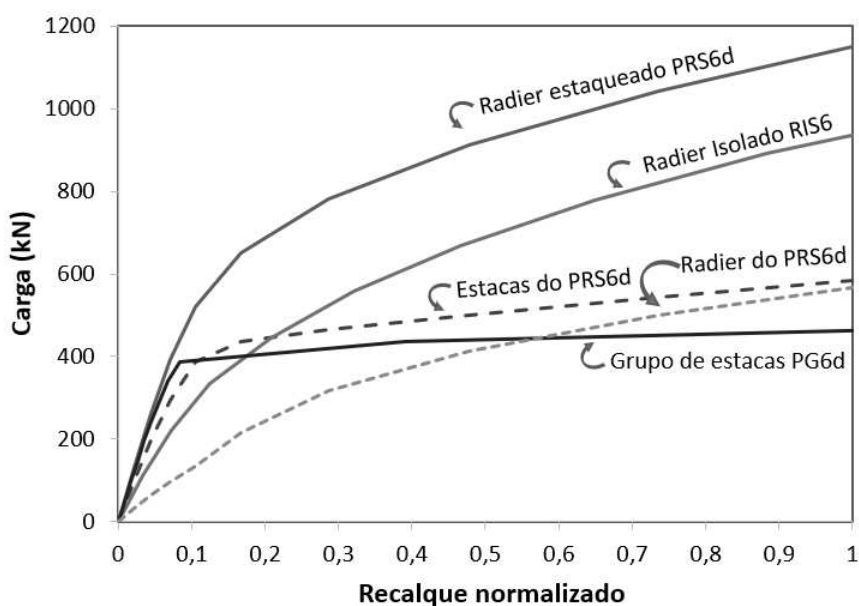


Fonte: A autora.

À medida que o espaçamento entre estacas é elevado acima de $s=6d$ verifica-se que a capacidade de carga de radiers, (com e sem a presença das estacas) supera as curvas correspondentes ao comportamento dos grupos de estacas devido à uma maior área superficial de contato entre o radier e o solo, onde as curvas do radier isolado se aproximam às curvas do

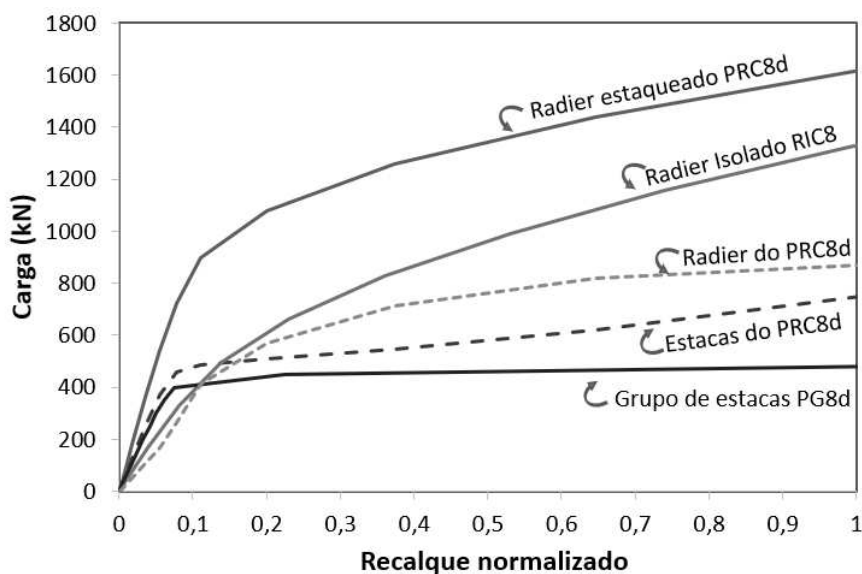
radier estaqueado com o aumento do espaçamento. Destaca-se que esse comportamento corrobora com os gráficos apresentados anteriormente em que demonstra que o radier estaqueado tende ao comportamento de um radier isolado conforme eleva-se o espaçamento entre estacas (Figuras 151, 152 e 153).

Figura 167 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI quadrado 6d.



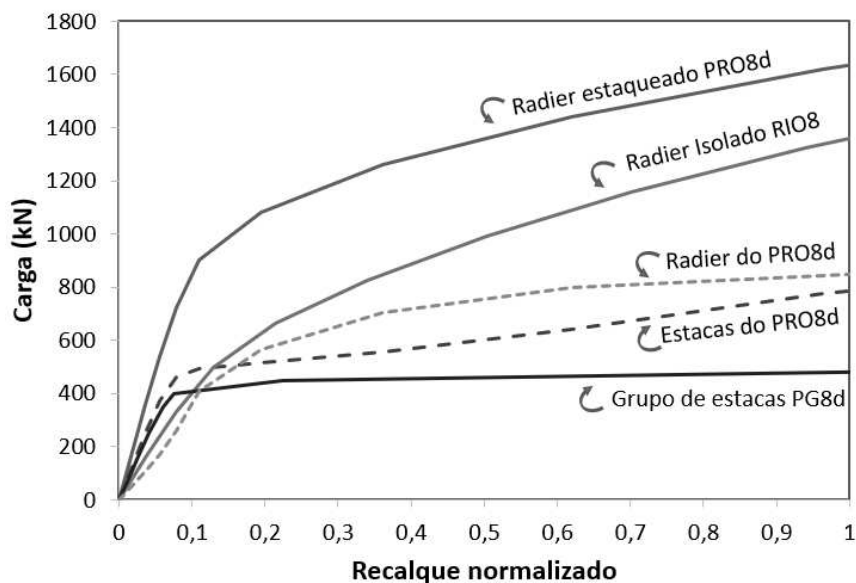
Fonte: A autora.

Figura 168 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI circular 8d.



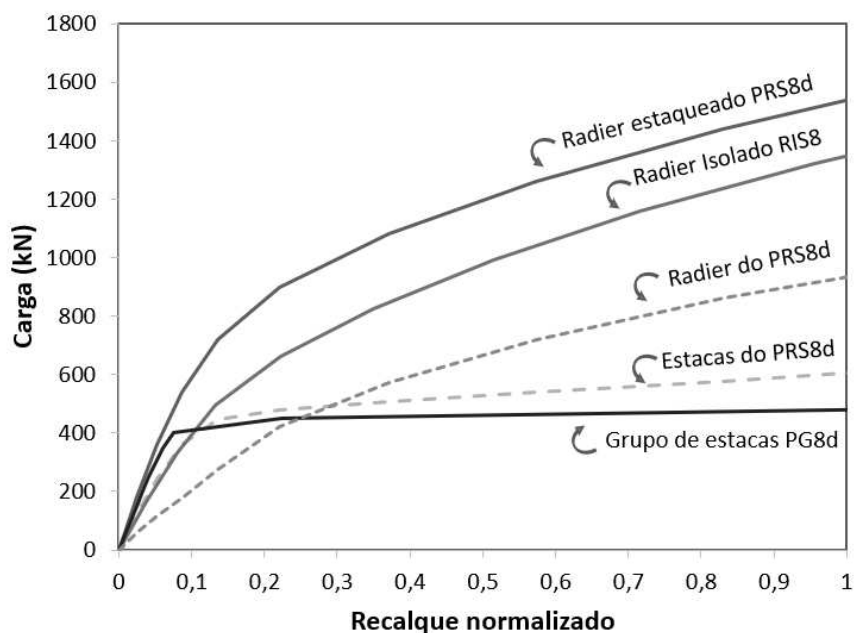
Fonte: A autora.

Figura 169 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI octogonal 8d.



Fonte: A autora.

Figura 170 – Curvas carga vs recalque mobilizado para o PR, PG, RI quadrado 8d.



Fonte: A autora.

Em todos os modelos estudados verifica-se que o grupo de estacas do sistema em contato com o solo apresenta uma tendência de ganho na capacidade de carga com o aumento do recalque de forma mais expressiva quando comparado ao grupo de estacas isolado, isso acontece certamente devido ao contato radier-solo. O inverso é verificado ao considerar o radier isolado do sistema (apoiado sobre o grupo de estacas) em que apresenta uma maior capacidade de carga

quando comparado com o seu desempenho isoladamente, ou seja, sem a presença de estacas. Destaca-se que essa tendência é mais expressiva nos maiores espaçamentos.

Para as fundações em grupo de estacas verifica-se uma mudança repentina no comportamento a um recalque normalizado de aproximadamente 0,1 a partir do qual, não promove quaisquer ganhos de carga com o aumento do recalque, indicando, portanto, o esgotamento da fundação. Contudo, para o radier estaqueado e o radier isolado observa-se uma tendência de aumento na capacidade de carga proporcional ao aumento do recalque, ou seja, quanto maior o recalque maior o ganho na capacidade de carga.

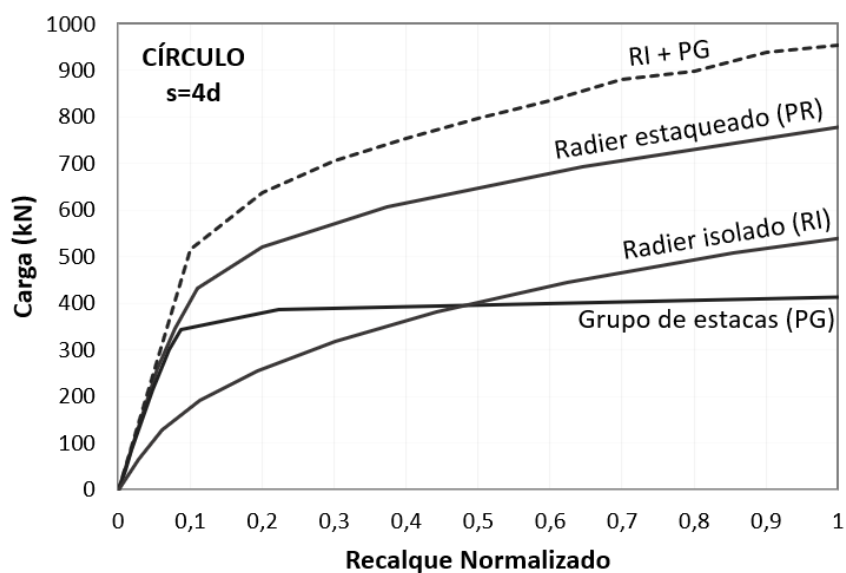
Quando comparado as geometrias de base, como já observado anteriormente, para todos os espaçamentos o comportamento das fundações circulares apresentam uma maior semelhança com a geometria octogonal do que quando comparado com a geometria quadrada, esta por sua vez se diferencia por apresentar uma maior capacidade de carga pelo contato radier-solo do que para as outras geometrias. Esta tendência se mostra mais expressiva para maiores espaçamentos, no $s=8d$ por exemplo, verifica-se que a capacidade de carga do radier isolado domina o comportamento do sistema apresentando uma maior capacidade de carga quando comparado ao grupo de estacas.

Comparando as curvas carga vs recalque normalizado nos diferentes tipos de fundações analisadas nesta pesquisa, e somando os resultados obtidos entre o radier isolado (sem a presença das estacas) e do grupo de estacas (sem a presença do contato bloco-solo) constata-se que a capacidade de carga do sistema radier estaqueado, quando se considera a influência de um elemento sobre o outro apresenta uma menor capacidade de carga do que a somatória obtida a partir dos seus elementos individuais (Figuras 171 a 179), esse comportamento corrobora com as concepções observadas na literatura como em Wu, Chai e Huang (2002).

Para um $s=4d$, verifica-se que a somatória entre o radier isolado e grupo de estacas sem contato apresentam resultados mais elevados do que no radier estaqueado. Para espaçamentos maiores que $6d$, observa-se que a geometria quadrada segue a mesma tendência em apresentar resultados divergentes aos resultados das geometrias circular e octogonal. Verifica-se que as curvas entre o radier estaqueado e da somatória (RI+PG) se sobrepõem até um recalque normalizado de aproximadamente 0,4 de maneira exclusiva para as geometrias circular e octogonal, em que na

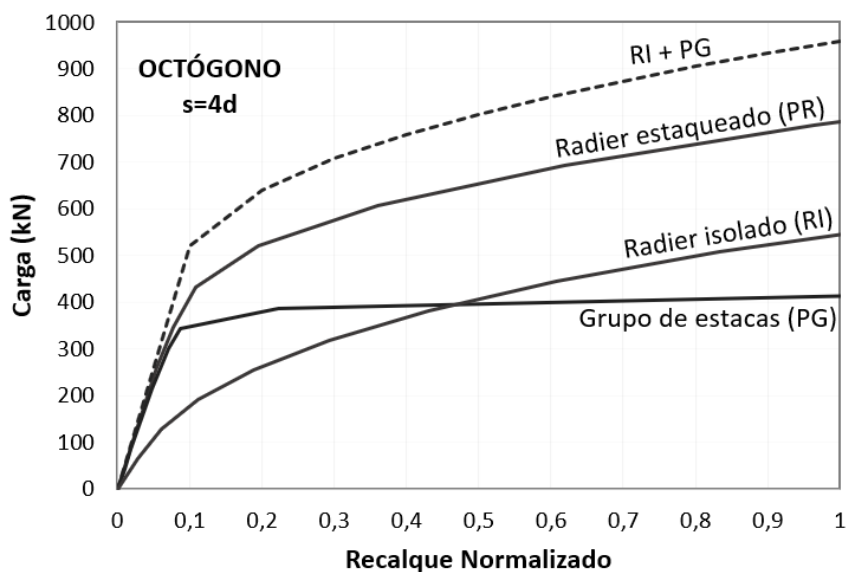
geometria quadrada, as curvas do radier isolado se mantêm mais próximas ao do radier estaqueado quando comparado as outras geometrias.

Figura 171 – Comportamento carga vs recalque nas fundações de base circular com espaçamento $s=4d$.



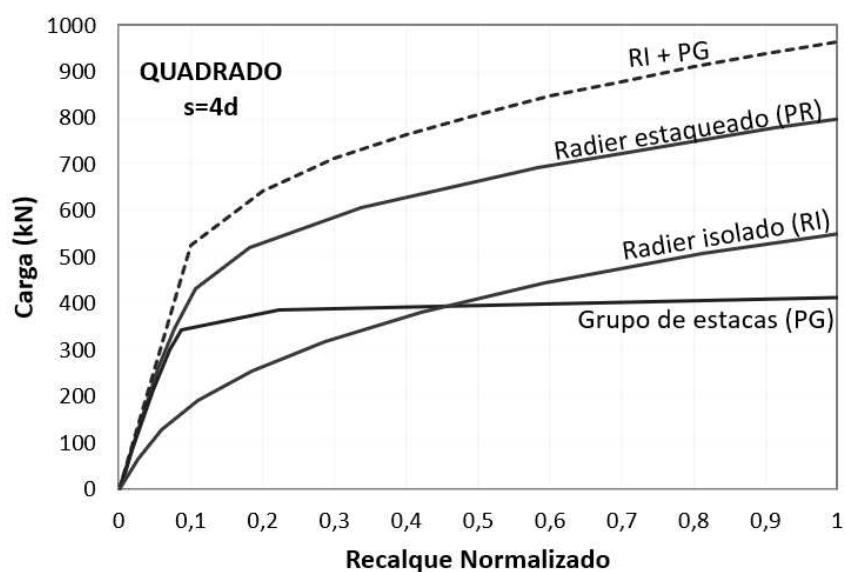
Fonte: A autora.

Figura 172 – Comportamento carga vs recalque nas fundações de base octogonal com espaçamento $s=4d$.



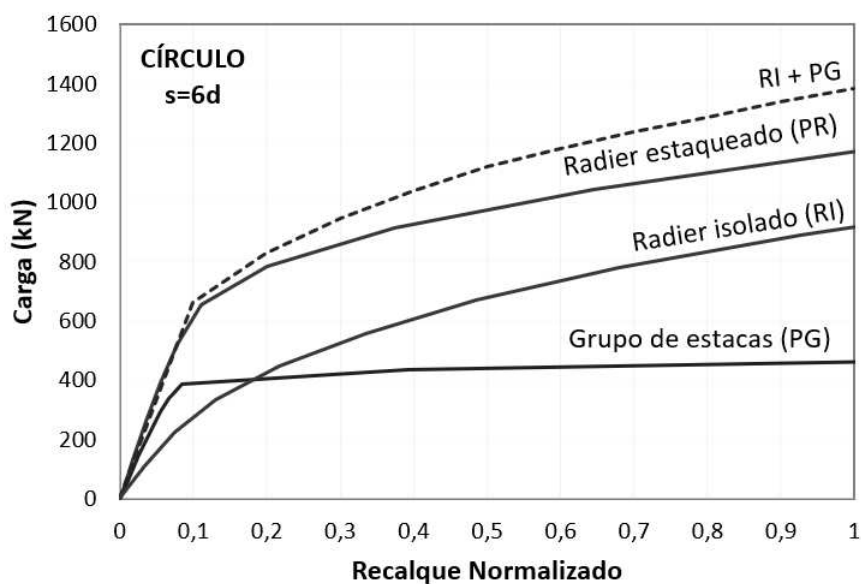
Fonte: A autora.

Figura 173 – Comportamento carga vs recalque nas fundações de base quadrada com espaçamento $s=4d$.



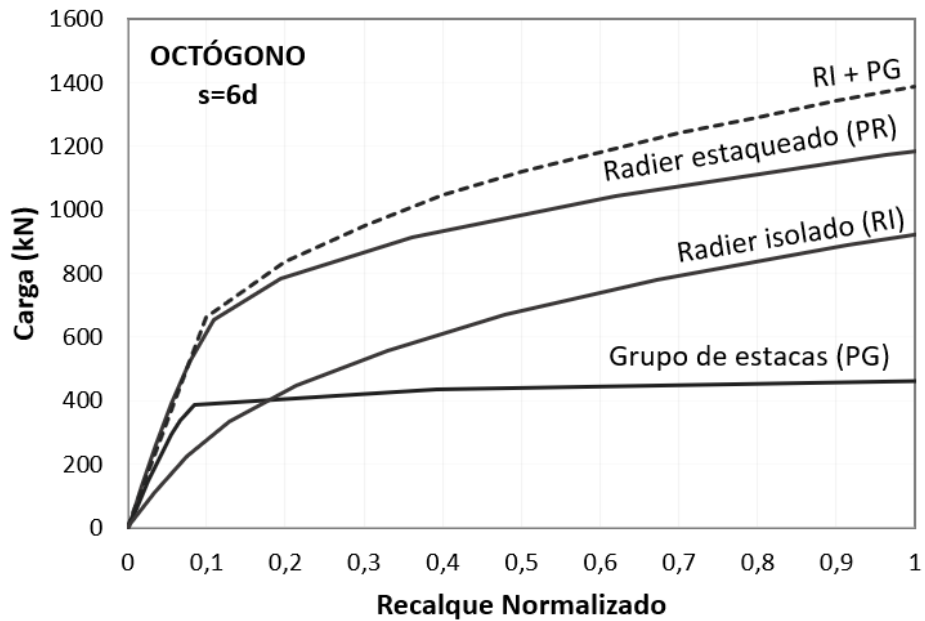
Fonte: A autora.

Figura 174 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base circular com espaçamento $s=6d$.



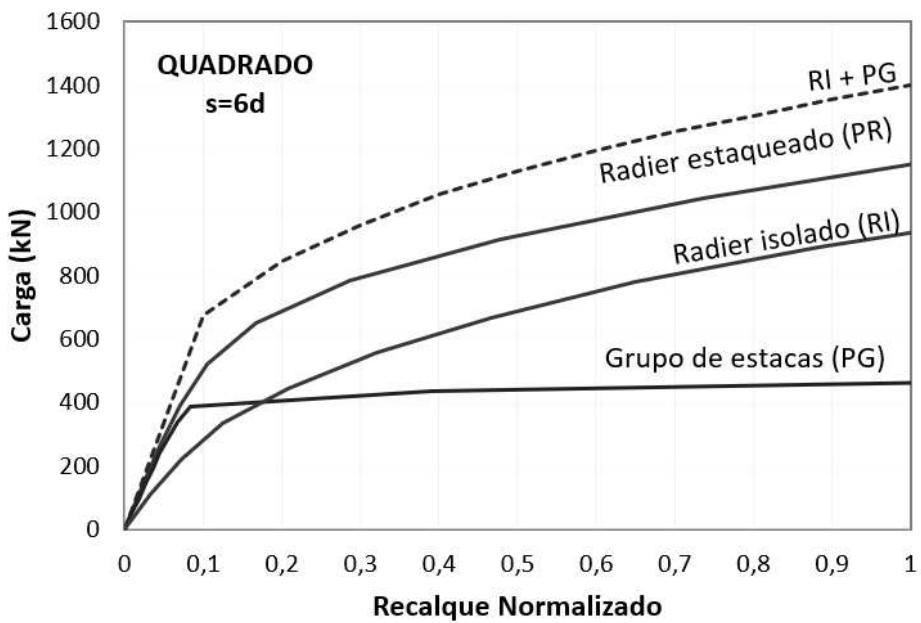
Fonte: A autora.

Figura 175 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base octogonal com espaçamento $s=6d$.



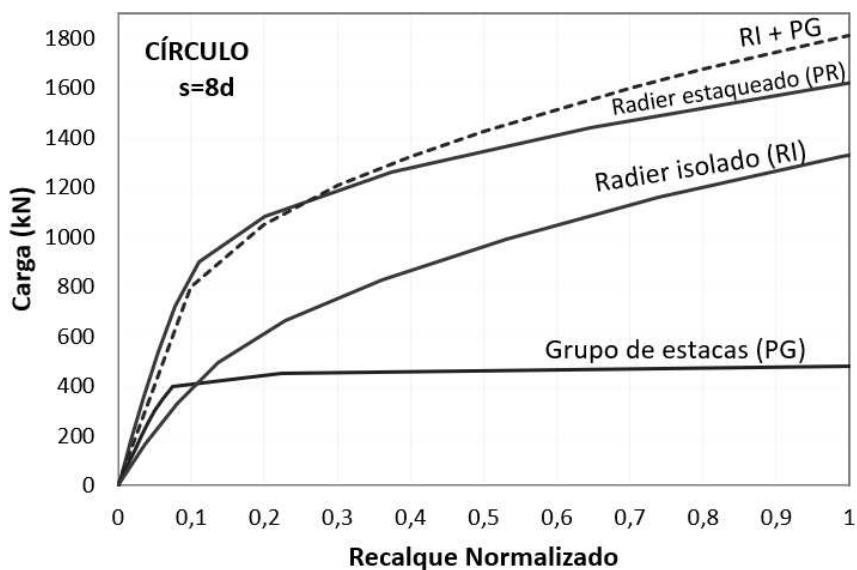
Fonte: A autora.

Figura 176 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base quadrada com espaçamento $s=6d$.



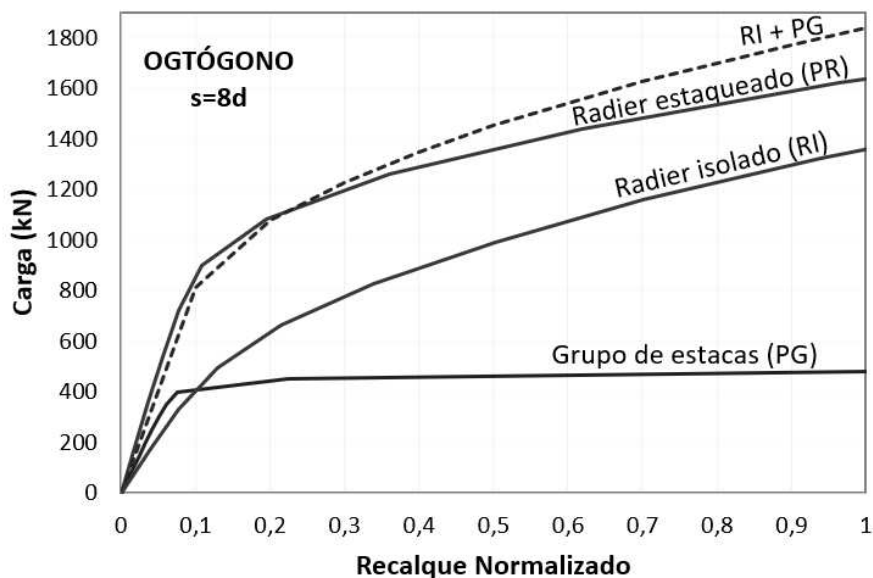
Fonte: A autora.

Figura 177 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base circular com espaçamento $s=8d$.



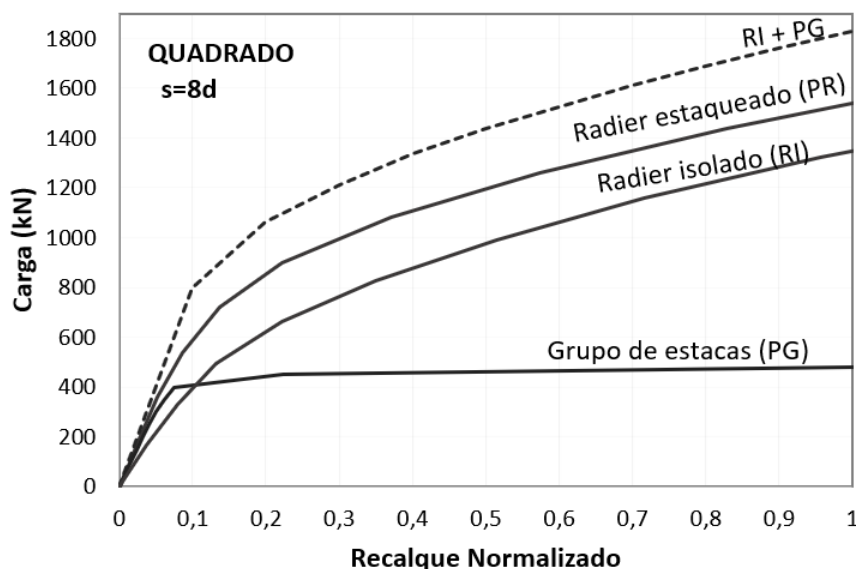
Fonte: A autora.

Figura 178 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base octogonal com espaçamento $s=8d$.



Fonte: A autora.

Figura 179 - Comportamento carga vs recalque nas fundações de base quadrada com espaçamento $s=8d$.



Fonte: A autora.

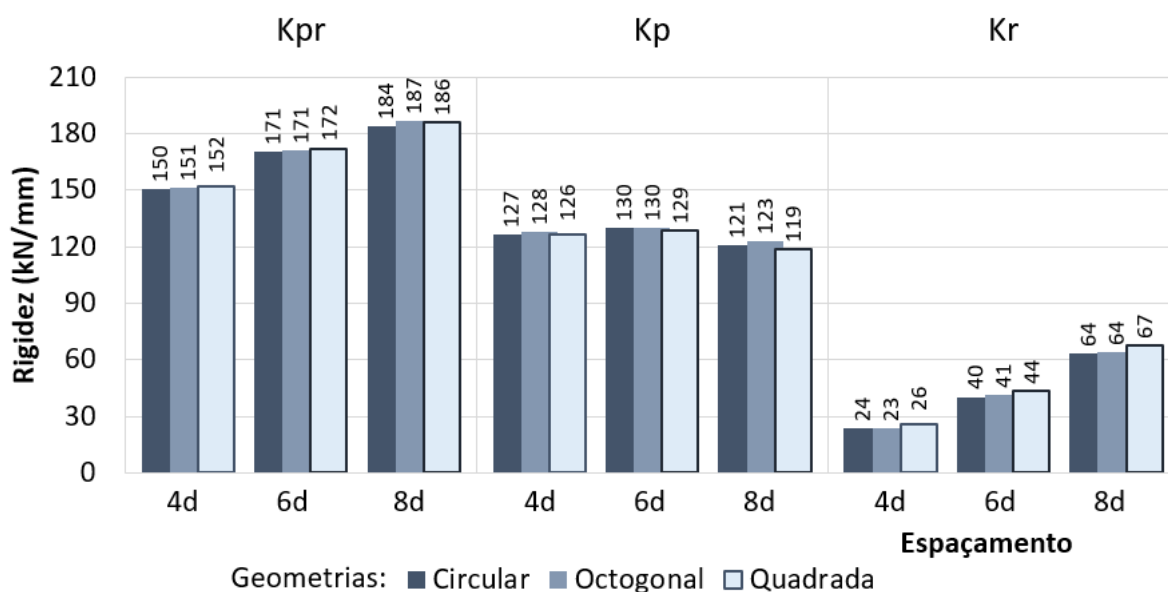
Os resultados em termos de rigidez inicial para o radier estaqueado (K_{pr}), e as parcelas de carga correspondentes ao radier (K_r) e o grupo de estacas (K_p) do sistema obtidos por meio da tangente inicial da curva carga vs recalque de cada elemento isoladamente pode ser visualizado na Figura 180. Nesta verifica-se que a rigidez global do sistema se eleva com o aumento do espaçamento entre estacas, assim como a rigidez do radier isolado (K_r) do sistema.

Destaca-se que a rigidez do radier isolado (K_r) é mais suscetível à variação do espaçamento quando comparado à rigidez do grupo de estacas (K_p), uma vez que, tanto a área líquida do elemento superficial quanto sua espessura é dependente do espaçamento entre estacas. Contudo, a rigidez do radier estaqueado (K_{pr}) é diretamente influenciado pela rigidez do radier isolado (K_r) uma vez que a rigidez do grupo de estacas (K_p) permanece praticamente inalterada. Portanto, quanto maior o espaçamento entre estacas, maior será o elemento superficial e, conseqüentemente maior a rigidez do radier isolado e do sistema.

Para uma melhor compreensão acerca da rigidez no comportamento das fundações analisou-se, portanto, a variação da rigidez nos diferentes níveis de carregamento. É apresentado na Figura 181, o comportamento em termos de rigidez para as fundações em radier estaqueado, bem como seus componentes isoladamente: radier (Figura 182) e grupo de estacas (Figura 183). Nestas

figuras verifica-se que os valores de rigidez diminui com o aumento do nível da carga, tendo em vista que há maiores recalques.

Figura 180 – Rigidez global do radier estaqueado (K_{pr}) e a rigidez correspondente: ao radier isolado (K_r) e o grupo de estacas (K_p) do sistema nas diferentes geometrias e espaçamentos estudados.

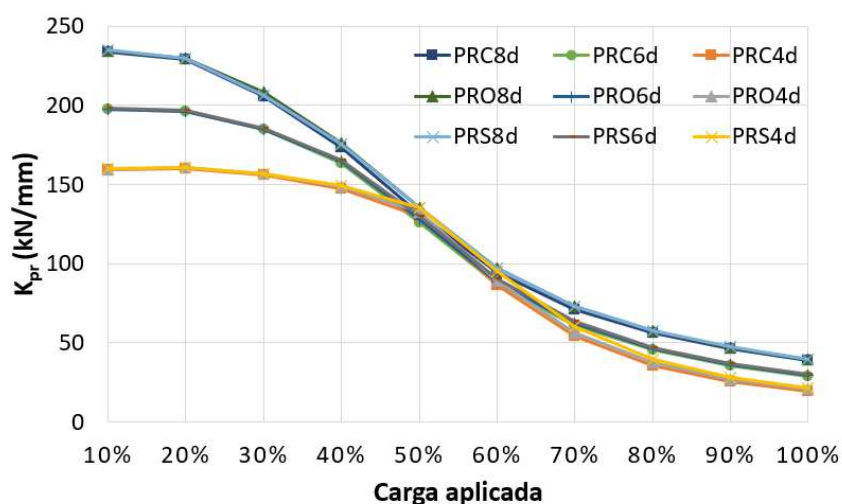


Fonte: A autora.

É importante salientar que nesse estudo o aumento do espaçamento entre estacas eleva tanto a área líquida de base do radier como a espessura do mesmo, mas as dimensões das estacas se mantem inalteradas, modificando-se apenas a distância entre elas. Isso provavelmente é o fator que domina a componente de rigidez no radier, no grupo de estacas e consequentemente no radier estaqueado, em que o aumento do espaçamento é proporcional a área de base do radier.

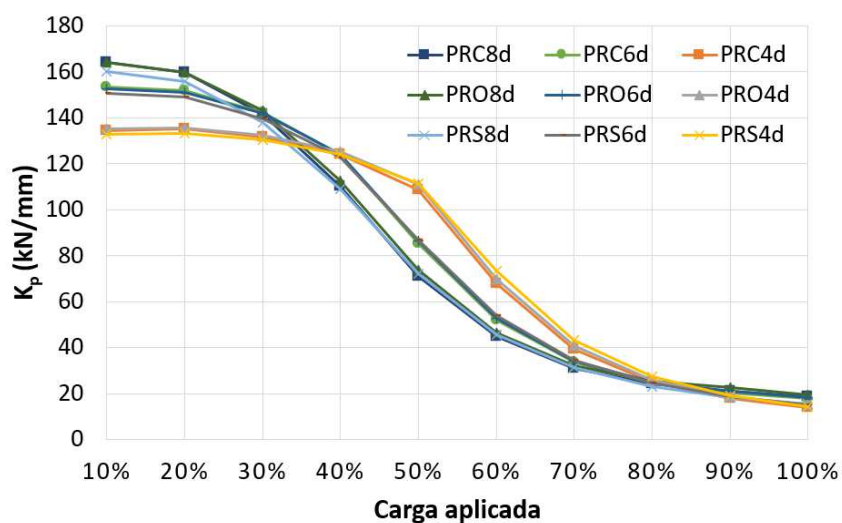
A partir das Figuras 181, 182 e 183 é possível constatar que não há variação significativa na rigidez ao alterar a geometria de base tanto no sistema (K_{pr}), quanto quando comparado com seus elementos individuais: no grupo de estacas (K_p) e no radier (K_r).

Figura 181 – Rigidez global dos radiers estaqueados (K_{pr}) ao longo dos estágios de carregamento.



Fonte: A autora.

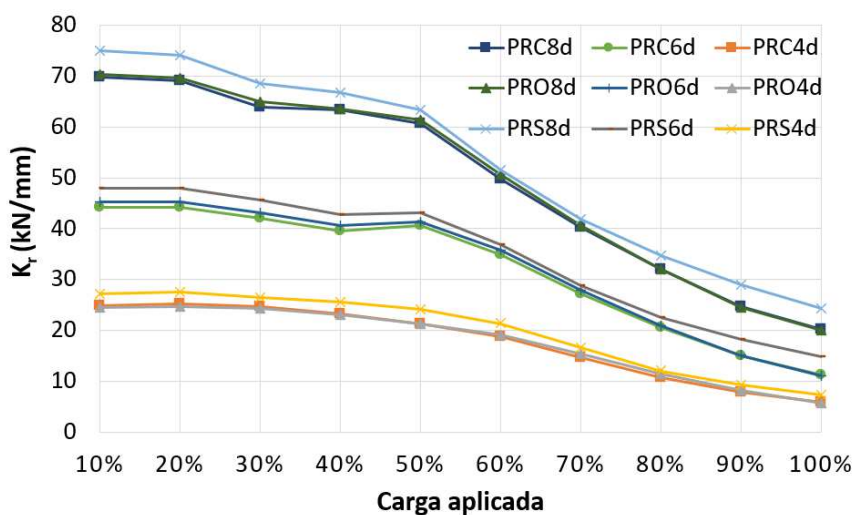
Figura 182 – Rigidez do grupo de estacas (K_p) do PR ao longo dos estágios de carregamento.



Fonte: A autora.

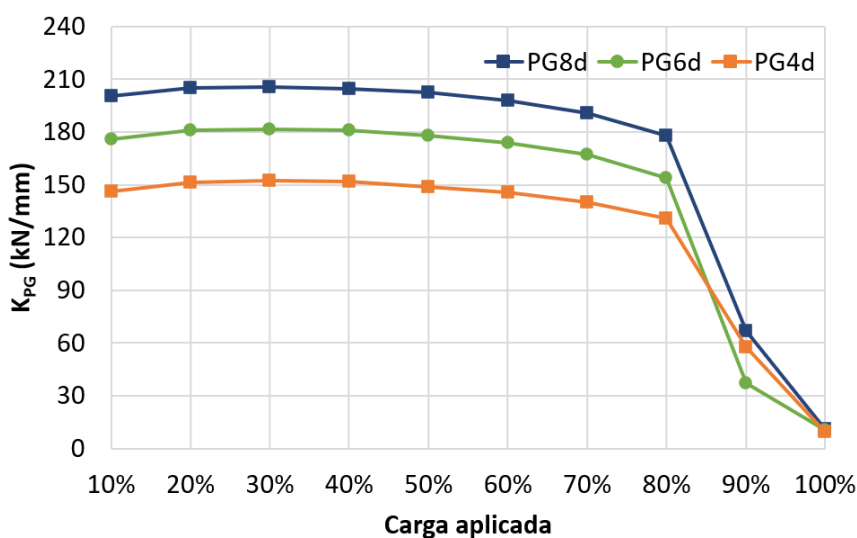
A rigidez ao longo dos estágios de carregamento para as fundações em grupo de estacas (K_{PG}) sem contato bloco-solo e em radier isolado (K_{RI}), sem a presença das estacas, estão resumidas nas Figuras 184 e 185. Nestas observa-se que a componente de rigidez entre o grupo de estacas do sistema, e o grupo de estacas suprimido do contato bloco-solo, ao longo dos estágios de carregamento apresentam comportamentos divergentes devido à influência exercida pelo contato bloco-solo.

Figura 183 – Rigidez do radier isolado (K_r) no PR ao longo dos estágios de carregamento.



Fonte: A autora.

Figura 184 – Rigidez do grupo de estacas sem contato bloco-solo (K_{PG}) ao longo dos estágios de carregamento.

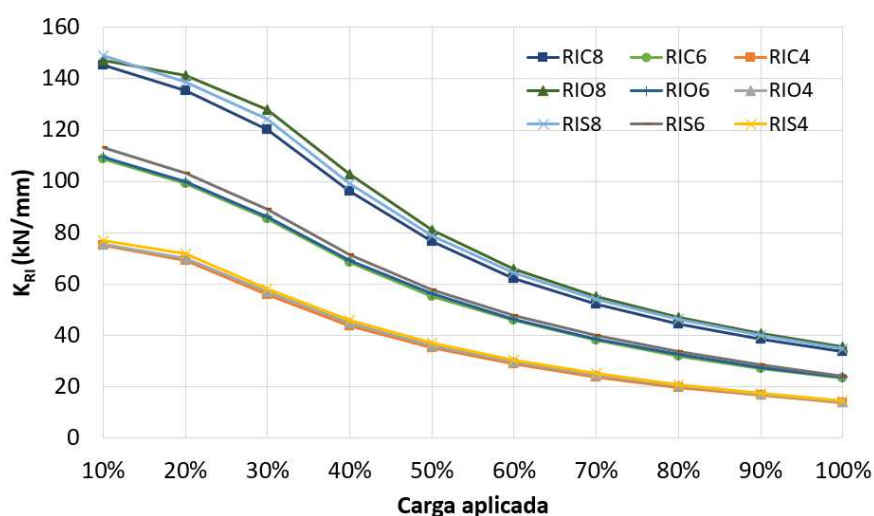


Fonte: A autora.

Ao contrário da rigidez correspondente ao grupo de estacas do sistema (K_p), na rigidez do grupo de estacas isolado (K_{PG}) verifica-se uma constância nos valores de rigidez até 80% do carregamento, estágio onde se conserva os menores recalques no grupo de estacas, a partir deste, onde possivelmente encontra-se o esgotamento da fundação, os valores de rigidez se reduzem repentinamente em consequência dos maiores recalques.

Ao comparar o radier isolado do sistema (Figura 183) e o radier isolado sem a presença das estacas (Figura 185), observa-se a mesma tendência no comportamento, embora o radier isolado K_{RI} apresenta uma maior rigidez em relação ao radier que é influenciado pelo grupo de estacas. Confrontando as diferentes fundações verifica-se que os valores de rigidez inicial entre o radier estaqueado e grupo de estacas não apresentam diferença significativa, todavia, apresentam-se superiores quando comparado com a fundação em radier isolado.

Figura 185 – Rigidez do radier isolado (K_{RI}) ao longo dos estágios de carregamento.



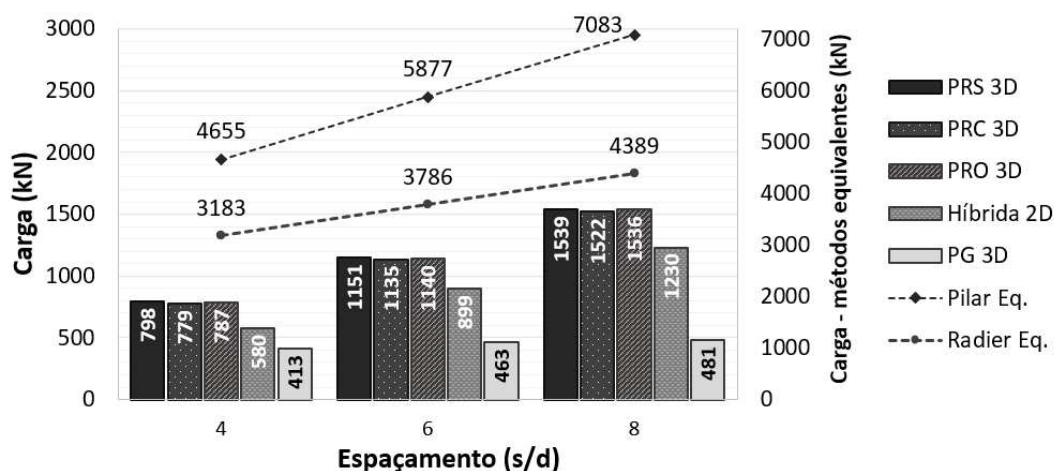
Fonte: A autora.

6.2 MÉTODOLOGIAS DE CÁLCULO

Com o objetivo de comparar as diferentes metodologias de cálculo, é resumido na Figura 186 as cargas convencionadas de ruptura a um recalque equivalente a 10% do diâmetro da estaca (30 mm) para as fundações em radier estaqueado (PR) e grupo de estacas (PG) a partir dos métodos do radier equivalente e pilar equivalente, nas análises híbridas bidimensionais (2D) e nas análises tridimensionais (3D).

Em resumo, todos os métodos de cálculo seguem a mesma tendência de elevação da capacidade de suporte da fundação com o aumento do espaçamento entre estacas. Tal fato, pode ser justificado principalmente devido ao aumento da área líquida de contato do radier/bloco com o solo, que eleva o nível das tensões ao redor das estacas e conseqüentemente sua resistência por atrito lateral, além disso há a redução da sobreposição do bulbo de tensões que auxilia na redução de recalques e no aumento da capacidade de carga.

Figura 186 - Cargas de ruptura convencionada a 10% do diâmetro da estaca para as fundações estaqueadas nos métodos do pilar e radier equivalente, análise híbrida 2D e tridimensional.



Fonte: A autora.

É válido ressaltar que a modelagem híbrida 2D baseada no método do pilar equivalente não leva em consideração nenhum parâmetro relacionado às dimensões do elemento superficial, entretanto quando comparado à análise tridimensional seus resultados se aproximaram mais dos resultados da fundação em radier estaqueado que considera o contato bloco-solo do que no grupo de estacas que suprime esse contato, ou seja, apesar de não levar em consideração os parâmetros geométricos do elemento superficial, a metodologia híbrida leva em consideração a parcela de carga contribuinte do contato bloco solo.

Dentro desse contexto, é importante ressaltar que os métodos de cálculo numéricos apresentam resultados mais fidedignos à realidade uma vez que foram aferidos, calibrados e validados a partir de resultados experimentais. Com isso, observa-se que os métodos teóricos: do pilar e radier equivalente se mostraram muito arrojados com valores superiores aos valores obtidos numericamente. Ressalta-se que esse comportamento também foi identificado por Wulandari (2013), onde os valores de deslocamentos obtidos pelo método analítico se mostraram maiores que os resultados obtidos por análise numérica 2D.

Randolph (1994) estipula a escolha do método equivalente relacionado com a quantidade, espaçamento e comprimento das estacas na fundação estaqueada a partir do cálculo do índice R. De acordo com esse índice, para valores de R menores que dois a abordagem do Pilar equivalente é mais indicada principalmente para estimar recalques médios. Entretanto, os

valores obtidos por esse método foram bem maiores que no radier equivalente, indicando a inviabilidade do método para fundações com as mesmas características desta pesquisa.

Ao comparar os resultados obtidos pela análise híbrida a partir da conversão do sistema em um pilar único equivalente aplicado ao método dos elementos finitos 2D em modelos previamente validados e calibrados, conclui-se que a análise híbrida apresenta valores coerentes, porém, menores que os resultados obtidos por meio da análise 3D, apresentando uma redução de cerca de 48%, 59% e 69% para os espaçamentos 4d, 6d e 8d quando comparado com o valor médio estimado pela metodologia tridimensional.

Além disso, verifica-se que os resultados da metodologia híbrida, quando comparado aos resultados tridimensionais apresentam um comportamento mais próximo aos resultados da fundação em radier estaqueado, com o bloco em contato com o solo e contribuindo com a capacidade de carga do sistema, do que quando comparado aos resultados obtidos a partir do grupo de estacas, supresso do contato bloco-solo. Dessa forma pode-se afirmar que a metodologia híbrida se mostra capaz de simular resultados coerentes quando validado e calibrado corretamente.

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e análises realizadas nesta pesquisa, pode-se concluir que:

O contato bloco-solo nas fundações em radier estaqueado permite um ganho substancial na capacidade de carga do sistema quando comparado ao grupo de estacas. Em maiores espaçamentos onde se eleva a área líquida de contato do radier, verifica-se um aumento na capacidade de carga de até 84%. Além disso constata-se um aumento considerável na capacidade de carga axial média e mobilização do atrito lateral nos primeiros metros do fuste da estaca devido a consideração do contato bloco-solo.

Nos raders estaqueados, para os primeiros estágios de carregamento, verifica-se uma predominância da capacidade de carga por meio das estacas, entretanto, conforme eleva-se a carga aplicada, uma maior parcela da carga é absorvida pelo radier. A 100% do carregamento, verifica-se que o contato bloco-solo é responsável por cerca de 34%, 49% e 61% do carregamento total da fundação para os espaçamentos 4d, 6d e 8d, respectivamente.

Em termos de capacidade de carga, a mudança da geometria, tanto no radier isolado quanto no radier estaqueado não apresenta nenhuma variação significativa no comportamento para recalques máximos em torno de 60 mm. Entretanto, para as fundações em radier estaqueado constata-se que a geometria do elemento superficial altera significativamente o mecanismo de distribuição e transferência de cargas do radier e estacas ao solo. Comportamento esse, que pode ser atribuído pela área radial de influência (cobrimento) da estaca sob o radier.

De modo geral, para todos os raders estaqueados analisados, constata-se que a geometria de base quadrada absorve uma maior parcela de carga pelo elemento superficial, seguida pela geometria circular e apresentando os menores valores a geometria octogonal. Consequentemente, o inverso é verificado para a parcela de carga absorvida pelas estacas.

Considerando o primeiro metro da estaca subjacente ao bloco, percebe-se mudanças substanciais nos valores de mobilização do atrito lateral e transferência de cargas axial do sistema decorrente da mudança da geometria superficial do bloco. Logo, para a escolha da geometria do radier estaqueado, é imprescindível verificar se essa camada de solo apresenta as

condições adequadas para receber esse aumento de sollicitação do atrito lateral, que não comprometa a segurança do sistema.

Com o aumento da carga aplicada e conseqüentemente dos recalques obtidos, a componente de rigidez em todas as fundações estudadas é reduzida. No entanto, com o aumento do espaçamento, a rigidez do elemento superficial do radier estaqueado tende a dominar a rigidez do sistema, tendo em vista que o radier é mais suscetível à variação do espaçamento do que o grupo de estacas, embora o aumento do espaçamento seja diretamente proporcional à rigidez obtida.

Nas cargas de ruptura convencionadas para um recalque estipulado a 10% do diâmetro da estaca, verifica-se que para os métodos teóricos equivalentes apresentaram valores extremamente elevados quando comparado com a metodologia 3D, considerada esta, mais fidedigna, desde que aferida e calibrada com resultados experimentais.

Ao comparar os resultados obtidos pela análise híbrida com os resultados obtidos tridimensionalmente, conclui-se que a análise híbrida apresenta valores coerentes, porém, conservadores. Dessa forma, pode-se afirmar que a metodologia híbrida é capaz de simular resultados para fundações em radiers estaqueados coerentes quando validado e calibrado corretamente e com um tempo de processamento muito inferior à análise tridimensional.

E por fim, é importante destacar que para obter resultados confiáveis e fidedignos para quaisquer tipos de análise numérica, particularmente em termos do comportamento carga vs recalque, é imprescindível que sejam realizados testes de convergência, validação e calibração do modelo numérico, ajustados de acordo com os parâmetros geotécnicos apropriados.

8 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir do entendimento apresentado nesta pesquisa, apresenta-se a seguir algumas sugestões para pesquisas futuras.

-Realizar análises alterando a localização das estacas no radier em diferentes geometrias, por exemplo a quadrada, octogonal e triangular, mantendo-se as mesmas dimensões do radier como área líquida de contato e espessura, e mesmas dimensões da estaca como quantidade, diâmetro, comprimento, espaçamento, rotacionando as estacas sob o centro do radier de maneira que possibilite uma uniformidade no cobrimento da estaca em relação às diferentes geometrias do bloco, e conseqüentemente unifique sua área de influência.

-Trabalhar com diferentes propriedades do solo, especialmente nas primeiras camadas de solo com o intuito de melhorar a capacidade de carga do elemento superficial a partir de mudanças na sua geometria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-AZIM, O. A.; ABDEL-RAHMAN, K.; EL-MOSSALLAMY, Y. M. Numerical investigation of optimized piled raft foundation for high-rise building in Germany. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 5, n. 1, p. 1–11, 2020. <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0258-4>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **ABNT. NBR 6122: Projeto e execução de fundações** Rio de Janeiro, 2019.
- AGUIAR, L. V. A. DE. **Estudo paramétrico sobre recalque de radiers estaqueados utilizando o método dos elementos finitos**. Recife: Universidade Católica de Pernambuco, 2017.
- ALGULIN, J.; PEDERSEN, B. **Modelling of a piled raft foundation as a plane strain model in PLAXIS 2D**. Sweden: Chalmers University of Technology, 2014.
- AMERATUNGA, J.; SIVAKUGAN, N.; DAS, B. M. **Developments in Geotechnical Engineering Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering**. Springer (India): [s.n.].
- BALAKUMAR, V. **Experimental Studies of Model Piled Rafts on Sand and Field Study of Prototype Behaviour**. [s.l.] ANNA UNIVERSITY, 2008.
- BALAKUMAR, V. et al. **A critical and comparative study on 2D and 3D analyses of raft and piled raft foundations**. *Geotechnical Engineering*, v. 49, n. 1, p. 150–164, 2018.
- BARBOSA, A. **Análise numérica do comportamento de um bloco sobre quatro estacas contendo uma estaca defeituosa**. Uberlândia, 2018.
- BEZERRA, J. E. **Estudo do comportamento de fundações em radier estaqueado: conceitos e aplicações**. BRASÍLIA: Universidade de Brasília, 2003.
- BITTENCOURT, D. M. A. **Construção de uma ferramenta numérica para análise de radiers estaqueados**. p. 221, 2012.
- BITTENCOURT, E. DE C. **Comportamento de Radiers Estaqueados Assentes em Solos Arenosos**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.
- BUDHU, M. **Fundações e estruturas de contenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- CARVALHO, I. S. **Análise experimental de blocos sobre grupos de estacas escavadas de pequeno diâmetro**. [s.l.] Universidade de Sao Paulo, 1994.
- CASTILLO, D. J. A. **Uso da técnica de Radier Estaqueado para pequenos edifícios assentes sobre solo colapsível**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2013.
- CELIK, F. **An Analytical Approach for Piled-Raft Foundation Design Based on Equivalent**

Pier and Raft Analyses by Using 2D Finite Element Method. Arabian Journal of Geosciences, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4579-6>

CESAR. **About Cesar.** Disponível em: <<http://www.co2cesar.eu/site/en/about.php>>. Acesso em: 12 out. 2020.

CHO, J. et al. **The settlement behavior of piled raft in clay soils.** Ocean Engineering, v. 53, p. 153–163, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.06.003>

CURADO, T. DA S. **Comparação de teorias de interação entre estacas.** [s.l.] Universidade Federal de Goiás, 2015.

DÉCOURT, L. **A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez.** Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE III, v. 1, p. 215–224, 1996.

DÉCOURT, L. **Provas de carga em estacas podem dizer muito mais do que têm dito.** Anais 6º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, v. V.1, p. 221–245, 2008.

EL-MOSSALLAMY, Y. M.; LUTZ, B.; DUERRWANG, R. **Special aspects related to the behavior of piled raft foundation.** Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering, v. 2, p. 1366–1369, 2009.

ELWAKIL, A. Z.; AZZAM, W. R. **Experimental and numerical study of piled raft system.** Alexandria Engineering Journal, v. 55, n. 1, p. 547–560, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.001>

EUROCODE 7, T. E. U. P. R. AND T. **Eurocode 7: Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing,** 2007.

FATTAH, M. Y.; AL-MOSAWI, M. J.; AL-ZAYADI, A. A. O. **Contribution to long term performance of piled raft foundation in clayey soil.** International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), v. 5, n. 7, p. 130–148, 2014. <https://doi.org/10.12989/gae.2013.5.1.017>

FATTAH, M. Y.; YOUSIF, M. A.; AL-TAMEEMI, S. M. K. **Effect of pile group geometry on bearing capacity of piled raft foundations.** Structural Engineering and Mechanics, v. 54, n. 5, p. 829–853, 2015. <https://doi.org/10.12989/sem.2015.54.5.829>

FERREIRA, T. J. **Análise numérica de sólidos axissimétricos via MEF: aplicação em elementos de concreto, de aço e mistos de aço e concreto.** [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

FLEMING, W. G. K. et al. **Piling Engineering.** 2nd. ed. Halsted Press: [s.n.].

FRASER, R. A.; WARDLE, L. J. **Numerical analysis of rectangular rafts on layered foundations.** Geotechnique, v. 26, n. 4, p. 613–630, 1976. <https://doi.org/10.1680/geot.1976.26.4.613>

FREITAS, A. P. S. DE. **Comportamento de radiers estaqueados como fundações de aerogeradores de energia eólica.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

FREITAS NETO, O. DE. **Avaliação experimental e numérica de radiers estaqueados com**

estacas defeituosas em solo tropical do Brasil. [s.l.] Universidade de Brasília, 2013.

GARCIA, J. R. **Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de campinas/sp.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2015.

GARCIA, J. R.; ALBUQUERQUE, P. J. R. DE. **Analysis of the contribution of the block-soil contact in piled foundations.** Latin American Journal of Solids and Structures, v. 16, n. 6, p. 1–22, 2019. <https://doi.org/10.1590/1679-78255565>

GARCIA, J. R.; ALBUQUERQUE, P. J. R. DE. **Numerical analysis of the influence of block geometry on the behavior of piled foundations.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 14, n. 1, p. 1–15, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000100007>

GARCIA, J. R.; ALBUQUERQUE, P. J. R. DE; FREITAS NETO, O. DE. **Avaliação do Efeito de Contato em Fundações Estaqueadas Assentes em Solo Argiloso e Arenoso.** COBRANSEG 2014, n. September, 2014.

GHALESARI, A. T. **On the Comparison Between the Approximate And Precise Methods of Piled Raft Foundation Analysis.** Mechanics, Materials Science & Engineering, n. May, p. 1–8, 2016.

HACHICH, W. et al. **Fundações Teoria e Prática.** São Paulo: [s.n.]. v. 2 ed

HAIN, S. J.; LEE, I. K. **The Analysis of Flexible Raft-Pile Systems.** Geotechnique, v. 28, n. 1, p. 65–83, 1978. <https://doi.org/10.1680/geot.1978.28.1.65>

HEMSLEY, J. A. **Design Applications of Raft foundations.** 1. ed. London: Thomas Telford Ltd, 2000. <https://doi.org/10.1680/daorf.27657>

HOOPER, J. A. **Observations on the Behaviour of a Piled-Raft Foundation on London Clay.** Proc Inst Civ Eng (Lond), v. 55, n. Part 2, p. 855–877, 1973. <https://doi.org/10.1680/iicep.1973.4144>

HORIKOSHI, K.; RANDOLPH, M. F. **Estimation of overall settlement of piled rafts.** Soils and foundations, v. 39, 1999. https://doi.org/10.3208/sandf.39.2_59

JANDA, T. et al. **Three Dimensional Finite Element Analysis and Back-analysis of CFA Standard Pile Groups and Piled Rafts Founded on Tropical Soil.** Soils and Rocks, v. 32, n. 1, 2009.

JAYALEKSHMI, B. R. et al. **Effect of Dynamic Soil-Structure Interaction on Raft of Piled Raft Foundation of Chimneys.** Hindawi Publishing Corporation, v. 2014, Arti, p. 11 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/790928>

JAYALEKSHMI, B. R.; JISHA, S. V.; SHIVASHANKAR, R. **Response in piled raft foundation of tall chimneys under along-wind load incorporating flexibility of soil.** Frontiers of Structural and Civil Engineering, v. 9, n. 3, p. 307–322, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11709-015-0288-8>

JAYALEKSHMI, B. R.; JISHA, S. V.; SHIVASHANKAR, R. **Analysis of Foundation of Tall R/C Chimney Incorporating Flexibility of Soil.** Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, v. 98, n. 3, p. 211–217, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40030-017-0218-y>

KATZENBACH, R. et al. **Combined Pile Raft Foundations (CPRF): an Appropriate Solution for the Foundations of High-Rise Buildings.** Slovak Journal of Civil Engineering, p. 19–29, 2005.

KATZENBACH, R.; ARSLAN, U.; MOORMANN, C. **Piled raft foundation projects in Germany.** Design applications of raft foundations, p. 323–391, 2000. <https://doi.org/10.1680/daorf.27657.0013>

KATZENBACH, R.; LEPLA, S.; CHOUDHURY, D. **Foundation Systems for High-Rise Structures.** [s.l.] CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315368870>

KIRAN, K. et al. **Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D.** International Journal for Scientific Research & Development, v. 6, n. 03, 2018.

KUMAR, V.; KUMAR, A. **An experimental study to analyse the behaviour of piled-raft foundation model under the application of vertical load.** Innovative Infrastructure Solutions, v. 3, n. 1, p. 1–17, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0141-8>

LIMA, B. S. **Otimização de Fundações Estaqueadas.** [s.l.] Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

LIU, G. R.; QUEK, S. S. **The finite element method: A Practical Course.** [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2003.

LONG, P. D. Footings with settlement- reducing piles in non-cohesive soil. 1993.

LONG, P. D. **Piled raft - A cost-effective foundation method for high-rises.** Geotechnical Engineering, v. 41, n. 3, 2010.

MACEDO, J. W. N. DE. **Modelagem numérica de radier estaqueado em solo arenoso.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

MAHARAJ, D. K.; ANSHUMAN. **The Effect of Raft Size and Pile Length on Load-Settlement Behaviour of Axisymmetric Piled Raft Foundation.** EJGE, 2014.

MAHMOOD, M. R.; AL-WAKEL, S. F. A.; HANI, A. A. **Experimental and Numerical Analysis of Piled Raft Foundation Embedded within Partially Saturated Soil.** Engineering and Technology Journal, v. 35, n. 2, p. 97–105, 2017.

MANDOLINI, A. **Design of piled raft foundations : practice and development.** BAP IV, International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, p. 59–80, 2003.

MANDOLINI, A.; VIGGIANI, C. **Settlement of piled foundations.** Géotechnique, v. 47, n. 4, p. 791–816, 1997. <https://doi.org/10.1680/geot.1997.47.4.791>

MEENA, N. K.; NIMBALKAR, S. **Effect of water drawdown and dynamic loads on piled raft: Two-dimensional finite element approach.** Infrastructures, v. 4, n. 4, 2019. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4040075>

MENDONÇA, A. V.; PAIVA, J. B. **An elastostatic FEM/BEM analysis of vertically loaded raft and piled raft foundation.** Engineering Analysis with Boundary Elements, v. 27, n. 9, p.

919–933, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0955-7997\(03\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S0955-7997(03)00061-4)

NGUYEN, D. D. C.; JO, S. B.; KIM, D. S. **Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects.** Computers and Geotechnics, v. 47, p. 16–27, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.06.007>

NOVAK, L. J.; REESE, L. C.; WANG, S.-T. **Analysis of Pile-Raft Foundations with 3D Finite-Element Method,** 2005. [https://doi.org/10.1061/40753\(171\)93](https://doi.org/10.1061/40753(171)93)

OH, E. Y. N. et al. **Numerical analysis of piled raft foundation in sandy and clayey soils.** Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering, v. 2, n. January, p. 1159–1162, 2009.

OTTAVIANI, M. **Three-Dimensional Finite Element Analysis of Vertically Loaded Pile Groups.** Geotechnique, v. 25, n. 2, p. 159–174, 1975. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.2.159>

PEREZ, C. A. C. **Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral.** [s.l.] Universidade de Brasília, 2017.

PEZO, O. B. **Análises Numéricas De Provas De Carga Em Radier Estaqueado Utilizando O Método Dos Elementos Finitos.** p. 151, 2013.

POULOS, H. G. **Alternative design strategies for piled raft foundations.** Conf. Deep Foundations. *Anais...*Singapore: 3, V., 1994

POULOS, H. G. **Piled raft foundations : design and applications.** n. 2, 2001.

POULOS, H. G. **Tall Building Foundation Design.** [s.l.] CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315156071>

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Pile Foundation Analysis and Design,** 1980.

POULOS, H. G.; SMALL, J. C.; CHOW, H. **Piled Raft Foundations for Tall Buildings.** *Geotechnical Engineering* Journal of the SEAGS & AGSSEA, v. 42, n. 2, p. 78–84, 2011.

PRAKOSO, W. A.; KULHAWY, F. H. **Contribution to piled raft foundation design.** Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, v. JANUARY 20, n. 127, p. 17–24, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:1(17))

PRESSLEY, J. S.; POULOS, H. G. **Finite element analysis of mechanisms of pile group behaviour.** International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v. 10, n. 2, p. 213–221, 1986. <https://doi.org/10.1002/nag.1610100208>

QUARESMA, A. R. et al. **Investigações Geotécnicas. In: Fundações Teoria e Prática.** 2. ed. São Paulo: [s.n.].

RANDOLPH, M. F. **Design of piled raft foundations** Bangkok Cambridge University, , 1983.

RANDOLPH, M. F. **DESIGN METHODS FOR PILE GROUPS AND PILED RAFTS.** XIII ICSMFE. *Anais...*New Delhi, India: 1994

RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. P. **Analysis of deformation of vertically loaded piles.**

Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978.
<https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000729>

RAVICHANDRAN, N.; SHRESTHA, S.; PIRATLA, K. **Robust design and optimization procedure for piled-raft foundation to support tall wind turbine in clay and sand.** Soils and Foundations, v. 58, n. 3, p. 744–755, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.027>

REUL, O.; RANDOLPH, M. F. **Vertical Loading.** n. January, p. 1–13, 2004.

RIBEIRO, M. A. A. A. **Análise de Fadiga em Estrutura de Fundação de Torre de Turbina Eólica.** 2014.

RIBEIRO, R. **Análise estática e dinâmica de diferentes geometrias de fundações superficiais de aerogeradores.** Natal- RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

ROCSCIENCE. **RS2.** Disponível em: <<https://www.rocscience.com/>>. Acesso em: 16 maio. 2019.

RODRIGUES, C. C. Y. **Análise de Estruturas Axissimétricas: Aplicação a Reservatórios Circulares.** 2009.

RYLTENIUS, A. **FEM Modelling of piled raft foundations in two and three dimensions.** [s.l.] Lund University, 2011.

SALES, M. M. **Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas.** Brasília: Universidade de Brasília, 2000.

SANCTIS, L. DE; MANDOLINI, A. **Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 132, n. 12, p. 1600–1610, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:12\(1600\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:12(1600))

SCHULZE, T. **Análise da capacidade de carga de estaca escavada instrumentada de pequeno diâmetro por meio de métodos semi-empíricos.** [s.l.] UNIV, 2013.

SMALL, J. C.; ZHANG, H. H. **Piled raft foundations subjected to general loadings.** Developments in Theoretical Geomechanics, n. 2000, p. 431–444, 2006.

SOARES, W. C.; COUTINHO, R. Q.; PINTO DA CUNHA, R. **Piled raft with hollow auger piles founded in a Brazilian granular deposit.** Canadian Geotechnical Journal, v. 52, n. 8, p. 1005–1022, 2015. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0087>

SOUSA, L. C. DE M. **Estudo Experimental Do Comportamento De Sapatas.** p. 158, 2003.

SVENSSON, H. **Design of foundations for wind turbines.** p. 161, 2010.

TAVARES, L. R. DE O. **Simulação numérica do comportamento de dutos enterrados sujeitos a movimentos de massa.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

TOMLINSON, M. J. **Foundation design and construction.** Seventh ed ed. [s.l.] Prentice Hall, 2001.

TRADIGO, F.; PISANÒ, F.; PRISCO, C. DI. **On the use of embedded pile elements for the numerical analysis of disconnected piled rafts**. *Computers and Geotechnics*, v. 72, p. 89–99, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.005>

TRAN, T. VAN; KIMURA, M.; BOONYATEE, T. **3D FE Analysis of Effect of Ground Subsidence and Piled Spacing on Ultimate Bearing Capacity of Piled Raft and Axial Force of Piles in Piled Raft**. *Open Journal of Civil Engineering*, v. 02, n. 04, p. 206–213, 2012. <https://doi.org/10.4236/ojce.2012.24027>

VAZ, L. E. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. Rio de Janeiro: [s.n.].

VIGGIANI, C.; MANDOLINI, A.; RUSSO, G. **Piles and Pile Foundations**. [s.l.: s.n.].

WESTGATE, Z. J.; DEJONG, J. T. **Geotechnical Considerations for Offshore Wind Turbines**. *Offshore* (Conroe, TX), p. 1–130, 2005.

WOLNEY, D. **Etapa de fundações do residencial Yachthouse utiliza 4600m³ de concreto**. *Fundações e Obras Geotécnicas*, p. 51, 2017.

WOOD, D. M. **Geotechnical modelling**. *Geotechnical Modelling*, p. 1–488, 2004.

WU, W. J.; CHAI, J. C.; HUANG, J. Z. **Interaction between pile and raft in piled raft foundation**. In: *Advances in Building Technology*. [s.l.] Elsevier, 2002. p. 603–610. <https://doi.org/10.1016/B978-008044100-9/50077-2>

WULANDARI, P. **Analysis of piled raft foundations in clayey soils using finite element and analytical methods**. *Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC 2013*, p. 1–6, 2013.

WULANDARI, P. S.; TJANDRA, D. **Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D**. *Procedia Engineering*, v. 125, p. 363–367, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.083>

APÊNDICE A

Parâmetros geométricos das fundações analisadas, conforme indicações da Figura 27.

Tabela 10 - Parâmetros geométricos das fundações estaqueadas sem contato bloco-solo

FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS SEM CONTATO BLOCO-SOLO				
NOMENCLATURA		PG-S4d	PG-S6d	PG-S8d
Espaçamento (S)	cm	120	180	240

Tabela 11 - Parâmetros geométricos das fundações superficiais

FUNDAÇÕES RASAS										
GEOMETRIA		QUADRADO			CÍRCULO			OCTÓGONO		
NOMENCLATURA		IBS-1	IBS-2	IBS-3	IBC-1	IBC-2	IBC-3	IBO-1	IBO-2	IBO-3
Área do bloco	m ²	4,42	8,24	13,24	4,42	8,24	13,24	4,42	8,24	13,24
Área líquida de contato	m ²	4,14	7,96	12,96	4,14	7,96	12,96	4,14	7,96	12,96
Perímetro de contato	cm	840,8	1148,2	1455,6	745,2	1017,9	1455,6	765,5	1045,1	1324,8
Comprimento (B)	cm	210,2	287,1	363,9	-	-	-	231	315,4	399,8
Comprimento (a)	cm	-	-	-	-	-	-	67,7	92,4	117
Diâmetro (D)	cm	-	-	-	237,2	324	410,6	-	-	-

Tabela 12 - Parâmetros geométricos das fundações estaqueadas com contato bloco-solo

FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS COM CONTATO BLOCO-SOLO										
GEOMETRIA		QUADRADO			CÍRCULO			OCTÓGONO		
NOMENCLATURA		PRS-S4d	PRS-S6d	PRS-S8d	PRC-S4d	PRC-S6d	PRC-S8d	PRO-S4d	PRO-S6d	PRO-S8d
Espaçamento (S)	cm	120	180	240	120	180	240	120	180	240
Cobrimento (c)	cm	45,1	53,5	62	33,7	34,4	35,6	30,6	30,4	30,2
Comprimento (B)	cm	210,2	287,1	363,9	-	-	-	231	315,4	399,8
Comprimento (a)	cm	-	-	-	-	-	-	67,7	92,4	117
Diâmetro (D)	cm	-	-	-	237,2	324	410,6	-	-	-
Perímetro de contato	cm	840,8	1148,2	1455,6	745,2	1017,9	1455,6	765,5	1045,1	1324,8
Área do bloco	m ²	4,42	8,24	13,24	4,42	8,24	13,24	4,42	8,24	13,24
Área líquida de contato	m ²	4,14	7,96	12,96	4,14	7,96	12,96	4,14	7,96	12,96

APÊNDICE B

Apresentam-se neste apêndice, os valores correspondentes às curvas carga vs recalque das fundações em radier estaqueado (PR), na Tabela 13, do grupo de estacas (PG) na Tabela 14 e radier isolado (RI), na Tabela 15.

Tabela 13 -Valores de carga e recalque obtidos para os radiers estaqueados circular (PRC), octogonal (PRO) e quadrado (PRS) nos respectivos espaçamentos ente estacas $s=4d$, $6d$ e $8d$.

Carga (kN)	Recalque (mm)		
	PRC4d	PRO4d	PRS4d
0	0,02	0,02	0,02
87	0,54	0,54	0,54
173	1,08	1,08	1,08
260	1,66	1,66	1,66
347	2,35	2,34	2,32
433	3,33	3,27	3,20
520	6,01	5,85	5,48
607	11,23	10,82	10,11
693	19,38	18,58	17,51
780	30,18	28,91	27,41
867	43,71	41,85	39,85
650	42,41	40,54	38,56
433	41,07	39,20	37,22
217	39,70	37,83	35,85
0	38,24	36,37	34,39

Carga (kN)	Recalque (mm)		
	PRC6d	PRO6d	PRS6d
0	0,02	0,02	0,02
130	0,66	0,66	0,66
261	1,33	1,33	1,33
391	2,12	2,12	2,11
522	3,19	3,17	3,15
652	5,17	5,10	5,01
782	9,01	8,83	8,62
913	14,96	14,69	14,36
1043	23,01	22,65	22,09
1174	32,98	32,52	31,71
1304	44,90	44,33	43,30
978	43,28	42,71	41,70
652	41,60	41,04	40,02
326	39,84	39,28	38,27
0	37,76	37,19	36,23

Carga (kN)	Recalque (mm)		
	PRC8d	PRO8d	PRS8d
0	0,02	0,02	0,02
180	0,77	0,77	0,77
360	1,57	1,57	1,57
540	2,63	2,59	2,62
720	4,15	4,09	4,10
900	6,84	6,66	6,64
1080	11,43	11,14	11,13
1260	17,70	17,26	17,20
1440	25,65	25,01	24,89
1620	35,18	34,33	34,16
1800	46,40	45,34	45,12
1350	44,53	43,48	43,28
900	42,59	41,54	41,35
450	40,45	39,42	39,25
0	37,66	36,65	36,52

Tabela 14 - Valores de carga e recalque obtidos para os grupos de estacas nos respectivos espaçamentos entre estacas $s=4d$, $6d$ e $8d$.

Carga (kN)	Recalque (mm)		Carga (kN)	Recalque (mm)		Carga (kN)	Recalque (mm)	
	PG4d			PG6d			PG8d	
0	0,02		0	0,02		0	0,02	
43	0,29		49	0,28		50	0,25	
86	0,57		97	0,54		100	0,49	
129	0,85		146	0,80		150	0,73	
172	1,13		194	1,07		200	0,98	
215	1,44		243	1,36		250	1,24	
258	1,77		291	1,67		301	1,52	
301	2,15		340	2,03		351	1,84	
344	2,63		388	2,52		401	2,25	
386	6,69		437	11,75		451	6,73	
429	44,44		485	45,78		501	45,81	
322	43,76		364	45,13		376	45,24	
215	43,08		243	44,47		250	44,64	
107	42,38		121	43,80		125	44,05	
0	41,68		0	43,13		0	43,46	

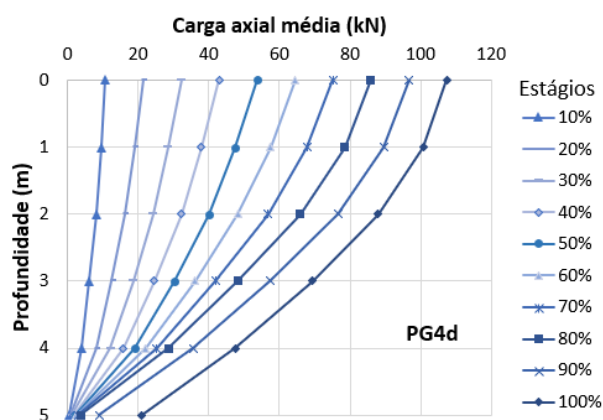
Tabela 15 - Valores de carga e recalque obtidos para os radiers isolados circular (RIC), octogonal (RIO) e quadrado (RIS) nas dimensões correspondentes aos espaçamentos entre estacas $s=4d$, $6d$ e $8d$.

Carga (kN)	Recalque (mm)			Carga (kN)	Recalque (mm)			Carga (kN)	Recalque (mm)		
	RIC4	RIO4	RIS4		RIC6	RIO6	RIS6		RIC8	RIO8	RIS8
0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
64	0,85	0,84	0,83	111	1,02	1,02	0,98	165	1,14	1,12	1,11
127	1,84	1,82	1,78	223	2,25	2,23	2,16	331	2,45	2,34	2,39
191	3,42	3,36	3,29	334	3,91	3,87	3,74	496	4,13	3,87	3,99
254	5,80	5,66	5,55	445	6,52	6,44	6,24	662	6,88	6,44	6,67
318	9,04	8,82	8,62	557	10,07	9,93	9,64	827	10,82	10,20	10,48
382	13,25	12,93	12,61	668	14,59	14,39	13,99	992	15,94	15,09	15,45
445	18,71	18,24	17,77	779	20,42	20,14	19,51	1158	22,19	21,05	21,48
509	25,65	25,01	24,38	891	27,82	27,43	26,52	1323	29,70	28,19	28,70
573	34,58	33,63	32,87	1002	36,94	36,38	35,30	1489	38,62	36,64	37,29
636	46,09	44,75	44,04	1113	47,91	47,16	46,13	1654	49,14	46,59	47,41
477	43,90	42,58	41,92	835	45,34	44,58	43,60	1241	46,30	43,79	44,65
318	41,53	40,23	39,61	557	42,50	41,79	40,86	827	43,22	40,79	41,66
159	38,90	37,62	37,05	278	39,33	38,64	37,77	414	39,75	37,50	38,28
0	35,47	34,24	33,74	0	35,31	34,65	33,81	0	35,66	33,56	34,30

APÊNDICE C

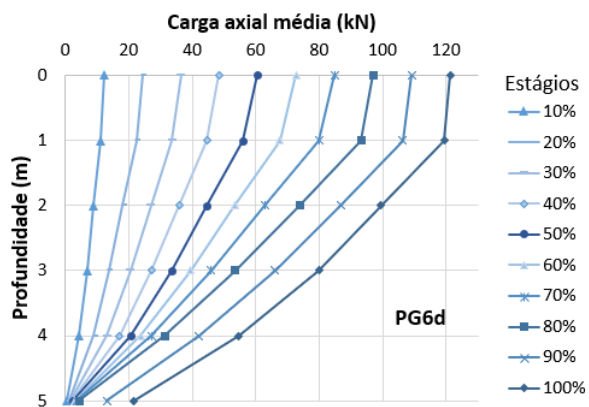
Apresentam-se neste Apêndice, da Figura 183 a 194 a evolução da transferência de cargas axial média ao longo dos 10 estágios de carregamento para uma estaca das fundações em radier estaqueado e grupo de estacas.

Figura 187 – Transferência de carga axial média no grupo de estacas 4d.



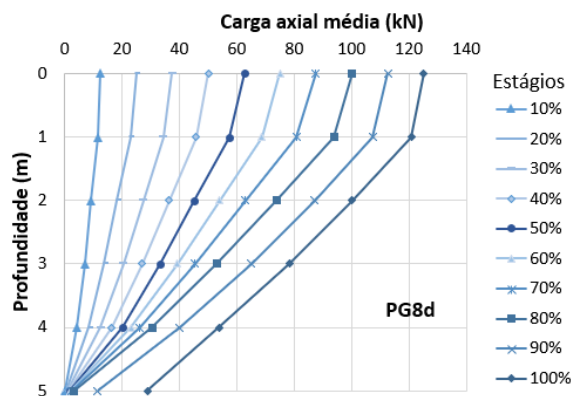
Fonte: A autora.

Figura 188 - Transferência de carga axial média no grupo de estacas 6d.



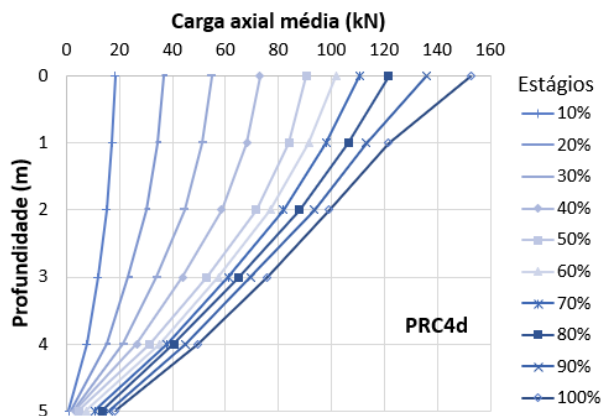
Fonte: A autora.

Figura 189 - Transferência de carga axial média no grupo de estacas 8d.



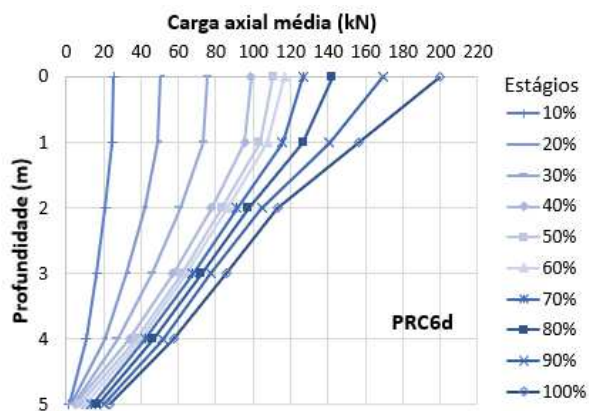
Fonte: A autora.

Figura 190 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado circular 4d.



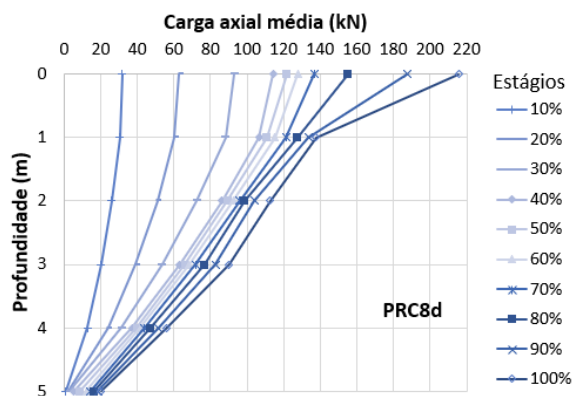
Fonte: A autora.

Figura 191 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado circular 6d.



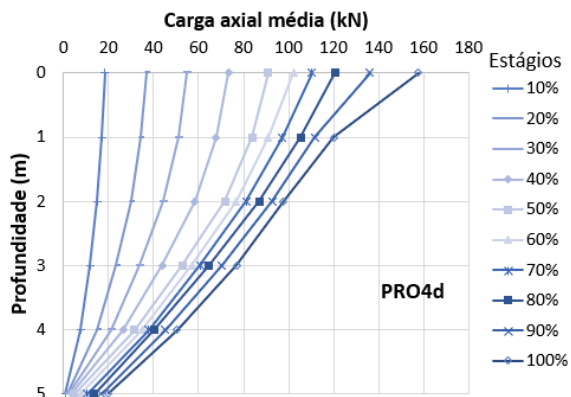
Fonte: A autora.

Figura 192 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado circular 8d.



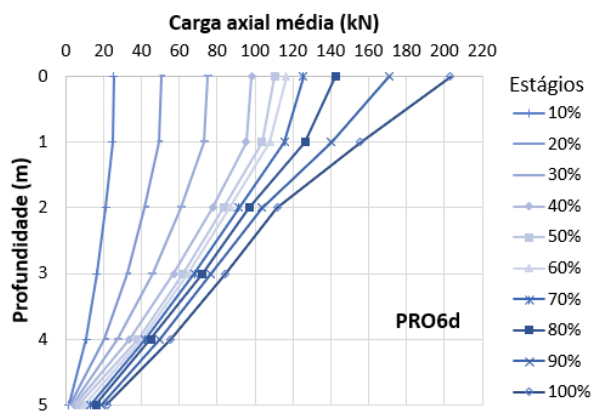
Fonte: A autora.

Figura 193 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado octogonal 4d.



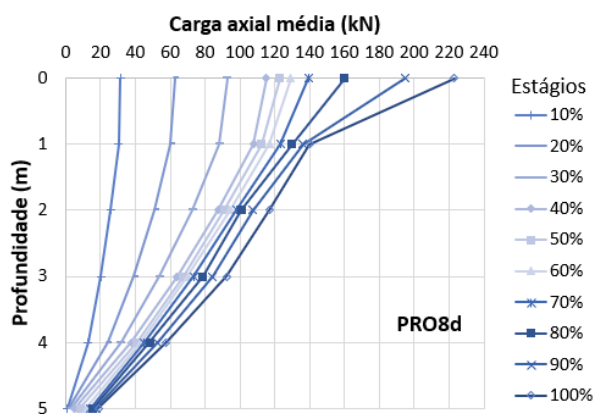
Fonte: A autora.

Figura 194 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado octogonal 6d.



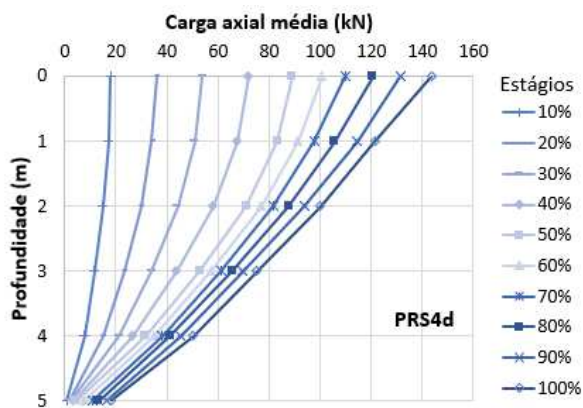
Fonte: A autora.

Figura 195 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado octogonal 8d.



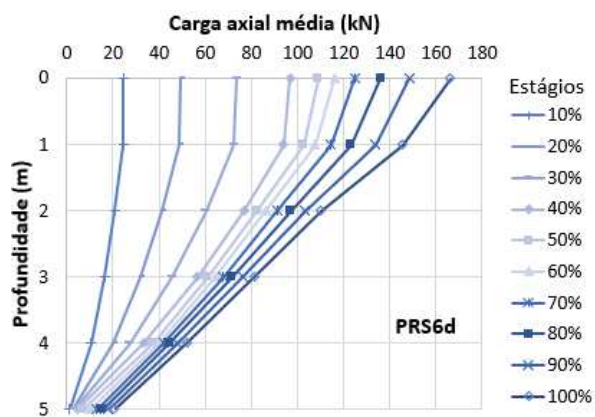
Fonte: A autora.

Figura 196 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado quadrado 4d.



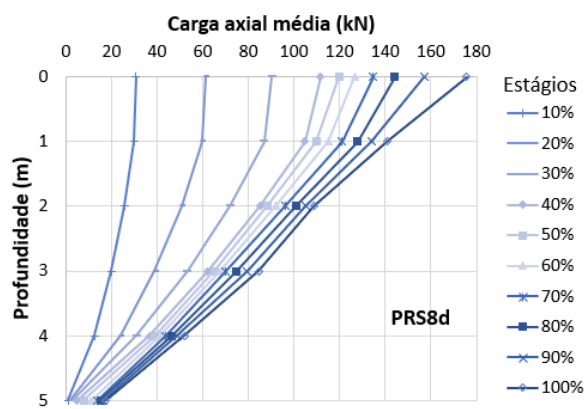
Fonte: A autora.

Figura 197 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado quadrado 6d.



Fonte: A autora.

Figura 198 - Transferência de carga axial média no radier estaqueado quadrado 8d.

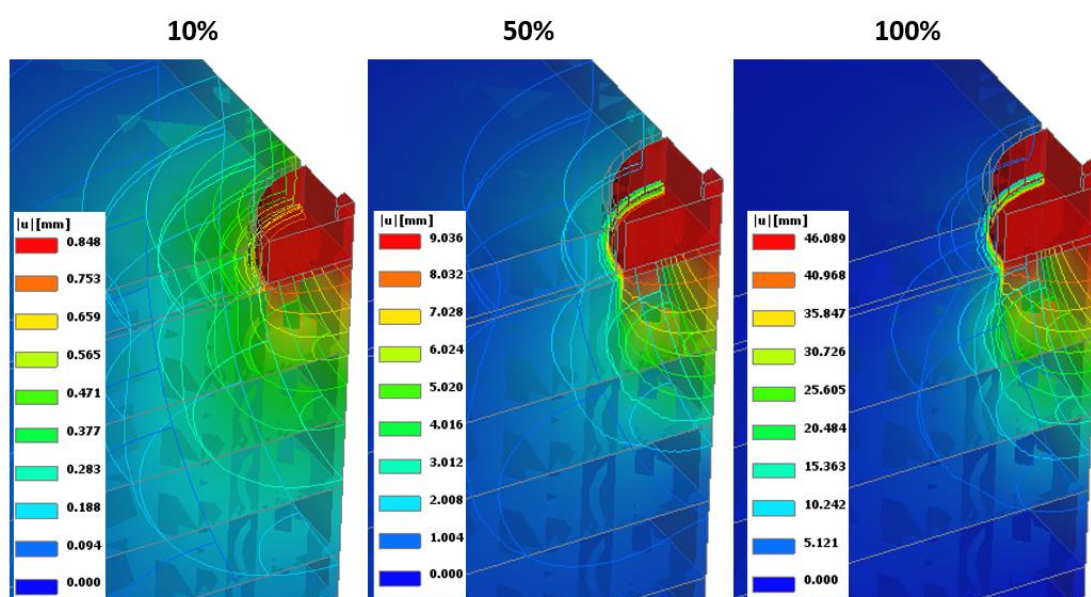


Fonte: A autora.

APÊNDICE D

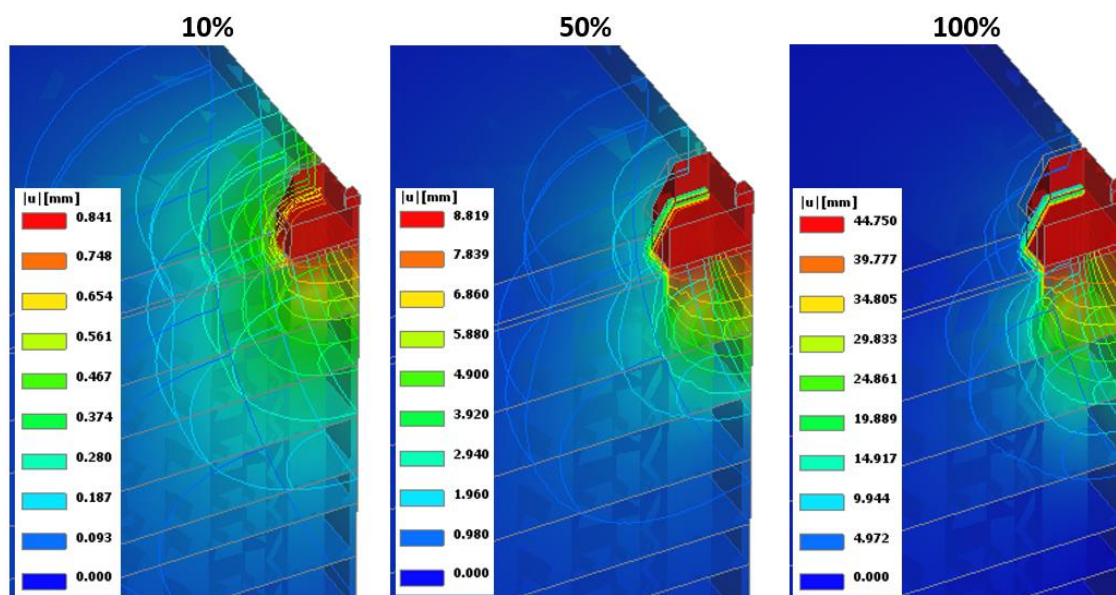
Apresentam-se neste Apêndice da Figura 195 a 203 a evolução dos deslocamentos totais obtidos após o processamento das análises a 10%, 50% e 100% do carregamento máximo adotado para os radiers isolados nas suas respectivas áreas de contato.

Figura 199 - Deslocamentos no RIC4 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



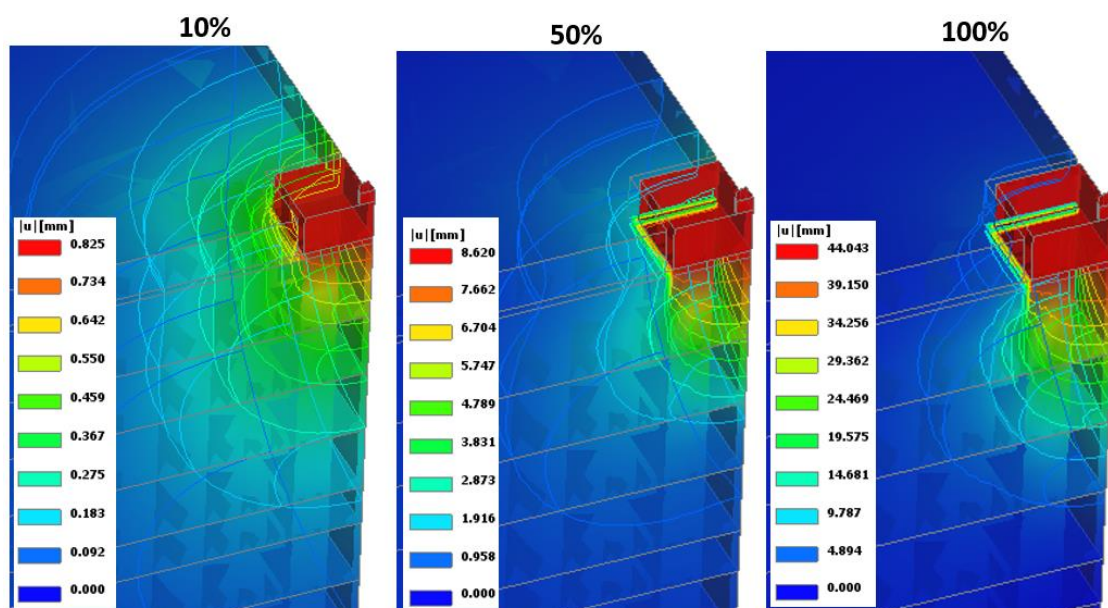
Fonte: A autora

Figura 200 - Deslocamentos no RIO4 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



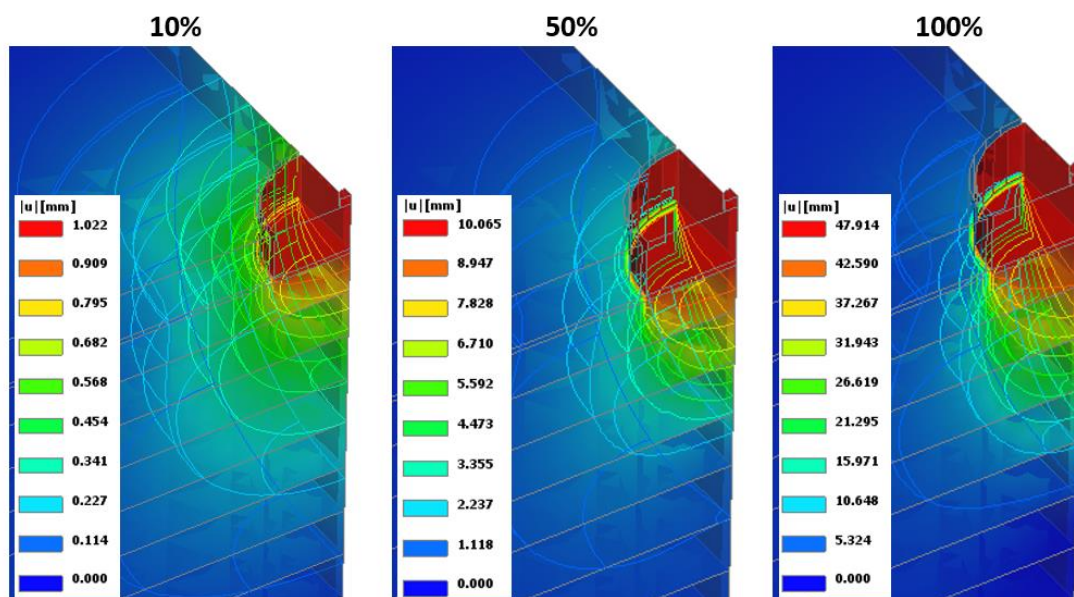
Fonte: A autora.

Figura 201 - Deslocamentos no RIS4 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



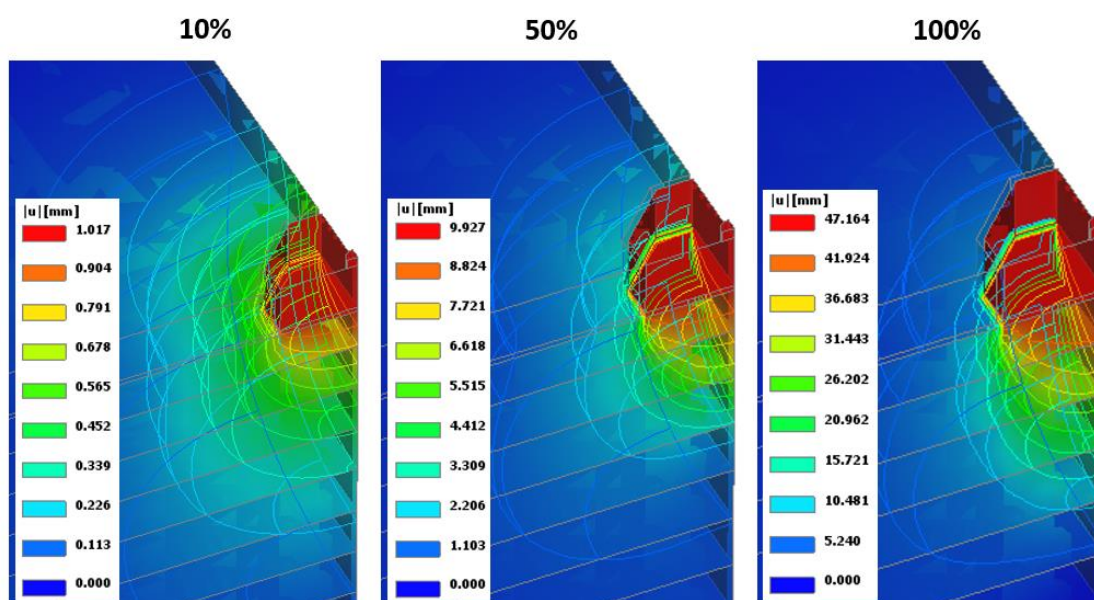
Fonte: A autora.

Figura 202 - Deslocamentos no RIC6 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



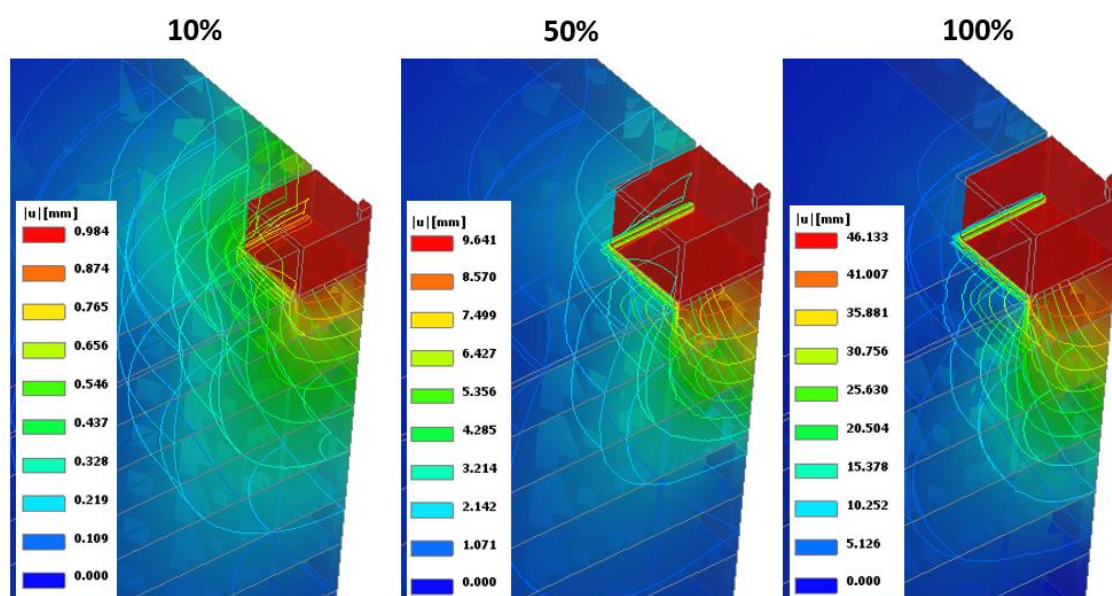
Fonte: A autora.

Figura 203 - Deslocamentos no RIO6 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



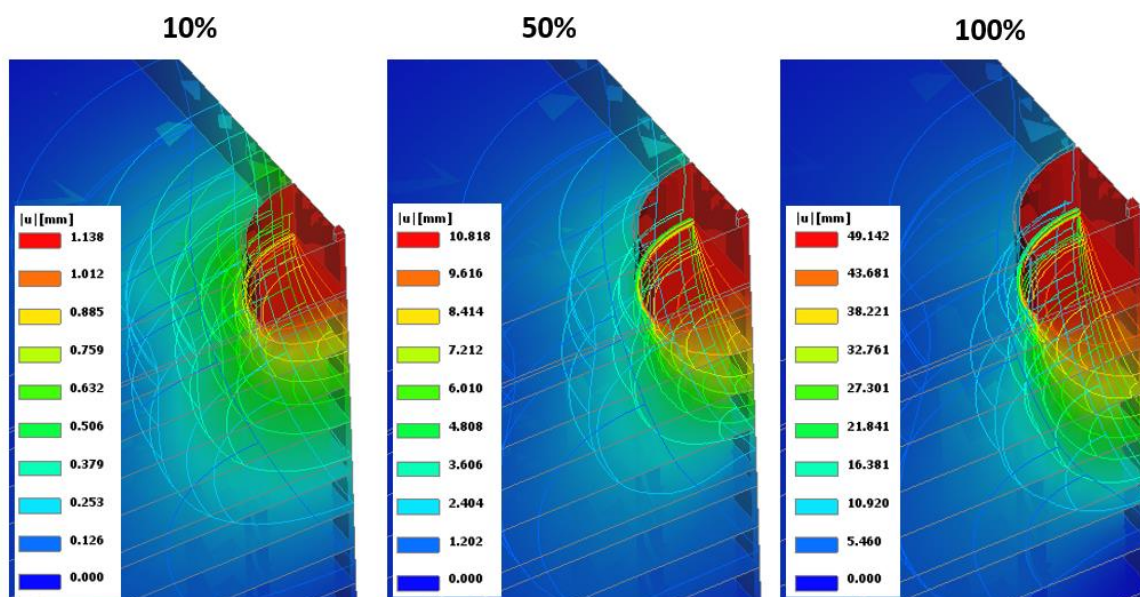
Fonte: A autora.

Figura 204 - Deslocamentos no RIS6 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



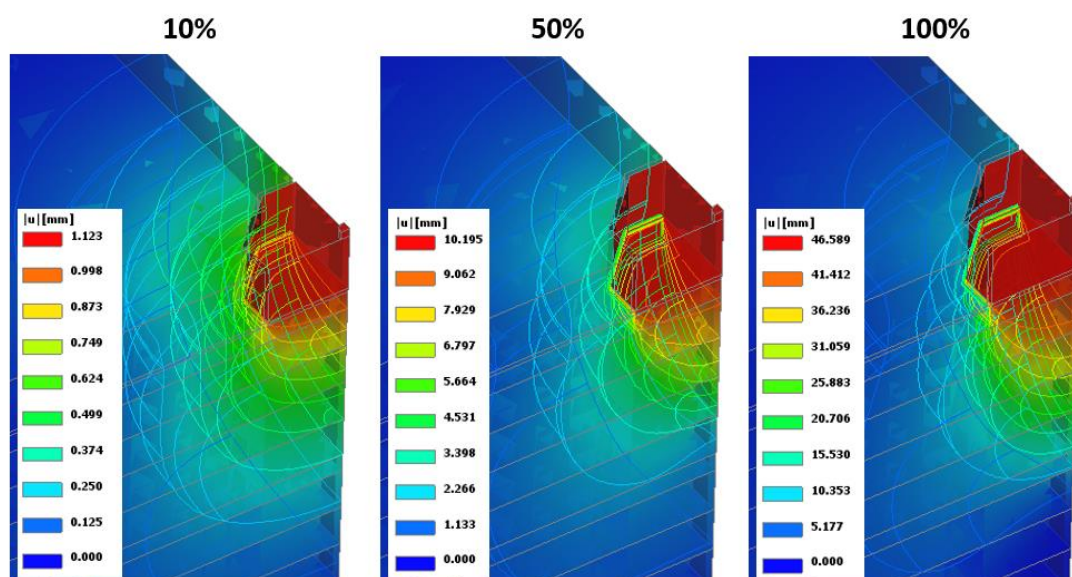
Fonte: A autora.

Figura 205 - Deslocamentos no RIC8 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



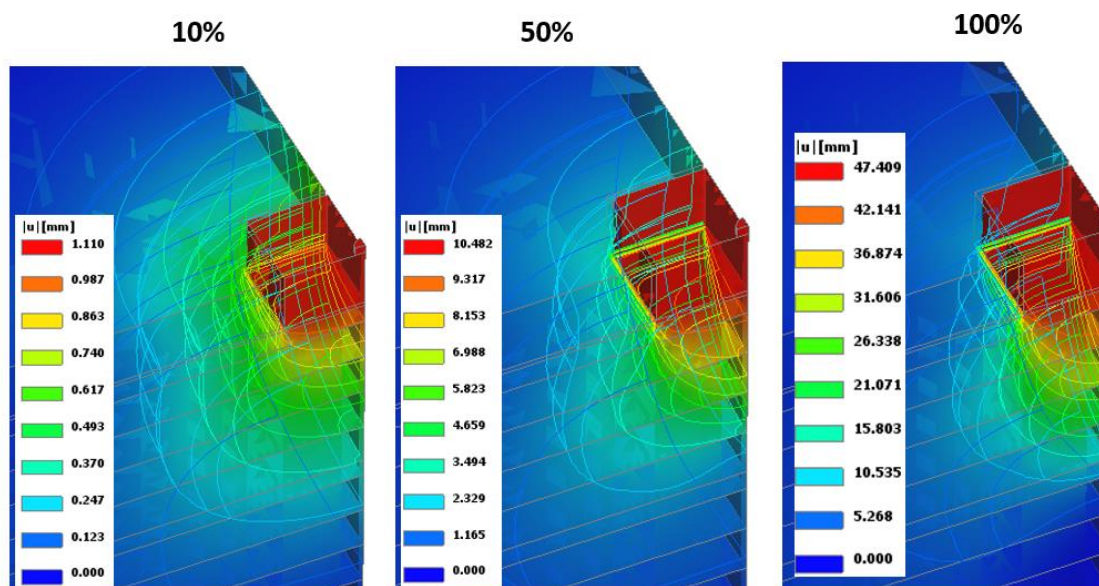
Fonte: A autora.

Figura 206 - Deslocamentos no RIO8 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.

Figura 207 - Deslocamentos no RIS8 a 10, 50 e 100% da carga de ensaio.



Fonte: A autora.