UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

COMPORTAMENTO DE RADIERS ESTAQUEADOS COMO FUNDAÇÕES DE AEROGERADORES DE ENERGIA EÓLICA

ANA PAULA SOBRAL DE FREITAS

ORIENTADOR: OSVALDO DE FREITAS NETO, D.Sc.
CO-ORIENTADOR: ALEXANDRE DUARTE GUSMÃO, Ph.D.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

NATAL-RN, JULHO DE 2018

COMPORTAMENTO DE RADIERS ESTAQUEADOS COMO FUNDAÇÕES DE AEROGERADORES DE ENERGIA EÓLICA

ANA PAULA SOBRAL DE FREITAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto
Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão

Natal
2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Freitas, Ana Paula Sobral de.
Comportamento de radiers estaqueados como fundações de aerogeradores de energia eólica / Ana Paula Sobral de Freitas. - 2018.
285 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto.
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão.

1. Parque eólico - Dissertação. 2. Distribuição de esforços - Dissertação. 3. Rigidez - Dissertação. 4. Radier estaqueado - Dissertação. 5. Transferência de carga - Dissertação. 6. Rateio de cargas - Dissertação. I. Freitas Neto, Osvaldo de. II. Gusmão, Alexandre Duarte. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 621.548

Elaborado por FERNANDA DE MEDEIROS FERREIRA AQUINO - CRB-15/316

COMPORTAMENTO DE RADIERS ESTAQUEADOS COMO FUNDAÇÕES DE AEROGERADORES DE ENERGIA EÓLICA

ANA PAULA SOBRAL DE FREITAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto – Orientador (UFRN)

_____

Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão – Co-orientador (UPE)

_____

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior – Examinador interno (UFRN)

_____

Prof. Dr. Wilson Cartaxo Soares – Examinador externo (UNIPE)

Natal/RN, 10 de Julho de 2018

RESUMO

A evolução nos últimos anos da potência das turbinas dos aerogeradores, com o inerente aumento do diâmetro das pás, tem levado a um aumento significativo da altura das torres, que atualmente têm mais de 120m. Como consequência, existe a necessidade de fundações de desempenho compatível com os esforços verticais, esforços horizontais e momentos fletores cada vez maiores. Observa-se que os projetos de fundações de obras que demandam grandes blocos associados a estacas, por vezes utilizados como soluções de fundações para aerogeradores, em sua grande maioria são superdimensionados, por não considerar a contribuição do bloco como elemento de transmissão de carregamento ao terreno. Esta pesquisa utilizou um software de modelagem numérica específico para geotecnia, neste caso o Plaxis® 3D Foundation v1.1. Este trabalho teve como objetivo analisar a distribuição de esforços entre as estacas e o radier, bem como as distorções decorrentes dos recalques diferenciais. Foram realizadas simulações variando quantidade e posicionamento das estacas no radier. O limitante na redução das estacas foi a rigidez rotacional, afetada pela elevada magnitude do momento atuante na estrutura, sendo o Estado Limite de Serviço o critério de projeto preponderante para definição do quantitativo e locação das estacas sob o radier. O bloco executado sobre 24 estacas respondeu pela transferência de 66% do carregamento aplicado. As estacas excluídas nas simulações não geravam acréscimo de carga nas estacas remanescentes, e sim uma maior participação do bloco no rateio do carregamento. Diante dos resultados, pode-se concluir que a consideração da contribuição do bloco na transmissão de esforços pode favorecer ao controle de custo e de tempo na execução da obra.

Palavras-chave: Parque eólico, radier estaqueado, capacidade de carga de fundações, transferência de carga, rigidez, interação solo-estrutura, rateio de cargas, distribuição de esforços.

ABSTRACT

The evolution of turbine power in wind turbines in recent years, with the inherent increase in blade diameter, has led to a significant increase in the height of the towers, which are currently over 120m. As a consequence, there is a need for foundations performance compatible with vertical efforts, horizontal efforts and increasing bending moments. It is observed that the projects of foundations that demand large blocks associated with piles, sometimes used as solutions of aerogenerators foundations, are mostly oversized because they do not consider the contribution of the block as an element of transmission of load to the ground foundation. This research used numerical modeling software specifically for geotechnics, in this case the Plaxis® 3D Foundation v1.1. This work had as objective to analyze the distribution of efforts between the piles and the raft, as well as the distortions arising from the differentiated settlements. Simulations were performed by varying the number and position of the piles under the raft. The limitation in the reduction of piles was the rotational stiffness, affected by the high magnitude of the moment in the structure, with the Service Limit State being the preponderant design criterion for the definition of the quantitative and location of the piles under the raft. The block executed on 24 piles responded by transferring 66% of the applied load. The piles excluded in the simulations did not generate increase of load in the remaining piles, but a greater participation of the block in the apportionment of the load. Considering the results, it can be concluded that the consideration of the contribution of the block in the transmission of efforts can favor the control of cost and time in the execution of the work.

KEYWORDS: Wind farm, piled raft, foundation load capacity, load transfer, stiffness, soil-structure interaction, load distribution.

Dedicatória

Aos meus pais, Annibal Carlos Gouveia de Freitas e Ana Maria Sobral de Freitas, por toda educação, valores e exemplo de vida.
Por todo orgulho que dispertam em mim.
Por toda gratidão a Deus que me fazem sentir por ser filha de vocês....
E se, dentre as inúmeras qualidades que enxergo em vocês, eu tivesse que escolher apenas uma de cada um para representar a fonte de inspiração para conclusão deste trabalho, eu diria: Resiliência e Leveza. Vocês, cada um com suas virtudes, se completam e me completam.
Todo o meu amor, respeito, admiração e gratidão.

Agradecimentos

Ao meu marido João Alberto, por ter me proporcionado a oportunidade de recomeçar e me dedicar a superar este desafio. Agradeço pela paciência que teve e por seu amor.

Aos meus amados filhos Ana Beatriz e João Pedro, por terem compreendido e aceitado a minha “ausência”, mesmo que fisicamente sempre presente e me desdobrando para nada faltar em cuidado, educação e demonstrações de amor.

Aos meus irmãos, Maria Fernanda e Carlos Theodorico, que sempre me inspiraram pela competência com que trilham e batalham em seus caminhos.

Às minhas tias, Anamélia e Maria Clara, pela torcida que sempre tiveram por mim.

À minha grande amiga Renata Rutckevski Moro, de uma generosidade sem tamanho, por todo o apoio que sempre me deu.

Às amizades que construi ao longo desse mestrado e que tanta força me deram nessa jornada, Daniela da Fonseca Ferreira, Thaís Lucena, Bárbara Bittencourt e Lisyanne Freire.

Ao meu orientador Osvaldo de Freitas Neto, agradeço pela oportunidade, confiança e pelas considerações sempre tão ricas ao meu trabalho.

Ao meu primeiro orientador, professor Dr. Jaime Gusmão (*in memorian*) que sempre me inspirou com sua inteligência, sensibilidade, alegria e paixão pela engenharia e pela vida.

À Alexandre Duarte Gusmão, mais que um co-orientador neste trabalho, um orgulho ter você sempre tão solícito a me ajudar com toda sua experiência e conhecimento.

Ao professor Olavo Francisco dos Santos Júnior, pelas orientações, contribuições e por estar sempre disponível para me ajudar.

Ao professor Fagner Alexandre Nunes de França, meu primeiro contato na UFRN, a quem sempre serei grata pelas orientações.

Ao professor Venerando Austáquio Amaro, por sua disponibilidade em compartilhar tanto conhecimento, sempre que precisei.

Ao professor Ricardo do Nascimento Flores Severo, pelo entusiasmo sempre contagiante e pelas orientações que me deu.

Ao colega Felipe Carlos de Araújo Leal, pela ajuda nos desenhos.

Aos colegas Gracianne Maria Azevedo do Patrocínio e Jeandson Willck Nogueira de Macedo pela partilha da experiência com o software utilizado nesta pesquisa.

Ao colega Eduardo Bittencourt pela parceria ao longo de toda a pesquisa.

À CAPES pelo financiamento e apoio a essa pesquisa.

Sumário

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 JUSTIFICATIVA 3

1.2 OBJETIVOS 4

2 REVISÃO DA LITERATURA 5

2.1 AEROGERADORES 7

2.1.1 Elementos que constituem um aerogerador 10

2.1.2 Fundação de aerogerador 11

2.1.2.1 Estudos em fundações de aerogeradores 13

2.2 FUNDAÇÃO EM RADIER ESTAQUEADO 17

2.2.1 Projeto de fundação em Radier Estaqueado 24

2.2.2 Estados Limites 38

2.2.3 Modelagens numéricas aplicadas a Radier Estaqueado 39

2.2.4 Análise da rigidez da fundação em radier estaqueado 78

3 MATERIAIS E MÉTODOS 80

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 80

3.2 ASPECTOS GERAIS RELACIONADOS AO SOFTWARE PLAXIS 3D FOUNDATION 82

3.2.1 Análises Comparativas com Casos da Literatura 84

3.2.1.1 Radier isolado e blocos e radiers sobre 1, 2 e 4 estacas (Soares, 2011) 84

3.2.1.1.1 Radier Isolado 85

3.2.1.1.2 Radier estaqueado com uma estaca 86

3.2.1.1.3 Radier estaqueado com duas estacas 86

3.2.1.1.4 Radier estaqueado com quatro estacas 87

3.2.1.1.5 Grupo com uma estaca 88

3.2.1.1.6 Grupo com duas estacas 89

3.2.1.1.7 Grupo com quatro estacas 90

3.2.1.2 Estaca isolada quadrada (Ottaviani, 1975) 91

3.2.1.5 Radiers sobre 9 e 15 estacas (Poulos et al., 1997) 94
3.2.1.4 Radiers sobre 9 estacas (Kuwabara, 1989) 99
3.2.1.5 Radiers sobre 16 estacas (caso proposto pelo comitê TC-18) 102
3.3 ASPECTOS GERAIS DA GEOLOGIA LOCAL 104
3.4 DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE TRABALHO 106
3.5 RETROANÁLISE DAS PROVAS DE CARGA 115
3.6 MODELAGEM DA FUNDAÇÃO DA BASE DO AEROGERADOR 125
3.6.1 Domínio do problema 126
3.6.2 Geometria da fundação e aplicação do carregamento 129
3.6.3 Perfil geotécnico e modelo constitutivo 133
3.6.4 Elementos Finitos 136
3.6.5 Radiers analisados na pesquisa 136
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 146
4.1 RADIER SOBRE 24 ESTACAS (RE24A E RE24B) 147
4.2 RADIER SOBRE 20 ESTACAS (RE20A E RE20B) 158
4.3 RADIER SOBRE 16 ESTACAS (RE16A E RE16B) 168
4.4 RADIER SOBRE 12 ESTACAS (RE12A E RE12B) 177
4.5 RADIER SOBRE 10 ESTACAS (RE10A E RE10B) 186
4.6 RADIER SOBRE 8 ESTACAS (RE8A E RE8B) 195
4.7 RADIER SOBRE 6 ESTACAS (RE6A E RE6B) 204
4.8 RADIER SOBRE 4 ESTACAS (RE4A) 212
4.9 RADIER SOBRE 2 ESTACAS (RE2A) 218
4.10 RADIER ISOLADO (RI) 223
4.11 ASPECTOS RELEVANTES DA DISCUSSÃO 226
5 CONCLUSÃO 238
5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS 239
REFERÊNCIAS DA LITERATURA 241
ANEXOS 249

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Métodos de cálculo em radier estaqueado (Freitas Neto, 2013). 37
Tabela 2 - Configurações de estacas para análise paramétrica (Pezo, 2013). 66
Tabela 3 - Recalque Diferencial x Relação de espaçamento no radier estaqueado (Pezo, 2013). 69
Tabela 4 – Percentual do carregamento absorvido pelas estacas do radier (Pezo, 2013). 70
Tabela 5 - Distorção angular no radier estaqueado x relação de espaçamento (Pezo, 2013). 71
Tabela 6 - Resumo capacidades de carga através da modelagem em grupo de estacas e radier estaqueado (Bittencourt, 2018). 74
Tabela 7 - Parâmetros geométricos e elásticos nas análises do caso da estaca isolada quadrada. 92
Tabela 8 - Cargas aplicadas nos 3 casos estudados. 96
Tabela 9 - Parâmetros utilizados nas análises do caso do radier sobre 9 e 15 estacas (Poulos et al., 1997). 96
Tabela 10 - Parâmetros geométricos e elásticos utilizados nas análises do caso do radier sobre 9 estacas proposto por Kuwabara (1989). 100
Tabela 11 - Parâmetros utilizados nas análises do caso proposto pelo TC-18 (ISSMGE). 103
Tabela 12 - Resultado obtido em comparação com os resultados observados na literatura para o caso proposto pelo TC-18 ISSMGE. (Modificado de Freitas Neto, 2013). 104
Tabela 13 - Cargas atuantes na fundação devido à estrutura do aerogerador. 109
Tabela 14 – Descrição do material obtido através da sondagem rotativa realizada no Parque Eólico. 112
Tabela 15 - Carga de Ruptura, Carga Admissível e Carga Extrema, com base nos ensaios de campo. 114

Tabela 16 - Coeficiente K (Aoki e Velloso, 1975) citado por Velloso e Lopes (2010)...115
Tabela 17 - Coeficiente Poisson (Teixeira e Godoy, 1996) citado por Cintra et al. (2011). 116
Tabela 18 - Peso específico de solos arenosos (Godoy, 1972) citado por Cintra et al. (2011). 116
Tabela 19 - Parâmetros geométricos e de carregamento adotados na modelagem da prova de carga. 120
Tabela 20 - Parâmetros adotados para a modelagem para a estaca e o impenetrável. 120
Tabela 21 - Parâmetros finais a serem utilizados na modelagem da fundação. 122
Tabela 22 - Domínios adotados para modelagem numérica. 126
Tabela 23 - Esforços atuantes na fundação. 130
Tabela 24 - Esforços atuantes na fundação convertidos em tensões. 131
Tabela 25 - Pares binários representando o momento atuante na interface entre a torre e o bloco de fundação. 132
Tabela 26 - Parâmetros adotados na modelagem numérica da fundação. 135
Tabela 27 - Blocos analisados na pesquisa. 137
Tabela 28 – Distribuição de esforços nas estacas do radier estaqueado RE24A. 152
Tabela 29 - Resultados obtidos através da modelagem realizada para o radier estaqueado RE24A. 153
Tabela 30 - Comparativo entre as distorções angulares em função da redistribuição das estacas no radier. 156
Tabela 31 - Deslocamentos verticais observados em pontos específicos na cota de assentamento do radier. 157
Tabela 32 – Distribuição de esforços nas estacas dos radiers sobre 20 estacas, REA e REB. 166
Tabela 33 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 20 estacas, nas configurações RE20A e RE20B. 166
Tabela 34 – Distribuição de esforços entre as estacas dos radiers sobre 16 estacas, nas configurações RE16A e RE16B. 175

Tabela 35 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 16 estacas, nas configurações RE16A e RE16B. 176
Tabela 36 – Distribuição de esforços entre as estacas dos radiers sobre 12 estacas, nas configurações RE12A e RE12B. 184
Tabela 37 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 12 estacas, nas configurações RE12A e RE12B. 185
Tabela 38 – Distribuição de esforços entre as estacas dos radiers sobre 10 estacas, nas configurações RE10A e RE10B. 193
Tabela 39 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 10 estacas, nas configurações RE10A e RE10B. 193
Tabela 40 – Distribuição de esforços entre as estacas do radier estaqueado sobre 8 estacas, nas configurações RE8A e RE8B. 202
Tabela 41 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 8 estacas, nas configurações RE8A e RE8B. 202
Tabela 42 – Distribuição de esforços entre as estacas do radier estaqueado sobre 6 estacas, nas configurações RE6A e RE6B. 210
Tabela 43 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 6 estacas, nas configurações RE6A e RE6B. 211
Tabela 44 – Distribuição de esforços entre as estacas do radier estaqueado sobre 4 estacas, RE4A. 216
Tabela 45 - Resultados obtidos através da modelagem realizada para o radier estaqueado sobre 4 estacas, RE4A. 217
Tabela 46 – Distribuição de esforços entre as estacas do radier estaqueado sobre 2 estacas, RE2A. 222
Tabela 47 - Resultados obtidos através da modelagem realizada para o radier estaqueado sobre 2 estacas, RE2A. 222
Tabela 48 - Resultados obtidos através das modelagens numéricas realizadas nesta pesquisa. 229
Tabela 49 - Média, desvio-padrão e coeficiente de variação para dispersão do carregamento verificado para cada estaca para as diversas configurações de bloco. 234

Lista de Figuras

Figura 1 - (a) Grupo de Estacas e (b) Radier Estaqueado (modificado de Bezerra, 2003). 6
Figura 2 - (a) turbina eólica com eixo horizontal; (b) turbina eólica com eixo vertical. Svensson (2010). 8
Figura 3 – (a) "anel" de aço como interface entre torre e fundação; (b) parafusos como interface entre torre e fundação. Svensson (2010). 10
Figura 4– Partes de um aerogerador de energia eólica com eixo horizontal. (Modificado de Svensson, 2010). 10
Figura 5 – Tipos de fundação de torre eólica analisadas por Mohamed e Austrell (2017): (a) radier circular plano tradicional; (b) radier circular plano e profundo; e (c) radier cônico. Modificado de Mohamed e Austrell (2017). 14
Figura 6 – Projeto de fundação em radier estaqueado: (a) vista em planta; (b) vista 3D; (c) vista frontal. (modificado de Shrestha et al (2017). 16
Figura 7 – Interação solo-estrutura entre radiers, estacas e subsolo. (KATZENBACH et al., 2005). 17
Figura 8 – Definição dos diferentes sistemas de fundação (Mandolini et al, 2017). 19
Figura 9 – Comportamento de um radier estaqueado (Katzenbach et al., 2000). 20
Figura 10 – Percentual do carregamento suportado pelo radier (Mandolini et al., 2005). 21
Figura 11 – Comportamento e soluções em radier estaqueado sobre 49 estacas, grupo de estacas com 49 estacas e radier isolado (Cooke, 1986). 24
Figura 12 – Curva Carga versus Recalque de soluções em radier estaqueado para as diferentes filosofias de projeto, Poulos (2001).....27
Figura 13 – O método PDR em sua forma original (Mandolini et al, 2017). 29

Figura 14 – Curvas carga-recalque para grupo de estacas e radier isolado com base no MEF (Método dos Elementos Finitos) utilizado por de Sanctis e Mandolini (2006) e curvas obtidas através do método proposto por Mandolini et al (2017). 30
Figura 15 - Comparação entre os resultados do método proposto e análises rigorosas pelo MEF utilizado por de Sanctis e Mandolini (2006). 31
Figura 16 – Curvas carga-recalque para grupo de estacas e radier isolado com base no MDF (Método das Diferenças Finitas) utilizado por Comodromos et al (2009) e curvas obtidas através do método proposto por Mandolini et al (2017). 32
Figura 17 – Comparação entre os resultados do método proposto e análises rigorosas pelo MDF utilizado por Comodromos et al (2009). 33
Figura 18 – Redução de recalque diferencial com inserção de estacas na porção central do radier (Modificado de Randolph, 1994), citado por Soares (2011) e Freitas Neto (2013). 34
Figura 19 – Distribuição de tensões em radier rígido e em radier flexível estaqueado (Modificado de Randolph, 1994), citado por Soares (2011) e Freitas Neto (2013). 34
Figura 20 – Limites de contorno para modelagem numérica de radier estaqueado (Pezo, 2013). 40
Figura 21 – Limites de contorno para modelagem numérica de estacas (Pezo, 2013). . 40
Figura 22 – Sistemas de fundações: (a) estaca isolada; (b) grupo com duas estacas; (c) grupo com quatro estacas; (d) radier sobre uma estaca; (e) radier sobre duas estacas; (f) radier sobre quatro estacas; (g) radier isolado (modificado de Soares, 2011). 42
Figura 23 - Curva carga x recalque do grupo de uma estaca e do radier com uma estaca (Soares, 2011). 43
Figura 24 - Curva carga x recalque do grupo de duas estacas e do radier com duas estacas (Soares, 2011). 44
Figura 25 - Curva carga x recalque do grupo de quatro estaca e do radier com quatro estacas (Soares, 2011). 44
Figura 26 - Esquema dos radiers estaqueados com 1, 2 e 4 estacas (modificado de Soares et al., 2014). 45
Figura 27 - Rateio do carregamento entre a estaca e o radier para o caso do radier assente sobre uma estaca (modificado Soares et al., 2014). 46

Figura 28 - Rateio do carregamento entre o grupo de estacas e o radier para o caso do radier assente sobre duas estacas (modificado Soares et al., 2014). 46
Figura 29 - Rateio do carregamento entre o grupo de estacas e o radier para o caso do radier assente sobre quatro estacas (modificado Soares et al., 2014).....47
Figura 30 – Configurações analisadas por Bacelar (2003). 48
Figura 31 – Geometria do problema (Bacelar, 2003). 49
Figura 32 – Vista isoparamétrica da malha de elementos finitos definida por Bacelar (2003). 50
Figura 33 – Distribuição de cargas entre estacas e radier (Bacelar, 2003). 51
Figura 34 – Geometria dos radiers e posicionamento das estacas íntegras e defeituosas, sendo estas as preenchidas na figura (modificado de Freitas Neto, 2013). 52
Figura 35 – Distribuição de cargas entre o radier e as estaca do radier estaqueado sobre três estacas, sendo uma delas defeituosa (Freitas Neto, 2013).....55
Figura 36 - Distribuição de cargas entre o radier e as estaca do radier estaqueado sobre quatro estacas, sendo uma delas defeituosa (Freitas Neto, 2013). 56
Figura 37 – Curva carga x recalque médio obtida experimentalmente no topo do radier estaqueado sobre quatro estacas (Freitas Neto, 2013). 57
Figura 38 – Geometria dos radiers estaqueados (Garcia, 2015).....58
Figura 39 - Perspectiva da malha de elementos finitos do radier estaqueado sobre três estacas (Garcia, 2015). 59
Figura 40 – Perspectiva da malha de elementos finitos do radier estaqueado sobre quatro estacas (Garcia, 2015). 59
Figura 41 – Distribuição do carregamento no radier estaqueado sobre uma estaca obtida experimentalmente (Garcia, 2015). 60
Figura 42 - Distribuição do carregamento no radier estaqueado sobre duas estacas obtida experimentalmente (Garcia, 2015). 61
Figura 43 - Distribuição do carregamento no radier estaqueado sobre três estacas obtida experimentalmente (Garcia, 2015). 61
Figura 44 - Distribuição do carregamento no radier estaqueado sobre quatro estacas obtida experimentalmente (Garcia, 2015). 62

Figura 45 – Curva carga x recalque do radier estaqueado sobre quatro estacas (Garcia, 2015). 63
Figura 46 - Configurações de estacas para análise paramétrica (Pezo, 2013). 65
Figura 47 – Malha de elementos finitos utilizada na análise paramétrica (Pezo, 2013). 67
Figura 48 - Geometria de blocos tipo do sistema de fundação do Instituto do Cérebro, com medidas em centímetros (Bittencourt, 2018). 72
Figura 49 - Layout do sistema de fundação estudado (modificado Cunha e Pando, 2013). 75
Figura 50 – Efeito da variação do comprimento da estaca e o coeficiente de Poisson do solo (modificado Cunha e Pando, 2013). 76
Figura 51 – Efeito da variação do comprimento das estacas de do coeficiente de Poisson do solo no rateio do carregamento entre o radier e as estacas (modificado, Cunha e Pando, 2013). 77
Figura 52 – Concepção de Fundação em Radier Estaqueado. 78
Figura 53 – Limites mínimos definidos pela Alstom, fabricante da torre analisada no estudo de caso desta dissertação (Fonte: Relatório Técnico INF-8403 emitido pela Alstom em 18/02/2011). 81
Figura 54 - Curvas Carga-Recalque do Radier Isolado, (Macedo, 2017). 85
Figura 55 - Curvas Carga-Recalque do Radier Estaqueado com uma estaca, (Macedo, 2017). 86
Figura 56 - Curvas Carga-Recalque do Radier Estaqueado com duas estacas, (Macedo, 2017). 87
Figura 57 - Curvas Carga-Recalque do Radier Estaqueado com quatro estacas, (Macedo, 2017). 88
Figura 58 - Curvas Carga-Recalque do grupo com uma estaca, (Macedo, 2017). 89
Figura 59 - Curvas Carga-Recalque do grupo com duas estacas, (Macedo, 2017). 90
Figura 60 - Curvas Carga-Recalque do grupo com quatro estacas, (Macedo, 2017). ...91
Figura 61 – Valores de constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com o PLAXIS para uma estaca isolada com 20 metros de comprimento e relação H/L igual a 4,0. 93

Figura 62 – Valores de constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com o PLAXIS para uma estaca isolada com 20 metros de comprimento e relação H/L igual a 1,5. 93
Figura 63 – Valores de constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com o PLAXIS para uma estaca isolada com 40 metros de comprimento e relação H/L igual a 1,5. 94
Figura 64 – Exemplo proposto por Poulos et al. (1997). 95
Figura 65 – Valores de recalque médio no radier de 15 estacas com carga aplicada igual a 12 MN obtidos na literatura e pelo método dos elementos finitos (PLAXIS). 97
Figura 66 – Valores de recalque médio no radier de 15 estacas com carga aplicada igual a 15 MN obtidos na literatura e pelo método dos elementos finitos (PLAXIS). 98
Figura 67 – Valores de recalque médio no radier de 9 estacas com carga admissível igual a 12 MN obtidos na literatura e pelo método dos elementos finitos (PLAXIS). 99
Figura 68 – Resultados obtidos para radier sobre 9 estacas para relação S/D igual a 3. 100
Figura 69 – Resultados obtidos para radier sobre 9 estacas para relação S/D igual a 5. 101
Figura 70 – Resultados obtidos para radier sobre 9 estacas para relação S/D igual a 10. 101
Figura 71 – Radier sobre 16 estacas proposto pelo TC-18 (SALES,2000). 103
Figura 72 – Mapa Litoestratigráfico da região que contempla o parque eólico abordado nesta pesquisa. Fonte: ANEEL – Abril/2018. 105
Figura 73 – Desenho esquemático do bloco da fundação (modificado de Maranhão, 2014). 107
Figura 74 – Vista em planta do radier estaqueado. 108
Figura 75 – Índice de resistência à penetração dos 6 furos de sondagens disponibilizados para esta dissertação. 110
Figura 76 – Perfil geológico simplificado da área onde foi executada a fundação em estudo. 111
Figura 77 – Resultados das Provas de Carga Estática. 113
Figura 78 – Parâmetros do perfil adotados para dar início à retroanálise. 117

Figura 79 – Premissas geométricas adotadas na retroanálise da prova de carga: (a) vista em perfil; (b) vista em planta. 119
Figura 80 – Resultado da retroanálise da prova de carga PC3 e dos ensaios de prova de carga, PC1, PC2, PC3 e PC4.....121
Figura 81 – Malha de elementos finitos utilizada para modelagem da retroanálise da PCE3. 122
Figura 82 – (a) vista do perfil geotécnico e do carregamento aplicado na estaca; (b) vista da estaca e do carregamento aplicado na estaca. 123
Figura 83 – Deformação vertical provocada pelo carregamento aplicado na superfície na área da seção transversal da estaca.....124
Figura 84 – Tensão propagada ao longo do comprimento da estaca em decorrência do esforço aplicado na superfície, na seção transversal da estaca. 124
Figura 85 – Tensão na seção da estaca localizada na superfície do terreno.....125
Figura 86 – (a) Vista em planta do bloco de fundação executado em campo com 24 estacas; (b) Corte do bloco considerado na modelagem numérica, definido conforme eixo de simetria geométrico e de carregamento. 127
Figura 87 – Domínio horizontal adotado para a modelagem do radier estaqueado. 128
Figura 88 – Domínio vertical adotado para a modelagem do radier estaqueado. 128
Figura 89 – (a) bloco de coroamento executado na obra; (b) bloco de coroamento adotado na modelagem numérica. 129
Figura 90 – Esforços atuantes na fundação. 133
Figura 91 – Esforços atuantes na fundação convertidos em tensão uniformemente distribuídas e pares binários.....133
Figura 92 – Perfil do problema adotado na modelagem numérica. 135
Figura 93 – (a) RE24A - Radier Estaqueado sobre 24 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....138
Figura 94 – (a) RE24B - Radier Estaqueado sobre 24 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....138
Figura 95 – (a) RE20A - Radier Estaqueado sobre 20 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....139

Figura 96 – (a) RE20B - Radier Estaqueado sobre 20 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....139
Figura 97 – (a) RE16A - Radier Estaqueado sobre 16 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....140
Figura 98 – (a) RE16B - Radier Estaqueado sobre 16 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....140
Figura 99 – (a) RE12A - Radier Estaqueado sobre 12 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....141
Figura 100 – (a) RE12B - Radier Estaqueado sobre 12 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....141
Figura 101 – (a) RE10A - Radier Estaqueado sobre 10 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....142
Figura 102 – (a) RE10B - Radier Estaqueado sobre 10 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....142
Figura 103 – (a) RE8A - Radier Estaqueado sobre 8 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....143
Figura 104 – (a) RE8B - Radier Estaqueado sobre 8 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....143
Figura 105 – (a) RE6A - Radier Estaqueado sobre 6 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....144
Figura 106 – (a) RE6B - Radier Estaqueado sobre 6 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....144
Figura 107 – (a) RE4A - Radier Estaqueado sobre 4 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....145
Figura 108 – (a) RE2A - Radier Estaqueado sobre 2 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....145
Figura 109 – (a) RE24A - Radier Estaqueado sobre 24 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.....147
Figura 110 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE24A. 148
Figura 111 – Malha de elementos finitos na região do radier RE24A. 149
Figura 112 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE24A.....150

Figura 113 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE24A, vista na seção transversal na região central do bloco.....151
Figura 114 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE24A, vista em planta. 151
Figura 115 – Distorção angular limite Δh/L (modificado de Bjerrum, 1963). 155
Figura 116 – Disposição das estacas no bloco RE24B.....156
Figura 117 – Seção transversal no eixo de simetria do bloco RE24A, (a) modelado apenas com a carga vertical; (b) modelado com a carga vertical, horizontal e momento.....158
Figura 118 – Seção transversal no eixo de simetria do bloco RE24A, ocultando o bloco e exibindo o carregamento, (a) modelado apenas com a carga vertical; (b) modelado com a carga vertical, horizontal e momento.....158
Figura 119 – Disposição das estacas no bloco RE20A.....159
Figura 120 – Disposição das estacas no bloco RE20B.....160
Figura 121 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE20B. 161
Figura 122 – Malha de elementos finitos na região do radier: (a) RE20A e (b) RE20B. 162
Figura 123 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE20A.....163
Figura 124 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE20B, vista na seção transversal na região central do bloco.....164
Figura 125 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE20B, vista em planta. 164
Figura 126 – Seção transversal através do eixo de simetria do bloco RE20A. 165
Figura 127 – Radier estaqueado sobre 16 estacas, RE16A.....168
Figura 128 – Radier estaqueado sobre 16 estacas, RE16B.....169
Figura 129 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE16A. 170
Figura 130 – Malha de elementos finitos na região do radier: (a) RE16A e (b) RE16B. 171
Figura 131 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE16A.....172
Figura 132 – Deslocamentos verticais no RE16A. 173
Figura 133 – Tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE16A. 174
Figura 134 – Corte no eixo de simetria do bloco RE16A.....175

Figura 135 – Radier estaqueado sobre 12 estacas, RE12A.....177
Figura 136 – Radier estaqueado sobre 12 estacas, RE12B.....178
Figura 137 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE12A. 179
Figura 138 – Malha de elementos finitos na região do radier, (a) RE12A; e (b) RE12B. 180
Figura 139 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE12A.....181
Figura 140 – Deslocamentos verticais no RE12A. 182
Figura 141 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE12A. 183
Figura 142 – Corte no eixo de simetria do bloco RE12A.....184
Figura 143 – Radier estaqueado sobre 10 estacas, RE10A.....187
Figura 144 – Radier estaqueado sobre 10 estacas, RE10B.....187
Figura 145 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE10B. 188
Figura 146 – Malha de elementos finitos na região do radier, (a) RE10A; e (b) RE10B. 189
Figura 147 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE10A.....190
Figura 148 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE10B, vista na seção transversal na região central do bloco.....191
Figura 149 – Deslocamentos verticais no RE10B. 191
Figura 150 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE10B. 192
Figura 151 – Radier estaqueado sobre 8 estacas, RE8A. 195
Figura 152 – Radier estaqueado sobre 8 estacas, RE8B. 196
Figura 153 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE8A. 197
Figura 154 – Malha de elementos finitos na região do radier, (a) RE8A; e (b) RE8B. .198
Figura 155 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE8A.....199
Figura 156 – Deslocamentos verticais no RE8A. 200
Figura 157 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE8A. 201
Figura 158 – Seção transversal através do eixo de simetria do bloco RE8B. 201
Figura 159 – Radier estaqueado sobre 6 estacas, RE6A. 204

Figura 160 – Radier estaqueado sobre 6 estacas, RE6B. 205
Figura 161 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE6A. 206
Figura 162 – Malha de elementos finitos na região do radier, (a) RE6A; e (b) RE6B. .207
Figura 163 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE6A.....208
Figura 164 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE6A, vista na seção transversal na região central do bloco.....209
Figura 165 – Vista em planta dos deslocamentos verticais no RE6A. 209
Figura 166 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE6A. 210
Figura 167 – Radier estaqueado sobre 4 estacas, RE4A. 213
Figura 168 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE4A. 214
Figura 169 – Malha de elementos finitos na região do radier RE4A. 214
Figura 170 – Curva carga x recalque dos pontos A B e C do bloco RE4A.....215
Figura 171 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE4A. 216
Figura 172 – Radier estaqueado sobre 2 estacas, RE2A. 218
Figura 173 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE2A. 219
Figura 174 – Malha de elementos finitos na região do radier RE2A. 220
Figura 175 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE2A.....221
Figura 176 – Malha de elementos finitos definida para o radier isolado, RI. 224
Figura 177 – Malha de elementos finitos na região do radier isolado, RI. 224
Figura 178 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do radier isolado, RI.....225
Figura 179 – Rateio do carregamento vertical entre o radier e as estacas. 230
Figura 180 – Dispersão de pontos representativos do carregamento absorvido por cada estaca em função da quantidade de estacas do bloco.....232
Figura 181 – Vista em planta do bloco de fundação executado em campo com 24 estacas. 233
Figura 182 – Recalque máximo observado para os blocos analisados nesta pesquisa. 235

Figura 183 – Fator de Segurança: relação entre a carga de ruptura, definida como a carga que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca, e a carga extrema atuante. 236
Figura 184 – Rigidez Rotacional dos blocos analisados nesta pesquisa. 236
Figura 185 – Valores extremos de Fator de Segurança, Rigidez Rotacional e Rigidez Translacional dos blocos analisados nesta dissertação. 237

Lista de Abreviaturas

- ABAQUS – Software para análise 3D de radiers estaqueados pelo método dos elementos finitos;
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ALLFINE – Para análise em radier estaqueado pelo método dos elementos finitos;
- CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior;
- CPT – *Cone Penetration Test* – Ensaio de Cone;
- DIANA – Programa de Elementos Finitos baseado no método dos deslocamentos. Desenvolvido pela *TNO Building and Construction Research Company;*
- ELPLA – ELASTIC PLATE. Programa para análise em radier estaqueado pelo método dos elementos finitos;
- FLEXPDE – *Scripted Multi-Physics Finite Element Solution Environment for Partial Differential Equations;*
- FS – Fator de Segurança
- GARP – *Geotechinical Analysis of Rafts with Piles;*
- ISSMGE - *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering;*
- LCPC-CESAR – Software desenvolvido pelo *"Laboratoire central des ponts et chaussées";*
- MDF – Método das Diferenças Finitas;
- MEC – Método dos Elementos de Contorno;
- MEF – Método dos Elementos Finitos;
- NBR – Norma Brasileira;
- PCE – Prova de Carga Estática;

- PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia
- PDR – Método proposto por Poulos e Davis (1980), Randolph (1994) e Poulos (2000) para estimar a curva Carga x Recalque de um radier estaqueado;
- PLAXIS 3D – Programa de análise tridimensional para análises geotécnicas pelo método dos elementos finitos.;
- RE2A – Radier sobre 2 estacas.;
- RE4A – Radier sobre 4 estacas;
- RE6A – Radier sobre 6 estacas;
- RE6B – Radier sobre 6 estacas;
- RE8A – Radier sobre 8 estacas;
- RE8B – Radier sobre 8 estacas;
- RE10A – Radier sobre 10 estacas;
- RE10B – Radier sobre 10 estacas;
- RE12A – Radier sobre 12 estacas;
- RE12B – Radier sobre 12 estacas;
- RE16A – Radier sobre 16 estacas;
- RE16B – Radier sobre 16 estacas;
- RE20A – Radier sobre 20 estacas;
- RE20B – Radier sobre 20 estacas;
- RE24A – Radier sobre 24 estacas (Bloco executado em campo);
- RE24B – Radier sobre 24 estacas (bloco com outra configuração para posicionamento das estacas);
- RI – Radier isolado;
- SPT – *Standard Penetration Test* – Sondagem de simples reconhecimento;

- UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Lista de Símbolos

- A_P – Área da seção transversal da estaca;
- A_E – Área da seção transversal da estaca;
- A_R – Área do radier;
- A_R – Área coberta por um grupo de estacas;
- B – Domínio horizontal;
- B_R – Largura do radier;
- c, c'– Coesão total e efetiva;
- D – Lado ou diâmetro da seção da estaca;
- E_P – Módulo de elasticidade do concreto das estacas e radiers;
- E_S – Módulo de elasticidade do solo;
- H/L – Domínio vertical;
- k0 – Coeficiente de empuxo em repouso;
- Kps – Coeficiente de Rigidez entre estaca e solo;
- Kr – Rigidez rotacional;
- Kt – Rigidez translacional;
- L – Comprimento da estaca;
- L/D – Relação entre o comprimento da estaca e o seu diâmetro;
- n – Número de estacas;
- NSPT – Número de golpes necessário para cravar os últimos 30 cm dos amostrador padrão;

- P_1, P_2 – Cargas verticais;
- Q_p, Q_g – Capacidade de carga de um grupo de estcas;
- Q_{pr} – Carga vertical total aplicada no radier estaqueado;
- Q_R – Carga vertical suportada pelo radier;
- Q_t – Capacidade de carga de uma sapata estaqueada;
- R_i, R_j, R_k – Esforços verticais;
- R_{inter} – coeficiente de interface entre o concreto das estacas ou radier e o solo adjacente;
- r_L – resistência lateral ao longo do fuste da estaca;
- r_P – resistência de ponta na base da estaca;
- S_{PR} – recalque do radier estaqueado;
- S_R – recalque do radier isolado;
- s – espaçamento entre as estacas;
- S/D, s/d – Espaçamento relativo entre estacas;
- t – Espessura do radier;
- w, ρ – Recalque;
- α – fator de incremento de capacidade de carga do grupo de estacas devido à interação com a sapata;
- α_{pr} – percentual do carregamento total que é transferida às estacas do radier estaqueado;
- α_r – percentual do carregamento total suportado pelo radier;
- β – fator de incremento da capacidade de carga da sapata devido à presença do grupo de estacas;
- ϕ – Ângulo de atrito interno do solo;

- γ – Peso específico do solo;
- v_c – Coeficiente de Poisson do concreto;
- v_s – Coeficiente de Poisson do solo;
- v – Coeficiente de Poisson;
- ψ – dilatância;
- σ_1 e σ_3 – tensões normais principais;
- τ – tensão de cisalhamento;
- Δh – recalque diferencial.

1 INTRODUÇÃO

O investimento em fontes limpas e renováveis para geração de energia elétrica vem sendo observado há alguns anos, fazendo com que esta opção de geração venha ocupando um espaço cada vez maior na matriz energética, não apenas do Brasil, mas do Mundo.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica, ABEEólica, o Brasil é considerado um país com um dos melhores ventos do mundo e possui uma matriz energética bastante renovável, mas ainda com grande potencial para aumentar o seu percentual em energia limpa.

A capacidade instalada de geração de energia eólica no Brasil vem apresentando um crescimento virtuoso ao longo dos anos. A previsão, conforme o relatório dados mensais de fevereiro de 2018, apresentado pela ABEEólica, é que ao final de 2023 serão 17,88 GW instalados em território brasileiro. Este mesmo relatório também coloca o Rio Grande do Norte como sendo o segundo estado que mais cresce em quantidade de parques eólicos.

Diante de um cenário de expansão do setor de geração de energia eólica, formas de otimizar esta produção são pensadas. Verifica-se que a produção de energia de uma turbina eólica pode ser aumentada ao se construir torres mais altas, alcançando uma maior velocidade e intensidade do vento. Segundo Lewin (2010), um aumento na altura da turbina de 80 para 100 m resulta em um aumento de 14% na potência e o aumento da altura de 80 para 120 m resulta em um aumento de 28% na produção de energia. Em termos de custo, aumentar a produção de energia eólica através da construção de torres mais altas que podem gerar potência adicional com o mesmo número de turbinas eólicas é mais vantajoso.

A construção de torres mais altas representa desafios significativos para o engenheiro geotécnico na seleção e dimensionamento de fundações, as quais devem ser compatíveis com as condições do terreno e dos ventos atuantes. Uma torre de turbina

eólica mais alta não só aumenta a carga vertical permanente, mas também aumenta significativamente o carregamento horizontal e o momento fletor decorrentes da ação do vento na base da torre. O incremento de carregamento, especialmente o de momentos fletores, não só tornam o projeto da fundação mais complexo, mas também demanda uma fundação mais robusta, exigindo que uma quantidade significativa de recursos seja alocada no seu projeto e construção para atender às questões de segurança.

Uma porcentagem significativa do total custo de instalação de uma turbina eólica é alocada na construção da fundação. Desta forma, é necessário desenvolver novas metodologias para projetar e selecionar a solução de fundação mais econômica para um determinado conjunto de condições geotécnicas e de carregamento.

Observa-se que os projetos de fundações de obras que demandam grandes blocos associados a estacas, quando não consideram a contribuição do bloco como elemento de transmissão de carregamento ao terreno, pode se mostrar como uma solução superdimensionada. Ou seja, considerar que o bloco tem a única função de transmitir o carregamento do aerogerador para as estacas, premissa adotada para projeto concebido como solução em grupo de estacas.

O dimensionamento de uma solução em radier estaqueado, que associa a contribuição de uma solução profunda a uma solução superficial, se torna um processo um pouco mais complexo. E para melhor entender o comportamento deste sistema composto pelo radier, as estacas e o solo de fundação, muitas pesquisas já foram realizadas e ainda vem sendo desenvolvidas.

Apesar da literatura apresentar muitos casos de análises de solução em radier estaqueado, esta solução ainda se mostra pouco verificada para casos de soluções de fundações de torres de aerogeradores.

Esta pesquisa está voltada para a análise do comportamento da fundação de uma torre de aerogerador quando considerada a contribuição do bloco como elemento transmissor de carregamento ao solo de fundação. Para isto, realizou-se um estudo de caso da fundação de uma torre de aerogerador construída em Macau, litoral norte do

estado do Rio Grande do Norte, concebida à luz da metodologia de cálculo de grupo de estacas. Para estas análises foi considerado um carregamento estático com a combinação de esforços vertical, horizontal e de momento mais desfavorável.

Para simular o comportamento da iteração existente entre os elementos envolvidos numa solução de radier estaqueado, utilizou-se um software de modelagem numérica em elementos finitos específico para geotecnia, o PLAXIS 3D *Foundation*, na versão 1.1.

1.1 JUSTIFICATIVA

A constatação de oportunidade de otimizar projetos de fundações de estruturas que demandam grandes blocos associados a estacas, necessidade muito comum em soluções de fundação para aerogeradores, motivou o desenvolvimento desta pesquisa.

As fundações dos aerogeradores precisam oferecer um desempenho compatível com os esforços verticais, esforços horizontais e momentos fletores cada vez maiores. A elevada magnitude dos momentos atuantes nesse tipo de estrutura demanda por grandes blocos, por vezes associados a estacas. Quando nessas soluções não se considera a contribuição do bloco como elemento de transmissão de carga, esta solução pode vir a se mostrar superdimensionada.

Projetos de fundação dimensionados à luz da teoria de radier estaqueado ainda é uma alternativa pouco utilizada. No caso dos aerogeradores, por se tratar de blocos de grande dimensão, necessária para combater os momentos atuantes neste tipo de estrutura, estando este bloco assente em terreno com elevada resistência, ele vai participar como elemento transmissor de carga ao terreno. Desconsiderar a contribuição do bloco na transmissão de carregamento implica em fundações com necessidade de um maior quantitativo de estacas ou maior comprimento destas, incorrendo em custo com material, mão-de-obra e tempo desnecessários.

1.2 OBJETIVOS

Avaliar a contribuição do bloco na capacidade de carga de fundações do tipo radier estaqueado e realizar simulações em cenários nos quais será verificada a influência do número de estacas e do seu posicionamento na base do radier, verificando:

- ✓ A distribuição de esforços entre as estacas e o radier;
- ✓ Recalques e distorções angulares na cota de assentamento do radier;
- ✓ Rigidez Rotacional e Translacional;
- ✓ Fator de Segurança.

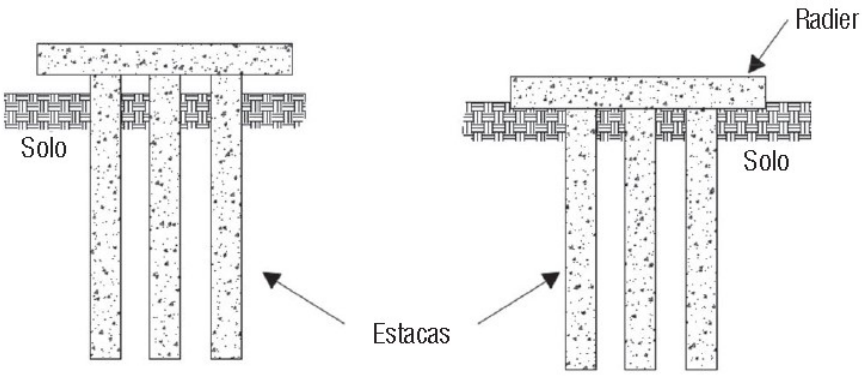
2 REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Gusmão Filho (1998), a fundação de uma obra de engenharia é o elemento transmissor dos esforços de uma estrutura ao terreno, sendo as fundações peças enterradas, como as sapatas, blocos, estacas, placas, etc., que intermedeiam entre a estrutura e o terreno. Juntamente com o terreno de fundações, as características e propriedades do subsolo, a peça de fundação escolhida para a transferência de carga ao terreno, formam o sistema solo-fundação.

Ao analisar as possibilidades de soluções em projetos de fundações, cada tipo de peça de fundação tem um mecanismo de transferência de carga ao terreno, resultando em deslocamentos do maciço muito diferentes, a depender da solução escolhida. Entender as diferenças e particularidades de cada uma dessas formas de transferência é fundamental para que seja escolhida a solução mais adequada ao considerar a superestrutura e os esforços por ela aplicados, bem como o perfil do terreno no qual a obra será executada.

Os tipos de sistemas de fundação dependem do elemento estrutural utilizado na transferência dos esforços da superestrutura ao terreno de fundação, podendo ser agrupados como fundação superficial, grupo de estacas (fundação profunda) ou radier estaqueado (solução mista de fundação superficial e profunda).

A diferença entre o radier estaqueado e os grupos convencionais de estaca é que, neste último, o bloco, elemento de ligação entre a superestrutura e as estacas, não tem seu contato com o solo considerado em projetos, conforme ilustrado na Figura 1.



(a) (b)

Figura 1 - (a) Grupo de Estacas e (b) Radier Estaqueado (modificado de Bezerra, 2003).

Para desenvolvimento de projetos de fundações, de uma forma geral, Gusmão Filho (1998) destaca dois critérios básicos que devem ser obedecidos:

- ✓ Deve haver segurança adequada à ruptura do solo de fundação, à ruptura da peça estrutural transmissora da carga ao solo, ao tombamento e deslizamento do conjunto da obra;
- ✓ O recalque resultante do carregamento do solo deve ser admissível para a obra, quer do ponto de vista de segurança estrutural, como de sua funcionalidade e uso, e eventualmente de sua aparência.

Uma verificação necessária para projetos de fundações é a análise da interação solo-estrutura. Conforme destaca Gusmão Filho (1998), muitos projetistas limitam-se ao estudo do sistema solo-fundação, podendo resultar em soluções de fundações inseguras, ou seguras, porém onerosas. Esquecem outras variáveis que interagem com a fundação e igualmente respondem pelo bom desempenho da obra, a exemplo das características dos materiais utilizados na superestrutura, o sistema estrutural adotado, a natureza dos carregamentos, o tipo de espaço ambiental onde a obra está inserida, etc.

Para um projeto de fundações, a visão do projetista deve envolver um sistema mais amplo, no caso o sistema solo-fundação-estrutura. O projetista de fundações não deve “se limitar à peça estrutural em si e ao solo, mas abranger com uma visão sistêmica a

sua interação com as outras variáveis e sistemas, que respondem, juntamente com as peças de fundações, pelo desempenho da obra", Gusmão Filho (1990).

Segundo Velloso e Lopes (2004), na verificação da interação solo-estrutura, a rigidez do elemento estrutural de fundação é considerada no cálculo de seus deslocamentos e esforços internos. Segundo Warren-Codrington (2013), para estas análises, modelos matemáticos são necessários para considerar as relações entre o solo e a estrutura no que diz respeito ao deslocamento e rigidez. Foram desenvolvidas diversas teorias de interação solo-estrutura para fundações, considerando os modelos elásticos lineares, em que o solo é modelado como sendo um semi-espaço elástico ou como um conjunto de molas independentes, e os modelos elásticos não lineares.

Segundo Warren-Codrington (2013), o modelo que considera o solo como sendo um semi-espaço elástico possui limitações, principalmente ligadas ao fato de que ele considera uniforme a relação do deslocamento do solo com a carga aplicada. Este modelo não leva em conta os parâmetros constitutivos não lineares do solo.

Outra forma de se representar a interação solo-estrutura é a partir de modelos de meio contínuo. Nesses modelos o solo pode ser representado por um semi-espaço elástico ou por modelos constitutivos que simulem um comportamento elasto-plástico do solo. Para o primeiro tipo de modelo, têm-se algumas soluções para vigas e placas baseadas na Teoria da Elasticidade. O segundo caso, pela complexidade envolvida, requer, por exemplo, solução numérica pelo Método dos Elementos Finitos (Velloso e Lopes, 2004).

2.1 AEROGERADORES

Os aerogeradores são soluções de engenharia que convertem a energia cinética da movimentação das pás de seu rotor em energia elétrica. É um equipamento que tem se popularizado rapidamente por ser uma fonte de energia renovável e não poluente. Eles

podem ser construídos em terra, conhecidos como aerogeradores *Onshore*, ou em meio marítmo, conhecidos como aerogeradores Offshore.

Segundo Svensson (2010), todas as turbinas eólicas têm em comum o uso de energia eólica para produzir energia elétrica. A maneira como isso é feito pode ser diferente, existem essencialmente dois tipos de turbinas eólicas, as com pás girando em torno de um eixo horizontal, que é mais comumente utilizado, e as que usam um movimento rotativo em torno de um eixo vertical, conforme ilustra a Figura 2.

(a) (b)

Figura 2 - (a) turbina eólica com eixo horizontal; (b) turbina eólica com eixo vertical. Svensson (2010).

Segundo Moura (2007), o padrão de aerogeradores utilizados para geração de energia elétrica na atualidade é o de eixo horizontal fixo, com três pás e estrutura não-flexível. Contudo, mais recentemente, observa-se a utilização de componentes bastante flexíveis que proporcionam elevadas amplitudes de vibração, provocando grandes forças inerciais e, em alguns casos, instabilidades.

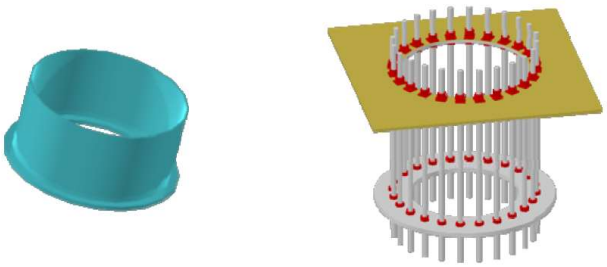
Considerando essa instabilidade inerente desse tipo de obra, a fundação de uma torre eólica precisa garantir sua estabilidade durante sua vida útil. Isso é feito transferindo as cargas que atuam na estrutura para o meio geotécnico. A força vertical que atua sobre a

fundação é principalmente decorrente do peso próprio do aerogerador, do bloco de fundação e do solo existente sobre o bloco. Contudo, as cargas mais preocupantes na fundação de uma turbina eólica são decorrentes da ação dos ventos, que provocam significativa ação de momento de flexão na fundação.

Segundo Pereira (1993) citado por Moura (2007), a obtenção das cargas de projeto é uma questão crucial nos projetos estruturais de aerogeradores. A característica turbulenta do vento provoca importantes esforços dinâmicos que quase sempre são superiores aos estimados. Moura (2007) cita algumas das razões da dificuldade de se expressar matematicamente as forças aerodinâmicas de projeto:

- ✓ O fluxo de vento que atinge a turbina é totalmente aleatório;
- ✓ As frequências de excitação do vento estão inseridas numa ampla faixa que incluem as próprias frequências naturais da estrutura;
- ✓ A ocorrência de vórtices e ventos cruzados durante a operação das máquinas afetam de forma significativa as cargas dinâmicas na estrutura do aerogerador;
- ✓ Operações de frenagem e controle aerodinâmico ativo proporcionam a ocorrência de forças transientes.

A transferência desses esforços para a fundação, segundo Svensson (2010) pode ser realizada através dos elementos apresentados na Figura 3. A torre, pré-fabricada, geralmente tem a forma de um cone oco de aço de alta qualidade com uma base mais larga que se conecta à fundação através de uma interface. Esta interface pode ser um tubo de aço, que fica embutido na fundação de concreto, ou através de vários parafusos longos que são embutidos no concreto.



(a) (b)

Figura 3 – (a) "anel" de aço como interface entre torre e fundação; (b) parafusos como interface entre torre e fundação. Svensson (2010).

2.1.1 Elementos que constituem um aerogerador

Para um melhor entendimento do elemento estrutural de um aerogerador, neste tópico serão apresentados os seus componentes. A Figura 4 contempla a imagem de um aerogerador de eixo horizontal. Sendo a fundação e a torre elementos já de conhecimento, serão apresentados os demais componentes, segundo Svensson (2010).

Figura 4– Partes de um aerogerador de energia eólica com eixo horizontal. (Modificado de Svensson, 2010).

A nacelle é o elemento que segura todo o maquinário da turbina e transforma a energia rotativa em energia elétrica. Cada fabricante tem seu próprio tipo de construção, mas em geral consiste em uma caixa de câmbio que acelera o movimento para uma velocidade mais adequada, um gerador que cria a energia elétrica e um sistema de freio que pode forçar a rotação a parar em caso de ventos muito fortes ou se outro tipo de falha ocorre. A nacelle é conectada à torre através de rolamentos, devido à possibilidade para girar em torno do eixo da torre para sintonizar a direção do vento.

As pás do rotor são projetadas para proporcionar um movimento rotativo. O perfil de uma pá de rotor é semelhante a uma asa de avião e é o mesmo princípio que força a lâmina a rodar, ou seja, o perfil cria uma diferença de pressão sobre a lâmina e, portanto, força a lâmina a se mover.

O cubo é a conexão entre as pás do rotor e a barra giratória que entra na nacelle. A forma do cubo é complicada, porque o cubo geralmente é de ferro fundido. O aço deve ser muito resistente contra a fadiga do metal e, portanto, uma liga especial é usada, que após a fundição sofre um tratamento térmico para obter as propriedades certas.

O transformador não faz parte da turbina eólica, mas é uma unidade necessária para transformar a energia de saída de turbina eólica em energia elétrica adequada para transmissão.

2.1.2 Fundação de aerogerador

A tendência de construção de torres cada vez mais altas, objetivando o aumento da produção de energia eólica, provoca um aumento significativo dos momentos fletores atuantes na base da torre. Estas condições fazem com que o desenvolvimento de um projeto de fundação, visando atender aos critérios de segurança, com um menor custo possível, se torne mais complexo.

Segundo Shrestha *et al* (2017), é necessário o desenvolvimento de novas metodologias de projeto que facilitem o acesso à solução mais econômica e que atenda

aos critérios de segurança exigidos. As soluções de fundações utilizadas para apoiar as turbinas eólicas podem ser em radier isolado, em grupo de estacas, ou em radier estaqueado, a depender da condição do subsolo, altura da torre e da velocidade do vento. A solução em radier isolado é de fácil concepção e construção, também fornecendo uma boa capacidade de carga por conta da sua grande área de contato com o terreno de fundação, porém sua limitação está nos recalques diferenciais e totais, especialmente quando submetido a maiores cargas de vento. Nestas situações, fundações profundas são adicionadas à fundação em radier isolado para criar o que é conhecido como uma fundação mista, o radier estaqueado, que geralmente é mais econômica para apoiar turbinas eólicas altas. Contudo, em muitos casos, observa-se que os projetos são desenvolvidos sem que seja considerada a contribuição do bloco como elemento de transmissão de carga, sendo esta concepção chamada de solução em Grupo de Estacas.

Shrestha *et al* (2017) destacam que os esforços mobilizados nas estacas e no radier variam com o recalque do radier estaqueado, o que dificulta enormemente o projeto desse tipo de fundação. Além disso, devido ao grande número de variáveis de projeto (raio do radier, número de estacas, comprimento das estacas, localização das estacas sob o radier, etc.), muitas soluções podem ser elaboradas. Os autores apontam para a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia adequada para ajudar o engenheiro a selecionar a solução de fundação mais adequada para as condições de terreno e carregamento.

Com base nas considerações geotécnicas para aerogeradores onshore propostas por Warren-Codrington (2013):

- ✓ As análises de capacidade de carga e estabilidade precisam garantir que a fundação forneça uma ligação com o solo para uma combinação, a mais crítica, de carregamento;
- ✓ A rigidez e os recalques podem ser avaliadas com base nas teorias de elasticidade;
- ✓ Aumentar a rigidez da fundação tem um efeito insignificante no recalque total, porém este acréscimo minimiza os recalques diferenciais;

- ✓ Este acréscimo na rigidez pode ser obtido ao incorporar estacas na fundação, sendo incluídas de forma otimizada visando compatibilizar capacidade de carga e custo;
- ✓ A elevada rigidez da fundação é preferida para reduzir as amplitudes de vibração decorrentes do carregamento dinâmico existente em fundações de torres eólicas. Esse aumento na rigidez contribui na redução dos recalques diferenciais.

Segundo Molemaar e Tempel (2002), nos projetos de fundação de torres de aerogeradores, por se tratar de uma estrutura submetida a carregamentos de natureza dinâmica, seu comportamento frente à frequência excitadora também deve ser analisado, sendo importante a consideração da rigidez da interação solo-estrutura na determinação da frequência natural da estrutura.

2.1.2.1 Estudos em fundações de aerogeradores

Mohamed e Austrell (2017) realizaram um estudo comparativo do comportamento geotécnico para três soluções de fundações para um aerogerador de 2 MW, quais sejam: radier superficial, radier profundo e um radier cônico, que podem ser visualizados na Figura 5. Segundo esses autores, não se tem conhecimento da utilização da solução de fundação em radier cônico para aerogeradores, no entanto esta solução já tem sido usada como fundação de chaminés na Polónia e de algumas torres de telecomunicações na China e na Rússia.

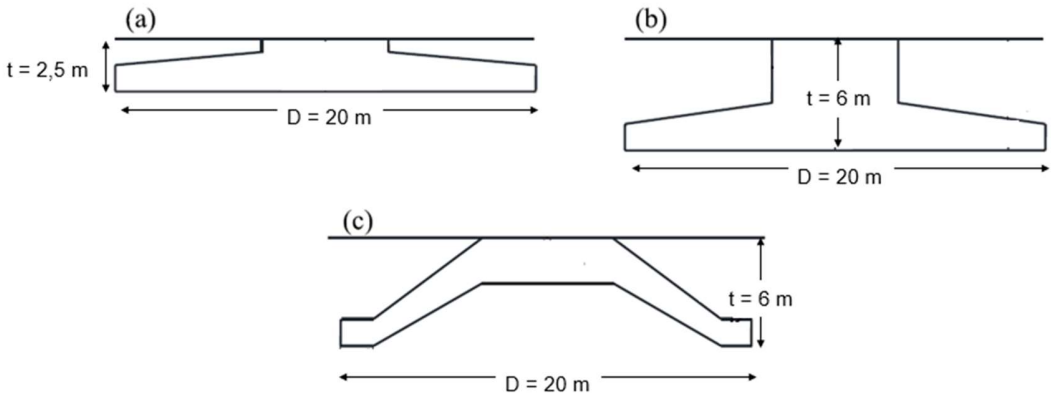


Figura 5 – Tipos de fundação de torre eólica analisadas por Mohamed e Austrell (2017): (a) radier circular plano tradicional; (b) radier circular plano e profundo; e (c) radier cônico. Modificado de Mohamed e Austrell (2017).

Mohamed e Austrell (2017) utilizaram o software ABAQUS para modelagem tridimensional através do Método dos Elementos Finitos. Para o solo foi considerado o modelo constitutivo plástico perfeitamente elástico, com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Para o elemento estrutural do radier foi considerado o modelo elástico linear. Devido à simetria, foi modelado apenas a metade do problema. Os limites da malha de elementos finitos utilizada para modelagem se estendem a uma distância de 2,5 vezes o diâmetro da fundação a partir da borda do radier e 3 vezes o diâmetro do radier em profundidade, contados a partir da superfície do terreno. A malha compreendeu 76.075 elementos e 323.881 nós para o caso do radier plano profundo, tendo sido adotada uma malha fina para as proximidades da fundação e uma malha grossa para a região mais afastada.

Mohamed e Austrell (2017) verificaram algumas características do radier cônico quando comparado ao radier circular com base plana e com o mesmo diâmetro:

- ✓ Uma maior capacidade de carga, 15% superior à obtida pelo radier circular com base plana, em decorrência da maior área de interface existente entre o solo e a fundação;
- ✓ Menores recalques diferenciais no caso do radier cônico;

- ✓ A geometria cônica considera o peso do solo mais profundo assente sobre a fundação, favorecendo a estabilidade para os esforços rotacionais provocados pelos elevados momentos atuantes nesse tipo de estrutura;
- ✓ Para o caso de nível d´água próximo a superfície do terreno, o formato cônico favorece a diminuição do efeito da força de poropressão sob a fundação;
- ✓ O radier cônico pode precisar de mais tempo de construção no local comparado com o radier plano superficial com o mesmo diâmetro. No entanto, a forma cônica requer diâmetros menores do que os de forma plana para atingir as exigências de segurança do projeto geotécnico, o que pode diminuir o tempo de construção da fundação no local;

- ✓ Os radiers cônicos precisam de quantidades menores de material do que os radiers planos superficiais. O volume total de concreto e o peso do aço foram reduzidos em 30% e 16%, respectivamente. No entanto, o volume total de escavação foi aproximadamente 11% a mais do que o volume de escavação um radier circular plano convencional. Além disso, uma escavação profunda requer mais trabalho.

Shrestha *et al* (2017) analisaram a fundação em radier estaqueado de um aerogerador com 130 m de altura, submetido a uma ação de vento com velocidade média de 201,17 km/h, de um parque eólico em Charleston, no Sul Carolina, EUA. A geometria da solução em radier estaqueado está representada na Figura 6.

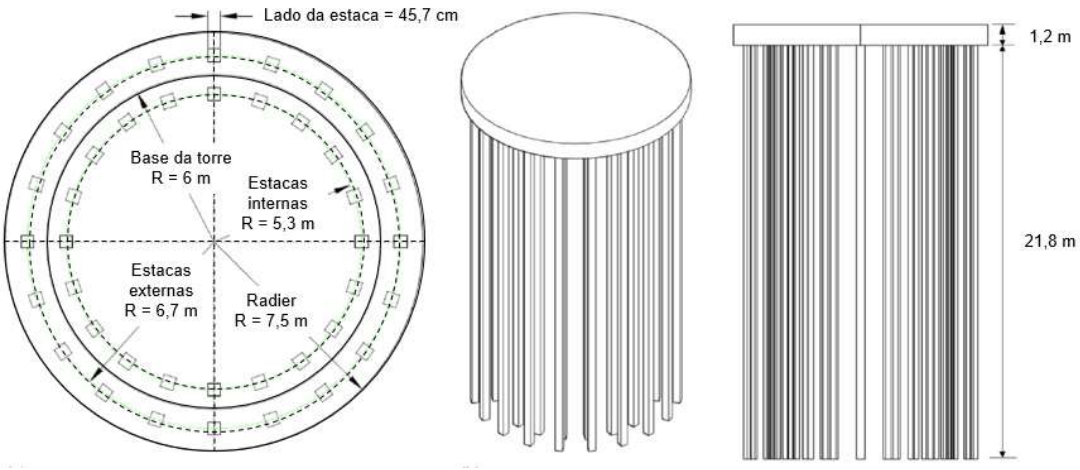


Figura 6 – Projeto de fundação em radier estaqueado: (a) vista em planta; (b) vista 3D; (c) vista frontal. (modificado de Shrestha et al (2017).

Shrestha *et al* (2017) realizaram uma pesquisa objetivando uma otimização de procedimento para o cálculo de uma fundação em radier estaqueado. Foi realizado um estudo paramétrico para entender o efeito de parâmetros incertos, conhecidos como variáveis aleatórias, como a velocidade do vento e as propriedades do solo (coesão não drenada) sobre as variáveis de projeto, como o raio do radier, número e o comprimento das estacas no custo da fundação.

Conforme foi verificado por Shrestha *et al* (2017), o dimensionamento final foi controlado pela rotação da torre e pelos recalques diferenciais. O uso da solução em radier estaqueado, aproveita os benefícios de ambos os elementos, o radier e as estacas, para controlar a capacidade de carga e os recalques, respectivamente. A solução em radier estaqueado foi a melhor opção para atender aos requisitos de projeto. Os resultados do estudo paramétrico mostraram que os requisitos de projeto podem ser atendidos aumentando-se o número de estacas, comprimento das estacas ou raio do radier para combater os efeitos da elevada velocidade do vento. Observaram também uma clara relação entre o custo total da fundação e os recalques diferenciais. Essa relação é útil para selecionar a melhor alternativa de projeto para as condições de campo apresentadas.

2.2 FUNDAÇÃO EM RADIER ESTAQUEADO

O radier estaqueado é uma solução de fundação que associa elementos de uma fundação rasa (sapata ou radier) com fundação profunda (estacas), buscando a união das vantagens de cada solução em uma solução unificada. Segundo Mandolini *et al.* (2017), os projetos de radier estaqueado frequentemente negligenciam vários aspectos bem conhecidos da literatura científica, às vezes levando a um aumento de custos sem o aumento do desempenho do sistema.

O mecanismo de transferência de carga em um radier estaqueado envolve uma interação complexa entre os elementos envolvidos. Cada elemento exerce sobre o outro uma interferência, conforme apresentado na Figura 7.

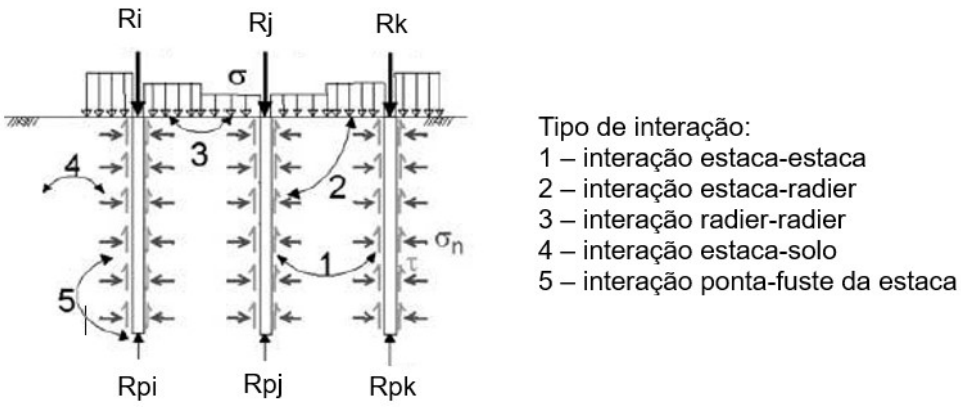


Figura 7 – Interação solo-estrutura entre radiers, estacas e subsolo. (KATZENBACH et al., 2005).

Verifica-se que comportamento de uma solução em radier estaqueado depende de vários fatores, tais como: o solo; a geometria do radier; a quantidade, diâmetro, comprimento, tipo, espaçamento e posicionamento das estacas sob o radier; o tipo e intensidade do carregamento aplicado; e a interação entre todos os elementos do sistema de fundação.

Teixeira (1996) destaca que o radier estaqueado é uma solução interessante quando o solo sob o radier possuir uma boa capacidade de suporte, de modo que poucas estacas sejam suficientes para reduzir os recalques a limites admissíveis. Esta solução

em radier estaqueado busca compatibilizar os recalques do radier com os recalques do grupo de estacas, minimizando os recalques diferenciais, uma vez que a solução em radier estaqueado é menos rígida do que o grupo de estacas.

Segundo Balakumar e Anirudhan (2011), quanto maior a resistência do solo abaixo do radier, maior será o efeito do contato de um radier sobre um grupo de estacas.

Segundo Randolph (1994) o contato do elemento horizontal (radier) com o solo, trabalhando em conjunto às estacas e formando um único sistema que trabalha em bloco, promove uma ruptura também em bloco, tornando-se um conjunto mais resistente à ruptura. Este efeito de ruptura do sistema composto pelo radier, estacas e o solo é interessante pois tende a garantir um fator de segurança maior em relação aos mesmos tipos de fundação quando analisados separadamente.

Mandolini *et al.* (2017) colocam que, do ponto de vista conceitual, um radier estaqueado consiste de um radier, em contato direto com o solo, assente sobre um grupo de estacas. Para descrever o percentual da carga total Q_{pr} suportada pelo radier, é possível referir à relação de partilha de carga α_r definida conforme Equação 1.

$$\alpha_r = Q_r / Q_{pr} \quad (1)$$

onde Q_r é a carga suportada pelo radier. Uma razão de compartilhamento de carga $\alpha_r = 1$ representa uma fundação sem estacas, enquanto $\alpha_r = 0$ representa um grupo de estacas com um radier que não está em contato com solo. As fundações de radier estaqueado cobrem o intervalo $0 < \alpha_r < 1$. Os diferentes sistemas de fundações trabalham conforme demonstrado na Figura 8.

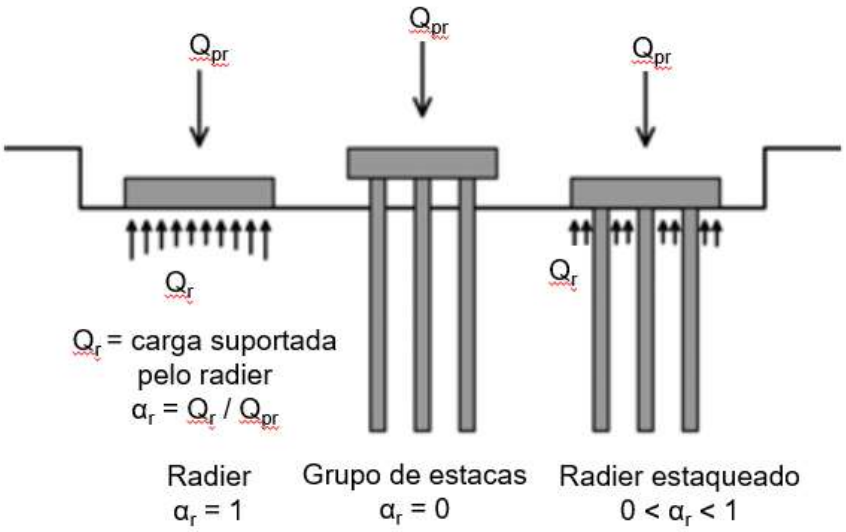


Figura 8 – Definição dos diferentes sistemas de fundação (Mandolini et al, 2017).

Katzenbach *et al.* (2000), citado por Garcia (2015), também utilizam um coeficiente que relaciona o percentual da carga que é transferida ao grupo de estacas (α_{pr}) com a carga total atuante na fundação, definindo desta forma o comportamento do radier estaqueado. O valor zero do coeficiente representa um radier isolado e o valor unitário representa o sistema convencional de grupo de estacas ignorando a influência do radier, conforme apresentado na Figura 9. Em geral, o valor de α_{pr} varia entre 0,4 e 0,7 (Katzenbach *et al*., 1998). O recalque do radier estaqueado é representado por S_{PR} e o recalque do radier isolado é representado por S_R.

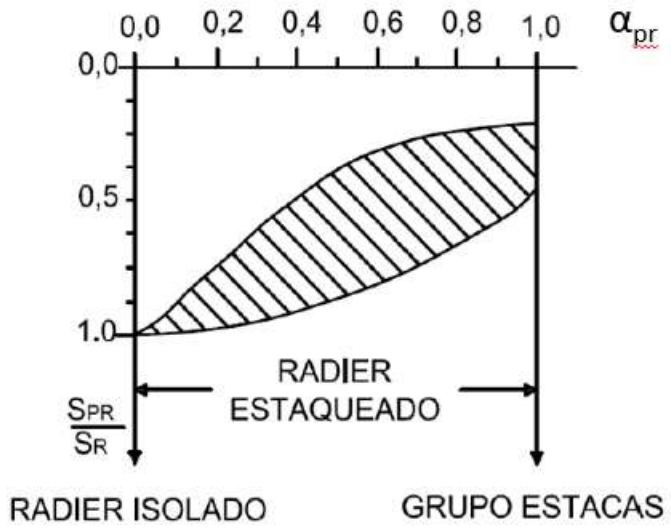


Figura 9 – Comportamento de um radier estaqueado (Katzenbach et al., 2000).

Mandolini *et al.* (2017) destacam que na maioria dos projetos, uma vez tomada a decisão de adotar estacas, é comum a suposição de que as cargas de projeto são transmitidas unicamente pelas estacas, negligenciando a contribuição do contato solo-radier. Mandolini *et al.* (2005) já havia mencionado que esta abordagem de projeto tradicional está claramente em conflito com evidências experimentais. Para grupo de estacas com razão s/d (espaçamento/diâmetro) relativamente pequenos (digamos s/d = 3 ÷ 4) e cobrindo toda a área do radier A_R (A_G / A_R ~ 1, com A_G a área coberta por grupo de estacas), a percentagem do carregamento suportada pelo radier tem um valor mínimo de 20% aproximadamente e este valor aumenta até 60-70% para aumento da relação s/d ou redução da relação A_G/A_R, conforme demonstrado na Figura 10.

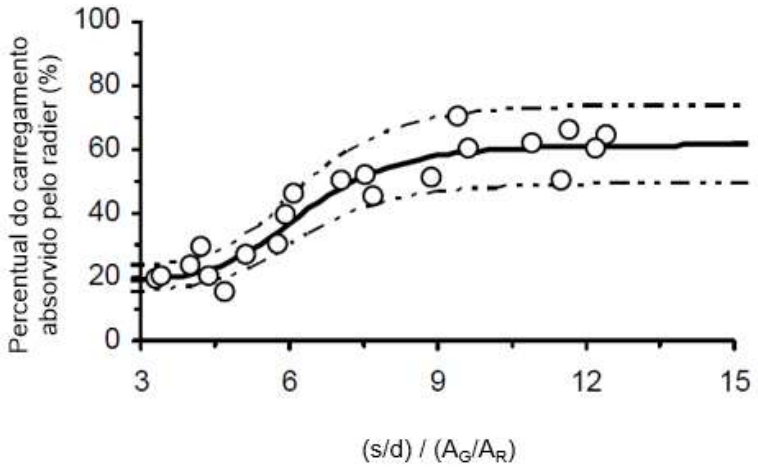


Figura 10 – Percentual do carregamento suportado pelo radier (Mandolini et al., 2005).

Conforme Mandolini *et al.* (2017), é comum negligenciar a contribuição do radier, sendo esta uma consideração conservadora no caso dos projetos onde as estacas são necessárias para fornecer capacidade de carga à fundação. Esta negligência torna-se totalmente errônea quando o radier possui capacidade de carga adequada, muitas vezes maior do que a fornecida pelo grupo de estacas, e as estacas têm o único papel de diminuir e/ou reduzir os recalques diferenciais.

Segundo Akinmusuru (1980), citado por Freitas Neto (2013), a capacidade de carga para um projeto em radier estaqueado não se resume à soma algébrica das capacidades de carga individuais de cada elemento do sistema radier + estacas. Esta capacidade de carga pode ser maior ao ser considerada a interação existente entre as partes, as características próprias do conjunto (tipo de estaca, rigidez do radier, geometria da fundação, ...), tipo de solo, todos esses fatores influenciam na capacidade de carga do sistema de fundação em radier estaqueado.

Com o objetivo verificar a interação radier/estacas, Akinmusuru (1973), citado por Garcia (2015), apresentou o resultado de um estudo com modelos reduzidos em areia, onde foram analisados, para o mesmo solo, o comportamento de uma sapata isolada, uma estaca isolada, um grupo de estacas, considerando também neste último, o contato

do bloco com o solo. A conclusão foi que a capacidade de carga de uma sapata estaqueada é superior à soma algébrica da capacidade de carga da sapata isolada e do grupo de estacas, havendo uma relação entre a fundação superficial e a profunda quando se utiliza o sistema de sapatas com estacas, de acordo com a Equação 2:

$$Q_t = \alpha.Q_g + \beta.Q_c \quad (2)$$

Onde: Q_t = capacidade de carga da sapata estaqueada; Q_g = capacidade de carga do grupo de estacas; Q_c = capacidade de carga da sapata isolada; α = fator de incremento da capacidade de carga do grupo de estacas devido à interação com a sapata; β = fator de incremento da capacidade de carga da sapata devido à presença do grupo de estacas.

Akinmusuru (1973), citado por Garcia (2015), mostrou através dos resultados dos ensaios, que a contribuição do bloco em contato com o solo é função das suas dimensões e do comprimento das estacas. E, de uma forma geral, mostrou que a parcela da capacidade de carga das estacas (Q_g) é bastante influenciada pela interação bloco/solo/estacas, enquanto que a capacidade de carga da sapata sofre pouca influência desta interação, resultando $\alpha >> \beta$. Sugerindo que na Equação 2 o valor de β seja considerado igual à unidade.

Segundo Poulos (2001), os radiers estaqueados com pequeno espaçamento entre as estacas tendem a trabalhar como “pilar equivalente”, tendo o radier pouca influência na capacidade de carga. Já os radiers que possuem um maior espaçamento entre as estacas e pequenos valores para relação L/B, sendo L o comprimento das estacas e B a largura do radier em planta, tendem a uma maior participação no comportamento da fundação.

Segundo Garcia (2015), os “pequenos” radiers estaqueados são aqueles cuja capacidade de carga do radier sem estaca(s) não é suficiente para suportar a carga total com fator de segurança adequado. As estacas somente são adicionadas para aumentar a capacidade de carga e levar o fator de segurança a níveis adequados. As dimensões do radier são da ordem de 5 a 15 m e obedecem à relação $B/L < 1$, sendo B a largura do radier em planta e L o comprimento das estacas. Já os “grandes” radiers estaqueados

são aqueles cuja capacidade de carga do radier sem estaca(s) é suficiente para suportar a carga total com uma margem adequada no fator de segurança. As estacas são adicionadas com o intuito de reduzir os recalques. Em geral, a largura do radier (B) é relativamente grande em comparação ao comprimento das estacas B/L > 1, em que L é o comprimento das estacas. Esta classificação em “grandes” e “pequenos”, podem sinalizar qual a abordagem de projeto seria mais adequada.

Mandolini *et al.* (2013) observaram, nos últimos anos, grandes avanços na compreensão do mecanismo de interação de fundações estaqueadas com o solo. A eficácia de uma estaca, em particular no que diz respeito à sua rigidez, é geralmente reduzida pela proximidade de outras estacas. Desta forma, a tendência atual está voltada para o uso de menos estacas, mais espaçadas, em radiers estaqueados, permitindo uma maior participação do radier na transferência do carregamento ao solo.

Conforme Sales (2000), o conceito tradicional de “grupo de estacas”, mesmo que o bloco esteja em contato com o solo, que é o usual, não se considera que ele possa transferir qualquer parcela de carga ao solo. Ainda segundo este autor, algumas das principais vantagens da aplicação de solução em radier estaqueado são:

- ✓ Redução de recalques diferenciais em projetos de fundações, inclusive os decorrentes da excentricidade da carga, às irregularidades das espessuras das camadas ou às dispersões das propriedades do solo;
- ✓ Prevenção de recalques entre diferentes partes carregadas de uma edificação;
- ✓ Aumento da capacidade de carga global das fundações;
- ✓ Aumento da resistência da fundação a carregamentos horizontais e momentos que tendem a levar a estrutura ao tombamento;
- ✓ Diminuição das tensões internas e momentos pela seleção otimizada das posições das estacas.

Com relação ao comportamento carga x recalque, Cooke (1986), citado por Garcia (2015), realizou esta análise para três alternativas de fundação: radier isolado, este radier estaqueado com 49 estacas e um grupo de 49 estacas sem a contribuição do radier. Observa-se que tanto a capacidade de carga quanto a rigidez do radier estaqueado são

superiores ao radier e ao grupo de estacas sem a contribuição do radier, conforme pode-se observar na Figura 11.

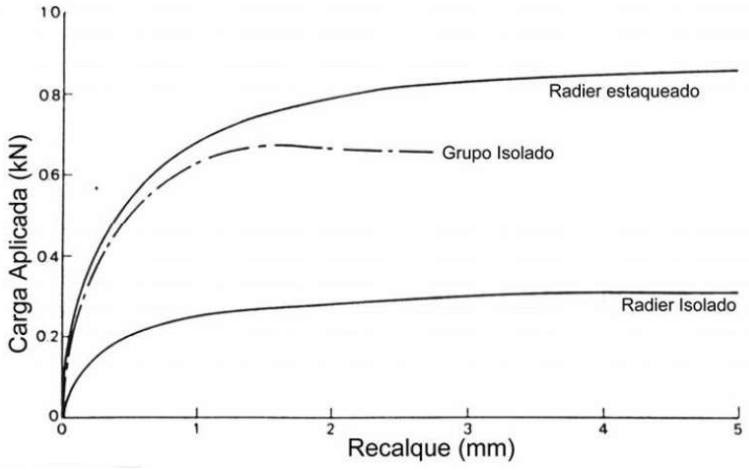


Figura 11 – Comportamento e soluções em radier estaqueado sobre 49 estacas, grupo de estacas com 49 estacas e radier isolado (Cooke, 1986).

2.2.1 Projeto de fundação em Radier Estaqueado

Segundo Shrestha *et al* (2017), a ideia básica por trás do uso de um radier estaqueado é usar o radier para aumentar a capacidade de carga da fundação em função de sua grande área de contato com o solo e diminuir os recalques totais e diferenciais com o uso de estacas. No entanto, a quantificação dos percentuais exatos de cargas totais suportado pelo radier e pelas estacas é o aspecto mais desafiador num projeto de uma solução em radier estaqueado. Essa dificuldade deve-se principalmente à falta de compreensão da interação complexa entre o solo, o radier e as estacas, bem como das forças mobilizadas ao longo da interface e dos valores dos recalques totais e diferenciais. Assim, a diretriz para um projeto confiável ainda não está disponível, especialmente para a fundação submetida a esforços combinados de momentos, carregamentos verticais e horizontais.

Um projeto de fundação do tipo radier estaqueado demanda várias análises, conforme proposição de Poulos (2001):

- ✓ Capacidade de carga última para carregamento vertical, horizontal e momento;
- ✓ Recalque máximo;
- ✓ Recalque diferencial;
- ✓ Esforços no radier para o projeto estrutural;
- ✓ Esforços nas estacas.

Ainda segundo o mesmo autor, um projeto racional de uma solução em radier estaqueado deve contemplar três etapas, conforme as abaixo relacionadas:

- ✓ Estágio preliminar: nesta primeira etapa é feita a análise de viabilidade da solução em radier estaqueado com o referido quantitativo de estacas para satisfazer as exigências do projeto. Nesta etapa inicial, o número de estacas é estimado por meio de uma análise aproximada;
- ✓ Segundo estágio: nesta segunda etapa de projeto é realizada uma análise mais detalhada que permitirá definir onde as estacas serão posicionadas e quais as suas características gerais;
- ✓ Estágio final: por fim, nesta última etapa de projeto, é realizado o detalhamento do radier estaqueado, com a obtenção no número ótimo de estacas, com o posicionamento ideal de cada estaca, é feita uma estimativa detalhada dos recalques diferenciais, momentos fletores e esforços cortante no radier, cargas e momentos nas estacas.

Os dois primeiros estágios envolvem cálculos relativamente simples, que podem ser realizados sem a necessidade de programas computacionais complexos. O estágio de detalhamento, porém, irá demandar a utilização de um programa computacional adequado que leve em consideração a interação existente entre o solo, o radier e as estacas. O efeito da interação entre o sistema de fundação (solo, radier e estacas) e a superestrutura também deve ser considerado.

A literatura aborda o comportamento da capacidade de carga e recalques em soluções de fundação em radier estaqueado. Randolph (1994), citado por Freitas Neto (2013) e Garcia (2015), define três filosofias diferentes para projeto de radier estaqueado, conforme relacionado a seguir:

- ✓ Abordagem convencional: nesta abordagem as estacas são projetadas como um grupo que contribui com o suporte da maior parte do carregamento;
- ✓ "Creep piling" ou Critério de mobilização parcial ou total das estacas: nesta abordagem as estacas são projetadas para trabalhar com uma carga de trabalho elevada, onde a fluência começa a ocorrer, com praticamente 70% a 80% da carga de ruptura. O quantitativo de estacas é dimensionado para reduzir a tensão de contato entre o radier e o solo para níveis inferiores a tensão de pré-adensamento;
- ✓ Controle de recalques diferenciais: nesta abordagem as estacas são posicionadas estrategicamente de forma a reduzir o recalque diferencial, ao invés de priorizar a redução do recalque médio.

Segundo Poulos (2001), existe uma versão mais extrema onde a capacidade de carga total das estacas é utilizada, isto é, algumas ou todas as estacas operam a 100% da sua carga última. Esta abordagem dá origem ao conceito de usar as estacas como redutores de recalque, reconhecendo que também contribuem para aumentar a capacidade de carga máxima de todo o sistema de fundação. Segundo o referido autor, um projeto dimensionado à luz da abordagem do controle de recalques diferenciais pode ser consideravelmente mais econômico se comparado com as outras abordagens.

A Figura 12 ilustra, conceitualmente, o comportamento carga *versus* recalque de radiers estaqueados de acordo com as estratégias de projeto mencionadas acima. A curva 0 mostra o comportamento do radier isolado, que apresenta recalques excessivos para carga de projeto. A curva 1 representa a abordagem de projeto convencional, onde o comportamento do sistema de fundação com radier estaqueado é governado pelo comportamento do grupo de estacas, as quais absorvem o maior percentual do carregamento e apresenta a curva carga versus recalque linear para carga de projeto. A curva 2 representa a abordagem que considera a fluência do estaqueamento, onde as

estacas trabalham com baixo fator de segurança, mas devido ao reduzido número de estacas, o radier suporta um maior carregamento do que a curva 1. A curva 3 demonstra a estratégia de utilizar as estacas como redutoras de recalque, utilizando a capacidade última das estacas no dimensionamento do projeto. Consequentemente a curva carga *versus* recalque se apresenta não linear, mas mesmo assim o sistema de fundação apresenta uma margem de segurança adequada e o critério de recalque é satisfeito. Portanto, a abordagem representada pela curva 3 é aceitável e se apresenta como a solução provavelmente mais econômica do que as abordagens representadas pelas curvas 1 e 2.

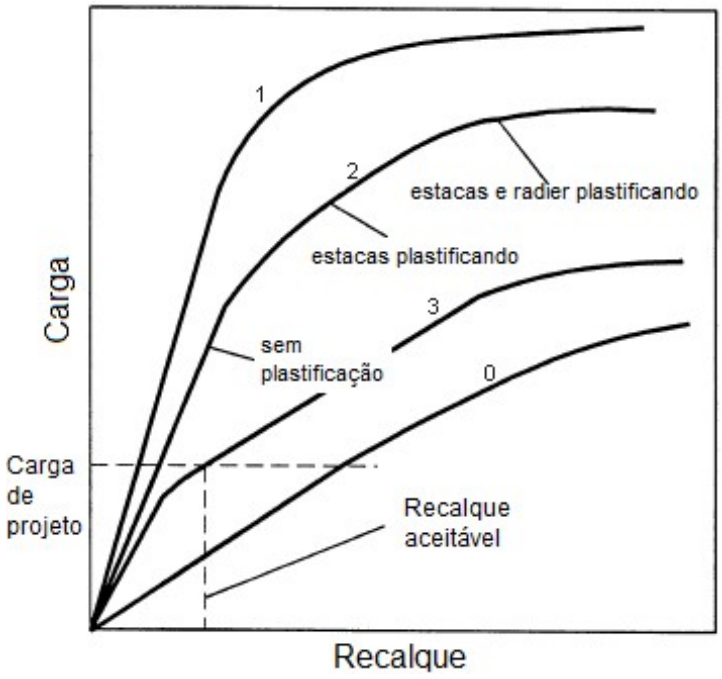


Figura 12 – Curva Carga versus Recalque de soluções em radier estaqueado para as diferentes filosofias de projeto, Poulos (2001).

A filosofia de projeto a ser utilizada para o dimensionamento de uma fundação em radier estaqueado deve ser escolhida de forma a obter o melhor desempenho do sistema de fundação que envolve a geometria estrutural do radier com as estacas e a características de resistência do solo, resultando em eficaz relação do custo x redução de recalque a níveis admissíveis.

Segundo Mandolini *et al* (2005), Mandolini *et al* (2013) e Mandolini *et al* (2017), pode-se afirmar com certeza que hoje em dia é possível instalar estacas sob um radier com diferentes finalidades geotécnicas: aumentar a resistência e a rigidez geral do radier (Abordagem de projeto baseada na capacidade de carga e recalque), reduzir o recalque médio (Abordagem de projeto baseada na redução de recalques) ou reduzir recalques diferenciais (abordagem de projeto baseada na redução de recalque diferencial).

Contudo, Mandolini *et al* (2017) consideram que apesar dos conhecimentos teóricos e experimentais acumulados sobre o assunto radier estaqueado, o conservadorismo simplista pressupostos ainda são empregados na rotina de projetos. Uma das principais razões é certamente a de que os projetistas costumam relutar em realizar análises numéricas e investigar o problema de interação solo-radier, que claramente exige experiência sobre o tema e custo computacional extra considerável.

Com o objetivo de preencher a lacuna entre Estado da Arte e Estado da Prática, Mandolini *et al* (2017) relacionam procedimentos de projeto simplificados, porém confiáveis, capaz de levar em conta o comportamento não-linear do solo. Este método simplificado é proposto para estimar a curva carga x recalque de um radier estaqueado e prever o rateio do carregamento entre estacas e radier para carga centralizada vertical, sendo tal método facilmente estendido para cargas horizontais. O procedimento proposto é uma extensão do método PDR (Poulos e Davis, 1980; Randolph, 1994; Poulos, 2000), que é um método particularmente útil para introduzir alguns aspectos básicos do "conceito de radier estaqueado".

O método PDR é baseado nas seguintes suposições: (1) estacas e radiers têm comportamento como sistema linear elástico até a ruptura; (2) o radier é rígido e submetido a uma carga central, portanto, apenas um deslocamento vertical uniforme pode ocorrer. Devido às hipóteses sobre a rigidez do radier, em princípio, o método é aplicável apenas a pequenos radiers estaqueados (B_R / L <1), nos quais os recalques diferenciais relevantes não ocorreriam (Russo e Viggiani 1998), citado por Mandolini *et al* (2017). No entanto, se o objetivo for a avaliação do rateio de carga entre o grupo de

estacas e o radier e a estimativa da curva carga média x recalque, o método ainda pode ser aplicado para fornecer informações úteis para fins de projeto.

No método PDR, a partir do conhecimento do comportamento do grupo de estacas e do radier, considerados como sistemas individuais, é feita uma combinação para prever o comportamento do sistema radier estaqueado. A partir de um ponto de vista conceitual, é possível expressar o recalque do grupo de estacas como o recalque que o grupo de estacas teria na ausência do radier mais uma solução de interação devido à presença do radier. O mesmo se aplica ao comportamento do radier no sistema combinado. São obtidas expressões para a rigidez do radier estaqueado e o compartilhamento de carga. As equações são válidas até que as estacas atinjam a ruptura, localização A na Figura 13. Além desse ponto e até ruptura do radier, qualquer incremento de carga é transferido diretamente para o radier, Mandolini *et al* (2017). Este comportamento pode ser verificado na Figura 13.

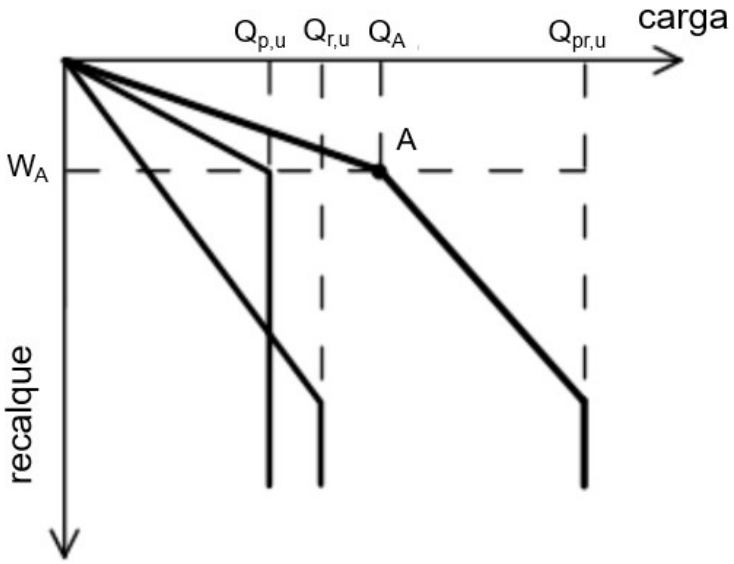


Figura 13 – O método PDR em sua forma original (Mandolini et al, 2017).

O método proposto por Mandolini *et al* (2017) emprega curvas carga x recalque não lineares arbitrárias para ambos os sistemas: grupo de estacas e radier. Antes as curvas carga x recalque tinham sido definidas para o grupo de estacas e para o radier,

individualmente. O método proposto assume que cada incremento de carga no radier estaqueado é compartilhado entre as estacas e o radier, dependendo da rigidez atual de cada um. Ao contrário do anteriormente considerado, onde os termos de interação sempre dependiam da rigidez inicial de cada sistema individualmente. Esta suposição, verificada numericamente e experimentalmente (Caputo e Viggiani 1984), citado por Mandolini *et al* (2017), para a interação estaca-estaca, será adotada para a interação grupo de estacas-radier.

O método apresentado por Mandolini *et al* (2017) foi validado através de comparação com resultados numéricos realizados para radier estaqueado por de Sanctis e Mandolini (2006) e Comodromos *et al.* (2009), e com resultados de centrífuga relatados em Fioravante e Giretti (2010). As Figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam os comparativos entre a metodologia simplificada apresentada por Mandolini *et al* (2017) e os métodos rigorosos dos Elementos Finitos e das Diferenças Finitas, utilizados por de Sanctis e Mandolini (2006) e Comodromos *et al.* (2009), respectivamente. Pode-se observar que os resultados são coincidentes.

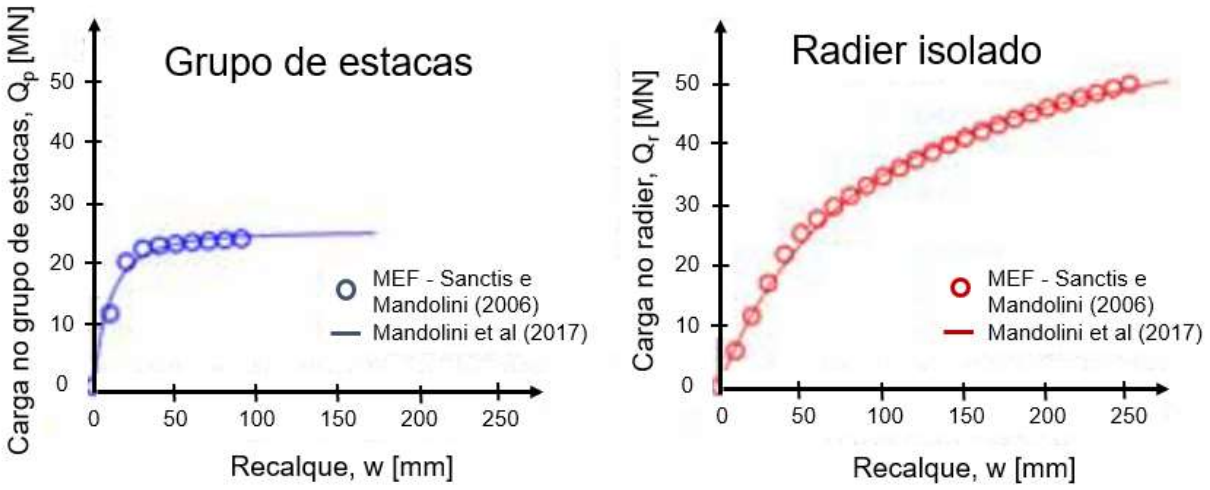


Figura 14 – Curvas carga-recalque para grupo de estacas e radier isolado com base no MEF (Método dos Elementos Finitos) utilizado por de Sanctis e Mandolini (2006) e curvas obtidas através do método proposto por Mandolini et al (2017).

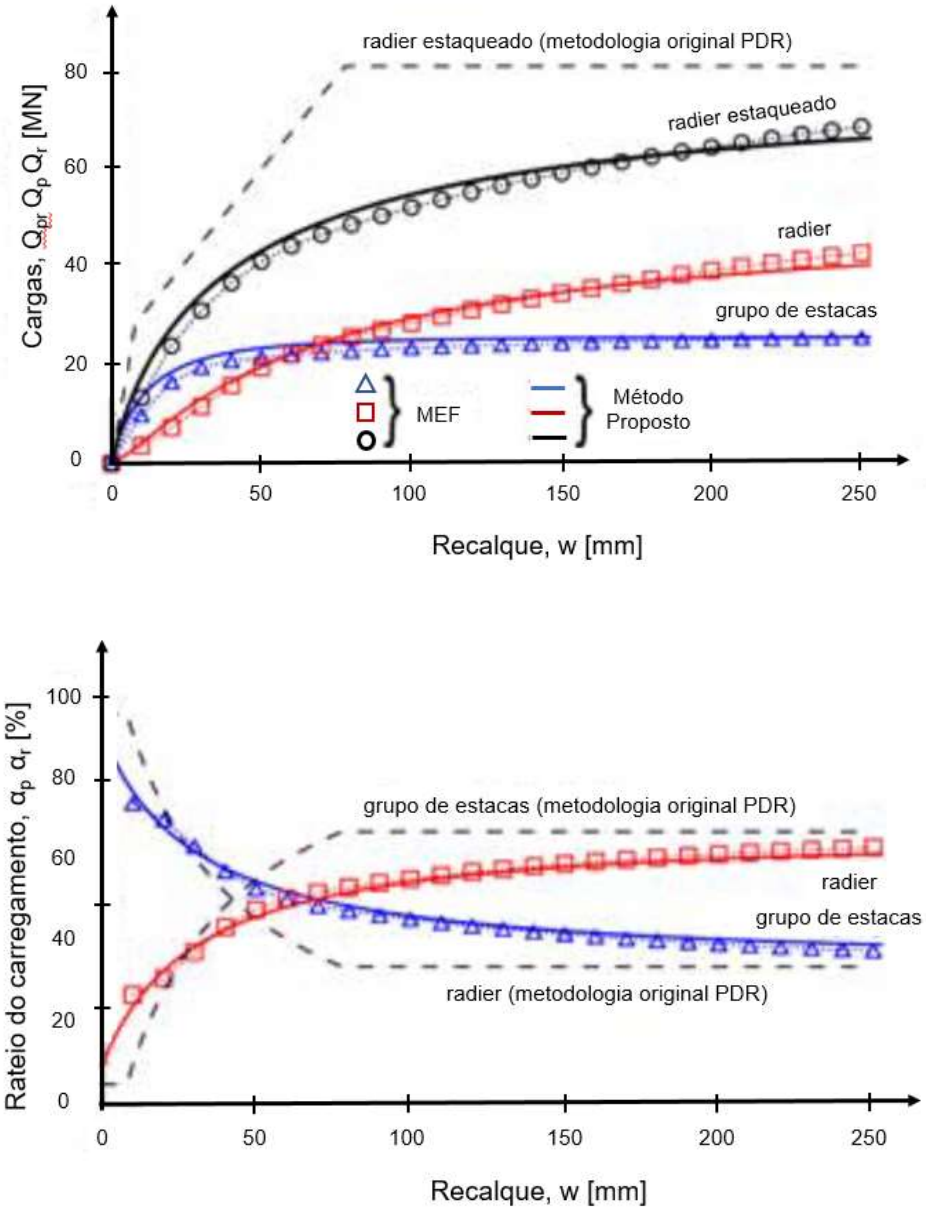


Figura 15 - Comparação entre os resultados do método proposto e análises rigorosas pelo MEF utilizado por de Sanctis e Mandolini (2006).

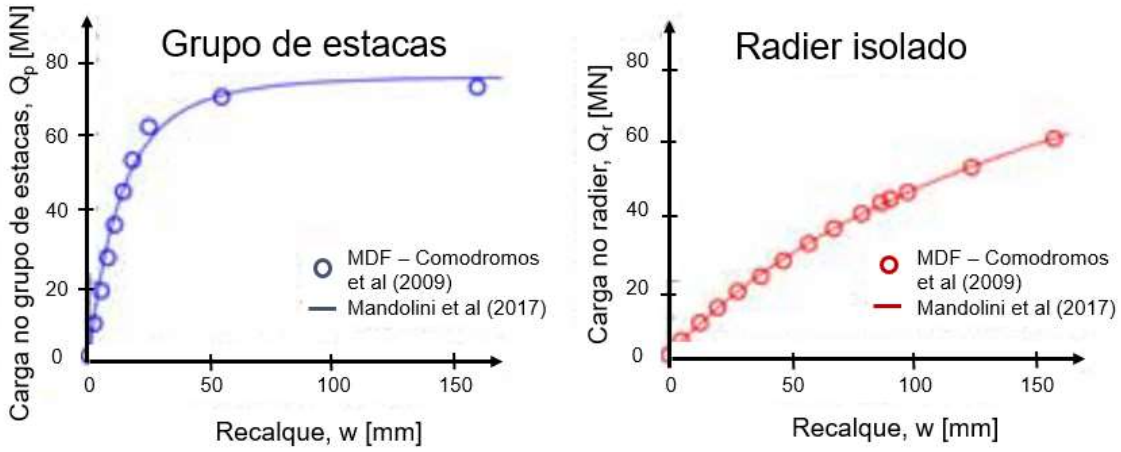
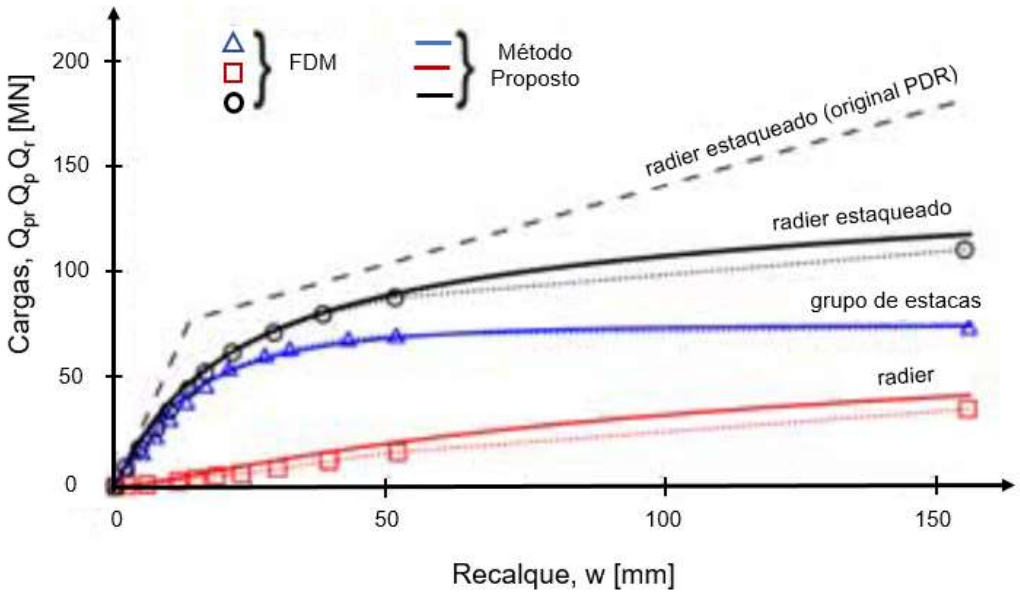


Figura 16 – Curvas carga-recalque para grupo de estacas e radier isolado com base no MDF (Método das Diferenças Finitas) utilizado por Comodromos et al (2009) e curvas obtidas através do método proposto por Mandolini et al (2017).



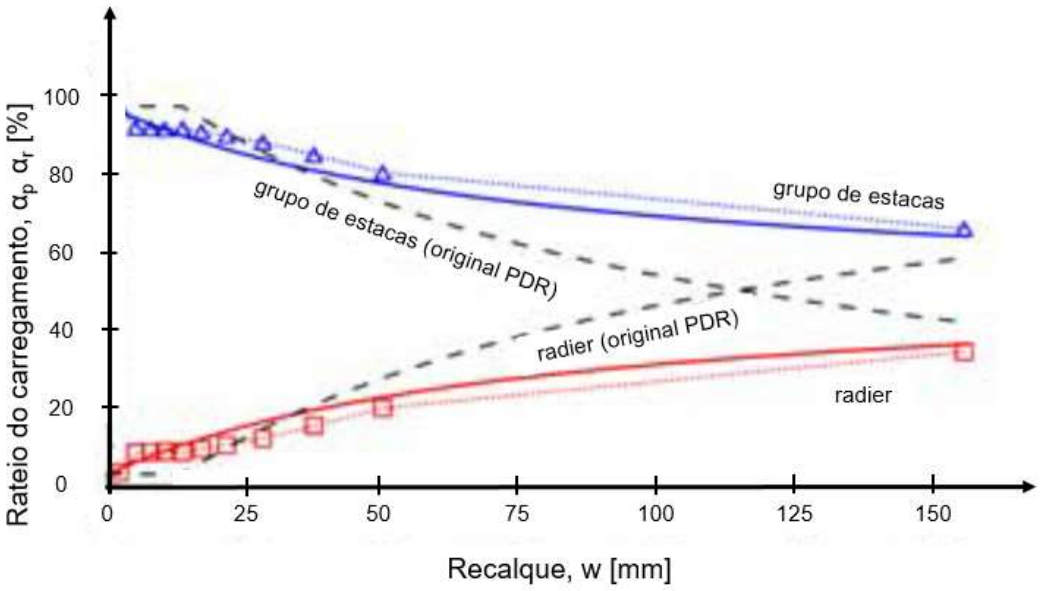


Figura 17 – Comparação entre os resultados do método proposto e análises rigorosas pelo MDF utilizado por Comodromos et al (2009).

A aplicação mais eficaz do radier estaqueado ocorre quando o radier pode oferecer uma capacidade de carga adequada, porém os recalques totais e/ou diferenciais excedem os limites aceitáveis. Conforme a Figura 18, Randolph (1994), citado por Soares (2011) e Freitas Neto (2013), apresenta o efeito da inserção de algumas estacas na base de um radier objetivando a redução de recalques diferenciais. Na Figura 19, também apresentada por Randolph (1994), citado por Soares (2011) e Freitas Neto (2013), observa-se como a inserção de estacas na base de um radier flexível afeta a distribuição das tensões, proporcionando um comportamento obtido para um radier rígido.

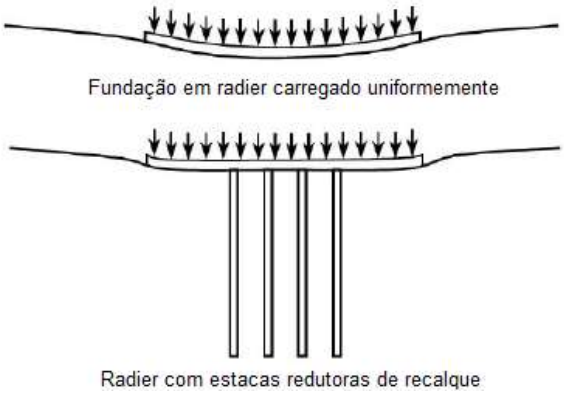


Figura 18 – Redução de recalque diferencial com inserção de estacas na porção central do radier (Modificado de Randolph, 1994), citado por Soares (2011) e Freitas Neto (2013).

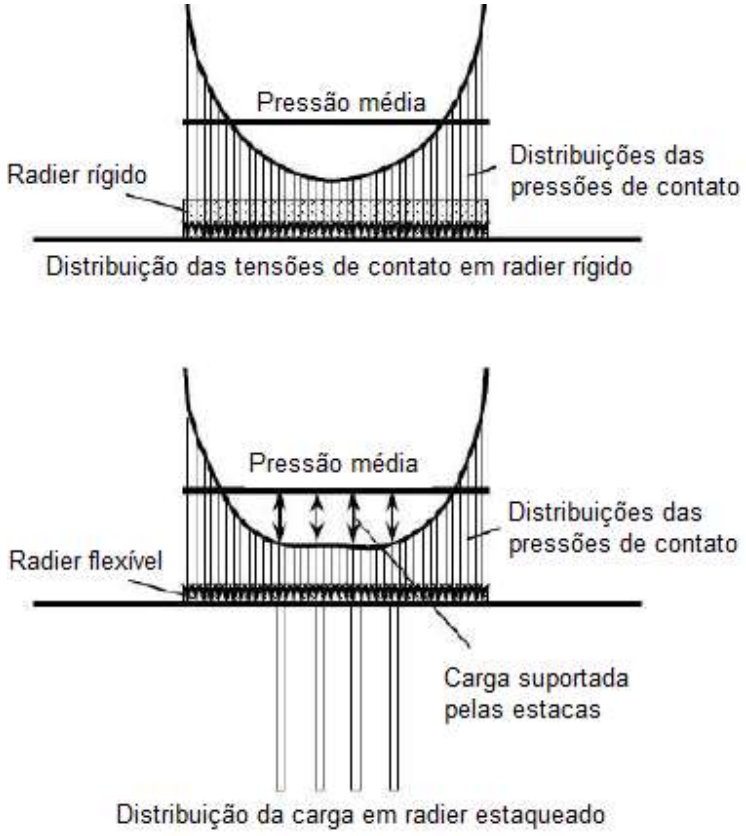


Figura 19 – Distribuição de tensões em radier rígido e em radier flexível estaqueado (Modificado de Randolph, 1994), citado por Soares (2011) e Freitas Neto (2013).

Como em qualquer projeto de fundações, a solução em radier estaqueado requer que sejam feitas considerações a respeito da capacidade de carga vertical, horizontal e momentos na fundação, verificação de recalques totais e diferenciais, determinação dos momentos e esforços cisalhantes para o projeto estrutural do radier e das cargas e momentos nas estacas.

Alguns parâmetros afetam o comportamento do sistema de fundação em radier estaqueado, são eles:

- ✓ Número, posição, diâmetro, espaçamento e comprimento das estacas;
- ✓ A intensidade e natureza do carregamento (concentrado ou uniformemente distribuído);
- ✓ Espessura do radier;
- ✓ Rigidez do terreno de fundação.

Com base na análise dos dados apresentados por Tang *et al*., (2013):

- ✓ Durante o processo de carregamento da fundação em radier estaqueado, não existe uma proporção fixa de compartilhamento de carga suportada pelo radier e pelas estacas;
- ✓ Quando a carga no topo de uma estaca é inferior à capacidade de carga desta estaca, a carga é suportada pela estaca, com o solo suportando menos do que 10% da capacidade de carga do solo. Ou seja, toda a carga da superestrutura é suportada pelo grupo de estacas nesse primeiro estágio de carregamento;
- ✓ Quando a carga no topo da estaca atingir ou exceder a capacidade de carga máxima da estaca, a carga atuante sobre o solo, aplicada pelo radier, aumenta significativamente. No entanto, a carga no topo da estaca permanece quase constante. Cada estaca do grupo de estacas continua com a capacidade de carga máxima e o solo começa a receber a carga da superestrutura.

Conforme destacado por Mandolini (2003), existe um número máximo de estacas que devem ser consideradas na base de um radier, que se superado não irá agregar maior eficiência, aumentando apenas o custo da solução. Inclusive, um número relativamente

reduzido de estacas, distribuído estrategicamente por toda a área do radier, pode melhorar sensivelmente o recalque diferencial. Quanto ao comprimento das estacas, para radiers de pequeno e médio porte, indica-se que as estacas tenham comprimento maior que a largura do radier.

Sales *et al.* (2015) destacam que o posicionamento das estacas é diretamente afetado pelo tipo de carregamento, ou seja, carga concentrada, carga uniformemente distribuída, carga excêntrica, momentos.

No que diz respeito à espessura do radier, nem o recalque máximo, nem o percentual do carregamento suportado pelas estacas são muito sensíveis à espessura do radier. Porém, como se pode esperar, o aumento na espessura do radier reduz os recalques diferenciais, mas geralmente aumenta o momento fletor máximo, conforme Garhy *et al.*, (2013) e Poulos (2001).

O projeto de uma fundação em radier estaqueado requer uma série de parâmetros geotécnicos e de performance:

- ✓ Peso específico do solo e do concreto;
- ✓ Ângulo de atrito e coesão do solo;
- ✓ Módulo de elasticidade do solo para cálculo da rigidez do radier e da estaca;
- ✓ Módulo de elasticidade do concreto;
- ✓ Coeficiente de Poisson do solo e do concreto;
- ✓ Coeficiente de empuxo passivo (k_0)
- ✓ Capacidade de carga do radier;
- ✓ Capacidade de carga da estaca;
- ✓ Critério de ruptura.

Embora existam vários ensaios laboratoriais e *in situ* disponíveis para a definição desses parâmetros, é comum, pelo menos nas avaliações iniciais, tomar como base os ensaios *in situ*, como o Ensaio de Penetração Padrão (SPT) e o Ensaio de Penetração de Cone Estático (CPT) para realizar correlações.

Segundo Poulos (2001) e Lee *et al.* (2010), o grande número de fatores que envolvem a interação solo-radier-estacas demanda métodos complexos para análise do comportamento de radiers estaqueados.

Freitas Neto (2013) relacionou vários métodos de dimensionamento de radier estaqueado, desde métodos simplificados, como correlações empíricas, ábacos de cálculo, métodos das fundações equivalentes e métodos baseados na teoria da elasticidade, até aqueles baseados em métodos computacionais aproximados, nos quais o radier é representado por uma placa e as estacas por molas, e os métodos computacionais rigorosos, como o Método dos Elementos de Contorno (MEC) e o Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual será utilizada nessa pesquisa. Além destes, pode-se destacar os métodos híbridos que são aqueles que combinam mais de um método de análise. A Tabela 1 apresenta as metodologias de cálculo de radier estaqueado.

Tabela 1 - Métodos de cálculo em radier estaqueado (Freitas Neto, 2013).

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 *et al*. (1991); Lee (1993); Wang (1995); Katzenbach *et al*. (1998), dentre outros.
	Métodos Híbridos	Poulos (1994) – GARP; Russo (1998) – NAPRA.

*Metodologia numérica implementada no programa Plaxis 3D Foundation.

Novak *et al*. (2005), citado por Freitas Neto (2013) comentam que o MEF tridimensional é o método mais recomendado para as análises da solução de fundação em radier estaqueado, pelo fato dessas análises serem tão complexas que os métodos simplificados não conseguem modelar corretamente o problema. O MEF está disponível em diversas ferramentas numéricas computacionais, podendo ser executado em computador de uso pessoal.

2.2.2 Estados Limites

Segundo Gusmão (1990), dois critérios devem sempre nortear um projeto de fundações: (i) deve ser assegurada a segurança da fundação, tanto do ponto de vista do solo quanto do elemento estrutural; (ii) e deve ser assegurado um desempenho satisfatório para a edificação nas condições de trabalho, ou seja, as deformações do terreno de fundação não devem provocar danos à obra.

Morgan e Ntambakwa (2008) citado por Warren-Codrington (2013) listam os principais estados limites a serem considerados no projeto de fundação de um aerogerador: resistência da fundação e do solo, estabilidade da fundação, rigidez solo-fundação e desenvolvimento de recalques diferenciais.

Segundo a NBR 6118:2014, são dois os critérios de segurança para projetos de estruturas de concreto: ELU e ELS, respectivamente, Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço. Estado limite é o estado que define impropriedade para o uso da estrutura, por razões de segurança, funcionalidade ou estética, desempenho fora dos padrões especificados para sua utilização normal ou interrupção de funcionamento em razão da ruína de um ou mais de seus componentes. Em outras palavras, é o estado em que a estrutura deixa de atender os requisitos para um funcionamento de forma plena e adequada ou até mesmo quando seu uso é interrompido por razão de um colapso na estrutura.

O ELU diz respeito ao desenvolvimento de pressões de contanto entre a fundação e o solo, que podem ser tais que causem a ruptura do solo sob ou adjacente à fundação. O ELS são os critérios de segurança que estão relacionados ao conforto para os usuários, durabilidade da estrutura, aparência e boa utilização de um modo geral. No caso em questão, onde pode-se destacar elevados valores de momento atuante na estrutura, especial atenção deve ser dada ao estado limite de deformações excessivas.

2.2.3 Modelagens numéricas aplicadas a Radier Estaqueado

O radier estaqueado deve ser corretamente modelado de maneira que o resultado final simule de forma real o comportamento do objeto de estudo. Segundo Pezo (2013), uma modelagem do ponto de vista geométrico deve ter em conta os seguintes aspectos:

- ✓ As dimensões em geral devem assegurar que o comportamento do objeto em estudo não é influenciado pelas restrições dos contornos do modelo;
- ✓ Cada elemento deve ser modelado respeitando no possível sua forma e dimensões;
- ✓ Sempre que possível são feitas simplificações por simetria com o objetivo de minimizar o tamanho do modelo.

Para a modelagem numérica de problemas em radier estaqueado, Sosa (2010) citado por Pezo (2013), recomenda que as dimensões horizontais do modelo radier estaqueado são três vezes a largura (B) do radier e a profundidade três vezes o comprimento das estacas (L). Esses limites de contorno do problema visam que todo o bulbo de tensões e deslocamentos estejam inseridos no volume considerado para a modelagem, de forma que os limites do contorno não influenciem os resultados das análises. A Figura 20 representa os limites de contorno recomendados para modelagens numéricas de um radier estaqueado.

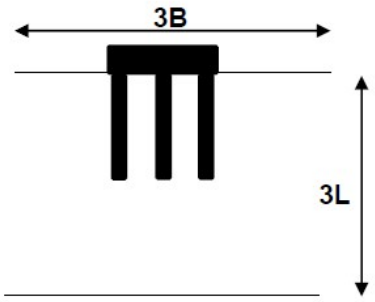


Figura 20 – Limites de contorno para modelagem numérica de radier estaqueado (Pezo, 2013).

Para a retroanálise do ensaio da prova de carga realizada em campo, a ser apresentada mais adiante, a modelagem teve como base os limites de contorno sugeridos por Ibañez (2001), citados por Sosa (2010) e por Pezo (2013). Eles reforçam a importância de simular adequadamente o comportamento das estacas para um melhor resultado da modelagem, destacando algumas recomendações, a seguir relacionadas e representadas na Figura 21:

- ✓ Os limites verticais do modelo devem ser definidos, pelo menos, duas vezes o comprimento (L) da estaca;
- ✓ Os limites horizontais do modelo devem ser definidos, pelo menos, duas vezes o comprimento (L) e em cada lado da estaca;
- ✓ O contato entre dois materiais ou elementos deve ser simulado usando elementos de interface.

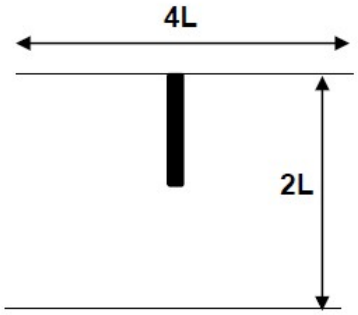


Figura 21 – Limites de contorno para modelagem numérica de estacas (Pezo, 2013).

O modelo constitutivo a ser adotado na modelagem permite relacionar as tensões com as deformações do material em função de parâmetros que dependem das propriedades mecânicas do solo. Para que o modelo seja realmente eficaz, deve possuir parâmetros definidos a partir de um número reduzido de ensaios simples, devendo reproduzir fisicamente o comportamento do material.

Segundo Freitas Neto (2013), uma das principais limitações nas tentativas de previsão de comportamento de fundações está na estimativa adequada dos parâmetros geotécnicos necessários para aplicar nos modelos constitutivos.

Conforme Svensson (2010) o comportamento Linear Elástico não é uma boa aproximação para os solos, mas pode ser usado para estruturas que existem no solo onde o comportamento da estrutura pode afetar o solo. Estruturas de concreto, por exemplo as fundações, podem ser modeladas como um material elástico linear.

Os parâmetros de resistência do solo, c e Φ, podem ser determinados a partir de ensaios de compressão triaxial, ao levar amostras do material até a condição de ruptura. O modelo prevê que os incrementos de deformação que acompanham qualquer mudança na tensão podem ser divididos em partes elásticas (recuperáveis) e plásticas (irrecuperáveis).

Segundo Pezo (2013), a interface entre o solo e o concreto, que é um dispositivo matemático para simular a interação que ocorre no contato entre dois materiais diferentes ou elementos (por exemplo, solo-radier e solo-estaca), permite a ocorrência de deformações elásticas em um elemento em relação a outro. Esta abordagem permite uma distinção entre um comportamento elástico, onde pequenos deslocamentos ocorrem na interface e o comportamento plástico que poderia levar ao deslocamento permanente.

Soares (2011) verificou, através de análises do efeito de grupo entre as estacas, que a capacidade de carga do grupo é maior que a soma das capacidades de carga das estacas individuais. Foi observado pelo referido autor que o recalque do grupo de estacas, sujeito a uma carga média por estaca, é maior do que o da estaca isolada, sob a mesma carga. Os resultados também mostraram que a interação entre o radier e as

estacas reduzem a eficiência dos elementos analisados individualmente, contudo, o desempenho do sistema de fundação foi favorecido pelo contato do radier com o solo, aumentando sua capacidade de carga. Esse ganho na capacidade de carga do radier estaqueado quando comparado ao grupo de estacas foi observado através dos resultados dos ensaios de capacidade de carga realizados.

Para a pesquisa, Soares (2011) realizou sete ensaios de prova de carga estática lenta, sendo três nos modelos em grupo de estacas, três nos radiers estaqueados e uma prova de carga direta no bloco pré-moldado. As disposições das estacas analisadas na pesquisa estão apresentadas na Figura 22. A dimensão do bloco se manteve fixa, as estacas são do tipo Hollow Auger com 0,3 m de diâmetro, 4,5 m de comprimento e o espaçamento entre elas igual a 1,05 m, representado 3,5 vezes o diâmetro da estaca.

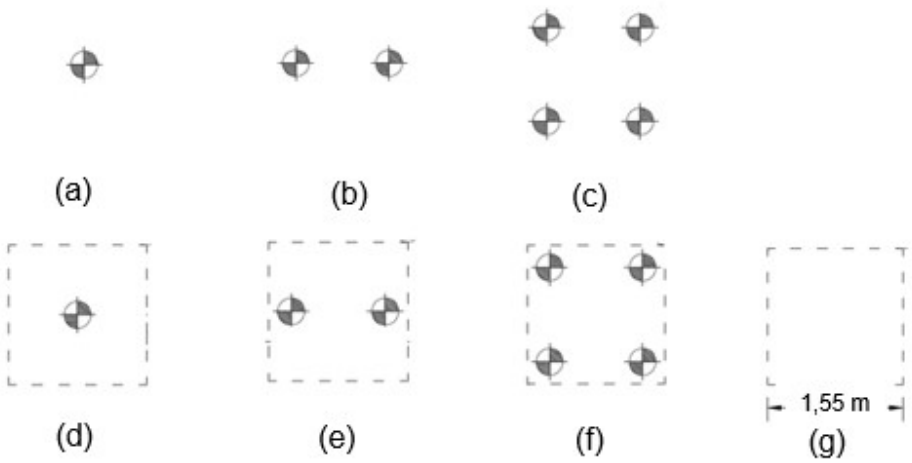


Figura 22 – Sistemas de fundações: (a) estaca isolada; (b) grupo com duas estacas; (c) grupo com quatro estacas; (d) radier sobre uma estaca; (e) radier sobre duas estacas; (f) radier sobre quatro estacas; (g) radier isolado (modificado de Soares, 2011).

O trabalho foi realizado na área litorânea de João Pessoa/PB. O perfil do terreno se caracteriza por uma camada de aterro com 0,5m de espessura, seguido de uma camada arenosa com compacidade variando de pouco a muito compacta até em média 10 m de profundidade. Na sequência, uma camada de silte arenoso fofo até 12m de profundidade, seguido de uma camada de areia silto-argilosa medianamente compacta

até 16 m de profundidade quando se encontra uma camada de argila siltosa rija a dura até a profundidade de 19m. Segue uma camada de areia pouco siltosa medianamente compacta até 22 m de profundidade e por fim uma camada de areia silto-argilosa variando de pouco a medianamente compacta até os 27 metros quando se encontra o calcário.

Dentre os diversos resultados obtidos por Soares (2011), as Figuras 23, 24 e 25 apresentam os gráficos carga x recalque obtidos através dos ensaios de prova de carga lenta. Pode-se verificar o ganho na capacidade de carga obtida quando da consideração do contato do bloco com o solo. Observa-se que no caso do radier sobre uma estaca esse ganho de capacidade de carga se mostrou mais acentuado do que no radier assente sobre quatro estacas. Entende-se que devido ao tamanho dos blocos serem os mesmos, uma menor quantidade de estacas permite um maior contato do bloco com o solo e consequentemente uma maior contribuição deste.

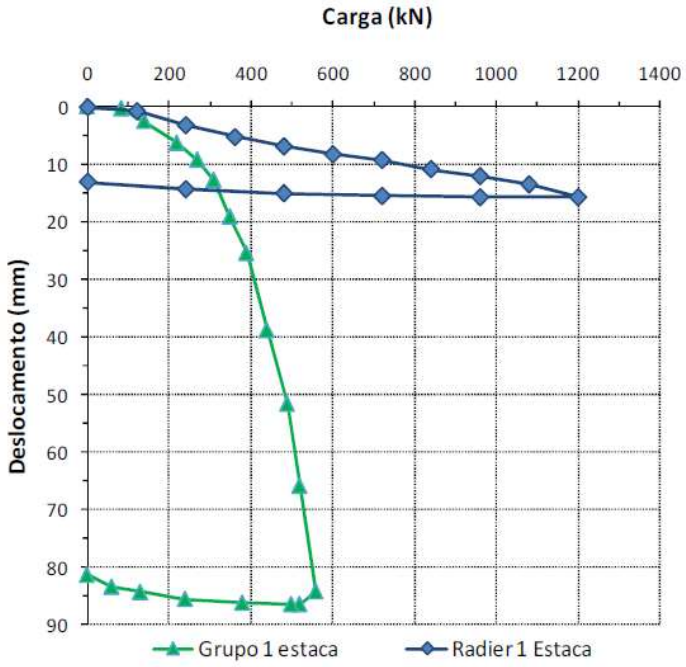


Figura 23 - Curva carga x recalque do grupo de uma estaca e do radier com uma estaca (Soares, 2011).

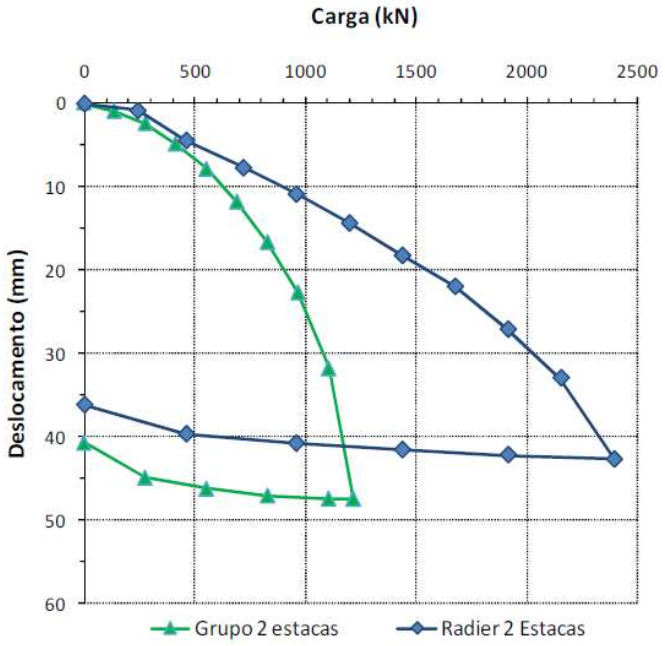


Figura 24 - Curva carga x recalque do grupo de duas estacas e do radier com duas estacas (Soares, 2011).

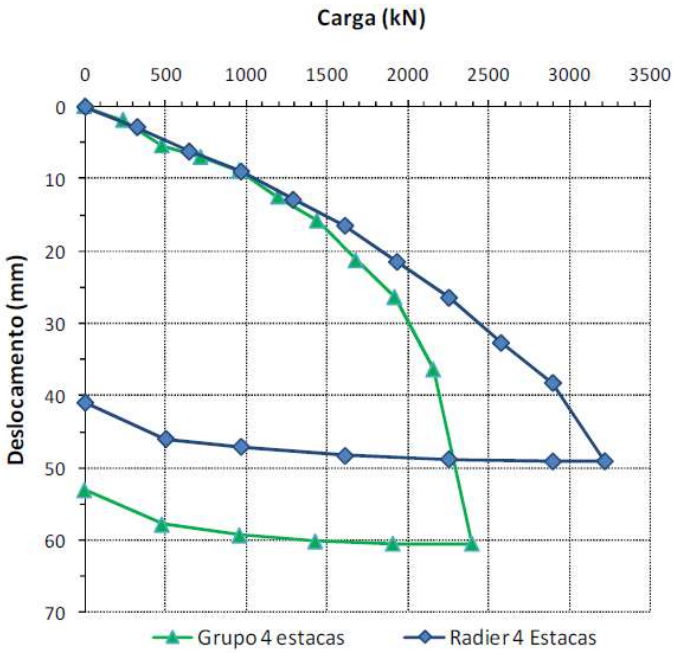


Figura 25 - Curva carga x recalque do grupo de quatro estaca e do radier com quatro estacas (Soares, 2011).

Soares *et al*. (2014), com base no banco de dados realizado por Soares (2011) acima descrito, analisaram o rateio do carregamento aplicado nas soluções em radier estaqueado, destacadas na Figuras 26. As Figuras 27, 28 e 29 apresentam o comportamento da distribuição de esforços entre o radier e as estacas, em função dos recalques provocados pela aplicação da carga do ensaio da prova de carga. Observa-se que quanto maior a área de contato entre o radier e o terreno de fundação, maior é a sua participação no rateio do carregamento aplicado, absorvendo 80, 70 e 50% para os radiers sobre 1, 2 e 4 estacas, respectivamente.

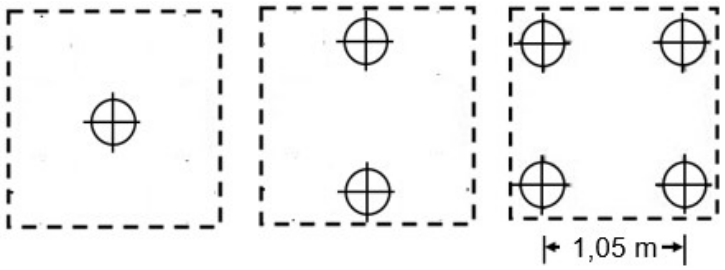


Figura 26 - Esquema dos radiers estaqueados com 1, 2 e 4 estacas (modificado de Soares et al., 2014).

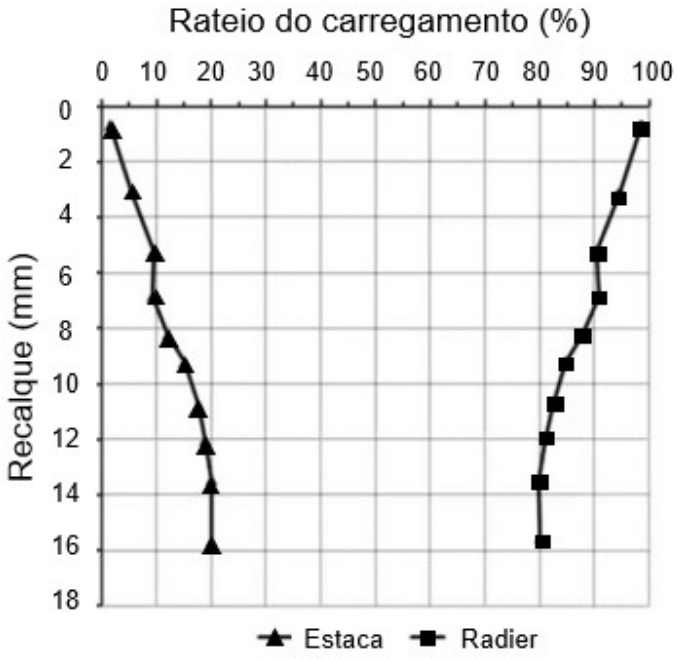


Figura 27 - Rateio do carregamento entre a estaca e o radier para o caso do radier assente sobre uma estaca (modificado Soares et al., 2014).

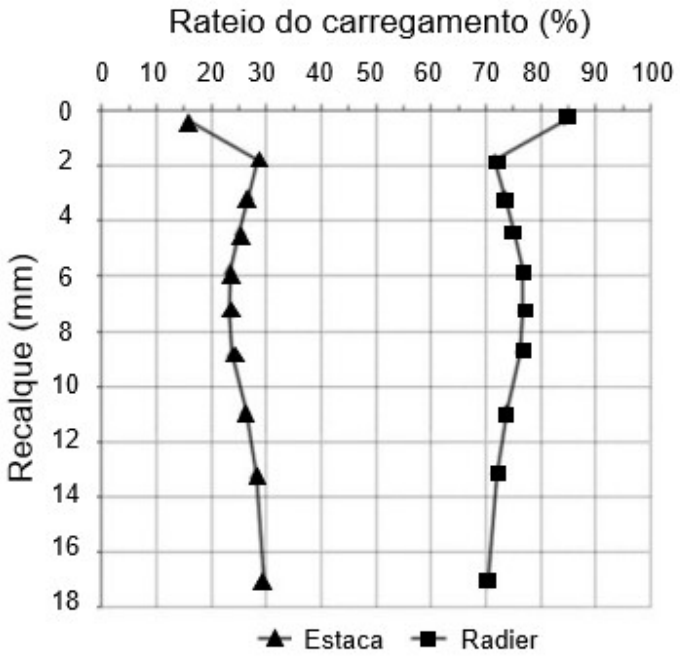


Figura 28 - Rateio do carregamento entre o grupo de estacas e o radier para o caso do radier assente sobre duas estacas (modificado Soares et al., 2014).

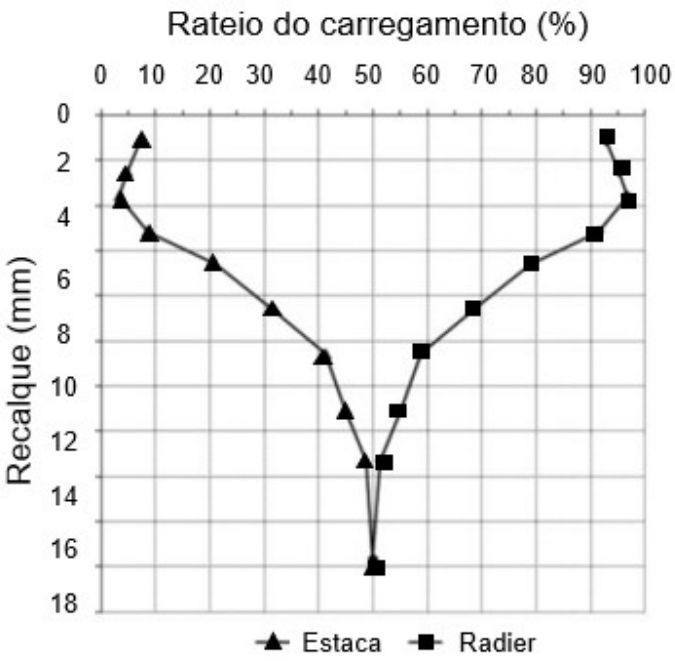


Figura 29 - Rateio do carregamento entre o grupo de estacas e o radier para o caso do radier assente sobre quatro estacas (modificado Soares et al., 2014).

Bacelar (2003) avaliou a influência do arranjo geométrico das estacas na minimização dos recalques diferenciais de um radier estaqueado, assim como a influência das características físicas e mecânicas tais como a rigidez do radier, dimensões das estacas e parâmetros do solo. Trata-se de um radier com 10m de raio e espessura variando de 0,2m a 1,154m, considerados flexíveis, submetido a uma carga uniformemente distribuída de 500 kPa, assente em uma camada homogênea com 40m de espessura, como comportamento elástico linear e isotrópico. Sob o radier foram consideradas estacas com 0,5m de diâmetro e comprimento de 5m, 12,5m e 25m 10, 25 e 50, com diversos arranjos, variando de configuração com apenas 1 estaca, até configuração com 25 estacas, conforme apresentado na Figura 30.

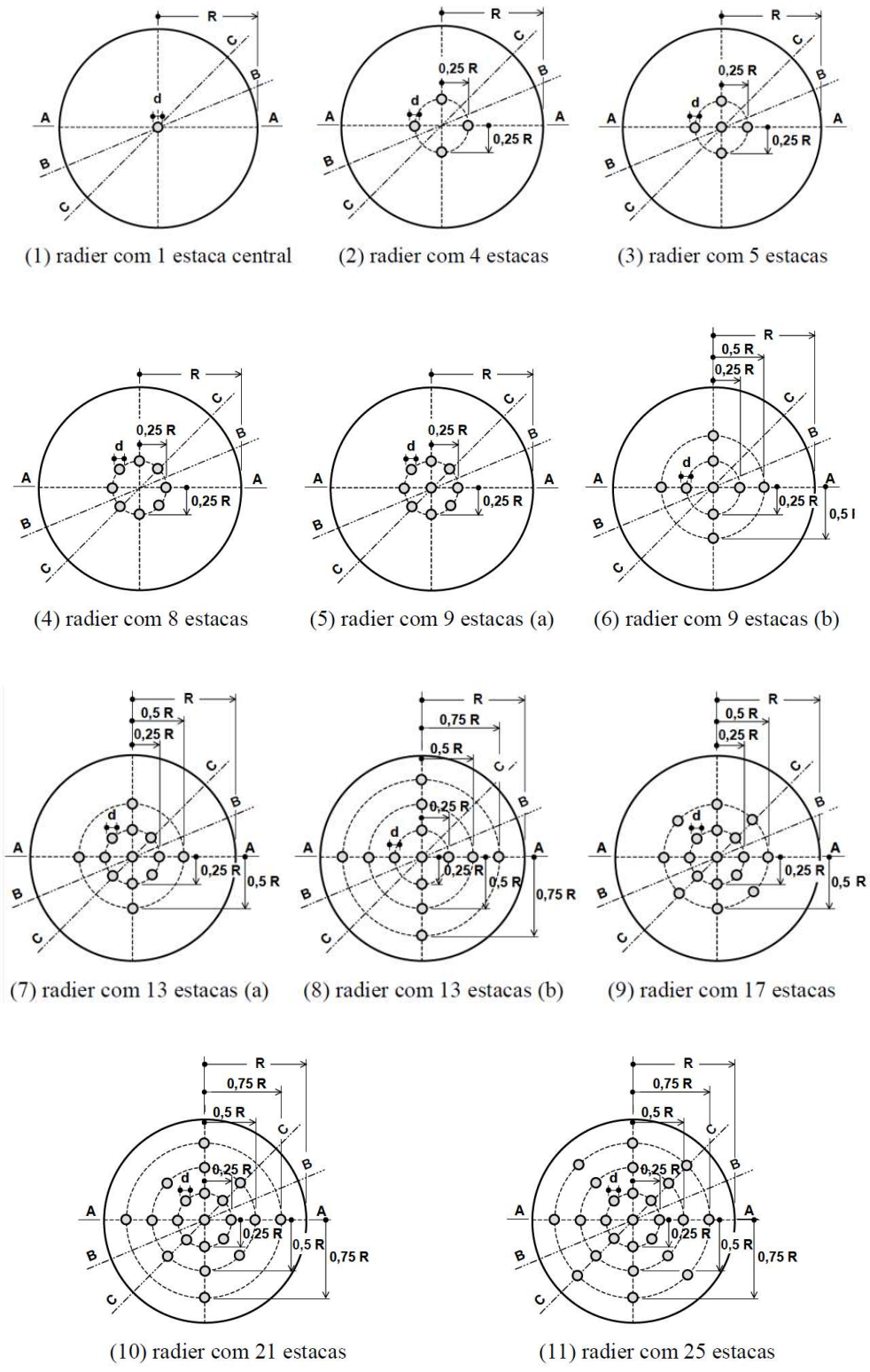


Figura 30 – Configurações analisadas por Bacelar (2003).

Para as análises, o radier e as estacas, constituídos de concreto armado, foi considerado um coeficiente de Poisson de 0,16 e um módulo de elasticidade de 35 GPa. Para o solo considerou-se 3 cenários com coeficiente de Poisson iguais a 0,1, 0,3 e 0,5, com os respectivos valores associados de módulo de elasticidade de 29MPa, 35MPa e 40MPa. As modelagens foram realizadas através do ABAQUS, um software em 3D que realiza simulações numéricas em elementos finitos. A geometria do problema está apresentada na Figura 31.

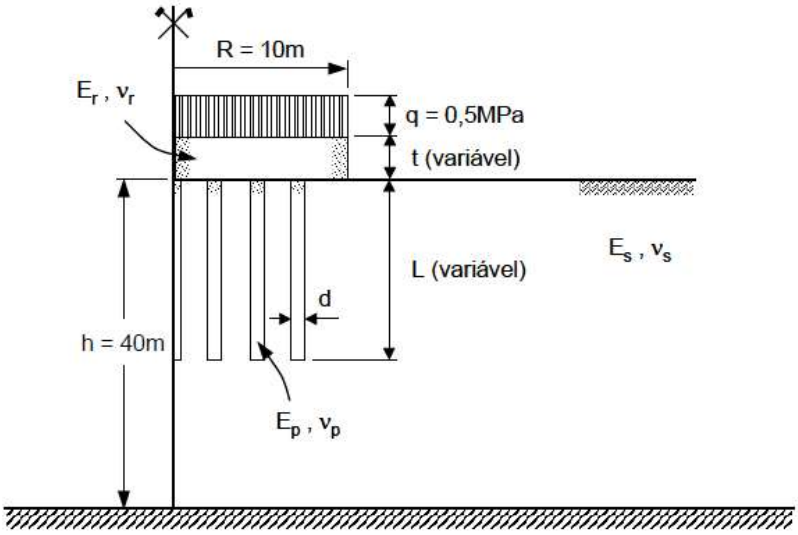


Figura 31 – Geometria do problema (Bacelar, 2003).

Devido à simetria apresentada em todas as configurações foi modelado apenas ¼ do problema. As malhas de elementos finitos geradas para as modelagens numéricas foram, em média, compostas por 11.100 elementos e 12.600 nós. As estacas e o solo foram discretizados como elementos sólidos tridimensionais de 8 nós enquanto que o radier foi discreditzado como um elemento de placa com 4 nós. Os limites de contorno adotados para modelagem do problema foi, na vertical igual a 40m que representa 1,6 vezes o maior comprimento da estaca adotada na modelagem e na horizontal, 40m em cada direção, ou seja, 3 vezes o raio do radier, contado a partir de sua borda. Os valores de contorno adotados por Bacelar (2003) se aproximam aos adotados por Ottaviani (1975), conforme citado por Bacelar (2003), que foram 2,5 vezes o raio na horizontal e

1,5 vezes o comprimento das estacas na vertical. A Figura 32 apresenta a malha de elementos finitos e as condições de contorno utilizadas na modelagem.

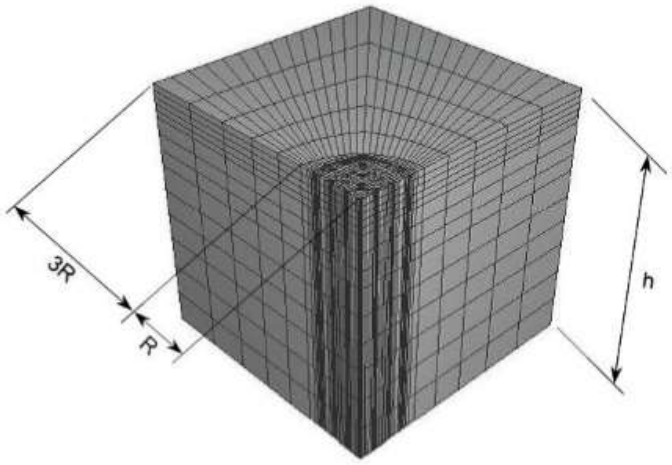


Figura 32 – Vista isoparamétrica da malha de elementos finitos definida por Bacelar (2003).

Dentre os diversos resultados apresentados por Bacelar (2003), com relação à distribuição de cargas entre o radier e as estacas, destaca-se:

- ✓ Quanto maior o comprimento das estacas, menor a parcela de carga suportada pelo radier;
- ✓ A variação no coeficiente de Poisson do solo afeta de forma significativa o rateio de esforços entre o radier e as estacas, mostrando que para um maior coeficiente de Poisson o radier absorveu um maior percentual do carregamento;
- ✓ Pode-se reduzir o número de estacas no radier ao adotar estacas mais longas, cuja resistência lateral seja totalmente mobilizada. Além disso, essas estacas mais longas normalmente sofrem pequenos deslocamentos sob ação de níveis de carregamentos usuais, sendo, portanto mais eficientes na redução de recalques, que é o objetivo principal do estaqueamento do radier;
- ✓ Na grande maioria dos casos analisados, com espaçamento entre as estacas entorno de 5 vezes o diâmetro, verificou-se que mais de 50% do carregamento total era suportado pelo radier;

- ✓ No que diz respeito ao efeito do posicionamento das estacas sob o radier, dependendo da configuração, uma maior parcela do carregamento será transmitida diretamente do radier para o solo como nas configurações onde as estacas se concentram mais na região central do radier;
- ✓ Com relação à distribuição de carga entre as estacas de uma mesma configuração, foi verificado que quanto mais afastada do centro do radier estiver a estaca, maior será o carregamento no topo desta estaca;
- ✓ Os maiores recalques foram verificados no centro do radier.

Na Figura 33 pode-se verificar um dos gráficos apresentados por Bacelar (2003) que relaciona o rateio de carga entre o radier e as estacas com a quantidade de estacas e o seu comprimento, no caso estacas com 5m, 12,5m e 25m. Nesta análise considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,5 para o solo e uma espessura de 0,536m para o radier. No gráfico é possível observar que a situação na qual o radier absorveu um menor nível de carregamento foi para o caso maior quantidade de estacas, 25, sendo estas com maior comprimento, 25m. Neste cenário de menor contribuição por parte do radier, ele absorveu 45% do carregamento. Para o quantitativo de 25 estacas sob o radier, a situação na qual o radier mais absorveu carga, em torno de 67.5%, corresponde àquela em que em que o comprimento das estacas foi menor, 5m.

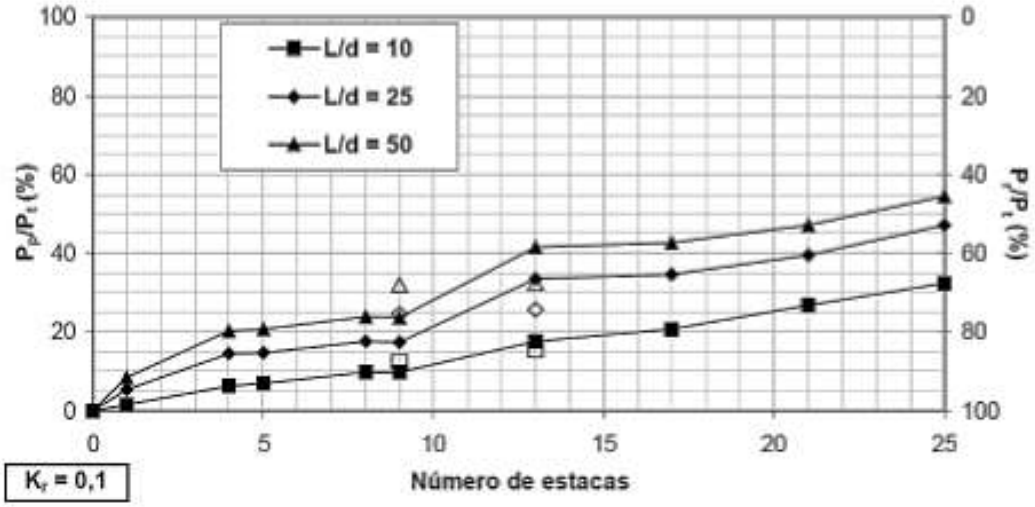


Figura 33 – Distribuição de cargas entre estacas e radier (Bacelar, 2003).

Freitas Neto (2013) avaliou o comportamento de radiers estaqueados sujeitos à presença de estacas defeituosas carregadas verticalmente. A pesquisa foi desenvolvida com base na realização de ensaios laboratoriais, análises numéricas e ensaios de campo. Em campo foram realizadas três provas de carga configuradas da seguinte forma: (a) radier assente sobre uma estaca, sendo esta defeituosa; (b) radier assente sobre três estacas, sendo uma defeituosa; (c) radier assente sobre quatro estacas, sendo uma defeituosa. As estacas executadas no campo experimental tiveram 0,25m de diâmetro e 5m de comprimento, todas instrumentadas no topo e na ponta, com espaçamento entre eixos de 5 vezes o diâmetro. A região danificada da estaca mediu 0,60m, estando posicionada entre 1,90m e 2,50m abaixo da cota de arrasamento dos radiers. Na modelagem numérica foram analisados os blocos com as estacas defeituosas executadas em campo e com esta mesma configuração considerando a inexistência de estacas defeituosas. A Figura 34 apresenta a geometria dos radiers estudados por Freitas Neto (2013) com o posicionamento das estacas defeituosas.

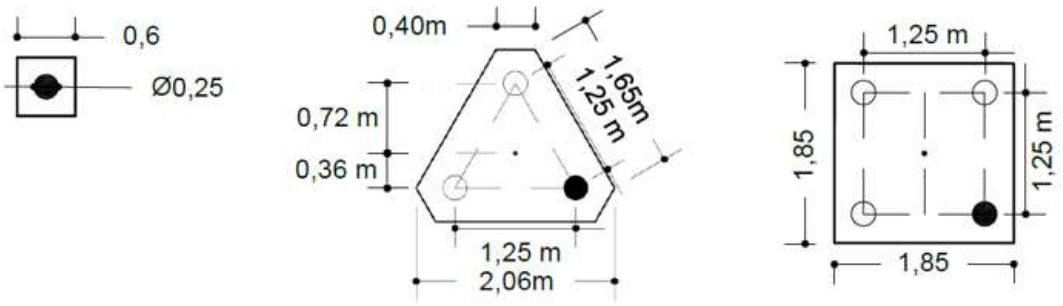


Figura 34 – Geometria dos radiers e posicionamento das estacas íntegras e defeituosas, sendo estas as preenchidas na figura (modificado de Freitas Neto, 2013).

O perfil geológico típico do campo experimental apresenta uma camada de argila silto-arenosa muito mole com 2m de espessura, seguida por uma camada de areia siltosa fofa a pouco compacta com 6m de espessura, seguido de uma camada de silte areno-argiloso medianamente compacto de 4m de espessura, quando é encontrado o impenetrável. O índice de N_{SPT} médio da primeira camada com 2m de espessura varia de 2 a 4 golpes. A camada seguinte com 6m de espessura tem o N_{SPT} médio variando de

4 a 7 golpes. A terceira camada, com 4m de espessura tem o N_{SPT} médio variando de 7 a 30 golpes, neste ponto tendo sido identificada uma menor uniformidade entre o número de golpes.

Os parâmetros geotécnicos utilizados por Freitas Neto (2013) foram obtidos a partir de ensaios triaxiais do tipo consolidado não drenado. Para representar o comportamento do concreto foi considerado o modelo plástico parabólico e para o solo foi considerado o modelo elástico perfeitamente plástico, com critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

As análises numéricas apresentadas por Freitas Neto (2013) foram realizadas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) em 3D com o software LCPC-CESAR. O elemento finito considerado foi o volumétrico pentaédrico quadrático, constituído por 15 nós. Não se pôde tomar partido da redução de esforço computacional fazendo uso da simetria, haja vista a sua inexistência em função da presença de defeito em uma das estacas dos blocos analisados.

Os domínios horizontal e vertical para geração da malha de elementos finitos das análises numéricas utilizados na pesquisa de Freitas Neto (2013) foram 3 vezes o comprimento da estaca para cada lado e duas vezes o comprimento da estaca na profundidade, contado da cota de arrasamento. O Módulo de Elasticidade do concreto armado das estacas e do radier foi de 22,85GPa, enquanto o do material com defeito foi de 5,9GPa. O Módulo de Elasticidade do Solo variou ao longo das camadas entre 8,5MPa e 19,95MPa, com valor médio de 12,12MPa. O coeficiente de Poisson para o concreto e o solo foram, respectivamente, 0,2 e 0,45. A espessura dos radiers com 1, três e 4 estacas foram de 0,55m, 0,60m e 0,65m, respectivamente. A resistência a compressão do concreto considerada foi de 25,0MPa e a resistência à tração foi 2,5MPa.

Freitas Neto (2013) verificou através das provas de carga realizadas em campo que, após a ruptura estrutural da estaca defeituosa, devido ao recalque diferencial no radier, houve alívio das cargas aplicadas sobre as estacas íntegras. Em decorrência desta redistribuição de esforços, as estacas íntegras foram submetidas à tração, de modo que o radier passou a absorver um maior percentual da carga total aplicada. Os

resultados obtidos nas três etapas (laboratório, numérico e campo) apresentaram significativa concordância entre si, tendo esta pesquisa contribuído para um melhor entendimento deste complexo funcionamento do sistema de fundação em radier estaqueado.

As Figuras 35 e 36 apresentam um dos resultados obtidos em campo para os radiers assentes sobre três e quatro estacas, ambos tendo uma das estacas com defeito. Pode-se verificar como se deu o rateio do carregamento entre o radier e as estacas, podendo identificar o momento no qual aconteceu a ruptura da estaca defeituosa e como se deu a redistribuição de esforços.

Observa-se na Figura 35 que as curvas de distribuição percentual da carga entre as estacas e o radier para cada incremento de carga, onde já no primeiro incremento de carga, quando os recalques eram menores do que 0,09mm, as estacas absorvem 90% do carregamento e o radier 10%. Observa-se que após o 3º incremento de carga (150,0kN), a tendência inverteu de forma abrupta, após recalques inferiores a 1,0mm, e o radier passou a absorver um maior percentual do carregamento. Neste momento houve um alívio da compressão sobre as estacas, provavelmente devido à ruptura estrutural da estaca defeituosa, passando as estacas a serem submetidas à tração e o radier a assumir um maior percentual do carregamento. Freitas Neto (2013) registrou que após o incremento de carga correspondente a 300,0kN aplicados no topo do radier, este começou a rotacionar em direção à estaca defeituosa.

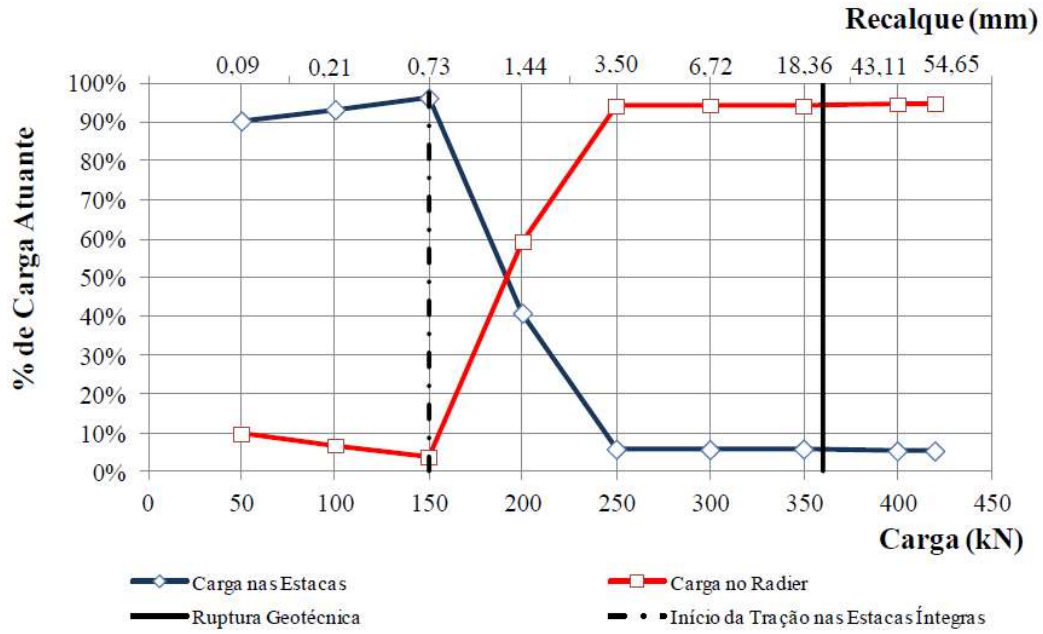


Figura 35 – Distribuição de cargas entre o radier e as estaca do radier estaqueado sobre três estacas, sendo uma delas defeituosa (Freitas Neto, 2013).

Observa-se na Figura 36 que as curvas de distribuição percentual da carga entre as estacas e o radier para cada incremento de carga, onde já no primeiro incremento de carga, quando foi registrado um recalque de 0,02mm, as estacas absorvem 73,3% do carregamento e o radier 26,7%. Observa-se que após o 8º incremento de carga (400,0kN), houve transferência das cargas antes suportadas pelas estacas para o radier, que passou a suportar 85,2% da carga total aplicada (630,0kN). Este processo se deu em função do alívio da compressão sobre as estacas, provavelmente devido à ruptura estrutural da estaca defeituosa. Freitas Neto (2013) destacou que após a ruptura da estaca defeituosa, ainda assim ela foi capaz de absorver 14,8% da carga aplicada.

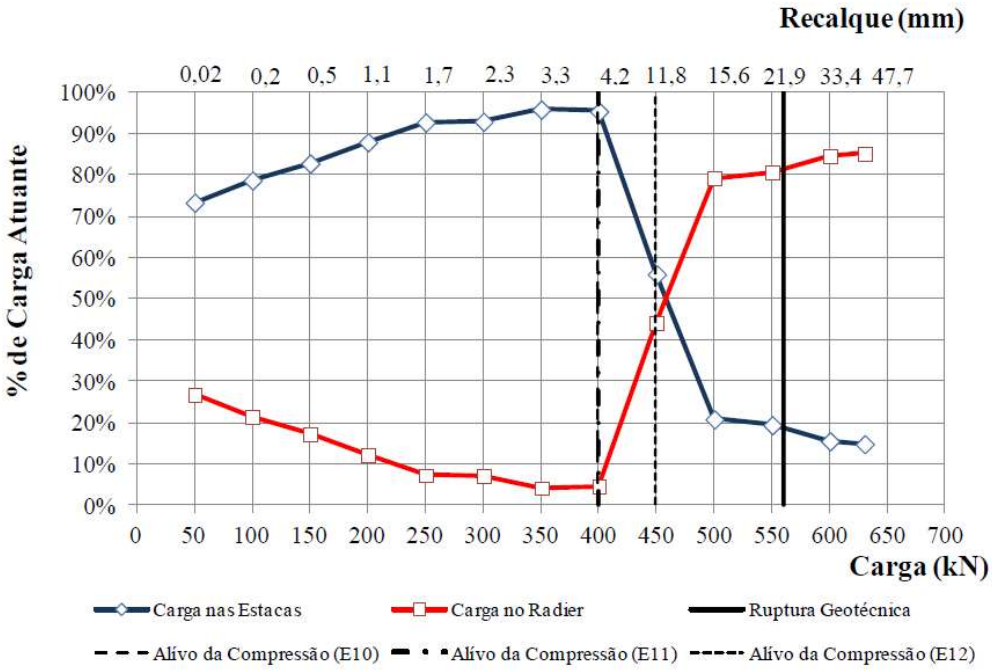


Figura 36 - Distribuição de cargas entre o radier e as estaca do radier estaqueado sobre quatro estacas, sendo uma delas defeituosa (Freitas Neto, 2013).

No que se refere à determinação da carga de ruptura convencionada, ou seja, quando não há ruptura nítida da fundação verificada na sua curva carga x recalque, Freitas Neto (2013) adotou o critério proposto por Décourt (1993), que indica a carga de ruptura convencionada para estacas de deslocamento e estacas escavadas como a equivalente a um recalque correspondente a 10% do seu diâmetro nominal (FREITAS NETO, 2013). A Figura 37 apresenta a curva carga x recalque para o radier assente sobre quatro estacas, sendo uma defeituosa, com a definição da carga de ruptura geotécnica do bloco considerando a carga que promove um recalque de 10% o diâmetro da estaca que é de 250mm, ou seja, um recalque de 25mm.

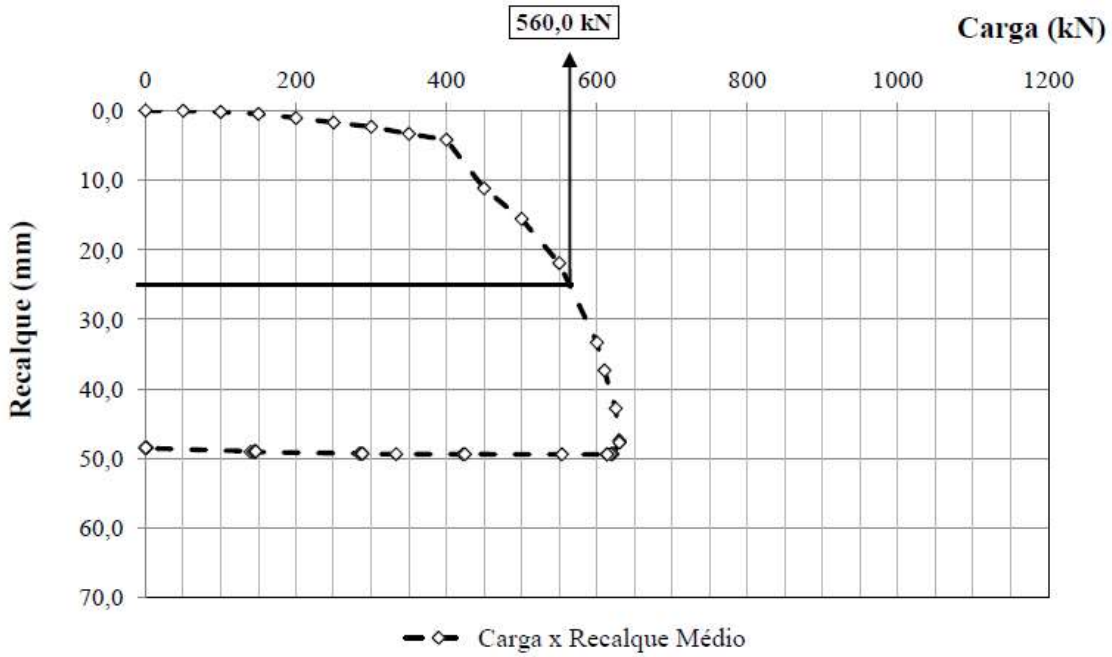


Figura 37 – Curva carga x recalque médio obtida experimentalmente no topo do radier estaqueado sobre quatro estacas (Freitas Neto, 2013).

Garcia (2015) analisou o comportamento de quatro radiers estaqueados assentes sobre uma, duas, três e quatro estacas com 0,25m de diâmetro e 5m de comprimento, espaçadas de cinco vezes o diâmetro e escavadas mecanicamente a trado em solo de diabásio da região de Campinas/SP. Esses blocos de fundação foram ensaiados a partir de provas de carga do tipo estática e lenta. As estacas foram instrumentadas em profundidade com *strain-gages* posicionados no topo e na ponta, com a finalidade de avaliar o mecanismo de distribuição de carga em profundidade, assim como avaliar o rateio do carregamento entre o radier e as estacas.

A pesquisa de Garcia (2015) foi realizada no mesmo perfil de solo apresentado do trabalho de Freitas Neto (2013), anteriormente citado. Os blocos analisados estão apresentados na Figura 38 abaixo. Os parâmetros do concreto empregados na análise foram 25,0kN/m^3, 26,75GPa e 0,20 para peso específico, Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson, respectivamente.

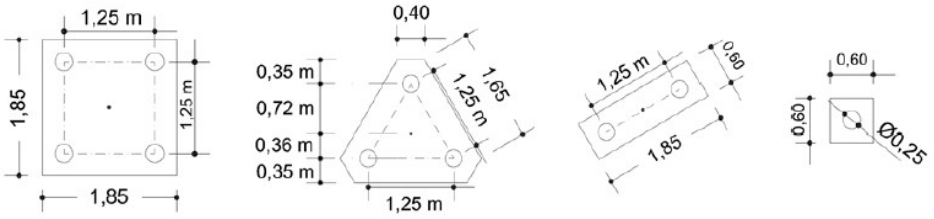


Figura 38 – Geometria dos radiers estaqueados (Garcia, 2015).

Para verificar o comportamento desse tipo de fundação, Garcia (2015) realizou análises tridimensionais (3D) por elementos finitos, por meio do software LCPC-Cesar. O modelo constitutivo utilizado para caracterizar concreto das estacas e do radier foi o com comportamento parabólico, que representa materiais de comportamento frágil. Para o solo foi considerado o comportamento elastoplástico com comportamento tensão x deformação não linear, com critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

A malha de elementos finitos considerada foi de elementos de formato triangular de interpolação quadrática, os quais foram executados a cada metro de profundidade, resultando em um elemento volumétrico do tipo pentaédrico. As condições de contorno do problema para os radiers assentes sobre uma, duas e quatro estacas, foi feito a partir de ¼ do problema, devido à simetria existente, considerando o domínio horizontal de 25m. Para o radier estaqueado a modelagem foi feita para ½ do problema, ficando o domínio horizontal de 25m no eixo de simetria do bloco e de 50m para o outro eixo. Para todos os blocos o domínio vertical foi de 10,80m, quando se detectou o impenetrável. Considerando uma altura média dos blocos analisados de 0,55m (0,50m para o radier sobre uma estaca e 0,65 para o radier sobre 4 estacas), esse domínio vertical foi de aproximadamente duas vezes o comprimento da estaca. A Figuras 39 e 40 apresentam a malha de elementos finitos com seus respectivos domínios do problema para os radiers sobre três e quatro estacas, respectivamente.

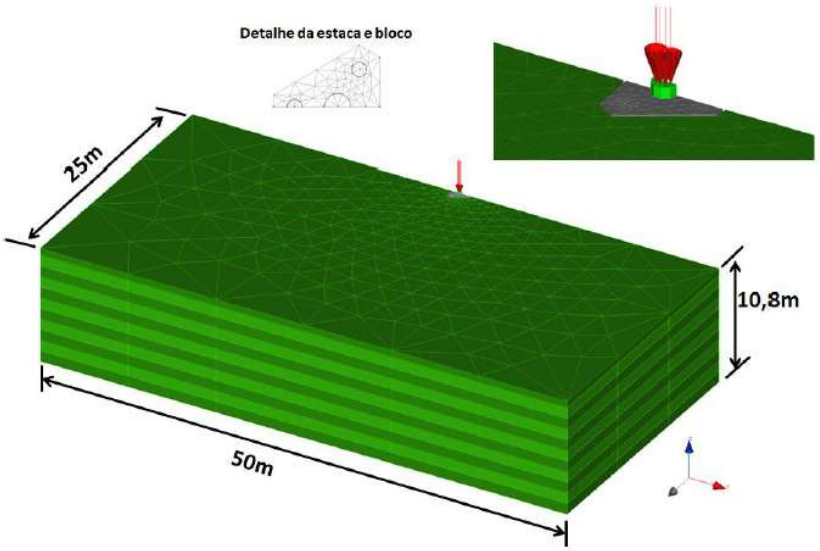


Figura 39 - Perspectiva da malha de elementos finitos do radier estaqueado sobre três estacas (Garcia, 2015).

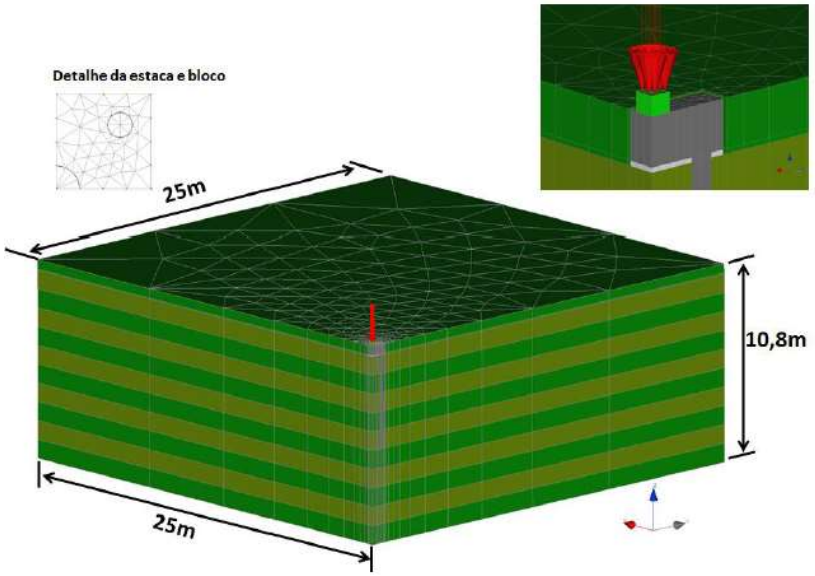


Figura 40 – Perspectiva da malha de elementos finitos do radier estaqueado sobre quatro estacas (Garcia, 2015).

Os resultados experimentais apontaram uma contribuição média devido ao contato radier-solo de 21% e 79% devido às estacas (lateral + ponta). No entanto, os resultados numéricos, justificados pela dificuldade em representar o elemento de interface entre o elemento de fundação e o solo, apresentaram uma maior contribuição do radier, 36%, quando comparado aos 21% observados experimentalmente, ficando as estacas responsáveis por assumir 64% do rateio do carregamento. Foram realizadas análises numéricas considerando a solução como grupo de estacas, e verificou-se que a maior participação da resistência de ponta foi identificada quando da consideração do contato entre o bloco e o solo, no caso, na condição de radier estaqueado. As Figuras 41, 42, 43 e 44 apresentam o rateio do carregamento observado experimentalmente para os radiers assentes sobre uma, duas, três e quatro estacas, respectivamente.

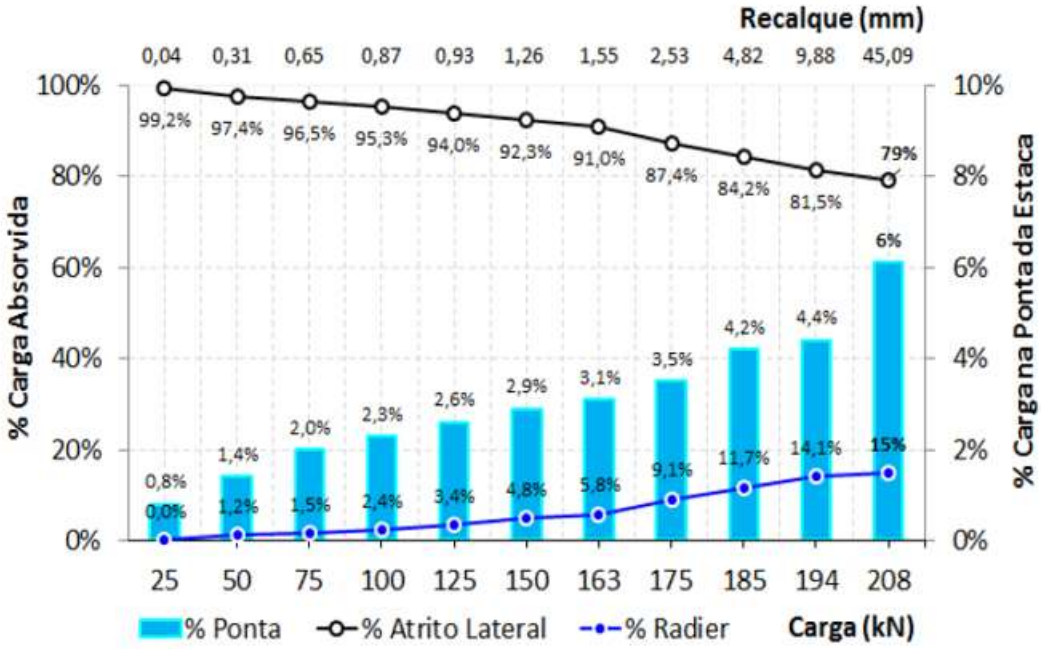


Figura 41 – Distribuição do carregamento no radier estaqueado sobre uma estaca obtida experimentalmente (Garcia, 2015).

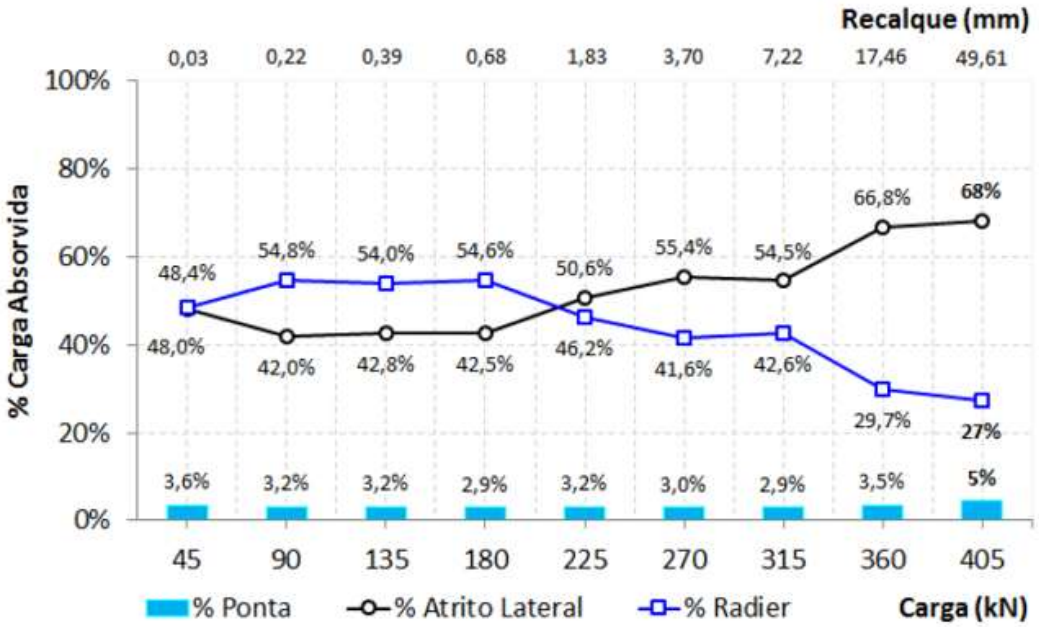


Figura 42 - Distribuição do carregamento no radier estaqueado sobre duas estacas obtida experimentalmente (Garcia, 2015).

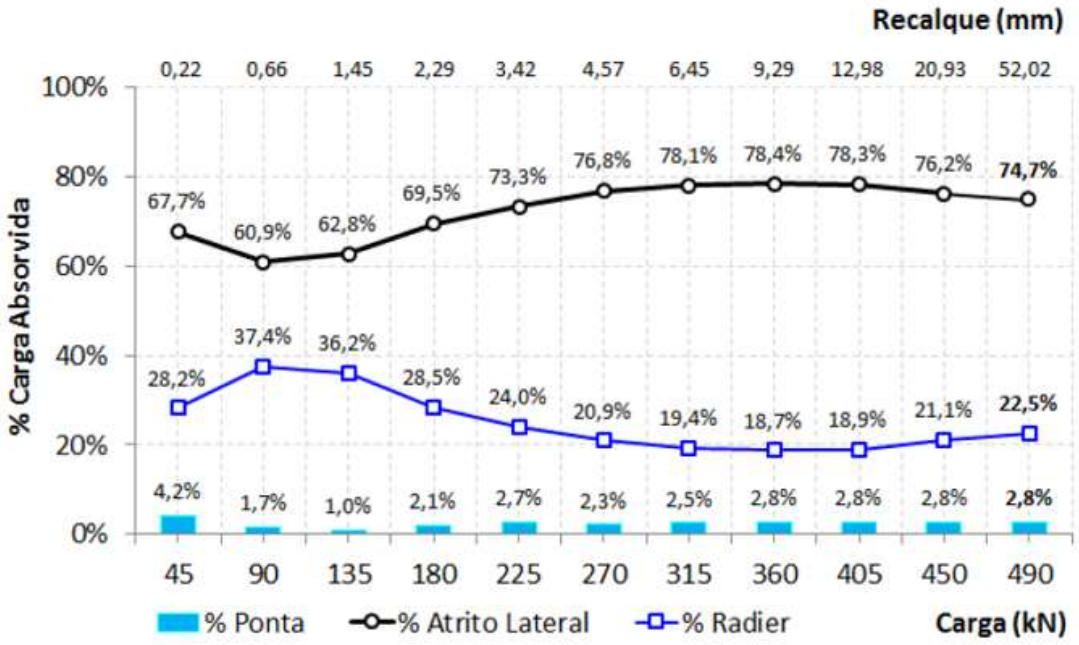


Figura 43 - Distribuição do carregamento no radier estaqueado sobre três estacas obtida experimentalmente (Garcia, 2015).

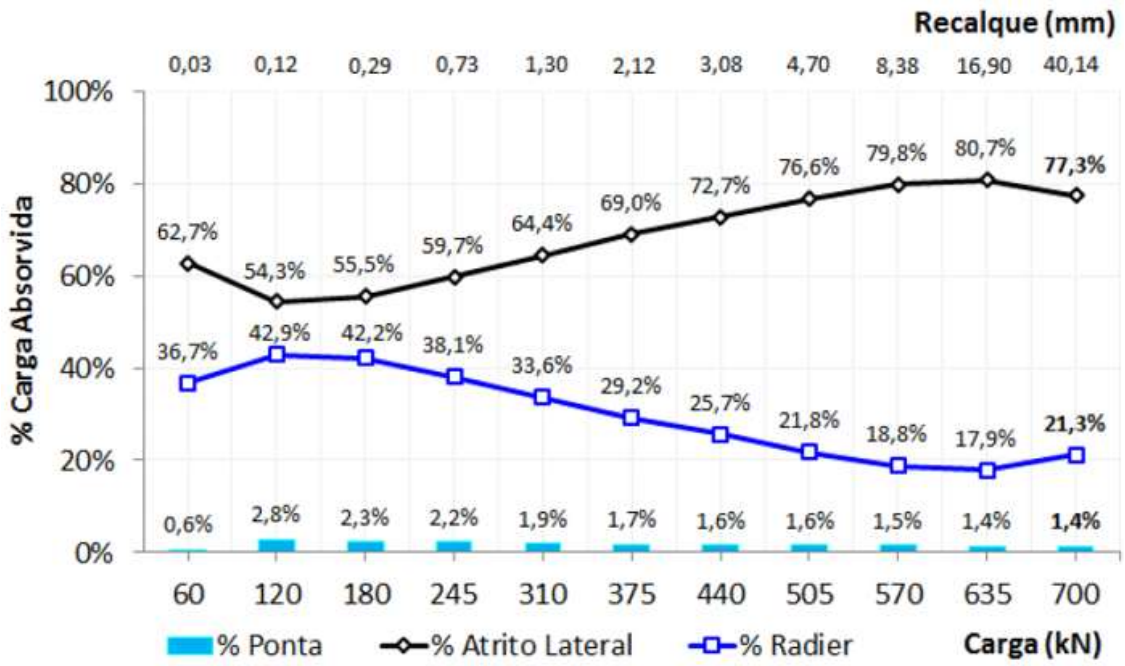


Figura 44 - Distribuição do carregamento no radier estaqueado sobre quatro estacas obtida experimentalmente (Garcia, 2015).

Analisando os gráficos de distribuição do carregamento entre o radier e as estacas para os ensaios experimentais, pode-se verificar que para a carga máxima de ensaio, 208kN, 405kN, 490kN e 700kN, para os radiers sobre uma, duas, três e quatro estacas, os radiers absorveram 15%, 27%, 22,5% e 21,3% do carregamento, respectivamente.

Garcia (2015) demonstrou por meio de análises pelo método da rigidez que a carga de ruptura geotécnica dos radiers analisados poderiam ser convencionadas para um deslocamento correspondente a 10% do diâmetro da estaca, que no caso analisado correspondeu a um recalque de 25mm. Desta forma, as cargas de ruptura convencionadas para os radiers sobre uma, duas, três e quatro estacas foram, 184kN, 371kN, 455kN e 658kN, respectivamente, tendo considerado um fator de segurança igual a 2 para obtenção da carga admissível de trabalho. A Figura 45 apresenta a carga x recalque do radier estaqueado sobre quatro estacas e a definição da carga de ruptura geotécnica convencionada para o bloco.

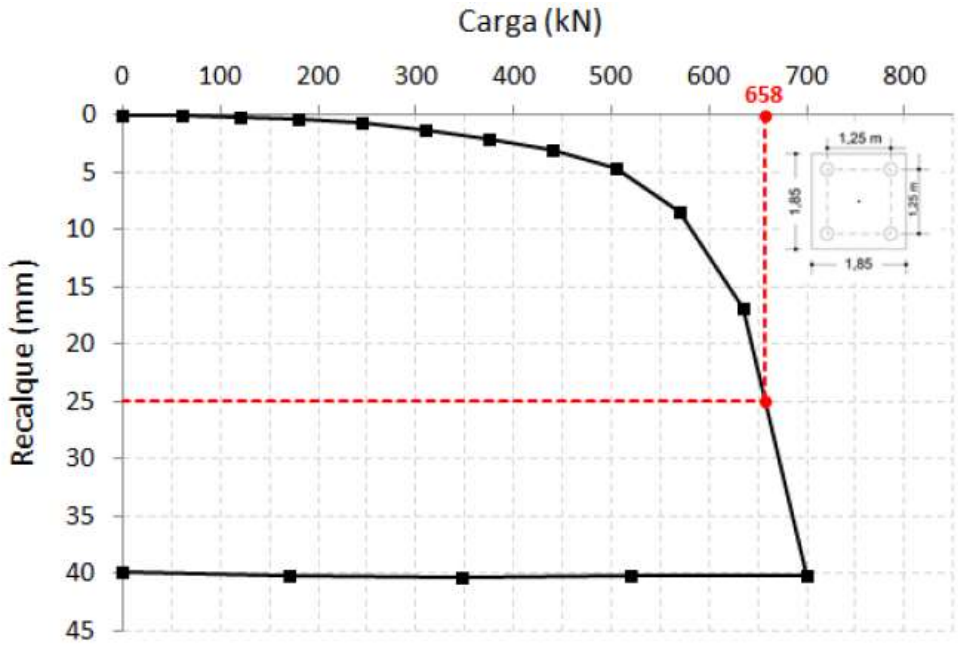


Figura 45 – Curva carga x recalque do radier estaqueado sobre quatro estacas (Garcia, 2015).

Pezo (2013) analisou o comportamento carga-recalque de um banco de dados organizado por Soares (2011), de fundações em grupo de estacas e radier estaqueados, executados em solo arenoso de várias camadas da área litorânea de João Pessoa/PB. O banco de dados contempla 7 provas de carga estáticas realizadas em estacas do tipo Hollow Auger, construídas em escala real, com 300 mm de diâmetro e 4,5 m de comprimento. Os dados foram retroanalisados com base no Método dos Elementos Finitos (MEF 3D), utilizando o programa CESAR-LCPC e os parâmetros geotécnicos iniciais foram obtidos através de correlações a partir de valores de N_{SPT} obtidos por Soares (2011). Na modelagem do comportamento tensão-deformação do solo, Pezo (2013) considerou o modelo constitutivo elástico-plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os resultados dessas simulações numéricas foram comparados com os resultados experimentais, medidos nas provas de carga.

Com o objetivo de obter uma melhor acurácia da retroanálise, Pezo (2013) decidiu por padronizar os limites de contorno da modelagem das estacas, do radier e do radier estaqueado. O referido autor considerou um domínio horizontal igual ao comprimento da

estaca para cada lado, contados a partir do centro do bloco e um domínio vertical igual a três vezes o comprimento da estaca, contados a partir da cota de assentamento do bloco.

Com relação à interface solo-radier e solo-estaca, Pezo (2013) cita as limitações nos estudos dos parâmetros geotécnicos no depósito arenoso para adotar a indicação de Sosa (2010), citado por Pezo (2013), que diz que o parâmetro da interface tem uma influência marcada apenas ao utilizar os modelos de solo com endurecimento. Por este motivo, o autor não considerou elementos de interface em sua pesquisa.

Para o depósito estudado, Pezo (2013) realizou análises paramétricas com o intuito de obter um maior conhecimento do comportamento de uma fundação em radier estaqueado, realizando algumas alterações na configuração da fundação, tais como: a espessura do radier, número, diâmetro, espaçamento e comprimento das estacas. O referido autor desenvolveu análises paramétricas para fundações em radier estaqueados submetidas apenas a carregamento vertical central, tendo verificado que o recalque máximo, recalque diferencial e distorção angular do radier diminuem, com o aumento da espessura do radier, do número, comprimento e diâmetro das estacas.

Pezo (2013) analisou radiers estaqueados, considerando o radier quadrado com 7m de lado e espessuras de 0,5m e 1m, submetido a uma carga pontual de 14.000 kN aplicada no centro do radier. O solo consiste de cinco camadas com modelo constitutivo considerado elástico-plástico, isotrópicos, sendo as camadas heterogêneas com uma espessura total de 24m. As estacas têm seção transversal circular com diâmetro d_1 = 0,50 m e d_2 = 0,30 m, com comprimentos L = 5,0 m, 10,0 m e 12,0 m. A quantidade de estacas é de 4, 9, 16 e 25. Esta configuração pode ser verificada na Figura 46 e na Tabela 2.

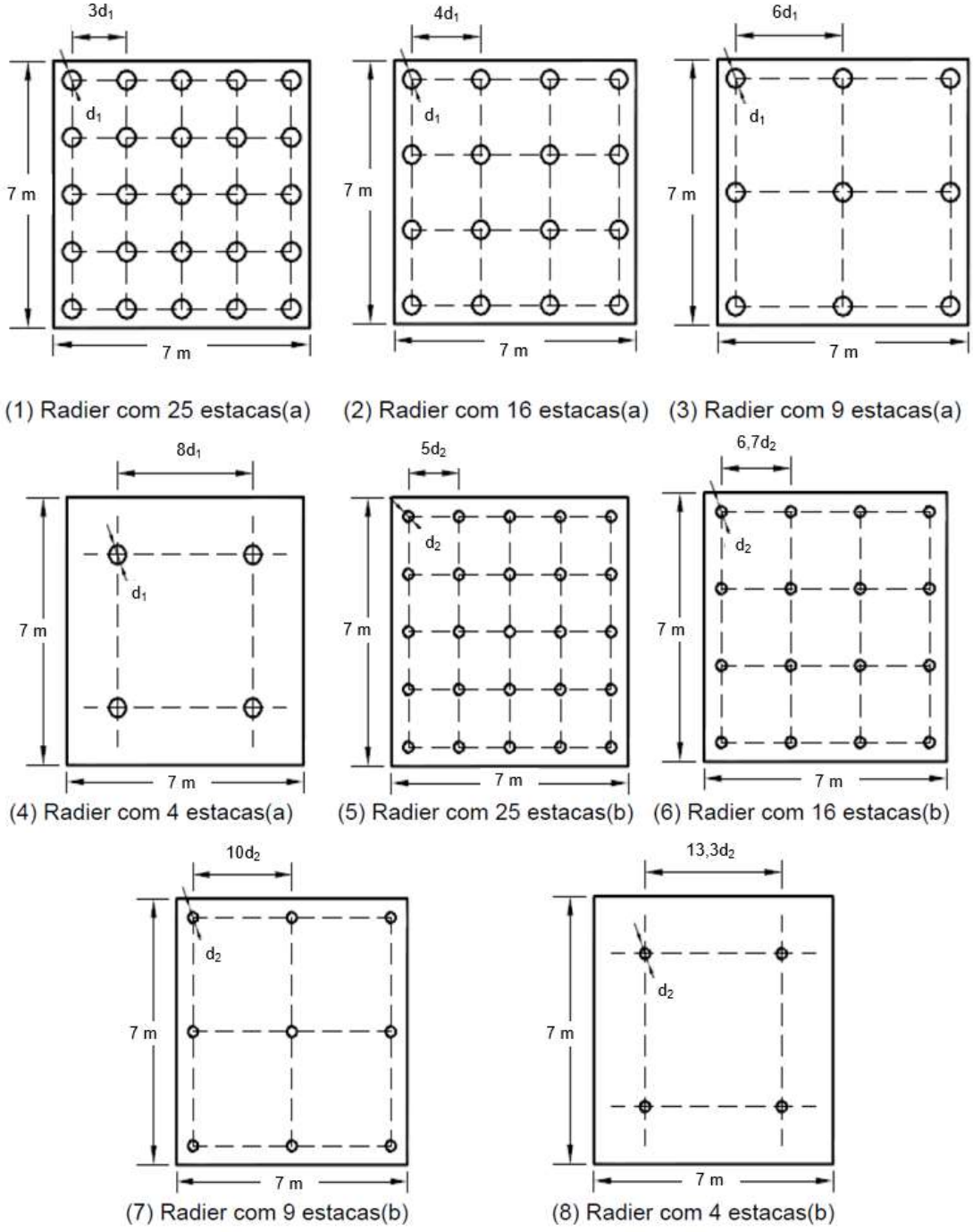


Figura 46 - Configurações de estacas para análise paramétrica (Pezo, 2013).

Tabela 2 - Configurações de estacas para análise paramétrica (Pezo, 2013).

Estacas			Relações			
Quantidade	**Diâmetro d (m)**	**Comprimento L (m)**	**L/d**	**t/d (0,5)**	**t/d (1,0)**	**S/d**
25	0,5	5	10,0	1,0	2,0	3
		10	20,0			
		12	24,0			
	0,3	5	16,7	1,7	3,3	5
		10	33,3			
		12	40,0			
16	0,5	5	10,0	1,0	2,0	4
		10	20,0			
		12	24,0			
	0,3	5	16,7	1,7	3,3	6,7
		10	33,3			
		12	40,0			
9	0,5	5	10,0	1,0	2,0	6
		10	20,0			
		12	24,0			
	0,3	5	16,7	1,7	3,3	10
		10	33,3			
		12	40,0			
4	0,5	5	10,0	1,0	2,0	8
		10	20,0			
		12	24,0			
	0,3	5	16,7	1,7	3,3	13,3
		10	33,3			
		12	40,0			

Onde: t é a espessura do radier e S é o espaçamento entre as estacas.

Para os contornos da malha de elementos finitos, Pezo (2013) padronizou nas seguintes distâncias: na direção vertical, 24m abaixo da base do radier, ou seja, 2 vezes o máximo comprimento L adotado para as estacas; e na direção horizontal: 28 m em cada direção, ou seja, 4 vezes a Largura do radier. Foi considerada a simetria do radier estaqueado e do carregamento, sendo a modelagem realizada para ¼ do problema, conforme pode-se verificar na Figura 47.

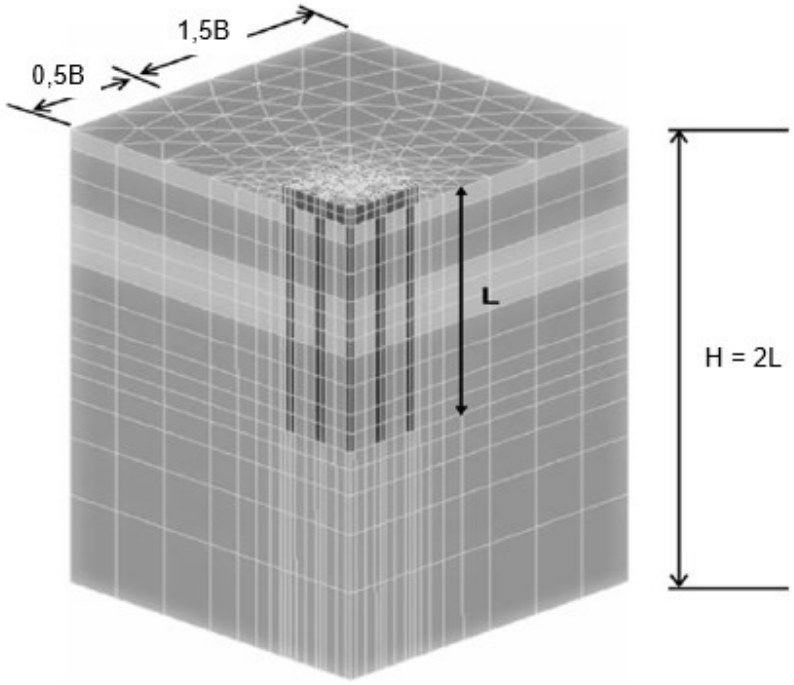


Figura 47 – Malha de elementos finitos utilizada na análise paramétrica (Pezo, 2013).

A seguir, algumas das conclusões obtidas com base nos resultados apresentados por Pezo (2013):

- ✓ Recalques máximos no centro do radier:
  - Quanto maior o comprimento da estaca, menor o recalque;
  - Quanto maior a quantidade de estacas, menor o recalque;
  - Quanto maior a espessura do radier, menor o recalque;
  - Quanto maior o diâmetro da estaca, menor o recalque.
- ✓ Recalque Diferencial x Relação de espaçamento no radier estaqueado, conforme apresentado na Tabela 3:
  - Quanto maior o comprimento das estacas, menor o recalque diferencial;
  - Quanto maior a espessura do radier, menor o recalque diferencial, sendo esta redução em média igual a 77%;
  - Para uma mesma espessura de radier, quanto maior o espaçamento entre as estacas, maior o recalque diferencial;

- ✓ Rateio do carregamento entre o radier e as estacas, conforme apresentado na Tabela 4:
    - Quanto maior a quantidade de estacas, menor o percentual absorvido pelo radier;
    - Quanto maior a espessura do radier, maior o percentual absorvido pelo radier;
    - Quanto maior o diâmetro da estaca, menor o percentual absorvido pelo radier;
    - Quanto maior o comprimento da estaca, menor o percentual absorvido pelo radier.
- ✓ Distorções angulares, conforme apresentado na Tabela 5:
    - Quanto maior a espessura do radier, menor a distorção angular;
    - Quanto maior o comprimento da estaca, menor a distorção angular;
    - Quanto maior o espaçamento entre as estacas, maior a distorção angular.

Tabela 3 - Recalque Diferencial x Relação de espaçamento no radier estaqueado (Pezo, 2013).

Relação Espaçamento (S/d)	Comprimento Estaca (m)	Recalque (mm) para espessura do radier = 0,5 m			Recalque (mm) para espessura do radier = 1,0 m		
		Centro	Canto	Diferencial	Centro	Canto	Diferencial
3	5	41,4	15,3	25,9	31,1	23,8	7,2
	10	33,6	10,5	23,1	23,1	16,9	6,1
	12	27,9	7,5	20,4	17,5	12,1	5,4
4	5	43,6	12,3	31,3	32,7	24,7	8,0
	10	39,2	9,4	29,8	24,4	17,3	7,0
	12	34,2	6,8	27,4	19,0	12,7	6,3
6	5	50,9	14,8	36,1	35,3	26,8	8,5
	10	45,5	9,8	35,7	28,1	20,0	8,1
	12	41,2	7,2	33,9	23,6	15,9	7,7
8	5	56,0	17,8	38,2	39,5	30,4	9,1
	10	52,3	14,6	37,7	35,9	27,1	8,9
	12	49,4	12,2	37,2	33,0	24,4	8,6
5	5	47,6	13,1	34,6	33,5	25,0	8,6
	10	40,6	8,4	32,2	25,3	18,0	7,3
	12	35,2	6,1	29,1	20,0	13,5	6,5
6,7	5	51,7	13,5	38,2	35,5	26,4	9,2
	10	45,9	8,8	37,2	28,1	19,8	8,3
	12	41,5	6,5	35,0	23,6	15,9	7,7
10	5	54,6	14,9	39,7	37,9	28,4	9,5
	10	50,1	10,7	39,4	31,9	22,9	9,0
	12	46,8	8,5	38,3	28,6	19,9	8,7
13,3	5	58,3	18,1	40,2	41,5	31,6	9,9
	10	55,7	15,8	39,9	38,3	29,1	9,2
	12	53,8	14,2	39,6	36,5	27,4	9,1

Tabela 4 – Percentual do carregamento absorvido pelas estacas do radier (Pezo, 2013).

S/d	L (m)	Diâmetro Estaca (m)	Espessura Radier (m)	Carga nas Estacas (%)			
				Grupo 2x2	Grupo 3x3	Grupo 4x4	Grupo 5x5
3	5	0,3	0,5	12,28%	17,62%	40,26%	40,05%
	10			18,51%	24,37%	53,43%	47,36%
	12			21,24%	26,24%	56,85%	47,39%
4	5	0,3	1,0	9,92%	13,91%	33,16%	34,76%
	10			14,85%	20,08%	44,44%	41,46%
	12			16,99%	22,32%	47,60%	41,83%
6	5	0,5	0,5	20,72%	21,86%	32,59%	54,47%
	10			29,22%	28,91%	45,05%	55,43%
	12			33,88%	30,10%	49,41%	54,36%
8	5	0,5	1,0	17,54%	21,23%	42,78%	45,53%
	10			24,27%	27,98%	51,16%	46,25%
	12			27,75%	30,87%	52,29%	46,29%

Tabela 5 - Distorção angular no radier estaqueado x relação de espaçamento (Pezo, 2013).

Relação Espaçamento S/d	Comprimento Estaca (m)	Distorção angular	
		Espessura do radier = 0,50 m	Espessura do radier = 1,0 m
3	5	1 / 191	1 / 683
	10	1 / 215	1 / 808
	12	1 / 243	1 / 916
4	5	1 / 158	1 / 617
	10	1 / 166	1 / 704
	12	1 / 181	1 / 782
6	5	1 / 137	1 / 579
	10	1 / 139	1 / 611
	12	1 / 146	1 / 643
8	5	1 / 129	1 / 542
	10	1 / 131	1 / 559
	12	1 / 133	1 / 574
5	5	1 / 143	1 / 578
	10	1 / 154	1 / 674
	12	1 / 170	1 / 757
6,7	5	1 / 130	1 / 541
	10	1 / 133	1 / 596
	12	1 / 141	1 / 640
10	5	1 / 125	1 / 523
	10	1 / 125	1 / 549
	12	1 / 129	1 / 568
13,3	5	1 / 123	1 / 499
	10	1 / 124	1 / 536
	12	1 / 125	1 / 542

Com relação à interface solo-radier e solo-estaca, Pezo (2013) cita as limitações nos estudos dos parâmetros geotécnicos no depósito arenoso para adotar a indicação de Sosa (2010), citado por Pezo (2013), que diz que o parâmetro da interface tem uma

influência marcada apenas ao utilizar os modelos de solo com endurecimento. Por este motivo, o autor não considerou elementos de interface em sua pesquisa.

Bittencourt (2018) realizou uma análise à luz da teoria de radier estaqueado de uma fundação que foi concebida pela metodologia de grupo de estacas. Para as análises, o referido autor realizou modelagens numéricas utilizando o software Plaxis 3D Foundation, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Trata-se de uma fundação constituída por estacas escavadas do tipo hélice contínua, com comprimentos de 15, 17 e 20 m e diâmetros de 250, 400 e 500 mm, executada no Instituto do Cérebro, no Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), cidade de Natal-RN. Os dados de entrada do programa e retroanálise dos parâmetros geotécnicos do solo foram subsidiados por ensaios de simples reconhecimento (SPT) e provas de carga estática em estaca (PCE). O subsolo local, modelado assumindo o seu comportamento elástico perfeitamente plástico, é formado por camadas de areia fina e média, pouco siltosa, compacta, até atingir o impenetrável. A Figura 48 apresenta a geometria dos blocos analisados na pesquisa.

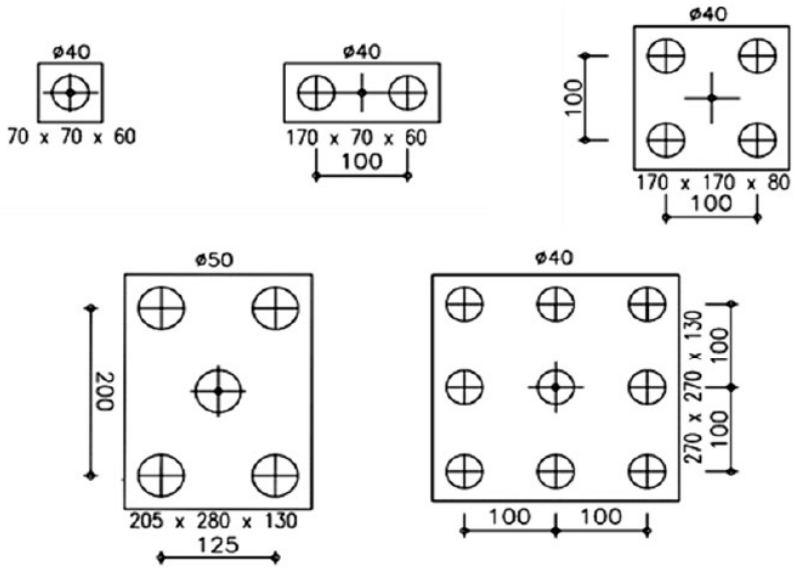


Figura 48 - Geometria de blocos tipo do sistema de fundação do Instituto do Cérebro, com medidas em centímetros (Bittencourt, 2018).

A verificação da rigidez dos blocos de fundação realizada por Bittencourt (2018), tendo por base a norma Espanhola (2007) e a NBR 6118 (2014), demonstrou que todos os blocos de fundação estão avaliados como rígidos. Conforme verificação quanto a Norma Espanhola (2007), todos os blocos apresentaram altura superior a 0,5 vezes a distância do eixo da estaca mais afastada da face do pilar. Com relação à NBR 6118 (2014), todos os blocos apresentaram altura superior à diferença entre a maior dimensão do bloco e do pilar, dividida por três. Foi considerado um pilar hipotético de 40 cm x 40cm.

Como resultados das análises realizadas, Bittencourt (2018) verificou que a interação do bloco de fundação incrementou a capacidade de carga e a rigidez do sistema, tendo o bloco absorvido até 21% do carregamento aplicado à fundação. Além disso, comprovou também que a capacidade de carga do sistema de fundação em radier estaqueado não se configura apenas na soma algébrica das resistências isoladas do bloco e estaca(s). Diante destes resultados, o autor concluiu que a metodologia de fundação em radier estaqueado se configura como uma técnica positiva para a cidade de Natal para obras de médio porte. A Tabela 6 foi apresentada por Bittencourt (2018) e nela pode-se observar o ganho de capacidade de carga obtido ao se considerar a contribuição do bloco. Vale destacar que o projeto destas fundações foi concebido à luz da teoria de grupo de estacas.

Tabela 6 - Resumo capacidades de carga através da modelagem em grupo de estacas e radier estaqueado (Bittencourt, 2018).

Sistema de fundação	Grupo de Estaca (kN)	Radier Estaqueado (kN)	Incremento da capacidade de carga (%)
1 estaca / ϕ25 L15	1.260	1.435	13,9
1 estaca / ϕ40 L15	3.000	3.270	9,0
2 estacas / ϕ40 L15	6.715	7.350	9,4
4 estacas / ϕ40 L15	12.200	13.000	6,5
4 estacas / ϕ25 L17	4.850	5.250	8,9
4 estacas / ϕ50 L20	21.800	21.800	0,0
5 estacas / ϕ50 L15	18.100	23.000	27,0
9 estacas / ϕ40 L15	21.500	23.750	10,5

Cunha e Pando (2013) realizaram análises paramétricas objetivando um melhor entendimento do comportamento de sistemas de fundações em radier estaqueado e grupo de estacas. Os autores verificaram a influência de parâmetros como comprimento da estaca, Coeficiente de Poisson, e rigidez relativa solo-estaca e solo-radier, na distribuição dos esforços entre o radier e as estacas. Para as análises foi utilizado o software APRAFR, desenvolvido por Zhang (2000) exclusivamente para grupos de estacas e radier estaqueados e o layout originalmente apresentado por Bezerra (2003), que está representado na Figura 49. Foram consideradas estacas com 0,50 m de diâmetro, com comprimentos de 12,5 m, 15 m e 50 m, espaçadas de 2,5 m. O Módulo de Elasticidade do solo e do radier foram de 6 MPa e 20.000 MPa, respectivamente. O coeficiente de Poisson das estacas e do radier foi de 0,2. Foram variados o Módulo de Elasticidade da estaca, o coeficiente de Poisson do solo, e a espessura do radier, tendo esta última variado de 0,25 m a 1,25 m.

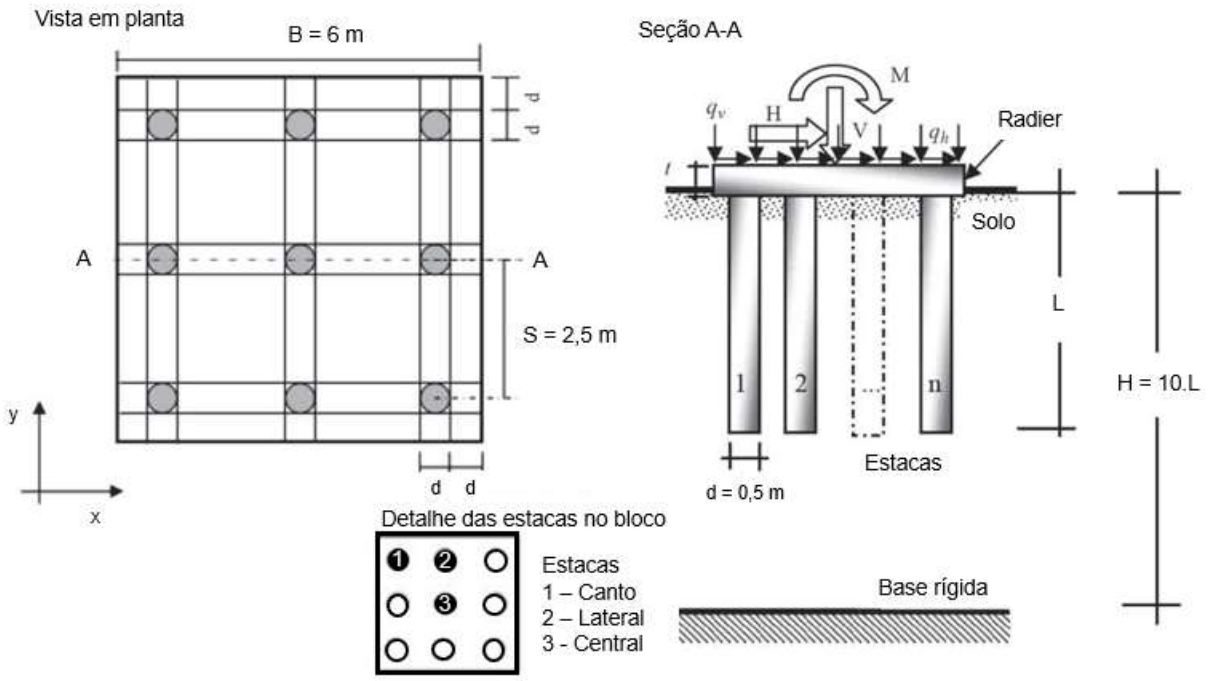


Figura 49 - Layout do sistema de fundação estudado (modificado Cunha e Pando, 2013).

Cunha e Pando (2013) dividiram a pesquisa na análise de três casos: (a) carregamento na direção vertical, através de uma tensão uniformemente distribuída no valor de 100 kPa; (b) carregamento na direção horizontal, através de uma tensão uniformemente distribuída no valor de 100 kPa; e (c) distribuição do carregamento ao longo da estaca. A seguir, alguns dos resultados obtidos para as análises com carregamento vertical, mostrando os efeitos da variação de alguns parâmetros no comportamento da fundação. As Figuras 50 e 51 apresentam graficamente o efeito da variação do comprimento das estacas e do coeficiente de Poisson do solo no recalque e na distribuição do carregamento. Para essas análises foi considerado um Módulo de Elasticidade da estaca de 18.000 MPa e o radier com 0,5 m de espessura.

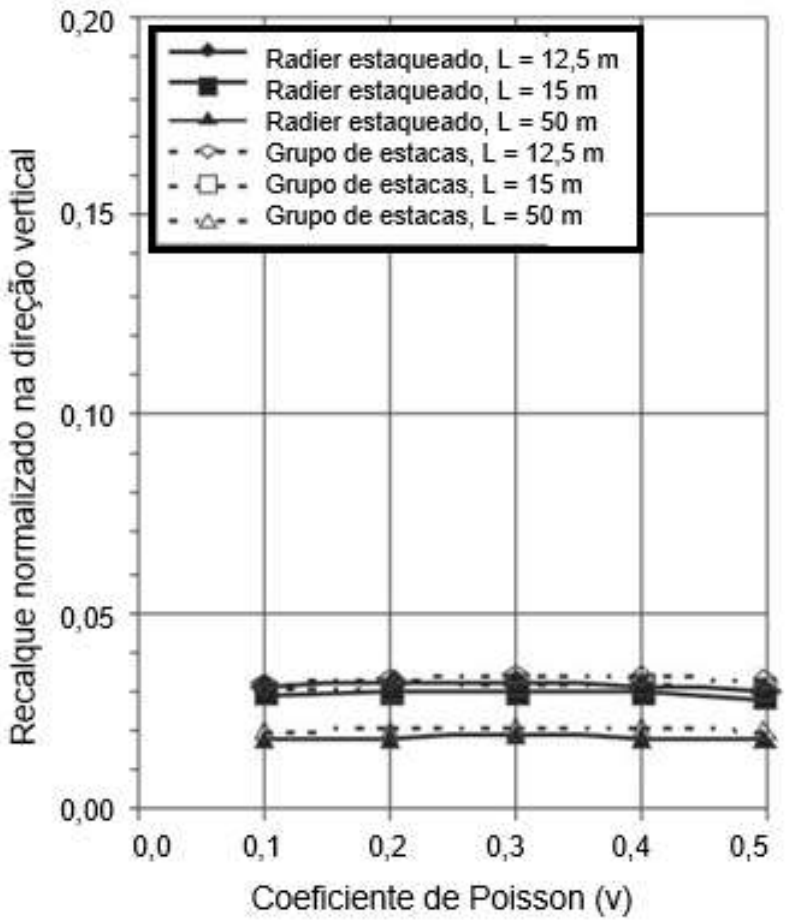


Figura 50 – Efeito da variação do comprimento da estaca e o coeficiente de Poisson do solo (modificado Cunha e Pando, 2013).

Analisando a Figura 50, observa-se que, para a configuração e parâmetros fixados na pesquisa, a variação do coeficiente de Poisson do solo praticamente não influencia no recalque da fundação, assim como o contato do bloco com o solo. A alternativa com maior comprimento da estaca, 50 m, apresentou recalques inferiores às alternativas com estacas de 12,5m e 15 m.

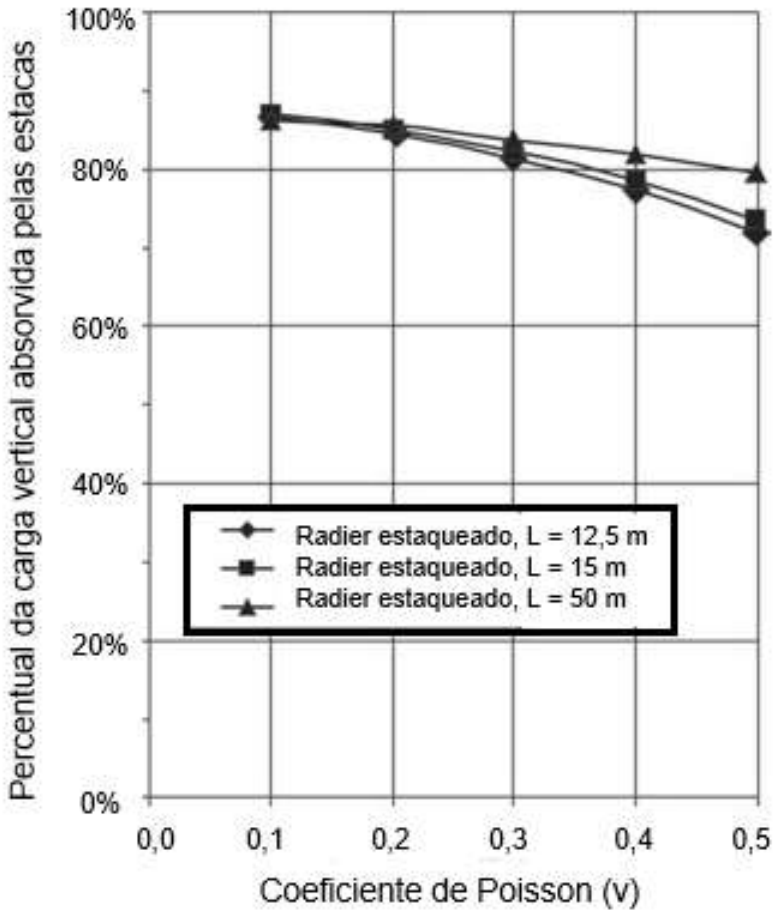


Figura 51 – Efeito da variação do comprimento das estacas de do coeficiente de Poisson do solo no rateio do carregamento entre o radier e as estacas (modificado, Cunha e Pando, 2013).

Analisando a Figura 51, observa-se que o aumento do coeficiente de Poisson do solo proporcionou uma redistribuição de esforços entre o radier e as estacas, aumentando a parcela suportada pelo radier. Este efeito foi sentido em menor intensidade para a solução com estacas de maior comprimento, 50 m. Verifica-se também que para fundações com maior comprimento de estacas, 50 m, as estacas absorvem um maior percentual do rateio do carregamento quando comparadas as soluções com estacas de menor comprimento, 12,5 m e 15 m.

2.2.4 Análise da rigidez da fundação em radier estaqueado

Ao se considerar a rigidez relativa estaca-bloco, parte do carregamento pode ser transferido ao terreno pelo bloco de coroamento, neste caso assumindo a função de radier. Ou seja, considera-se a rigidez e a contribuição não só das estacas, mas também do bloco de fundação, funcionando como um sistema de radier estaqueado, ilustrado na Figura 52.

Conforme conhecimento difundido na literatura geotécnica, a resistência lateral do sistema solo-estaca acontece integralmente quando o deslocamento do topo é da ordem de 1% do diâmetro da estaca. Dispondo de resultados de provas de cargas estáticas, por exemplo, é possível calcular a rigidez da estaca (relação entre a resistência mobilizada e o recalque de 1% do diâmetro da estaca).

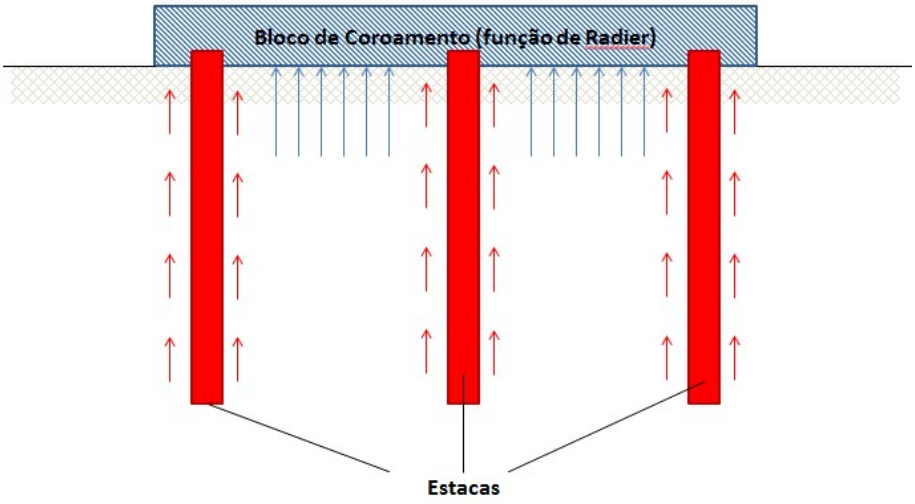


Figura 52 – Concepção de Fundação em Radier Estaqueado.

Segundo Svensson (2010), é importante destacar que, ao realizar uma modelagem através do Método dos Elementos Finitos para um radier estaqueado, a rigidez atribuída às estacas, ao radier e ao solo é fundamental para a qualidade dos resultados. A rigidez é que vai governar a distribuição da carga. Por exemplo, estacas com rigidez muito alta vão absorver muita carga à custa de pouca carga para o radier.

Duas verificações necessárias em projetos de fundação de uma torre eólica são a Rigidez Rotacional e a Rigidez Translacional. No caso da Rigidez Rotacional, Kr, é a relação entre o momento atuante na fundação e a distorção angular verificada através da modelagem. Enquanto a Rigidez translacional, Kt, é a relação entre o esforço horizontal máximo e o deslocamento horizontal por ele provocado, obtido também através da modelagem numérica. Estes são indicadores importantes de segurança que devem atender a limites mínimos exigidos pelo fabricante da torre.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo deste trabalho é avaliar, a partir de análises numéricas, a contribuição do bloco/radier na capacidade de carga da fundação de um aerogerador que foi projetado pela teoria de grupo de estacas. Para esta análise foi realizado um estudo de caso da fundação de uma base de aerogerador pertencente a um parque eólico construído em Macau, no litoral norte do Rio Grande do Norte.

A primeira análise foi realizada para a solução executada em campo, no caso um bloco assente sobre 24 estacas. Na sequência, apresenta-se proposições alternativas de fundação com a redução no número de estacas, mantendo as dimensões do bloco, o tipo e comprimento das estacas. Adicionalmente foi verificado o comportamento do radier isolado, ou seja, com a desconsideração de todas as estacas. Foi verificada a redistribuição de esforços entre as estacas e o radier, apresentando uma análise da influência da quantidade e posicionamento das estacas na distribuição de esforços e deformações da fundação.

Para cada proposição de bloco foi verificado, além da distribuição de esforços entre o radier e as estacas, os recalques máximos, as distorções angulares, a rigidez rotacional e a relação entre a carga vertical de ruptura e a carga vertical extrema de projeto, verificando se estes valores atendiam aos critérios de segurança.

Para efeito de comparação de resultados, convencionou-se que a carga de ruptura das fundações analisadas é aquela equivalente ao recalque igual a 10% o diâmetro da estaca. Para verificação desta carga de ruptura, os esforços horizontais e de momento foram mantidos nos valores extremos de projeto e o carregamento vertical, aplicado na cota de assentamento do bloco, foi aumentado para levar a fundação à ruptura. A relação desta carga com a carga vertical extrema de projeto foi verificada como um indicativo do comportamento da fundação em relação ao ELU (Estado Limite Último).

No caso das verificações de segurança quanto aos critérios de rigidez, tanto as Rigidez Rotacional quanto a Rigidez Translacional foram verificadas. A Rigidez Rotacional relaciona o momento máximo extremo com a distorção angular decorrente de todos os esforços atuantes na fundação. A rigidez translacional relaciona a força horizontal com o deslocamento horizontal por ela provocado. A Figura 53 apresenta os valores mínimos da rigidez rotacional e translacional, necessários para garantir a segurança do aerogerador em análise.

	Mínimo permitido	Máximo permitido
k_r Rigidez Rotacional [GNm/rad]	61	sem limite
k_t Rigidez Translacional [GN/m]	1,4	sem limite

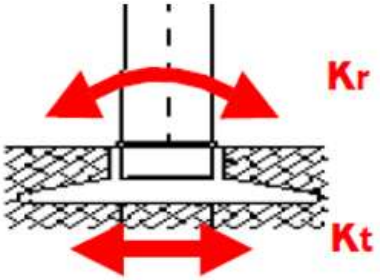


Figura 53 – Limites mínimos definidos pela Alstom, fabricante da torre analisada no estudo de caso desta dissertação (Fonte: Relatório Técnico INF-8403 emitido pela Alstom em 18/02/2011).

Para as simulações numéricas foram considerados os esforços extremos. A escolha deve-se ao fato de se tratar de uma estrutura esbelta na qual os esforços verticais sofrem pouca variação entre os cenários operacionais e extremos, apenas 2,5% de acréscimo, enquanto os momentos aumentam 67,4% de um cenário para outro, se tornando extremamente representativos.

Neste capítulo é apresentada a ferramenta numérica utilizada na análise da fundação objeto desta dissertação. Trata-se de um software de elementos finitos, o Plaxis 3D Foundation, versão 1.1 para *input* de dados e versão 2.0 para o *output* dos resultados. São apresentados o tipo de elementos finitos considerado, parâmetros geométricos utilizados nas análises, assim como a validação e calibração do software, comparando os resultados disponibilizados na literatura com os obtidos através do PLAXIS 3D Foundation.

Para definição dos parâmetros do solo adotados nas modelagens numéricas da fundação, foi realizada a retroanálise de provas de carga realizadas em estacas executadas na obra. De posse destes parâmetros, foi realizada a modelagem numérica da fundação executada no parque eólico.

3.2 ASPECTOS GERAIS RELACIONADOS AO SOFTWARE PLAXIS 3D FOUNDATION

Para as modelagens realizadas nesta dissertação foi utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF 3D), utilizando o programa PLAXIS 3D *Foundation*, versão 1.1. É um programa utilizado mundialmente pelas principais empresas e instituições de engenharia na indústria de engenharia civil e geotécnica. As aplicações vão desde escavações, aterros e fundações até mineração e geomecânica de reservatórios.

Esta ferramenta permite uma análise numérica detalhada através da geração de uma malha de elementos finitos podendo ser definida com a liberdade de escolha do nível de refinamento que é necessário para cada problema. O Método dos Elementos Finitos é uma das ferramentas numéricas mais utilizadas para análise de estruturas de fundações.

O PLAXIS 3D *Foundation* apresenta três subprogramas: o *Input*, onde são definidas as condições gerais do problema e as fases de cálculo; o *Output* que é usado para inspeção dos resultados a partir de vista tridimensional; e o *Curves*, que permite o acesso a gráficos resultantes das etapas de cálculo. O programa é alimentado com dados como geometria, planos de trabalho, sondagens, propriedades dos materiais, modelo de comportamento dos materiais, condições de contorno, definição da espessura da malha bidimensional e tridimensional, condições de tensões e poro pressões iniciais do terreno, sendo possível criar ou editar fases que simulam um determinado estágio de construção ou um dado carregamento.

Este software trabalha com diferentes modelos constitutivos para representar o comportamento do solo. Nesta pesquisa, para o solo foi considerado o modelo

constitutivo plástico perfeitamente elástico, que significa que o comportamento tensão x deformação do solo é linear elástico até um certo limite de tensão, após o qual o solo é perfeitamente plástico. Este modelo requer cinco parâmetros de entrada para o solo: Módulo de Elasticidade (E), Coeficiente de Poisson (v), ângulo de atrito (ϕ), coesão (c), e dilatância (ψ). O valor do parâmetro de rigidez (E) e a coesão (c) são geralmente escolhidos como valor representativo que é consistente com o nível de tensão no solo. Para modelagem do concreto das estacas e do bloco foi utilizado o modelo linear elástico, que prevê uma relação constante entre tensão e deformação. Foi adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, sendo este bastante utilizado nas análises geotécnicas, gerando bons resultados do comportamento ao cisalhamento dos solos

O PLAXIS trabalha com elementos da interface que são usados para modelar a interação entre diferentes materiais. Por exemplo, a interação entre uma estaca e o solo circundante pode ser modelada pelo uso de elementos de interface. Esta interface pode ser definida pelo usuário do programa, inserindo um valor para a intensidade da ligação entre o solo e o concreto, onde 1 é uma ligação perfeita e 0 não é nenhuma ligação.

A malha de elementos finitos é gerada inicialmente bidimensional, composta por elementos triangulares de 6 nós, sobre esta malha é gerada a malha tridimensional, composta por elementos prismáticos de 15 nós, sendo 6 nós em cada face triangular, por 8 nós em cada face quadrilateral e 6 pontos de integração de Gauss.

Os resultados de deslocamentos e tensões podem ser apresentados em forma gráfica ou em planilhas, proporcionando uma compreensão do comportamento quanto às tensões e deformações da fundação modelada.

Ressalta-se a divergência da convenção de sinais utilizada no PLAXIS 3D *Foundation* quando comparada à convenção usual da geotécnica. O programa considera as tensões de tração positivas e as tensões de compressão negativas.

3.2.1 Análises Comparativas com Casos da Literatura

Esta etapa tem como principal objetivo, verificar a concordância dos casos previamente analisados e apresentados na literatura com os resultados obtidos a partir do software utilizado nessa pesquisa, aferindo o correto manuseio do software. Geralmente a calibração e aferição de um software requerem dados experimentais ou resultados de análises numéricas.

Serão apresentados neste tópico os resultados obtidos para as diversas análises comparativas realizadas, que vão desde bloco com uma estaca em solo homogêneo, a radier estaqueado com 16 estacas inseridas em um solo heterogêneo. Os resultados obtidos a partir do PLAXIS 3D *Foundation* foram comparados com aqueles obtidos por análises realizadas por outros autores e seus respectivos métodos de cálculo como Ottaviani (1975), Sales (2000), Bittencourt & Lima (2009), Souza (2010), Yamashita (1998), Matsumoto (1998), Small & Poulos (2007), Kuwabara (1989), Ta & Small (1996), Poulos & Davis (1980), Randolph (1983) Poulos (1991), Poulos (1994) e Sinha (1997), Soares (2011) e Freitas Neto (2013).

3.2.1.1 Radier isolado e blocos e radiers sobre 1, 2 e 4 estacas (Soares, 2011)

Soares (2011) realizou uma pesquisa para verificar o comportamento de fundações em radier estaqueado, onde se considera o contato do bloco com o solo, e em grupo de estacas, onde não se considera o contato do bloco com o solo. O objetivo foi mensurar o efeito do contato do bloco com o terreno na capacidade de carga e nos recalques da fundação. No estudo realizado pelo referido autor, foram realizadas sete provas de carga estática em três sistemas de fundação, grupo de estacas, radier estaqueado e radier isolado. Foram executadas ao todo 14 estacas do tipo Hollow Auger com 0,30 m de diâmetro, 4,5 m de comprimento e com espaçamento de 1,05 m entre eixo, correspondendo a 3,5 vezes o diâmetro. Foi considerado um radier quadrado com 1,55 m de lado.

Para cada uma das provas de carga analisadas por Soares (2011), Macedo (2017) realizou modelagens numéricas com o uso do software PLAXIS 3D *Foundation*, com resultados apresentados a seguir. Os resultados obtidos por Macedo (2017) demonstram um desempenho satisfatório da ferramenta numérica na previsão do comportamento de radiers estaqueados.

3.2.1.1.1 Radier Isolado

É possível observar na Figura 54 que os valores numéricos obtidos através da modelagem numérica apresentam comportamento próximo ao modelo obtido por Soares (2011), através de provas de carga estática, até aproximadamente os primeiros 50% do carregamento, o equivalente a um carregamento de 550 kN. Para carregamentos mais elevados, os resultados obtidos através da modelagem numérica se apresentam bem distintos dos obtidos na prova de carga, onde pode-se observar que o modelo numérico assume um comportamento menos rígido do que o modelo experimental. O recalque máximo obtido no modelo numérico foi 61% maior que o modelo experimental, 26,10 mm e 16,25 mm, respectivamente.

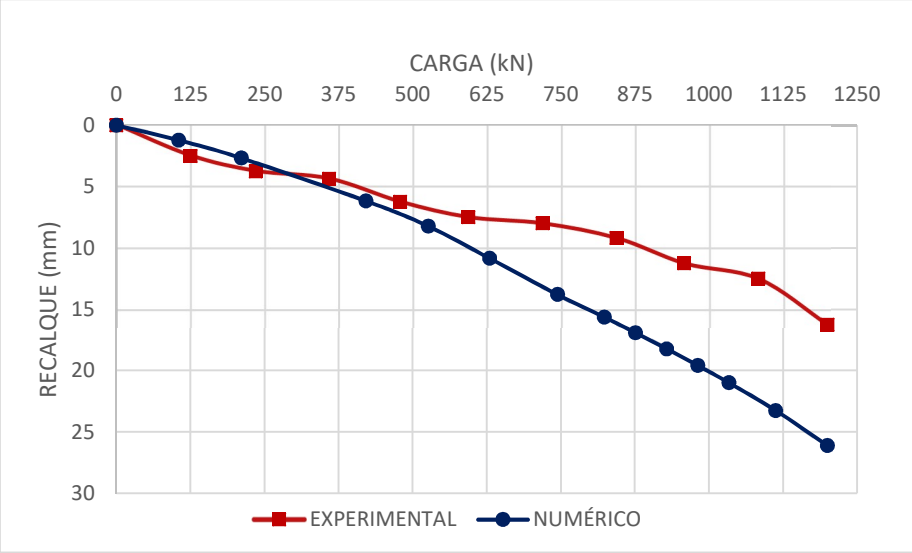


Figura 54 - Curvas Carga-Recalque do Radier Isolado, (Macedo, 2017).

3.2.1.1.2 Radier estaqueado com uma estaca

A modelagem numérica do radier estaqueado com uma estaca representou de forma aproximada os valores obtidos através do modelo experimental, conforme pode ser observado na Figura 55. Contudo, o modelo numérico apresentou rigidez um pouco superior ao modelo experimental até o carregamento de 1.000 kN, quando as duas curvas convergem para o recalque máximo obtido na prova de carga, 15,8 mm, contra 15,5 mm na modelagem numérica.

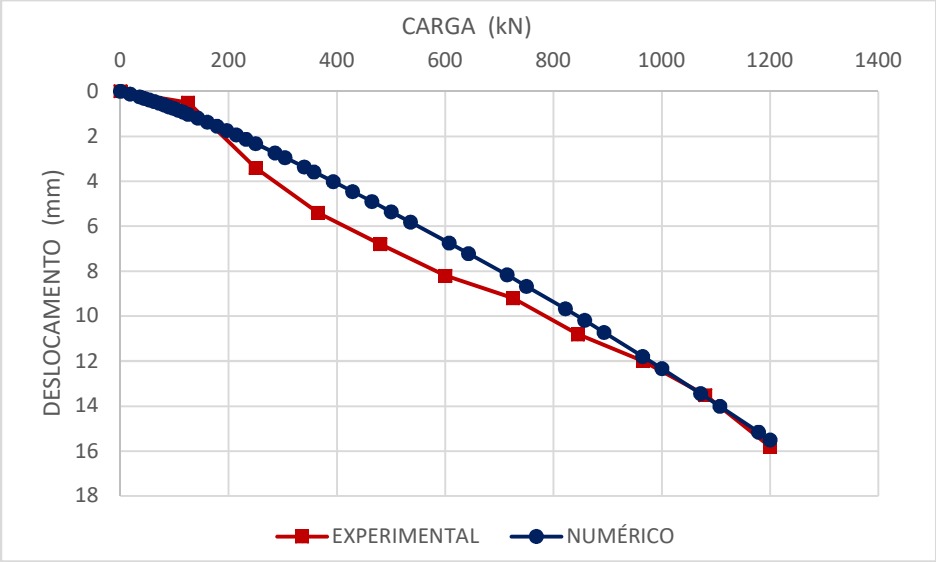


Figura 55 - Curvas Carga-Recalque do Radier Estaqueado com uma estaca, (Macedo, 2017).

3.2.1.1.3 Radier estaqueado com duas estacas

Os resultados obtidos através da modelagem numérica no Plaxis 3D foram muito próximos aos resultados do modelo experimental em praticamente todos os estágios de carga, conforme pode-se observar na Figura 56. A partir da carga 2.200 kN (92% da carga total) existe uma redução brusca na rigidez do modelo experimental e o modelo numérico se mantém com um comportamento mais rígido. Assim, as curvas começam a divergir atingindo recalques máximos distintos, 36,42 mm e 42,50 mm para os modelos numérico e experimental (17% maior), respectivamente.

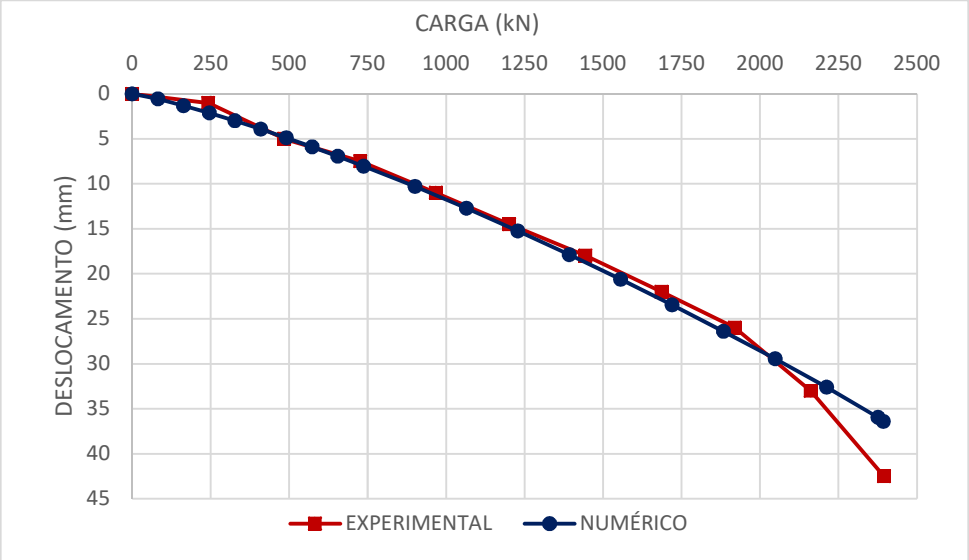


Figura 56 - Curvas Carga-Recalque do Radier Estaqueado com duas estacas, (Macedo, 2017).

3.2.1.1.4 Radier estaqueado com quatro estacas

Na Figura 57 pode-se observar que a modelagem experimental apresenta uma menor rigidez do que a modelagem numérica para radier com 4 estacas. As curvas estão relativamente próximas até a carga de 2.250 kN (70% da carga total), quando a curva experimental apresenta uma perda de rigidez representada através de maiores recalques. O recalque máximo da modelagem numérica foi de 36,43 mm, enquanto o experimental atingiu 49,2 mm, ou seja, 35% maior.

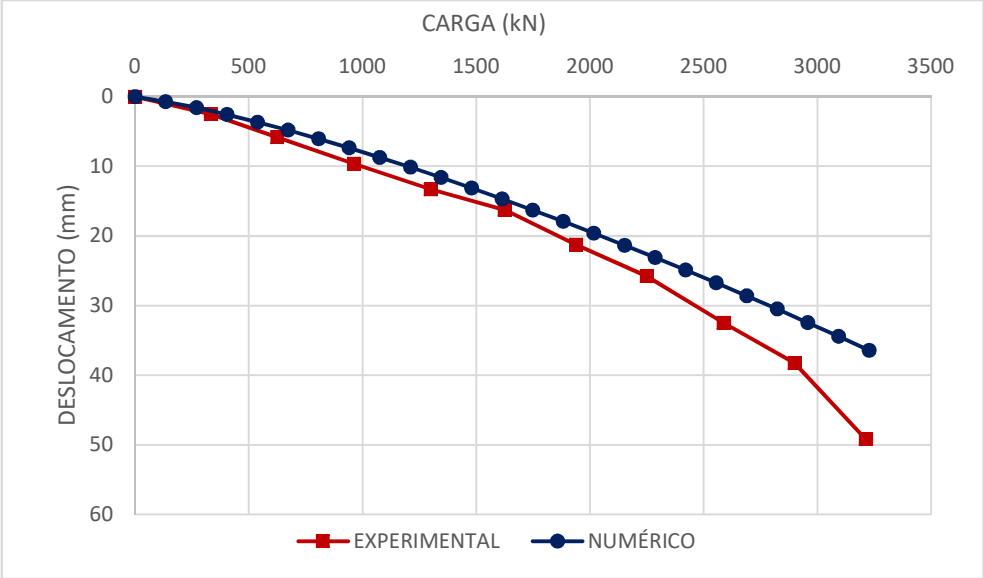


Figura 57 - Curvas Carga-Recalque do Radier Estaqueado com quatro estacas, (Macedo, 2017).

3.2.1.1.5 Grupo com uma estaca

No caso da modelagem numérica do grupo com apenas uma estaca, esta apresentou semelhança com o modelo experimental apenas no trecho linear elástico desta curva, representado até aproximadamente 50% do carregamento, conforme pode-se observar na Figura 58. A partir deste ponto as curvas assumem comportamento distintos, com o modelo numérico apresentando uma maior rigidez que o leva a níveis de recalque bem inferiores ao modelo experimental. O recalque máximo no modelo numérico foi aproximadamente 70% inferior ao modelo experimental, 25,15 mm e 86 mm, respectivamente.

Desta forma, diante da divergência no valor do recalque, conclui-se que a modelagem numérica simulou o comportamento adequado para o grupo com uma estaca apenas para níveis pequenos de carga e recalque. A carga de trabalho obtida através da análise da curva numérica apresenta certa divergência quando comparada à carga obtida através do modelo experimental resultante da prova de carga estática.

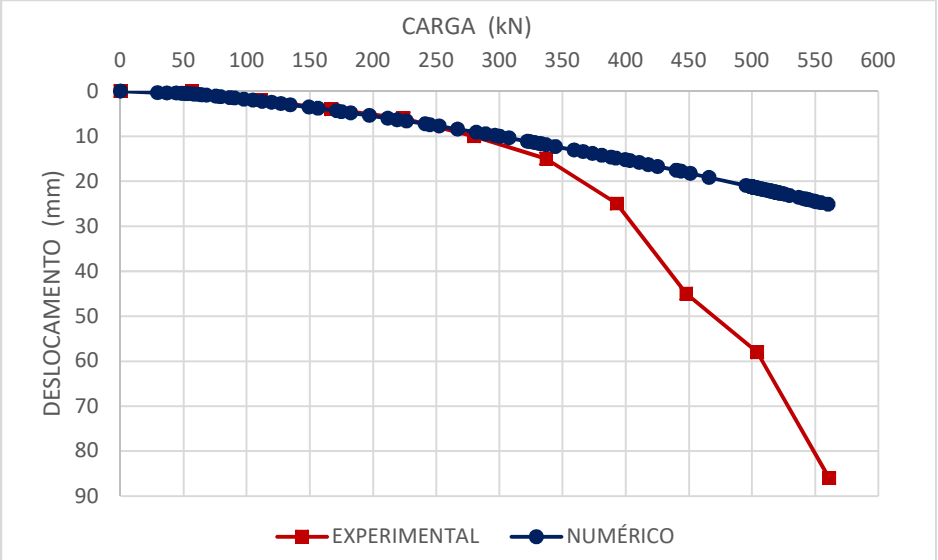


Figura 58 - Curvas Carga-Recalque do grupo com uma estaca, (Macedo, 2017).

3.2.1.1.6 Grupo com duas estacas

Pode-se observar na Figura 59 que os resultados obtidos através da modelagem numérica estão bastante aproximados dos obtidos na curva experimental até aproximadamente 70% do carregamento. A partir deste ponto a curva experimental perde rigidez e o modelo numérico passa a apresentar recalques consideravelmente inferiores aos obtidos na prova de carga. O recalque máximo numérico no valor de 28,75 mm é aproximadamente 40% inferior ao recalque experimental de 47,40 mm.

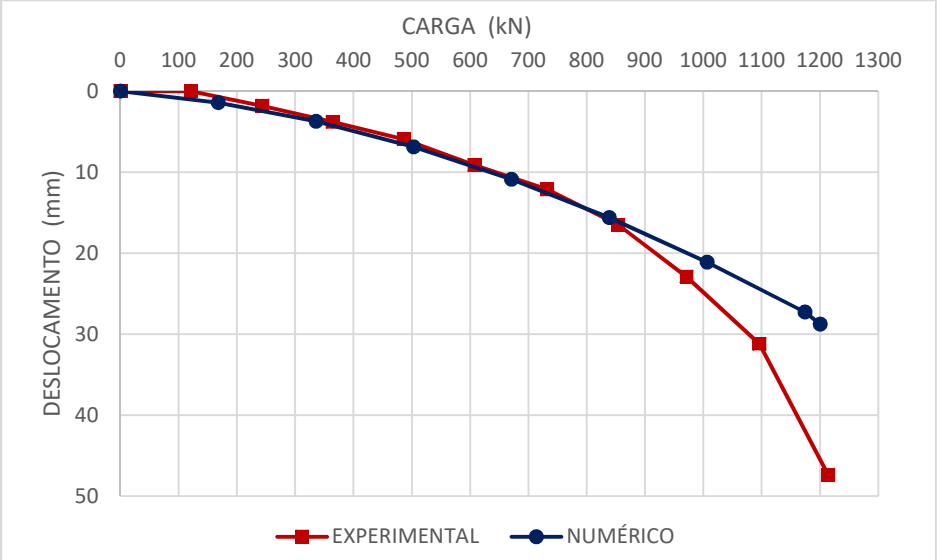


Figura 59 - Curvas Carga-Recalque do grupo com duas estacas, (Macedo, 2017).

3.2.1.1.7 Grupo com quatro estacas

Analisando a Figura 60 pode-se observar que os resultados obtidos são aproximados até aproximadamente 1.000 kN, 40% da carga total aplicada. A partir daí até aproximadamente a carga de 2.250 kN, 90% da carga total aplicada, o modelo numérico previu recalques sensivelmente superiores. Na sequência do carregamento observa-se uma queda brusca de rigidez no modelo experimental que atingiu um recalque de 60,44 mm, enquanto o modelo numérico apresentou um recalque de 45,08 mm, 25% inferior ao recalque experimental.

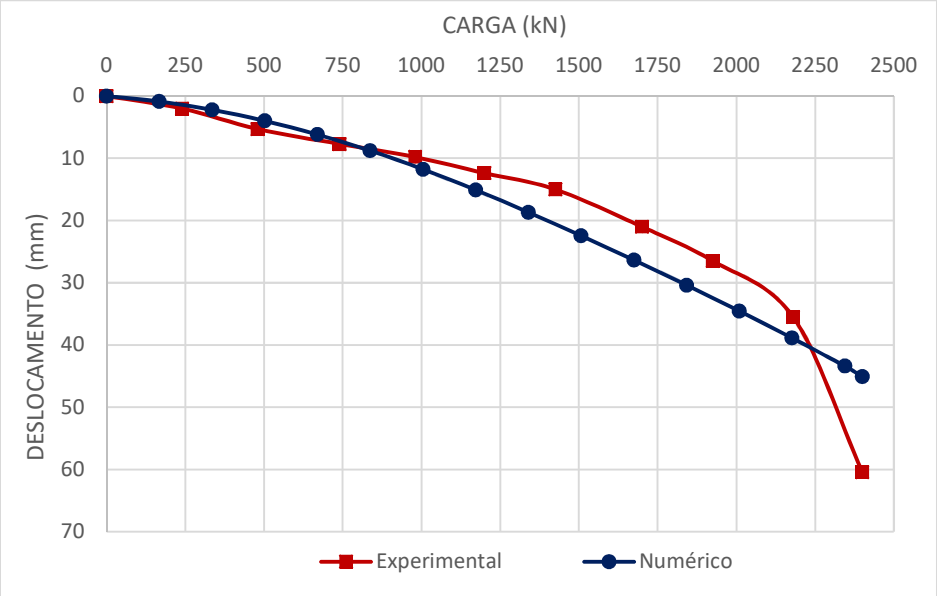


Figura 60 - Curvas Carga-Recalque do grupo com quatro estacas, (Macedo, 2017).

3.2.1.2 Estaca isolada quadrada (Ottaviani, 1975)

Mesmo sendo o objeto desta pesquisa a análise de uma fundação em radier estaqueado, originalmente projetado para trabalhar como um grupo de estacas, julga-se necessário validar o programa Plaxis 3D Foundation para o elemento de uma estaca isolada. É de conhecimento comum que o comportamento carga-recalque das estacas é um dos principais fatores que influenciam o comportamento global de um radier estaqueado ou de um grupo de estacas. Além de que nessa pesquisa se dispõe de provas de carga realizadas em campo em estacas isoladas e que serão modeladas através de retroanálise para obtenção de parâmetros.

Os resultados obtidos através do PLAXIS 3D Foundation foram comparados com os obtidos na literatura, anteriormente apresentados por Ottaviani (1975), Sales (2000) com o programa ALLFINE, Bittencourt & Lima (2009) com o programa FLEXPDE, Souza (2010) com programa DIANA e Freitas Neto (2013) com o programa LCPC Cesar.

Para a modelagem numérica deste caso foi feita a consideração do solo com comportamento elástico-linear, mesmo modelo de comportamento adotado para a estaca.

Os parâmetros geométricos e elásticos utilizados para esta modelagem numérica estão apresentados na Tabela 7. Para a determinação da rigidez relativa (Kps), que quantifica a relação entre o módulo de elasticidade da estaca pelo módulo de elasticidade do solo, foi fixado o módulo da estaca, variando o do solo, de modo que se trabalhou com valores de Kps que variaram entre 200 e 2000.

Para a determinação da constante de recalque, que relaciona o módulo de elasticidade das estacas (E_p), o comprimento da aresta da seção transversal da estaca quadrada, o recalque (ρ) e a tensão aplicada (uniformemente distribuída no topo da estaca), foram utilizados valores de tensão variando entre 250 kPa e 2000 kPa. Com o resultado das simulações numéricas foram obtidos os valores do recalque no topo da estaca, e com ele foram determinadas as respectivas constantes de recalque.

Tabela 7 - Parâmetros geométricos e elásticos nas análises do caso da estaca isolada quadrada.

D(m)	**A_p (m²)**	**B(m)**	**L(m)**	**σ (kPa)**
1,0	1,0	3.L	20,0 e 40,0	250 até 2000
H/L	**E_P(kPa)**	**E_S(MPa)**	***V*c**	***V*s**
1,5 e 4,0	20.000.000	Variável	0,25	0,45

D – Lado da seção da estaca; A_p – Área da seção transversal da estaca; B – Domínio horizontal; L – Comprimento da estaca; σ – Tensão Aplicada no topo da estaca; H/L – Domínio Vertical; Ep – Módulo de Elasticidade do Concreto; Es – Módulo de Elasticidade do Solo; vc – Coeficiente de Poisson do concreto; vs – Coeficiente de Poisson do solo.

As modelagens para este caso contemplaram três cenários. No primeiro caso foi considerado um comprimento da estaca de 20 metros e o domínio vertical igual a 4. No segundo caso foi considerado uma estaca com 20 metros de comprimento com domínio vertical (H/L) igual a 1,5. Finalmente, no terceiro caso foi considerado uma estaca com 40 metros de comprimento e domínio vertical de 1,5. Os resultados obtidos nessas modelagens estão apresentados nas Figuras 61, 62 e 63.

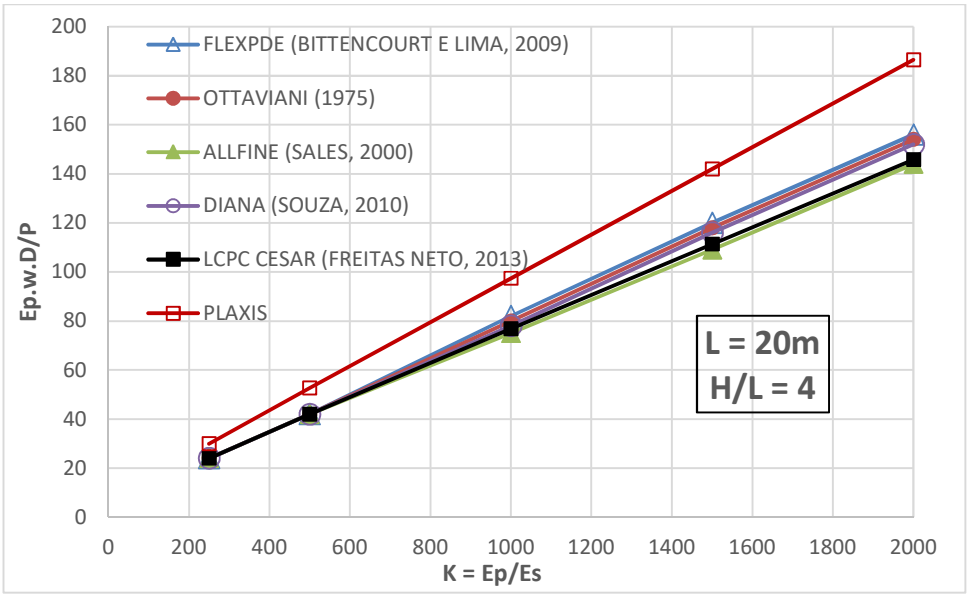


Figura 61 – Valores de constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com o PLAXIS para uma estaca isolada com 20 metros de comprimento e relação H/L igual a 4,0.

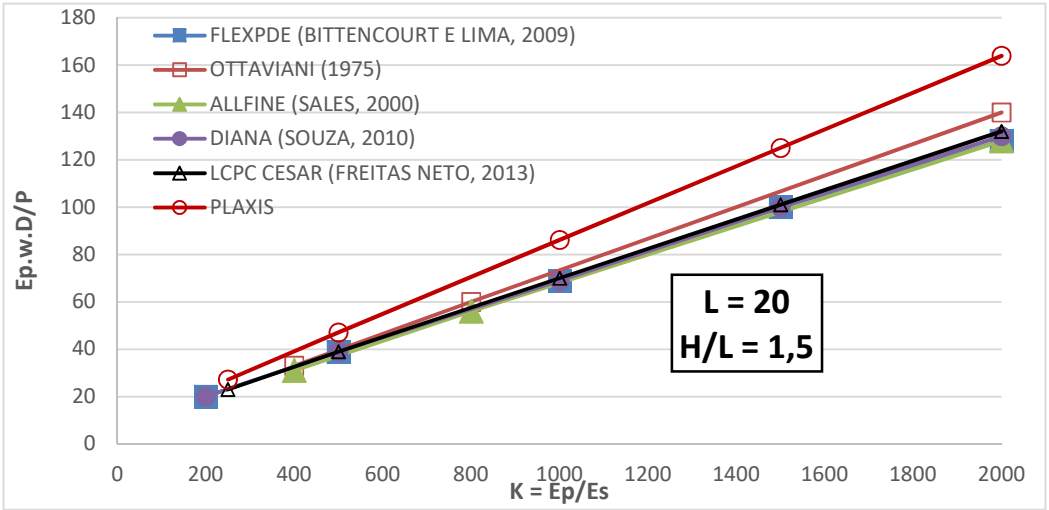


Figura 62 – Valores de constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com o PLAXIS para uma estaca isolada com 20 metros de comprimento e relação H/L igual a 1,5.

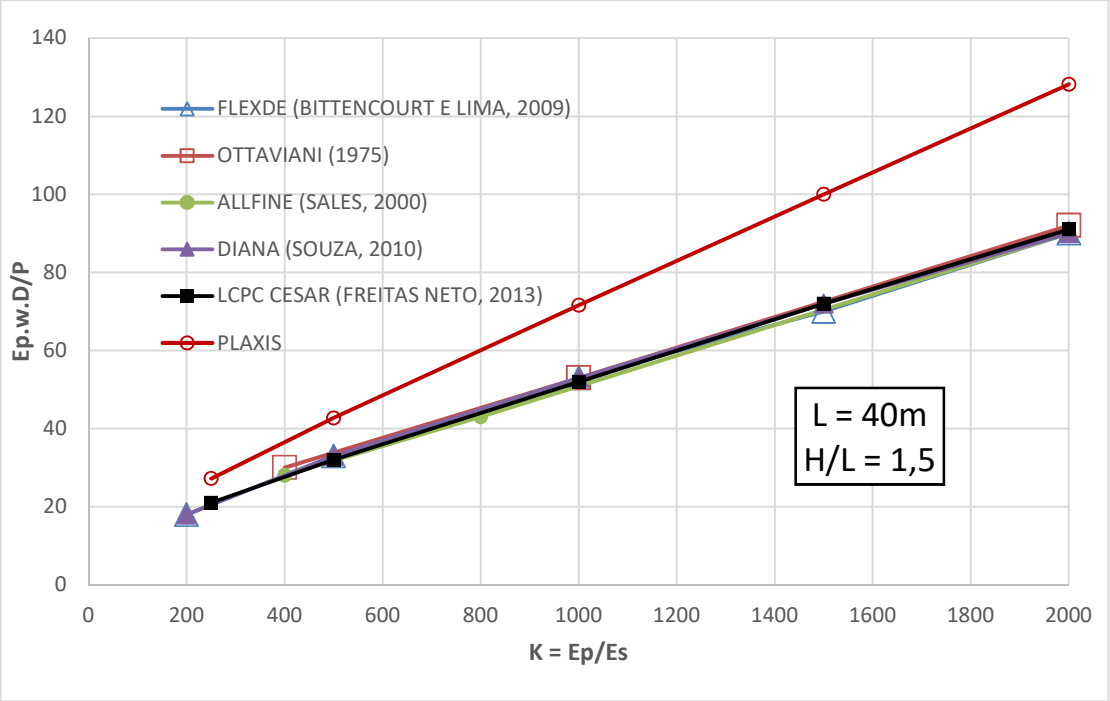


Figura 63 – Valores de constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com o PLAXIS para uma estaca isolada com 40 metros de comprimento e relação H/L igual a 1,5.

Mesmo com esta divergência apresentada pelo PLAXIS, considerou-se que o software respondeu de forma eficaz, visto que a constante de recalque tem elevada sensibilidade diante de pequenas variações de recalque, sensibilidade esta destacada por Freitas Neto (2013). A maior diferença identificada no valor de recalque absoluto em comparação com os outros resultados foi de apenas 4mm.

3.2.1.5 Radiers sobre 9 e 15 estacas (Poulos *et al.*, 1997)

Esta análise foi proposta por Poulos *et al*. (1997), e contempla 3 casos de radier estaqueado com 60m² (10m x 6m) cuja tensão de ruptura é 0,30 MPa, resultando em uma carga de 18,0 MN. Dois dos radiers estão assentes sobre 15 estacas e o terceiro caso sobre 9 estacas. O carregamento é transmitido através de 9 pilares, sendo 6

carregados por uma carga P_1 e 3 carregados por uma carga P_2 que corresponde ao dobro de P_1, conforme Figura 64. Os pontos nomeados por A, P_1 e P_2 são pontos de locação de estacas.

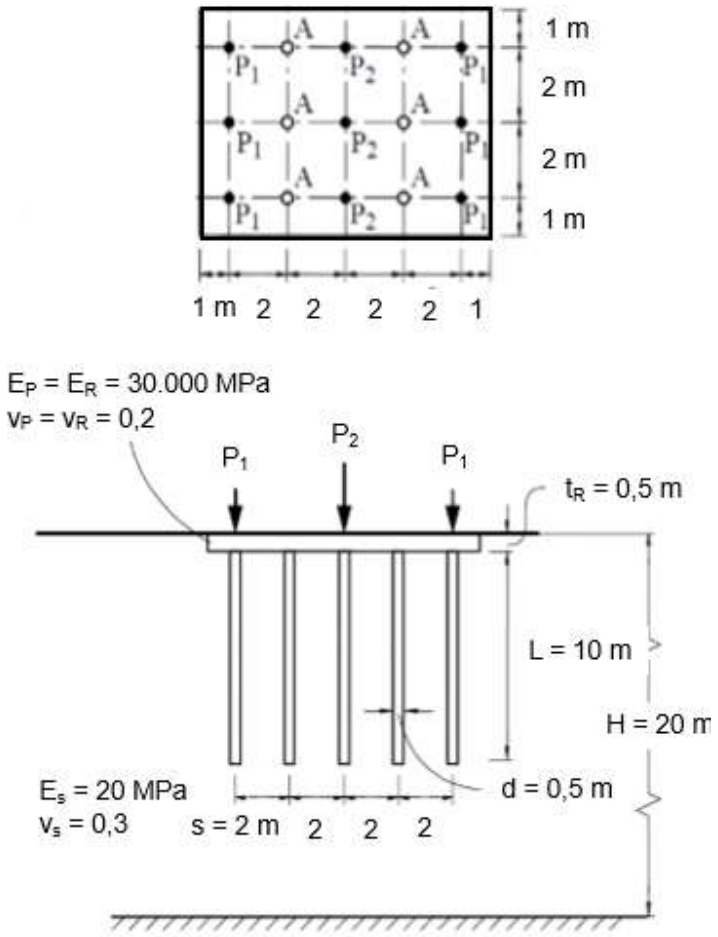


Figura 64 – Exemplo proposto por Poulos et al. (1997).

Este estudo foi realizado em 3 cenários distintos, onde se variou a carga total aplicada e o número de estacas, conforme pode-se observar na Tabela 8 e com as seguintes configurações paramétricas apresentadas na Tabela 9.

Tabela 8 - Cargas aplicadas nos 3 casos estudados.

Cenários	Nº. de estacas	Carga nos Pilares P1 (kN)	Carga nos Pilares P2 (kN)	Carga total aplicada (kN)
A	15	1.000	2.000	12.000
B	15	1.250	2.500	15.000
C	9*	1.000	2.000	12.000

* Nessa análise as estacas marcadas como A na Figura 42, são desconsideradas na fundação.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados nas análises do caso do radier sobre 9 e 15 estacas (Poulos et al., 1997).

D (m)	A_P (m^2)	B (m)	L (m)	
0,5	0,196	3.L	10,0	
H/L	**$E_P = E_R$ (GPa)**	**ν_c**	**ν_s**	**t (m)**
2	30,0	0,2	0,3	0,5

D – Diâmetro da seção transversal da estaca; A_P – Área da seção transversal da estaca; B – Domínio horizontal; L – Comprimento da estaca; H/L – Domínio Vertical; $E_P = E_R$ – Módulo de Elasticidade do Concreto da Estaca e do Radier; ν_c – Coeficiente de Poisson do concreto; ν_s – Coeficiente de Poisson do solo; t – Espessura do radier.

Os valores dos recalques obtidos através da simulação numérica no Plaxis foram comparados com métodos consagrados na literatura, como Poulos & Davis (1980), Randolph (1983), Poulos (1991, 1994) Ta & Small (1996) e Sinha (1997), para o mesmo problema. Estes resultados estão apresentados nas Figuras 43, 44 e 45.

Os resultados obtidos na modelagem numérica do Caso A desse item, onde foi considerada a carga aplicada de 12MN para um radier sobre 15 estacas, está apresentado na Figura 65. O recalque máximo no radier obtido através do PLAXIS foi de 22,4mm, e este foi 10,4% menor do que a média dos resultados obtidos na literatura.

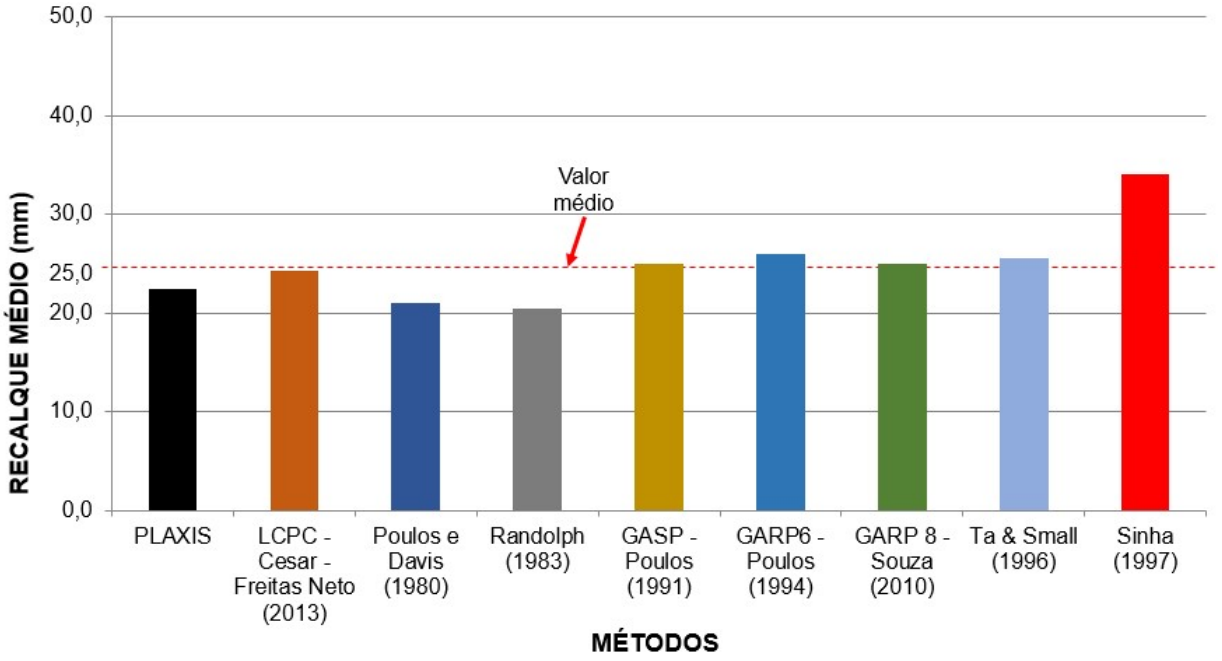


Figura 65 – Valores de recalque médio no radier de 15 estacas com carga aplicada igual a 12 MN obtidos na literatura e pelo método dos elementos finitos (PLAXIS).

Na Figura 66 são apresentados os valores de recalque médio no radier para uma carga aplicada de 15 MN (Caso B). O recalque obtido nas análises numéricas realizadas com o PLAXIS foi de 28,0mm, o que corresponde a um valor de 11,7% inferior se comparado com o valor médio dos demais métodos obtidos na literatura. Este recalque corresponde a um aumento de 25% se comparado com o recalque obtido no caso A, para um incremento de carga de 25% (de 12 MN para 15 MN), como era de se esperar, haja vista ser esta modelagem realizada à luz do modelo linear-elástico.

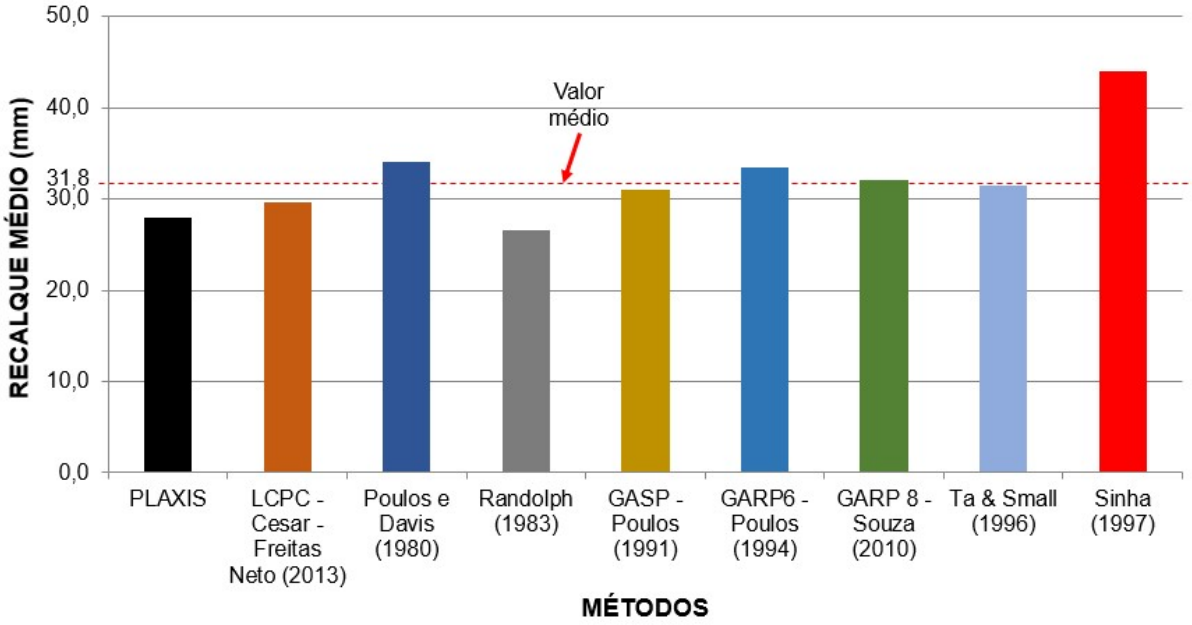


Figura 66 – Valores de recalque médio no radier de 15 estacas com carga aplicada igual a 15 MN obtidos na literatura e pelo método dos elementos finitos (PLAXIS).

Na Figura 67 são apresentados os valores de recalque para o Caso C do radier sobre 9 estacas e suportando um carregamento de 12 MN. Observa-se que com a retirada de 6 estacas da base do radier, os valores de recalque aumentaram em média 15,5%, se comparados ao Caso A, mostrando que a retirada de 40% das estacas, que vem a gerar uma redução de custo significativa para a obra, não implica num acréscimo proporcional de recalque pois o efeito de grupo e absorção de carga pelo radier compensam esta redução de estacas. No entanto, tal fato deve ser verificado caso a caso. Além disso, pode-se observar que o recalque obtido para o Caso C, com o Plaxis, no valor de 28,9 mm foi 1,1% maior do que o recalque médio obtido a partir dos casos da literatura.

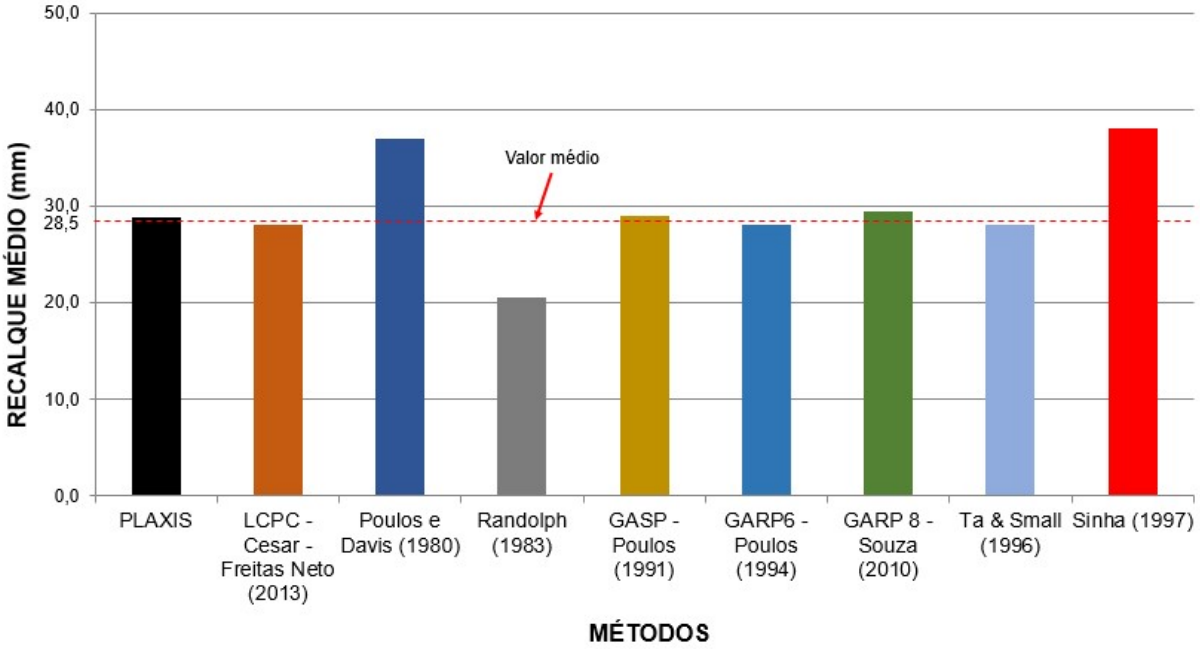


Figura 67 – Valores de recalque médio no radier de 9 estacas com carga admissível igual a 12 MN obtidos na literatura e pelo método dos elementos finitos (PLAXIS).

3.2.1.4 Radiers sobre 9 estacas (Kuwabara, 1989)

Este caso analisa um radier estaqueado sobre 9 estacas circulares de 1m de diâmetro, D, assente sobre um solo homogêneo de comportamento elástico. A distância do eixo das estacas periféricas até a borda do bloco corresponde ao diâmetro da estaca e a carga aplicada foi uniformemente distribuída em toda a superfície do radier. Kuwabara (1989) utilizou o M.E.C. (Método dos Elementos de Contorno) para representar todos os elementos da fundação, sem a utilização de qualquer outro método ou simplificação na consideração das interações, sendo sua análise considerada uma análise “M.E.C. – complete” como mencionou Sales (2000).

Para este estudo apresentado por Kuwabara, para um mesmo nível de carregamento variou-se a relação L/D das estacas, fixando o diâmetro e variando o comprimento das estacas. Os espaçamentos, S, entre as estacas também variaram possibilitando avaliar a influência deste na distribuição das cargas para o radier e para as estacas, assim como

a influência nos recalques. A Tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados na modelagem.

Tabela 10 - Parâmetros geométricos e elásticos utilizados nas análises do caso do radier sobre 9 estacas proposto por Kuwabara (1989).

D(m)	A_P (m²)	B (m)		L/D			
1	0,785	3.L		25	50	100	150	200
H/L	K_{PS}	v_c	v_s	t (m)		S / D		
2	1000	0,2	0,49	2		3	5	10

D – Diâmetro da seção da estaca; A_P – Área da seção transversal da estaca; B – Domínio horizontal; L/D – Relação entre o comprimento da estaca e o seu diâmetro; H/L – Domínio Vertical; K_{PS} – Coeficiente de Rigidez entre estaca e solo; v_c – Coeficiente de Poisson do concreto; v_s – Coeficiente de Poisson do solo; t – Espessura do radier; S/D: Espaçamento relativo entre as estacas.

Os resultados obtidos nas simulações realizadas, bem como os resultados observados na literatura para a modelagem deste problema proposto por Kuwabara (1989) estão apresentados nas Figuras 68, 69 e 70.

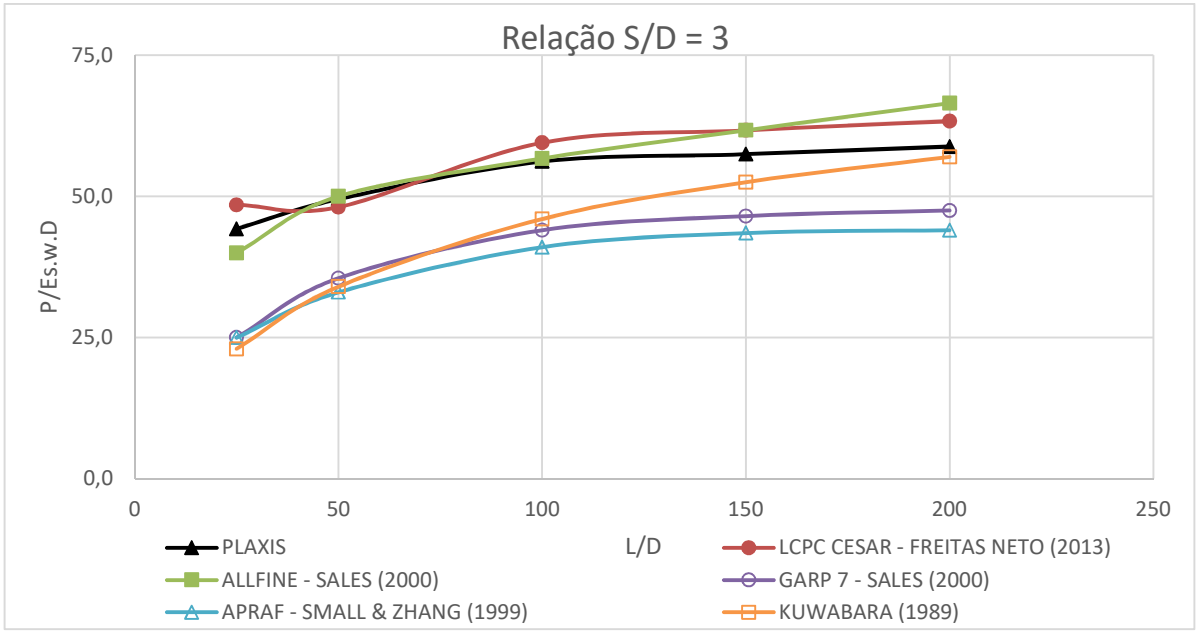


Figura 68 – Resultados obtidos para radier sobre 9 estacas para relação S/D igual a 3.

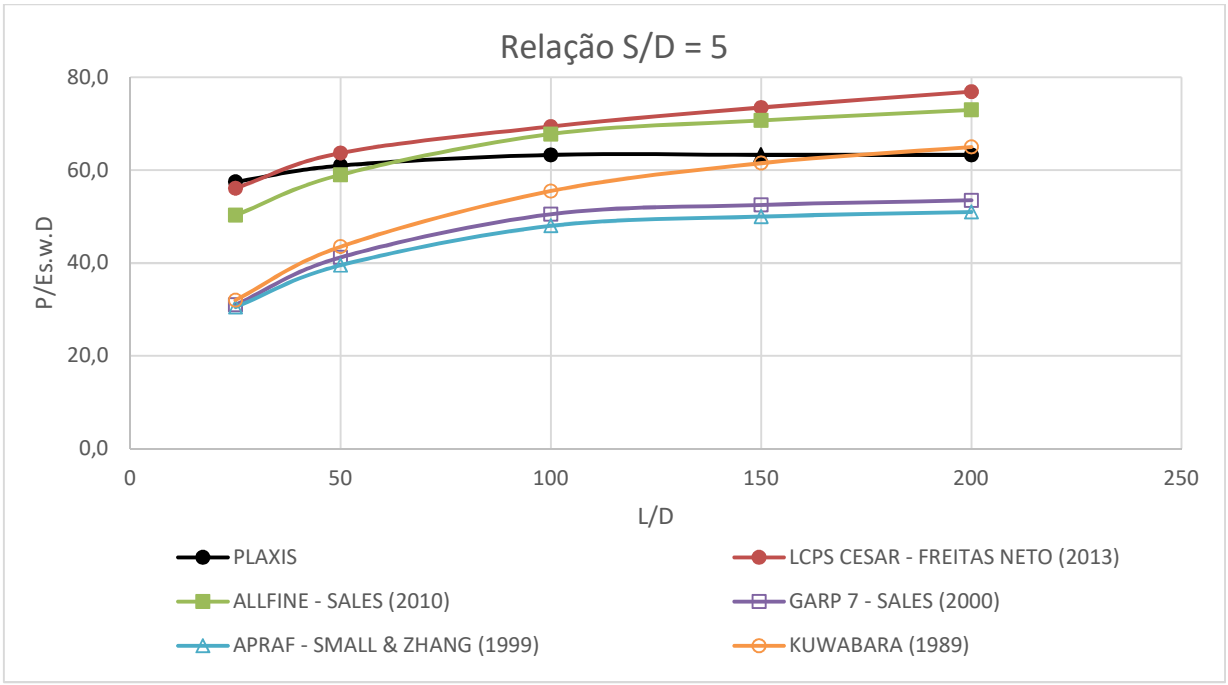


Figura 69 – Resultados obtidos para radier sobre 9 estacas para relação S/D igual a 5.

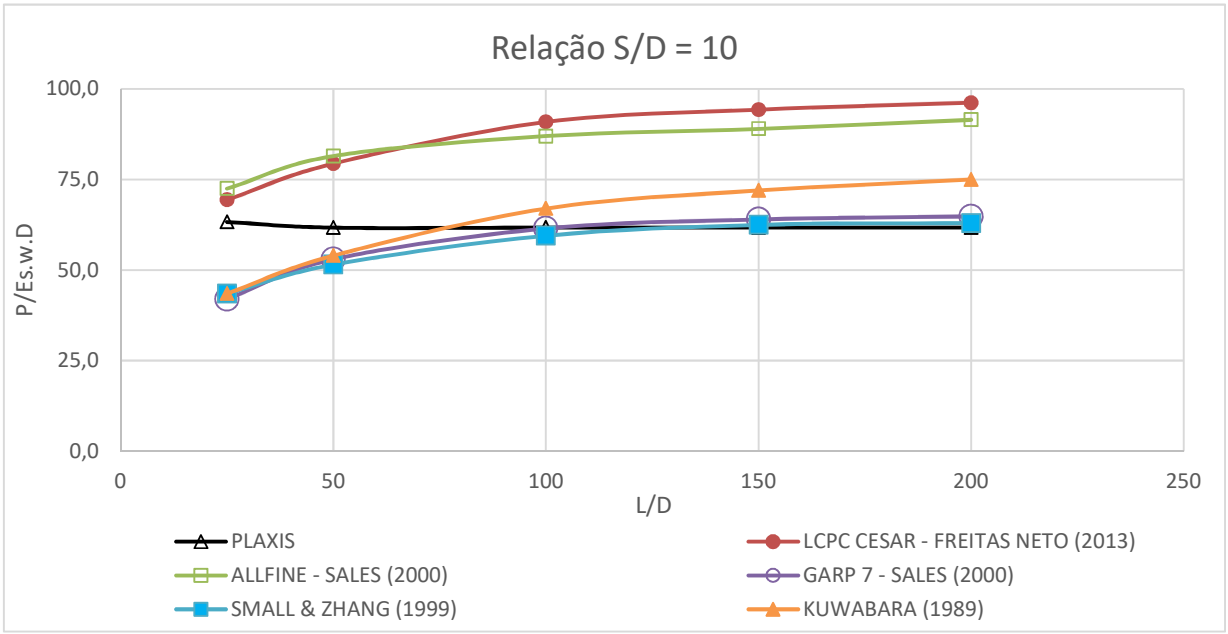


Figura 70 – Resultados obtidos para radier sobre 9 estacas para relação S/D igual a 10.

De acordo com os resultados obtidos, com exceção do resultado com espaçamento relativo S/D = 10, houve tendência de convergência dos resultados de Freitas Neto (2013), com o programa LPCP- Cesar e de Sales (2000), com o programa ALLFINE, com os obtidos nessa pesquisa. Todos estes modelamentos realizados com base em elementos finitos. Assim, as diferenças entre os resultados apresentados podem ser justificadas pelos métodos utilizados nas análises.

A densidade da malha utilizada pelos pesquisadores também pode justificar as variações nos resultados, bem como a elevada sensibilidade da constante de recalque, que diante de pequenas variações de recalque absoluto, onde 1 mm resulta em grandes alterações nos resultados.

Verifica-se que, a partir da relação L/D igual a 100, os valores de recalque tiveram uma leve tendência à estabilização. Esta estabilização é esperada visto que o modelo de análise considerado é o modelo elástico, onde a carga é diretamente proporcional ao deslocamento. Entende-se que esta constância não é visualizada no início por ser necessário uma carga mínima para mobilizar o Sistema e então ele passar a assumir esta relação proporcional de carga x recalque.

3.2.1.5 Radiers sobre 16 estacas (caso proposto pelo comitê TC-18)

Este problema foi apresentado pelo comitê técnico TC-18 da ISSMGE. Trata-se de um radier estaqueado com 16 estacas em solo heterogêneo, com o módulo de elasticidade e resistência não drenada crescente com a profundidade conforme as Equações 3 e 4 abaixo.

$$E_s = 2{,}45.z + 7{,}0 \text{ (MPa)} \quad (3)$$

$$c_u = 3{,}93.z + 110{,}0 \text{ (kPa)} \quad (4)$$

O radier é solicitado por uma carga de 80 MN distribuída em toda a sua superfície e os parâmetros utilizados na modelagem são apresentados na Tabela 11. A geometria do problema está representada na Figura 71.

Tabela 11 - Parâmetros utilizados nas análises do caso proposto pelo TC-18 (ISSMGE).

D_P (m)	A_P (m²)	B (m)	L (m)	t (m)
1,0	0,785	3.L	30,0	2,0
H/L	**$E_P = E_R$ (GPa)**	**v_c**	**v_s**	**S / D**
2	35,0	0,16	0,1	3

D_P – Diâmetro da seção da estaca; A_P – Área da seção transversal da estaca; B – Domínio horizontal (medido do centro do radier até cada uma das bordas); L – Comprimento das estacas; H/L – Domínio Vertical; E_P – Módulo de Elasticidade da estaca; E_R – Módulo de Elasticidade do radier; v_c– Coeficiente de Poisson do concreto; v_s– Coeficiente de Poisson do solo; t – Espessura do radier; S/D: Espaçamento relativo entre as estacas; S – espaçamento entre as estacas = 3m.

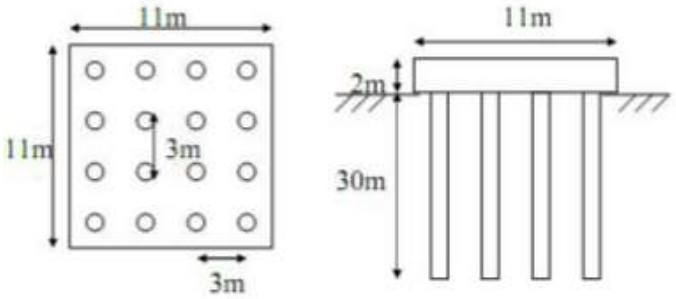


Figura 71 – Radier sobre 16 estacas proposto pelo TC-18 (SALES,2000).

Após a modelagem numérica realizada com a utilização do PLAXIS, os resultados obtidos foram comparados com os resultados encontrados na literatura para este estudo de caso. Pode-se observar que o programa utilizado nesta dissertação apresentou resultados semelhantes aos outros anteriormente divulgados, principalmente com aqueles baseados no método dos elementos finitos. Os resultados obtidos nesta modelagem, bem como os levantados na literatura, estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado obtido em comparação com os resultados observados na literatura para o caso proposto pelo TC-18 ISSMGE. (Modificado de Freitas Neto, 2013).

Autor / Programa / Método	Recalque (mm)	Carga nas Estacas (%)
Yamashita (1998) / MEF	29	98
Horikoshi & Randolph (1998) / Tubulão Equivalente	31	x
Horikoshi & Randolph (1998) / HyPR	41 - 43	100
Matsumoto (1998) / KURP	42	96
GARP - Método Aproximado	42	98
Sales (2000) / ALLFINE / MEF	27	95
Souza (2010) / DIANA / MEF	31	x
Freitas Neto (2013) / LCPC - CESAR / MEF	28,8	94
PLAXIS - MEF	30	92

Observa-se que mesmo a concepção da fundação sendo em radier estaqueado (bloco em contato com o solo), o pequeno espaçamento relativo entre as estacas (S/D = 3) e a alta resistência da massa de solo, resulta numa rigidez elevada para o estaqueamento. Isto ocasiona numa participação pouco relevante do elemento horizontal no recebimento dos esforços aplicados à fundação.

Ao comparar os resultados de recalques constantes na literatura com o PLAXIS, observa-se boa concordância, em especial na comparação com aqueles obtidos por meio do Método dos Elementos Finitos.

3.3 ASPECTOS GERAIS DA GEOLOGIA LOCAL

A área em estudo está inserida no município de Macau-RN, na região do estuário de Diogo Lopes, e as litoestratigrafias pertencem às unidades da Bacia Potiguar, localizada no extremo nordeste brasileiro, inserida no Estado do Rio Grande do Norte e Ceará. A

região é caracterizada por uma geodinâmica atual marcada pela presença de um sistema de ilhas barreiras, campos dunares e praias arenosas, sujeitados a intensa ação da dinâmica costeira, em que forçantes hidrodinâmicas, eólicas e o arranjo estrutural prévio originam a alta instabilidade das feições morfológicas, evidenciada nas constantes modificações da linha de costa em curtos períodos de tempo (FERREIRA et al., 2014; SANTOS et al., 2014; AMARO et al., 2013; SANTOS & AMARO, 2013).

Segundo Rios *et al* (2016), a modificação da morfologia costeira sofre ainda com a interferência antrópica, como as atividades das indústrias petrolífera, salineira, carcinicultura e parques eólicos que correspondem a atividades socioeconômicas de grande relevância para o RN. A locação do parque eólico abordado nesta pesquisa pode ser visualizada no mapa com as unidades litoestratigráficas da região apresentado na Figura 72.

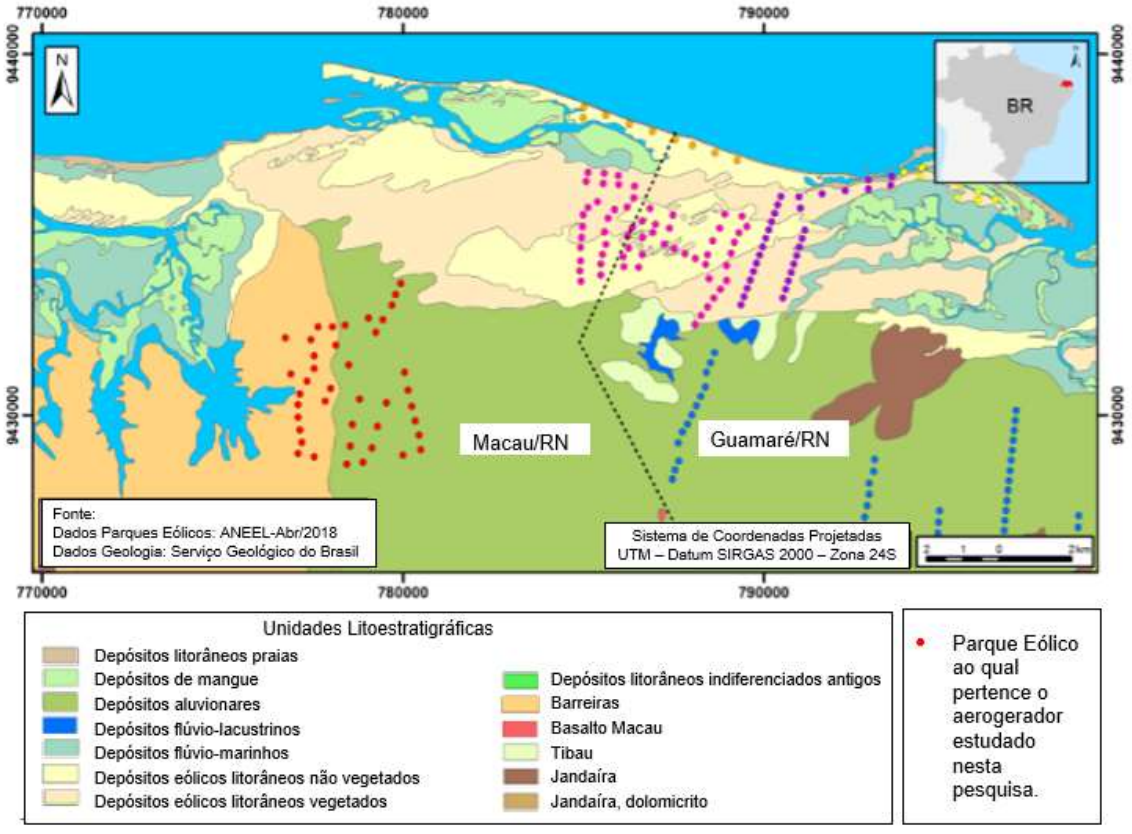


Figura 72 – Mapa Litoestratigráfico da região que contempla o parque eólico abordado nesta pesquisa. Fonte: ANEEL – Abril/2018.

No contexto geológico no qual se insere a área de estudo, no caso a Bacia Potiguar, segundo Rios *et al* (2016), o arcabouço geológico é composto por unidades litológicas do Terciário ao Quaternário, dispostas estratigraficamente da base para o topo em: Formação Tibau, Formação Barreiras e Formação Potengi. A zona costeira constitui-se por sedimentos provenientes dos processos deposicionais contemporâneos, caracterizados como depósitos do Holoceno (aluvional, eólico e marinho), que recobrem as unidades mais antigas ao longo da costa (SILVA & NOGUEIRA, 1995; FARIAS, 1997; STATTEGGER et al., 2006), citado por Rios *et al* (2016).

Segundo Cruz *et al* (2010), a carta litoestratigráfica da Bacia Potiguar atualmente usada foi publicada por Araripe e Feijó em 1994. Estes autores dividiram a Bacia Potiguar em três grupos: Areia Branca, Apodi e Agulha. O Grupo Areia Branca, predominantemente siliciclástico, engloba as formações Pendência, Pescada e Alagamar. O Grupo Apodi, engloba as formações Açu, Ponta do Mel, Jandaíra e Ubarana, exibindo um aumento significativo de rochas carbonáticas. O Grupo Agulha é composto, pelas formações Ubarana, Guamaré, Tibau e Barreiras, de composição siliciclásticas e carbonáticas de alta e baixa energia (ARARIPE e FEIJÓ, 1994), citado por Cruz *et al* (2010).

3.4 DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE TRABALHO

Trata-se de um parque eólico localizado na região litorânea ao norte do Rio Grande do Norte, onde foram executadas treze torres Alstom ECO86 de 80 m de altura, que serão submetidas a oscilações com frequência da ordem de 60 Hz.

A concepção do projeto foi em grupo de estacas. A transferência de carga da torre para as estacas se dá através de um bloco de coroamento circular enterrado, com diâmetro de 14,70m em planta, e altura variável entre 1,50 e 1,80m. A fixação da torre sobre o bloco é feita por meio de parafusos, revestidos por peça cilíndrica de concreto com 3,00m de diâmetro e 1,15m de altura, assente sobre o bloco de coroamento, conforme Figura 73.

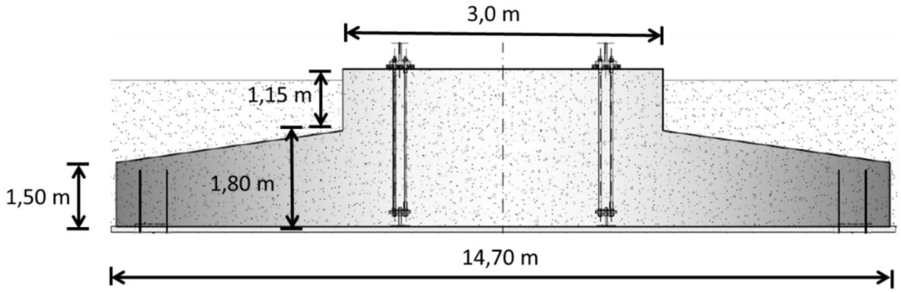


Figura 73 – Desenho esquemático do bloco da fundação (modificado de Maranhão, 2014).

O bloco está assente sobre 24 estacas raiz com 7 metros de comprimento e 350 mm de diâmetro, posicionadas na extremidade do bloco, conforme Figura 74. O raio da circunferência onde as estacas estão posicionadas tem 7 metros e o raio do bloco tem 7,35 metros.

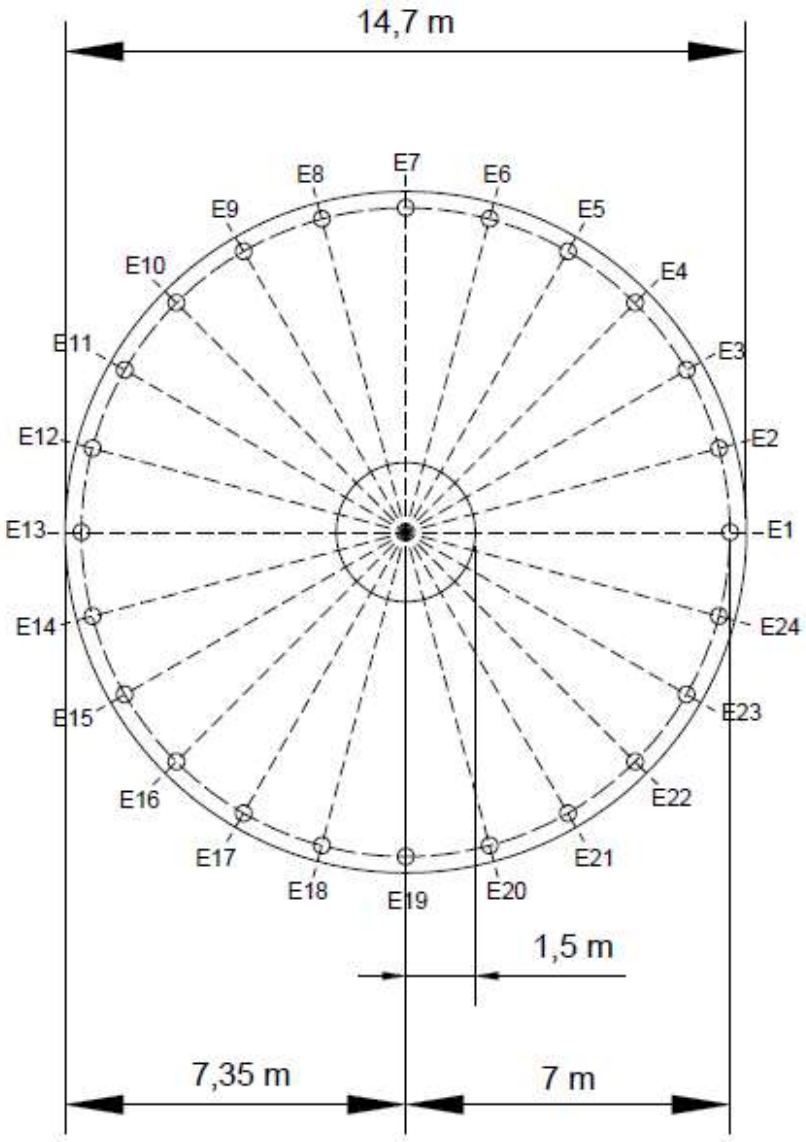


Figura 74 – Vista em planta do radier estaqueado.

Os valores das cargas máximas atuantes na fundação devido à estrutura do aerogerador e em função dos cenários de carregamento operacional e extremo estão apresentados na Tabela 13. O peso próprio do bloco e o peso do aterro sobre o mesmo não estão contabilizados na tabela abaixo.

Tabela 13 - Cargas atuantes na fundação devido à estrutura do aerogerador.

Cenário de cargas	Operacionais	Extremas
Carga Vertical (kN)	2.417	2.478
Carga Horizontal (kN)	376	620
Momento (kN)	26.918	45.066

O peso próprio do bloco é de 6.943,6 kN, e o aterro sobre o bloco de 1.996,7 kN. Foi considerado um peso específico de 24 kN/m^3 para o concreto e 16 kN/m^3 para o aterro, conforme especificações do projetista.

Foram disponibilizados para as análises os resultados de 6 furos de sondagem a percussão realizadas na área de assentamento de duas das bases de aerogeradores do parque eólico, os aerogeradores 9 e 13. A Figura 75 apresenta os índices de resistência à penetração de cada um deles. O perfil geotécnico típico, com base nessas 6 sondagens, pode ser descrito conforme a Figura 76. As 6 sondagens a percussão que foram disponibilizadas para as análises realizadas nesta pesquisa estão apresentadas no Anexo A desta dissertação. O perfil apresenta inicialmente uma camada de areia siltosa, plástica, fofa, com espessura média de 3m, seguido por uma camada de arenito consolidado pertencente à Formação Barreiras, pouco plástico, de cor variegada, muito compacto, apresentando concreções por oxidação (ferruginosa) até o limite das sondagens (impenetrável a percussão). Não foi identificado nível d´água.

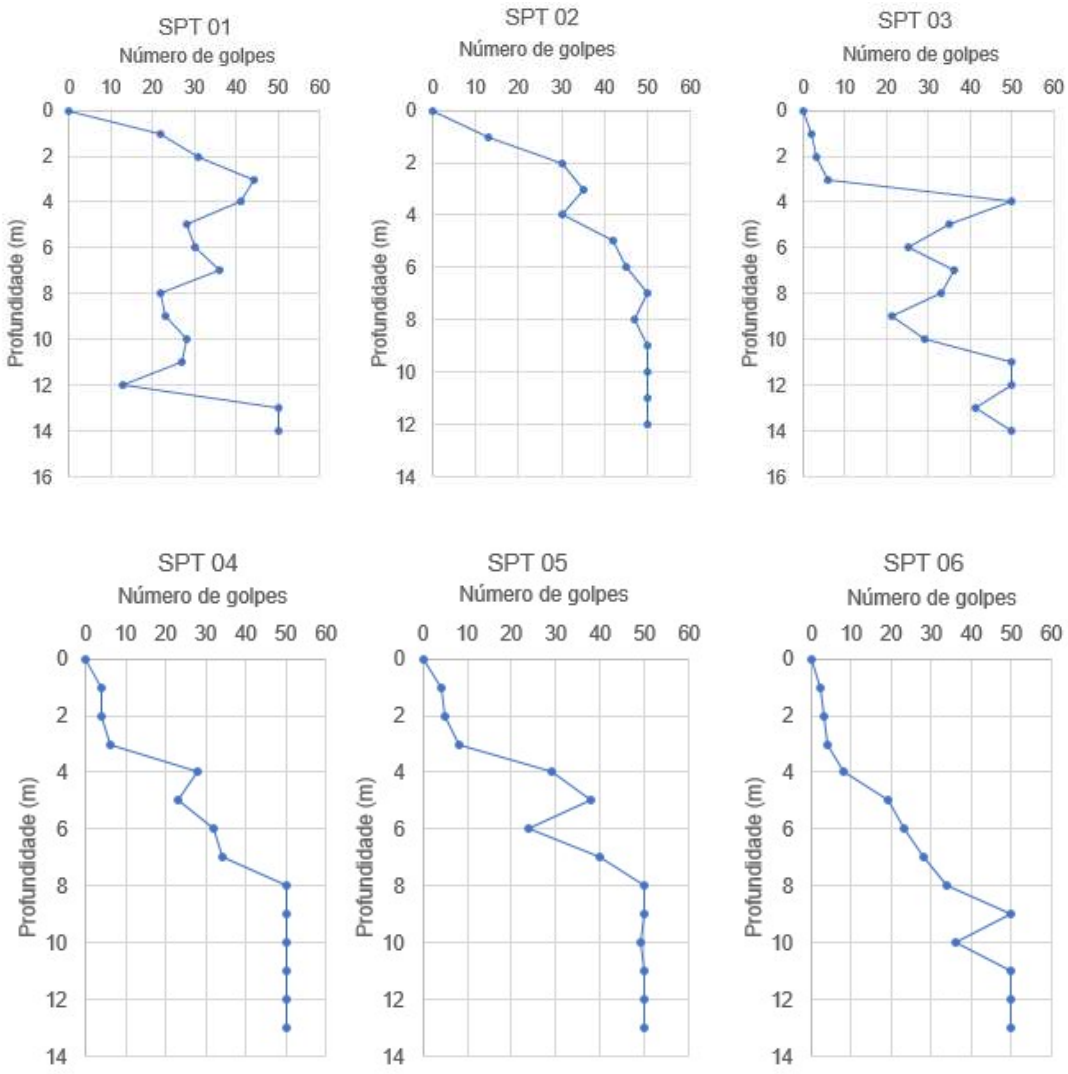


Figura 75 – Índice de resistência à penetração dos 6 furos de sondagens disponibilizados para esta dissertação.

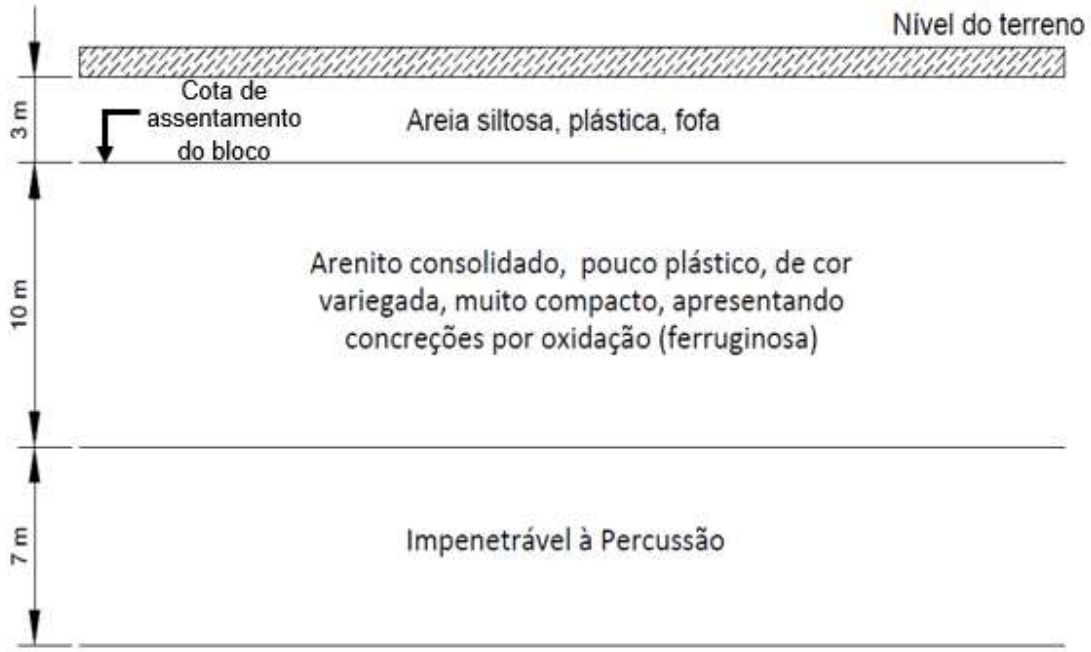


Figura 76 – Perfil geológico simplificado da área onde foi executada a fundação em estudo.

Foi realizada uma prospecção geotécnica complementar através da técnica de eletro-resistividade com o objetivo foi identificar formações carbonáticas e/ou calcarenitos de matriz arenosa, que pudessem esconder cavidades e pequenas cavernas. Esse estudo foi feito em 10 pontos e abrangeu uma área significativa da região centro-sul do parque eólico. Os resultados mostraram indícios de resistivos profundos teoricamente relacionados com a presença de unidade “carbonáticas” em 6 das 10 seções, porém a possível ocorrência de cavidade foi observada em apenas 3 seções, cada uma em uma base distinta de aerogerador.

Para dirimir tais dúvidas sobre a presença de cavidade no subsolo, foi realizada uma sondagem rotativa até 31m de profundidade no local de uma das seções e não foram encontradas variações de velocidade de avanço da perfuração que indicassem a presença de cavidade. A Tabela 14 apresenta a descrição do material encontrado, não tendo sido encontrado o nível d´água. Com base nesses resultados concluiu-se ser

remota a possibilidade de haver cavidades que pudessem afetar o desempenho da fundação dos aerogeradores.

Tabela 14 – Descrição do material obtido através da sondagem rotativa realizada no Parque Eólico.

Profundidade (m)	**Descrição do material obtido através da sondagem rotativa**
0,0 - 7,0	Argila Silto Arenosa, vermelha clara variegada, com pedregulhos (seixos).
7,0 - 11,5	Silte Arenoso, amarelo claro, com pedregulhos.
11,5 - 20,5	Argila Silto Arenosa, vermelha clara, variegada, com pedregulhos.
20,5 - 28,0	Silte Arenoso, amarelo claro, com pedregulhos (cascalhos).
28,0 - 31,0	Areia Argilosa, cinza escura, com pedregulhos.

Para a verificação do desempenho das estacas, foram realizadas 04 provas de carga estática (PCE) em estacas posicionadas na área das bases dos aerogeradores 9 e 13, a PCE1 e PCE2 (provas de carga 1 e 2) no aerogerador 9 (AGE09) e as PCE3 e PCE4 (provas de carga 3 e 4) no aerogerador 13 (AGE13). A Figura 77 apresenta os resultados deste ensaio através das curvas carga-recalque.

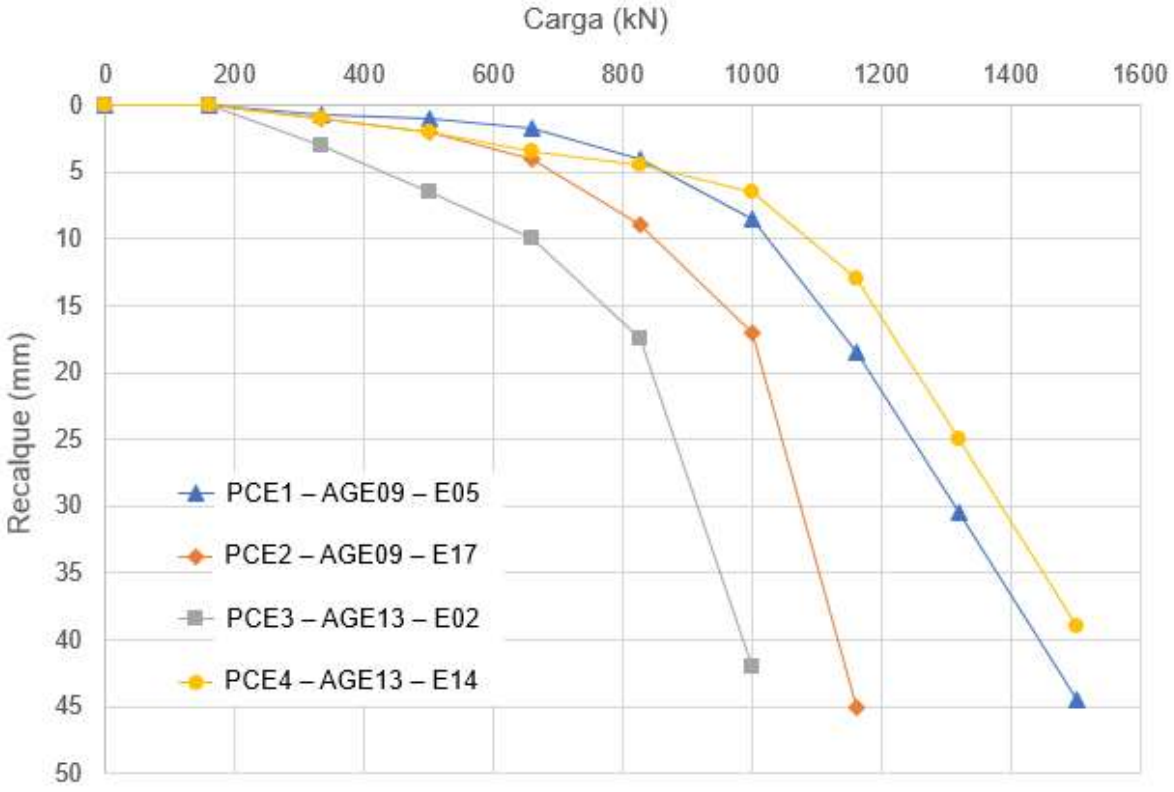


Figura 77 – Resultados das Provas de Carga Estática.

A carga de ruptura das estacas foi convencionada, com base no critério de ruptura de Terzaghi (1942), que considera a capacidade de carga como a carga correspondente a um recalque de 10% o diâmetro da estaca. No caso, as estacas apresentam um diâmetro de 350mm e, verificando a Figura 54 acima, observa-se que para um recalque de 35mm, as provas de carga PCE1, PCE2, PCE3 e PCE4 apresentaram cargas de ruptura e respectivas capacidade de carga apresentadas na Tabela 15. Para a carga admissível foi adotado o fator de segurança global de 2 para as estacas, adotado para fundação profunda dimensionada como grupo de estacas. No cenário de cargas extremas, admitiu-se uma majoração da carga admissível das estacas em até 30% em relação ao cenário de cargas operacionais, sendo os valores limites para este cenário também apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Carga de Ruptura, Carga Admissível e Carga Extrema, com base nos ensaios de campo.

Provas de Carga	Carga de Ruptura Convencionada (kN)	Carga Admissível (kN)	Carga Extrema (kN)
PCE1	1.384	692	900
PCE2	1.104	552	718
PCE3	952	476	619
PCE4	1.460	730	949
Média	1.244	622	809
Desvio Padrão	238	119	155
Coeficiente de variação	19%	19%	19%

Observa-se que a carga de ruptura varia de 952 a 1.460 kN, com média de 1.225 kN, desvio-padrão de 238 kN, e coeficiente de variação igual a 19%. Pode-se verificar uma grande dispersão dos valores, que não é compatível com a relativa uniformidade observada nas sondagens, ou seja, a dispersão deve estar relacionada à execução das estacas.

No projeto original do estaqueamento o diâmetro da estaca raiz seria de 410mm de fuste e ponta com 310mm de diâmetro em camada resistente. Porém, durante a execução das estacas raiz, deparou-se com a dificuldade de cravação do tubo de revestimento quando o mesmo encontrava camada resistente entre 3 e 4 m de profundidade medida a partir do terreno. Esta dificuldade também ocorreu mesmo quando o avanço da execução foi realizado com martelo de fundo. A escavação passou então a ser feita por dentro do revestimento com ferramenta própria e o diâmetro da estaca foi reduzido para 350 mm. Todas as estacas raiz foram executadas dessa maneira.

3.5 RETROANÁLISE DAS PROVAS DE CARGA

Para obtenção dos parâmetros a serem utilizados na modelagem numérica da fundação, realizou-se a retroanálise dos ensaios de prova de carga estática realizados em campo.

Os parâmetros de coesão, ângulo de atrito e módulo de elasticidade, adotados para dar início à retroanálise foram estimados com base nas correlações com os valores de N_{SPT} apresentadas nas Equações 5, 6 e 7:

$c = 10. N_{SPT}$ (kPa), (Teixeira e Godoy, 1996) (5)

$\phi = 28º + 0,4. N_{SPT}$ (Godoy, 1983) (6)

$E = 3. K. N_{SPT}$ (para estacas escavadas), (Aoki, 1984) (7)

onde K é o coeficiente empírico do método Aoki-Velloso (1975), função do tipo de solo, conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Coeficiente K (Aoki e Velloso, 1975) citado por Velloso e Lopes (2010).

Solo	**K (MPa)**
Areia	1,00
Areia Siltosa	0,80
Areia siltoargilosa	0,70
Areia argilosa	0,60
Areia argilosiltosa	0,50
Silte	0,40
Silte argiloso	0,55
Silte arenoargiloso	0,45
Silte argiloso	0,23
Silte argiloarenoso	0,25
Argila	0,20
Argila arenosa	0,35
Argila arenosiltosa	0,30
Argila siltosa	0,22
Argila siltoarenosa	0,33

Para o coeficiente de Poisson, tomou-se por base os valores típicos apresentados por Teixeira e Godoy (1996), que são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Coeficiente Poisson (Teixeira e Godoy, 1996) citado por Cintra et al. (2011).

Solo	**v**
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3 – 0,5
Argila saturada	0,4 – 0,5
Argila não saturada	0,1 – 0,3

No caso do peso específico de solos arenosos foram adotados os valores propostos por Godoy (1972) apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Peso específico de solos arenosos (Godoy, 1972) citado por Cintra et al. (2011).

N_{SPT}	**Compacidade**	**Peso específico (kN/m^3)**		
		Areia seca	**Úmida**	**Saturada**
< 5	Fofa	16	18	19
5 - 8	Pouco Compacta			
9 - 18	Medianamente Compacta	17	19	20
19 - 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito Compacta			

Com base nas proposições para os parâmetros apresentadas acima, a retroanálise foi iniciada com os seguintes parâmetros, conforme consta no perfil apresentado na Figura 78.

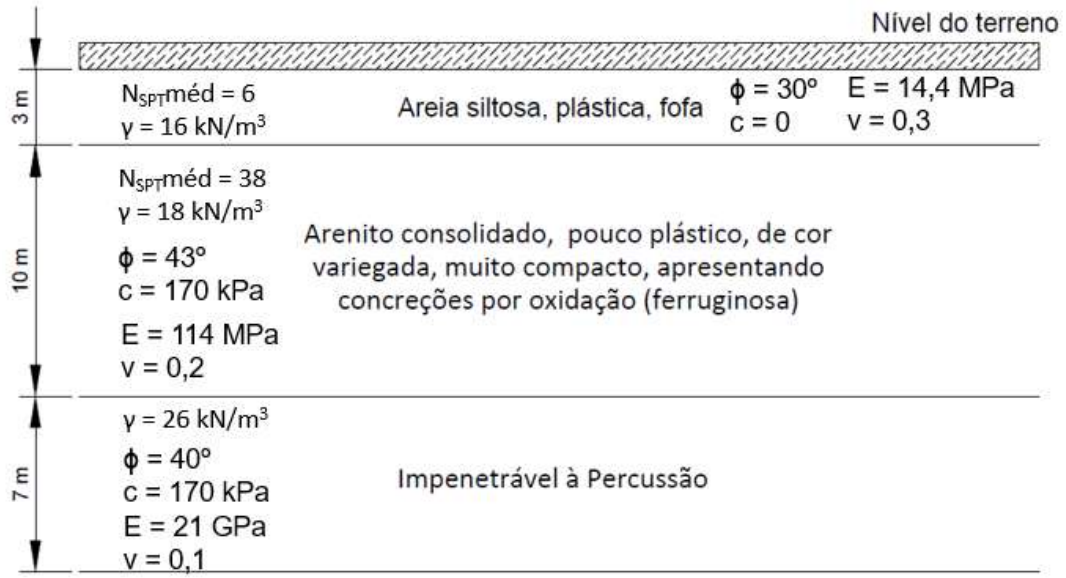


Figura 78 – Parâmetros do perfil adotados para dar início à retroanálise.

Cabe destacar que em uma retroanálise, principalmente em casos onde vários parâmetros variáveis estão relacionados, podem estar envolvidos vários erros. Uma grande quantidade de combinações é possível, e a combinação escolhida não necessariamente irá representar os parâmetros reais do solo. Contudo, se busca obter um conjunto de parâmetros que, juntos, reflitam um comportamento de rigidez compatível com o valor verificado através dos ensaios de prova de carga realizados em campo e que deram origem às curvas carga-recalque.

Observou-se que os parâmetros obtidos da retroanálise do ensaio PCE3, quando utilizados na modelagem do radier estaqueado, provocavam uma distribuição de esforços onde as estacas recebiam mais carga do que quando utilizamos os parâmetros da retroanálise de uma curva com comportamento intermediário entre as obtidas dos ensaios de campo. Para ambos os casos, o radier estava responsável por transmitir um maior percentual de carregamento, quando comparado com o percentual transmitido pelas estacas, em decorrência da elevada rigidez do terreno e da grande área de contato deste com o radier.

Num primeiro momento se pensou que um comportamento solo/estaca com maior rigidez (curva intermediária) provocaria um rateio onde as estacas receberiam um maior percentual de carga do que no caso da modelagem com os parâmetros da curva de menor rigidez (PCE3). Mas isto não foi observado, visto que estes mesmos parâmetros que conferem uma maior rigidez ao sistema solo/estaca, também proporcionam uma maior rigidez para deformação do radier, fazendo com que ele absorva um maior carregamento, aliviando a carga nas estacas.

Desta forma, visando uma análise que minimizasse a participação do bloco, não considerado no projeto como elemento transmissor de carga, e maximizasse a carga de trabalho da estaca, para saber se essa atendia aos critérios de capacidade de carga, definiu-se trabalhar com os parâmetros da curva com menor rigidez, no caso a PCE3. Assim, pode-se verificar a participação do radier no rateio de esforços num cenário menos favorável para sua atuação, podendo observar se, mesmo assim, sua contribuição seria representativa.

Na modelagem, para o meio geotécnico, foi considerado um modelo de comportamento não linear, com critério de ruptura de Mohr-Coulomb, enquanto que para o material da estaca adotou-se o modelo linear elástico. Os parâmetros necessários para a modelagem foram o peso especifico, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coesão, ângulo de atrito, dilatância e o coeficiente de interface entre o solo e o concreto.

Para a retroanálise da prova de carga não foi considerada a primeira camada de Areia Siltosa, com 3 metros de espessura, apresentada no perfil típico da área do parque eólico. Como a altura do bloco da fundação tem 2,95 metros de altura, o elemento da estaca vai estar instalado na camada de arenito consolidado, que apresentou em média 10 metros de espessura. Desta forma, a modelagem foi realizada considerando o terreno arrasado nesta profundidade da altura do bloco que, para efeitos de modelagem, foi arredondada para 3 metros. Para representar o impenetrável, registrado no final nas sondagens, foi considerado um material com parâmetros que caracterizem uma elevada rigidez, com uma espessura de 7 metros, adotando para a modelagem um domínio vertical de 2,4 vezes o comprimento da estaca. O domínio horizontal adotado na

modelagem foi igual a 3 vezes o comprimento da estaca para cada lado, ou seja, 21m. A Figura 79 apresenta os parâmetros geométricos considerados na retroanálise da prova de carga.

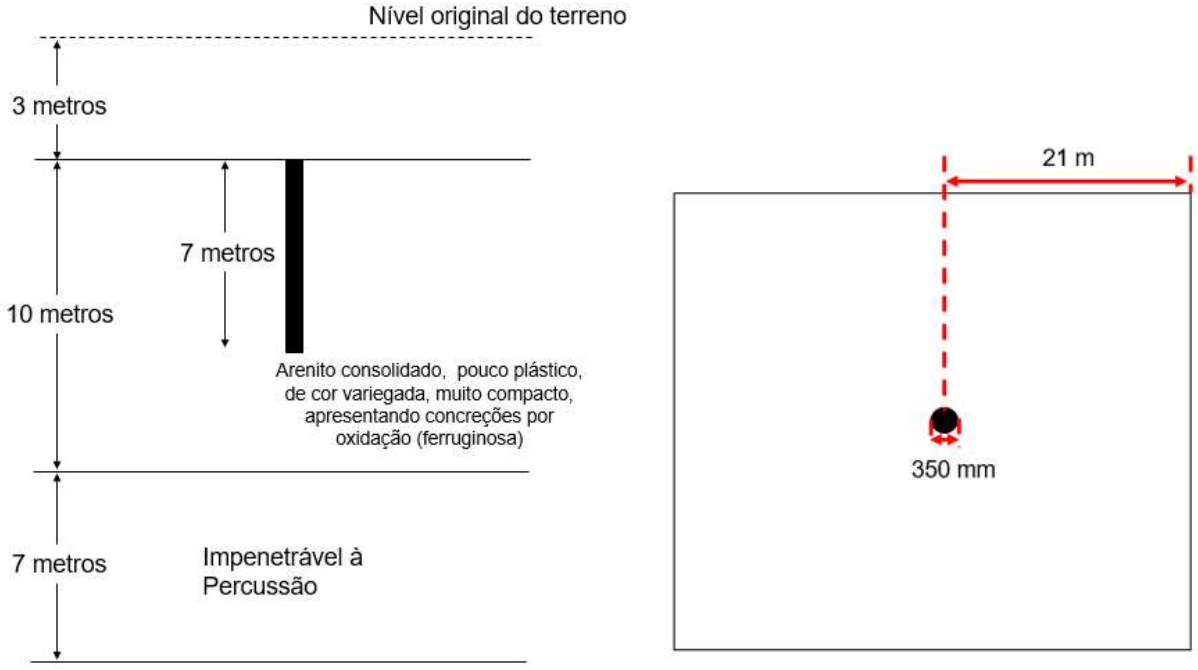


Figura 79 – Premissas geométricas adotadas na retroanálise da prova de carga: (a) vista em perfil; (b) vista em planta.

Com relação ao carregamento adotado na retroanálise, utilizou-se a carga máxima aplicada nos ensaios da prova de carga, 1.500 kN, conforme observado no gráfico da Figura 54 que apresenta os resultados das provas de carga. Este carregamento foi aplicado de forma uniformemente distribuída na cabeça da estaca de 350mm de diâmetro, resultando uma tensão vertical igual a 15.591 kN/m^2. A Tabela 19 resume os parâmetros geométricos e de carregamento considerados na retroanálise da prova de carga.

Tabela 19 - Parâmetros geométricos e de carregamento adotados na modelagem da prova de carga.

D(m)	A_p (m²)	L(m)	H/L	B
0,35	0,09621	7	2,4	3.L
Domínio Vertical H (m)	**Domínio Horizontal B (m)**		**Carga (kN)**	**Tensão (kN/m²)**
17	21		1.500	15.591

D – diâmetro da estaca; A_p – Área da seção transversal da estaca; L – comprimento da estaca; B – Domínio horizontal; H – Domínio vertical.

Com relação aos parâmetros geotécnicos para a camada que representa o impenetrável, bem como os parâmetros do elemento estrutural da estaca, a Tabela 20 apresenta os valores adotados na modelagem.

Tabela 20 - Parâmetros adotados para a modelagem para a estaca e o impenetrável.

Material	ɣ (kN/m³)	Es (kN/m²)	ν	c (kPa)	ϕ (º)
Impenetrável	26	21.000.000	0,1	170	40
Estaca	24	21.000.000	0,2	-	-

ɣ - peso específico; Es – módulo de elasticidade; ν – coeficiente de Poisson; c – coesão; ϕ - ângulo de atrito.

Definidos os domínios horizontal e vertical, bem como os parâmetros do impenetrável e da estaca, a retroanálise foi realizada variando individualmente cada um dos parâmetros da camada de arenito até obter uma curva carga-recalque aproximada da obtida através da prova de carga PCE3. A importância em realizar várias modelagens, alterando os parâmetros do arenito um a um foi verificar a influência de cada um deles no formato da curva carga-recalque. A Figura 80 apresenta a curva carga-recalque dos ensaios de prova de carga, bem como a curva obtida através da retroanálise da curva PCE3.

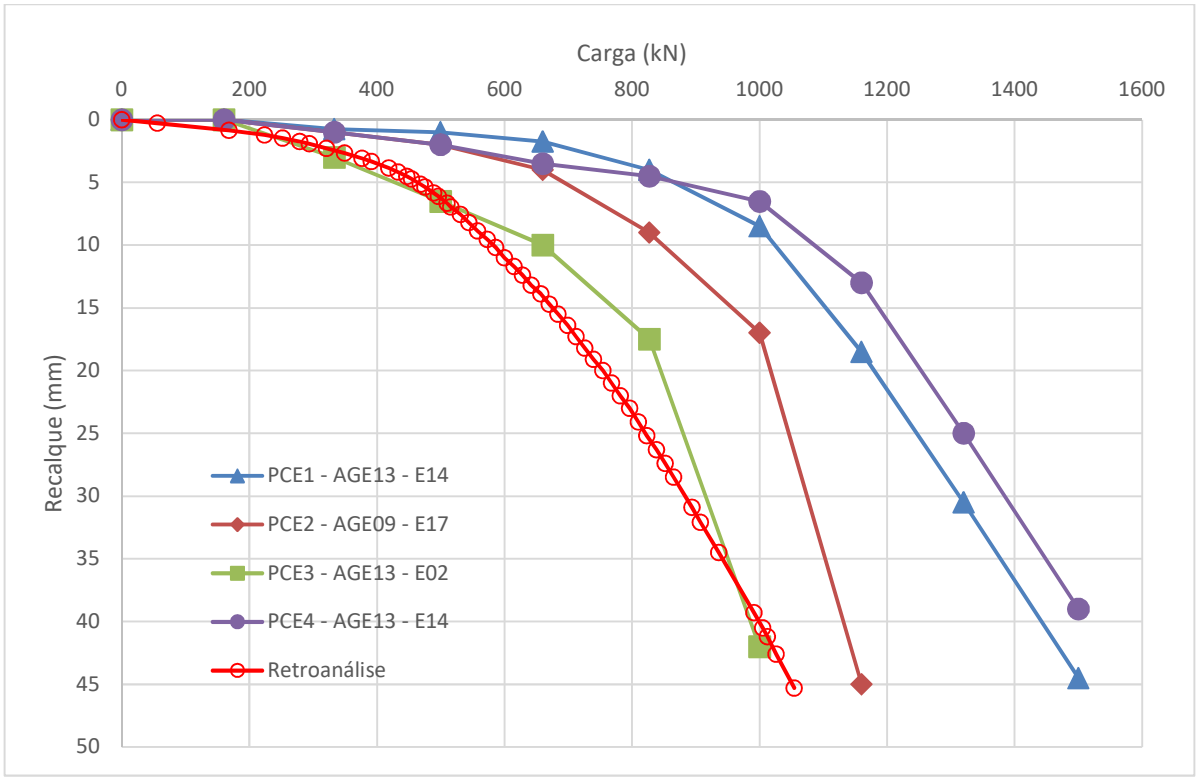


Figura 80 – Resultado da retroanálise da prova de carga PC3 e dos ensaios de prova de carga, PC1, PC2, PC3 e PC4.

Os parâmetros obtidos para a camada de arenito através da retroanálise, bem como os demais parâmetros a serem adotados na modelagem numérica da fundação, estão apresentados na Tabela 21. Foi considerado para os 3 metros iniciais, correspondente à camada de Areia Siltosa, parâmetros de aterro compactado, em decorrência da necessidade de escavação desta camada para execução do bloco da fundação.

Tabela 21 - Parâmetros finais a serem utilizados na modelagem da fundação.

Material	γ (kN/m^3)	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (º)	R_{inter}
Aterro	19	20	0,3	0	35	0,67
Arenito consolidado	26	65	0,2	20	36	0,67
Impenetrável	26	21.000	0,1	170	40	1
Estaca	24	21.000	0,2	-	-	0,67

γ - peso específico; E – módulo de elasticidade; ν – coeficiente de Poisson; c – coesão; ϕ - ângulo de atrito; R_{inter} – coeficiente de adesão entre solo e estaca.

Na retroanálise foi definida uma malha de elementos finitos muito fina, conforme classificação do programa, composta por 8.932 elementos e 25.871 nós, que pode ser visualizada na Figura 81.

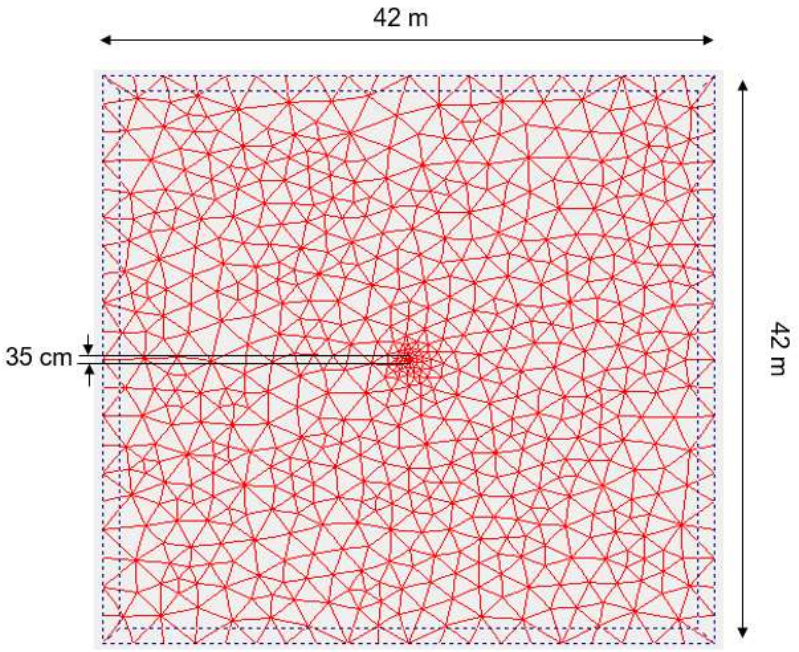
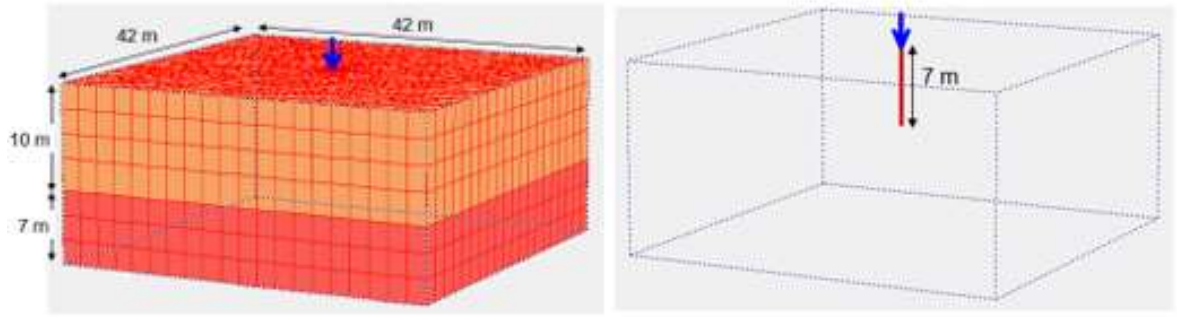


Figura 81 – Malha de elementos finitos utilizada para modelagem da retroanálise da PCE3.

Apresenta-se a seguir algumas imagens que possibilitam uma melhor visualização da modelagem realizada para a PCE3. A Figura 82(a) apresenta uma imagem 3D da

camada de arenito seguida da camada que representa o impenetrável e a tensão aplicada na cabeça da estaca. A Figura 82(b) apresenta a mesma figura sendo que com a representação do elemento geotécnico ocultado para que se possa visualizar a estaca.



(a) (b)

Figura 82 – (a) vista do perfil geotécnico e do carregamento aplicado na estaca; (b) vista da estaca e do carregamento aplicado na estaca.

Foram selecionadas algumas imagens obtidas através da modelagem da retroanálise da prova de carga PCE3. Na Figura 83 pode-se verificar a deformação vertical provocada pelo carregamento da estaca. O elemento estrutural, por ter elevada rigidez, apresenta o mesmo deslocamento em sua integralidade, sendo este elemento submetido ao maior deslocamento, seguido do solo na proximidade da ponta da estaca.

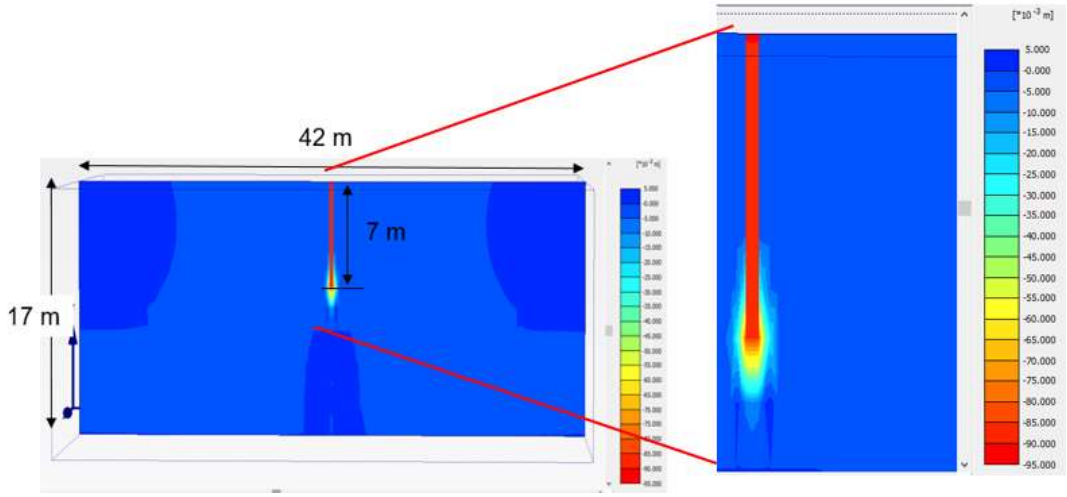


Figura 83 – Deformação vertical provocada pelo carregamento aplicado na superfície na área da seção transversal da estaca.

A Figura 84 apresenta a tensão ao longo do elemento estrutural da estaca e a Figura 85 apresenta a tensão atuante na seção da estaca em sua superfície. Observa-se que o esforço vai sendo dissipado ao longo do elemento estrutural da estaca, reduzindo até atingir a ponta da estaca.

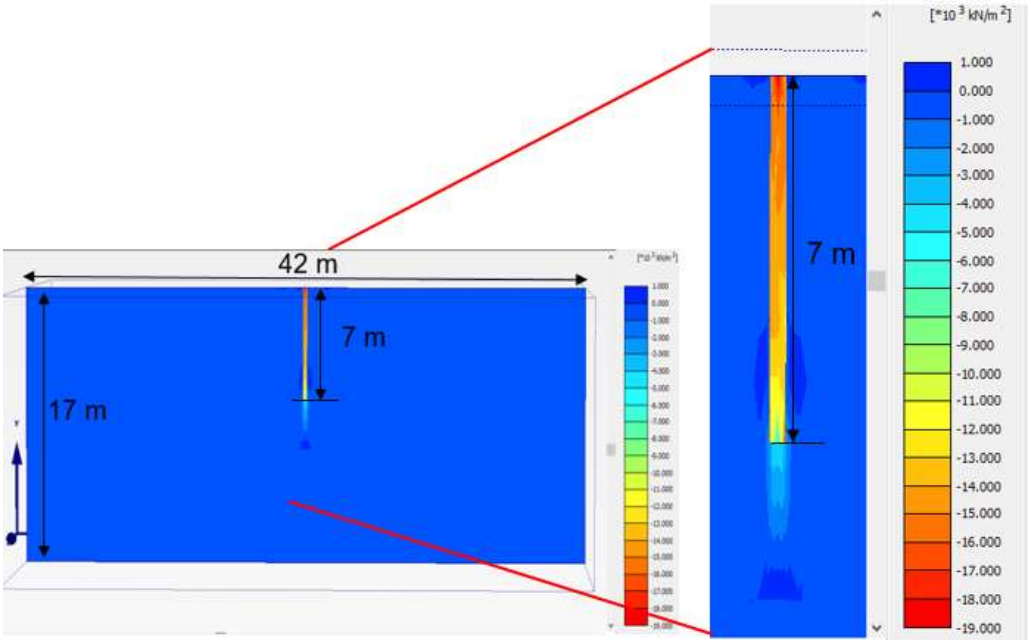


Figura 84 – Tensão propagada ao longo do comprimento da estaca em decorrência do esforço aplicado na superfície, na seção transversal da estaca.

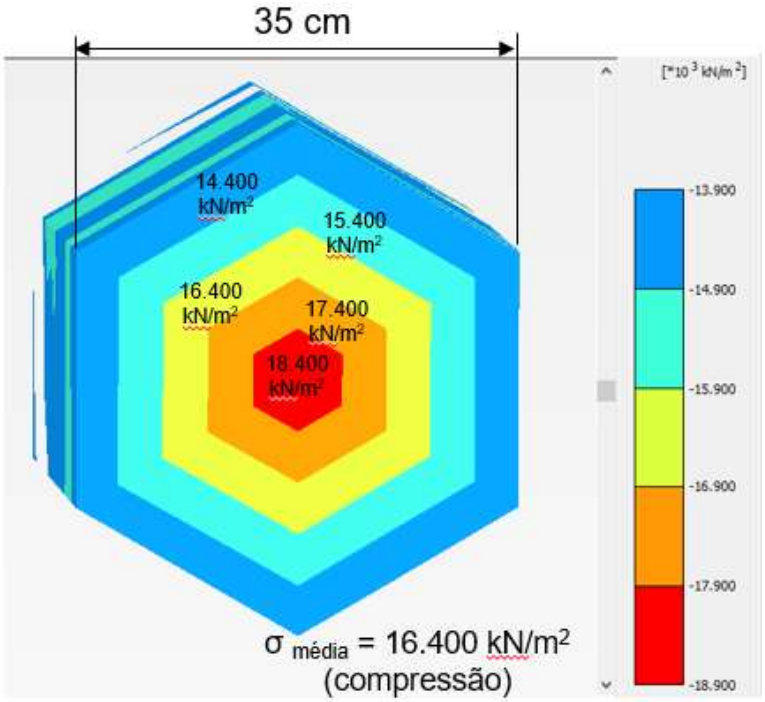


Figura 85 – Tensão na seção da estaca localizada na superfície do terreno.

3.6 MODELAGEM DA FUNDAÇÃO DA BASE DO AEROGERADOR

O projeto de fundação da base do aerogerador, objeto de estudo desta pesquisa, foi concebido para uma solução convencional de fundação profunda, onde todo o carregamento da base é integralmente transmitido ao solo por meio das estacas, ou seja, não há transferência de carga ao terreno através do bloco/radier como fundação superficial.

Com base nos parâmetros obtidos através da retroanálise da prova de carga, será analisada através da modelagem numérica como acontece a transferência de carga quando é considerado o contato existente entre o bloco de coroamento das estacas e o solo, bem como os estados limites último e de serviço.

Para modelagem da fundação executada na obra deste estudo de caso, algumas considerações foram adotadas, conforme apresenta-se nos itens subsequentes.

3.6.1 Domínio do problema

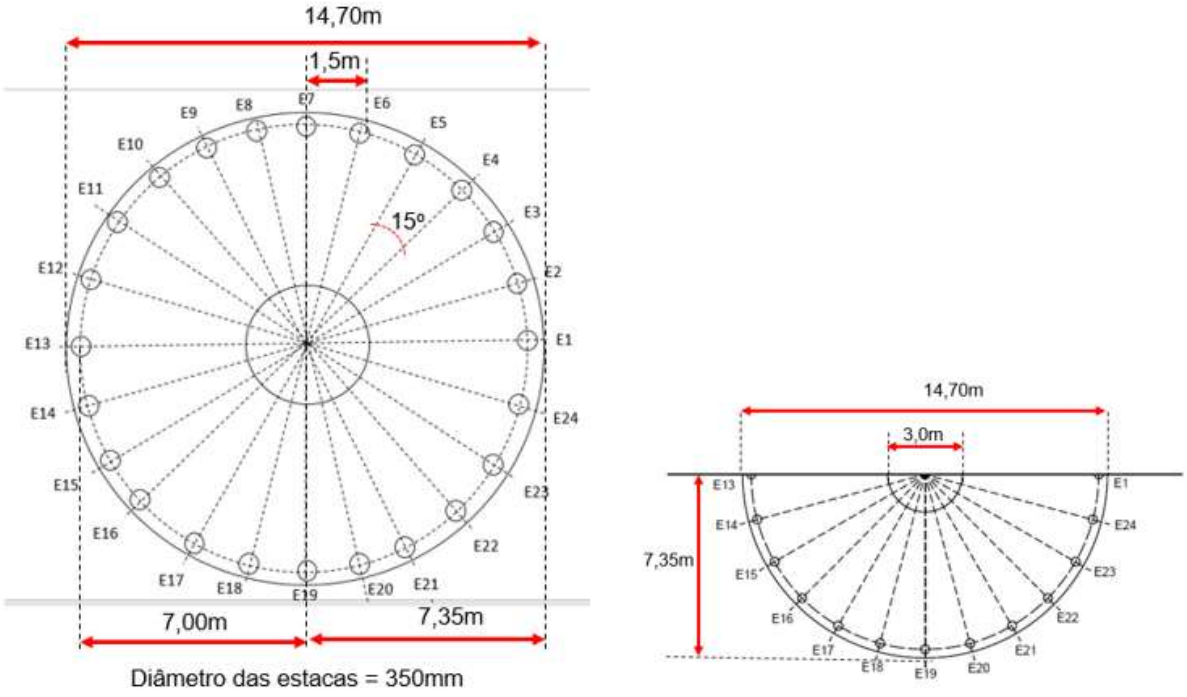
Para a modelagem foram adotados limites de contorno de forma a garantir que toda a deformação decorrente do carregamento aplicado estivesse contemplada dentro dos limites definidos, sem que houvesse nenhuma interferência de restrição de deslocamento imposta pelos limites de contorno do problema. Para isto, tomou-se como base as relações existentes na literatura e verificou-se se estas eram suficientes para abranger o bulbo de tensões do estudo de caso ora apresentado. A Tabela 22 apresenta os domínios considerados na modelagem numérica.

Tabela 22 - Domínios adotados para modelagem numérica.

R_R (m)	Domínio Horizontal	Domínio Horizontal (m)	L (m)	H/L	Domínio Vertical (H) (m)
7,35	$4.R_R$	30	7	2,4	17

R_R – raio do radier; L – comprimento da estaca.

Primeiramente se tentou modelar o bloco inteiro, porém, o software, para o refino de malha adotado, não habilitava a inclusão de todos os elementos contemplados no problema, limitando o cadastro de todas as estacas. O estudo de caso é constituído de um bloco com 14,7 m de diâmetro e 24 estacas com 350 mm de diâmetro e 7 m de comprimento. O raio da circunferência onde as estacas estão posicionadas tem 7 metros e o raio do bloco tem 7,35 metros. A versão do programa, para o refino adotado, limitava a inclusão de no máximo 20 estacas. Por esta razão, decidiu-se fazer uso da simetria, geométrica e de carregamento, apresentada pelo problema ao modelar a metade da fundação ao longo do seu eixo de simetria. A Figura 86 apresenta a vista em planta do bloco de fundação executado em campo e sua representação na modelagem numérica. As Figuras 87 e 88 apresentam os domínios geométricos adotados na modelagem.



(a) (b)

Figura 86 – (a) Vista em planta do bloco de fundação executado em campo com 24 estacas; (b) Corte do bloco considerado na modelagem numérica, definido conforme eixo de simetria geométrico e de carregamento.

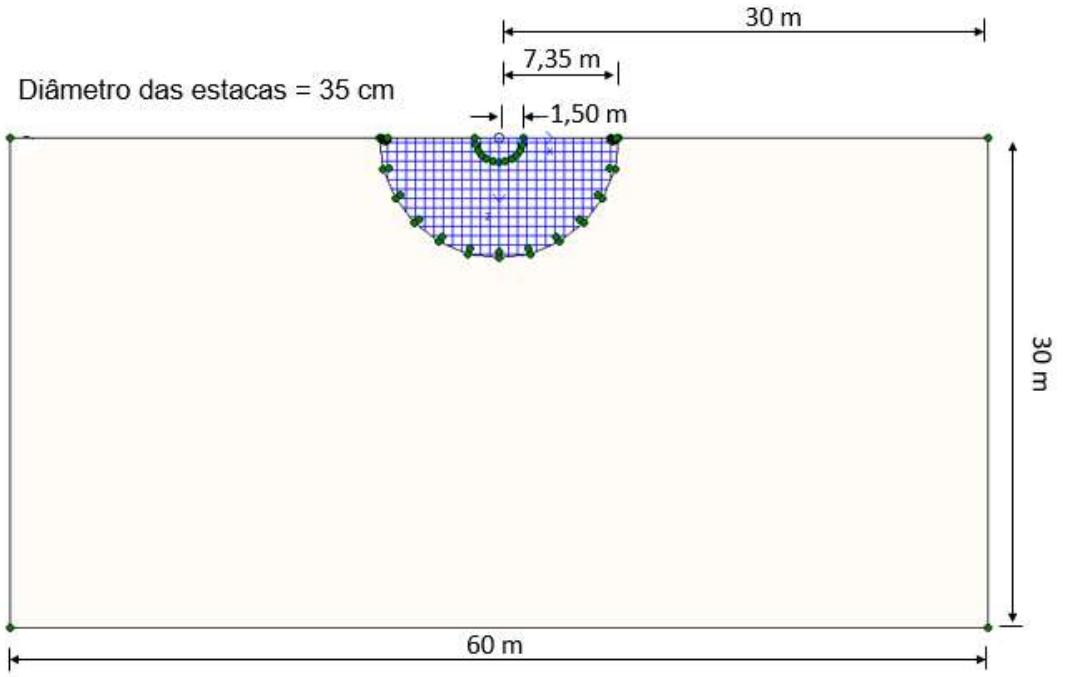


Figura 87 – Domínio horizontal adotado para a modelagem do radier estaqueado.

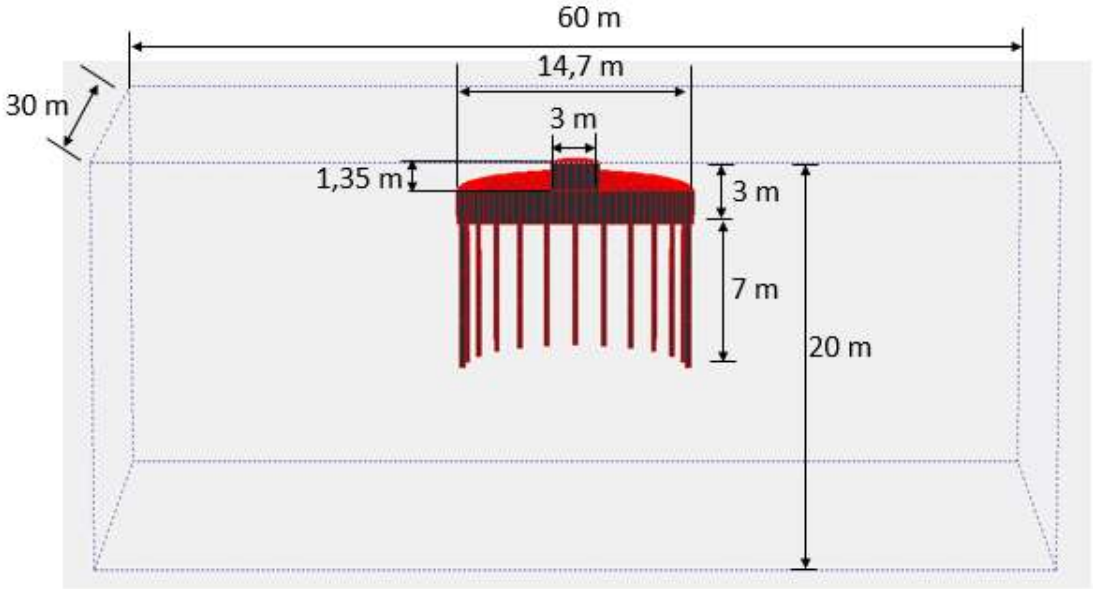


Figura 88 – Domínio vertical adotado para a modelagem do radier estaqueado.

3.6.2 Geometria da fundação e aplicação do carregamento

Conforme informações de projeto, a transferência de carga da torre para a fundação se dá através de um bloco de coroamento circular enterrado, com diâmetro de 14,70m em planta, e altura variável entre 1,50 e 1,80m. A fixação da torre sobre o bloco é feita por meio de parafusos revestidos por peça cilíndrica de concreto com 3,00m de diâmetro e 1,15m de altura, assente sobre o bloco de coroamento. Para efeito de modelamento numérico, considerou-se que o bloco apresentava uma altura constante igual ao valor médio entre a altura máxima e mínima de 1,80 e 1,50, respectivamente, resultando uma altura média igual a 1,65 m. Para cota de assentamento do bloco foi adotada a mesma como 3,00m. A Figura 89 apresenta o bloco executado no parque eólico e o bloco modelado.

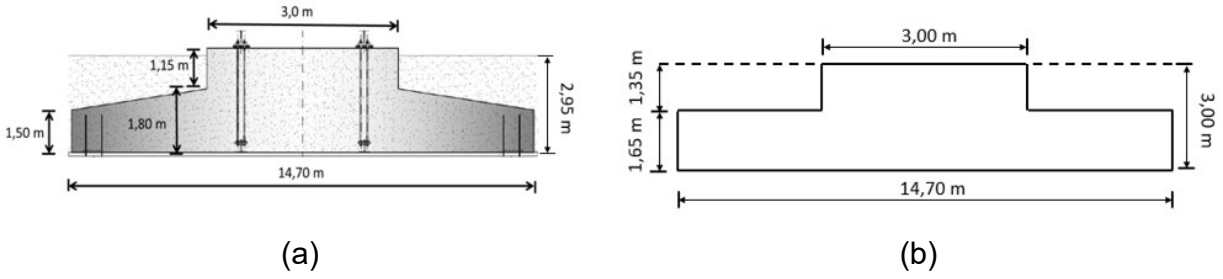


Figura 89 – (a) bloco de coroamento executado na obra; (b) bloco de coroamento adotado na modelagem numérica.

Considerando que o carregamento transmitido à fundação é composto pelos esforços aplicados pela torre, acrescido dos esforços decorrentes do peso do bloco e do solo, foram consideradas duas profundidades para transferência de esforços. A transferência do carregamento da torre, conforme descrito no projeto, ocorre através dos parafusos que são revestidos por um cilindro com 3,00m de diâmetro que se conecta ao bloco. Conforme modelagem, essa conexão acontece na profundidade de 1,35m. No caso dos esforços aplicados à fundação decorrentes do peso do bloco e do solo, estes tiveram sua aplicação considerada na cota de assentamento do bloco, na área delimitada pelo bloco com 14,7 m de diâmetro. Destaca-se que o peso do bloco e do solo, representam 78,5% da carga vertical total atuante na fundação, sendo o momento

aplicado pelo aerogerador o esforço de maior relevância. A Tabela 23 apresenta os esforços atuantes com seus respectivos pontos de aplicação.

Tabela 23 - Esforços atuantes na fundação.

Cenário de Cargas	**Carga Vertical aerogerador (kN)**	**Carga Vertical peso bloco e solo (kN)**	**Carga Horizontal aerogerador (kN)**	**Momento aerogerador (kN.m)**
Operacionais	2.417,0	8.940,3	376,0	26.918,0
Extremas	2.478,0	8.940,3	622,0	45.066,0
Ponto de aplicação	Contato entre a torre e o bloco (cota -1,35m)	Contato entre o bloco e o solo (cota -3,0m)	Contato entre a torre e o bloco (cota -1,35m)	Contato entre a torre e o bloco (cota -1,35)

Na modelagem do carregamento vertical e horizontal, estes foram considerados como uma tensão uniformemente distribuída. Os esforços da torre foram considerados na área onde ocorre a conexão da torre com o bloco, que corresponde a uma área circular com 3 metros de diâmetro na posição central do bloco. O carregamento correspondente ao peso, foi considerado também como uma tensão uniformemente distribuída na área de contato entre o bloco e o solo, correspondente a uma área circular com 14,7 metros de diâmetro, na cota de assentamento do bloco. O momento aplicado pela torre foi modelado através da aplicação de pares binários na circunferência que delimita a conexão da torre com o bloco.

Os esforços considerados nas simulações numéricas foram os esforços extremos. A escolha deve-se ao fato de se tratar de uma estrutura esbelta na qual os esforços verticais sofrem pouca variação entre os cenários operacionais e extremos, apenas 2,5% de acréscimo, enquanto os momentos aumentam 67,4% de um cenário para outro. Esses momentos, quando relacionados com as distorções angulares por eles provocadas, resultam num indicador importante de segurança, a Rigidez Rotacional da fundação, que deve atender a um limitador com valor mínimo definido pelo fabricante da torre. Para a torre em questão, a Rigidez Rotacional não pode ser inferior à 61 GN.m/rad, conforme documento disponibilizado pelo fabricante ao calculista da fundação.

A Tabela 24 apresenta os esforços convertidos em tensão com suas respectivas regiões de atuação. No caso dos esforços de momento atuantes na fundação, por não ser possível o lançamento direto do momento fletor no software utilizado, este esforço foi considerado através de pares binários, ou seja, pares de forças com uma certa distância resultando no valor de momento extremo atuante, conforme apresentado na Tabela 25. A Figura 90 apresenta um desenho esquemático de forças e momento atuante e na Figura 91 pode-se visualizar esses esforços convertidos em tensões uniformemente distribuídas e pares binários. Observa-se que na cota -1,35 onde ocorre a ligação da torre com o bloco de fundação, é representada a tensão resultante entre a tensão vertical e horizontal atuantes nesta cota.

Tabela 24 - Esforços atuantes na fundação convertidos em tensões.

Cenário de Tensões	**Tensão Vertical aerogerador (kN/m^2)**	**Tensão Vertical peso bloco + solo (kN/m^2)**	**Tensão Horizontal aerogerador (kN/m^2)**
Operacionais	341,9	52,7	53,2
Extremas	350,6	52,7	88,0
Área de aplicação	Área de contato entre a torre e o bloco, delimitada por uma circunferência com 3 metros de diâmetro no centro do bloco	Área de contato entre o bloco e o solo, delimitada por uma circunferência de 14,70 metros, correspondente ao diâmetro do bloco	Área de contato entre a torre e o bloco, delimitada por uma circunferência com 3 metros de diâmetro no centro do bloco

Tabela 25 - Pares binários representando o momento atuante na interface entre a torre e o bloco de fundação.

Pares binários					
Coordenadas dos binários		**Carregamento Operacional**		**Carregamento Extremo**	
x (m)	**y (m)**	**Força (kN)**	**Momento (kN.m)**	**Força (kN)**	**Momento (kN.m)**
-1,5000	0,0000	748	1.122	1.252	1.878
-1,4489	0,3882	1.445	2.093	2.418	3.503
-1,2990	0,7500	1.295	1.682	2.168	2.816
-1,0607	1,0607	1.058	1.122	1.770	1.877
-0,7500	1,2990	748	561	1.252	939
-0,3882	1,4489	387	150	648	252
0,0000	1,5000	0	0	0	0
0,3882	1,4489	-387	150	-648	252
0,7500	1,2990	-748	561	-1.252	939
1,0607	1,0607	-1.058	1.122	-1.770	1.877
1,2990	0,7500	-1.295	1.682	-2.168	2.816
1,4489	0,3882	-1.445	2.093	-2.418	3.503
1,5000	0,0000	-748	1.122	-1.252	1.878
Momento atuante na metade modelada da fundação (kN.m)			13.459		22.533
Momento total atuante na fundação (kN.m)			26.918		45.066

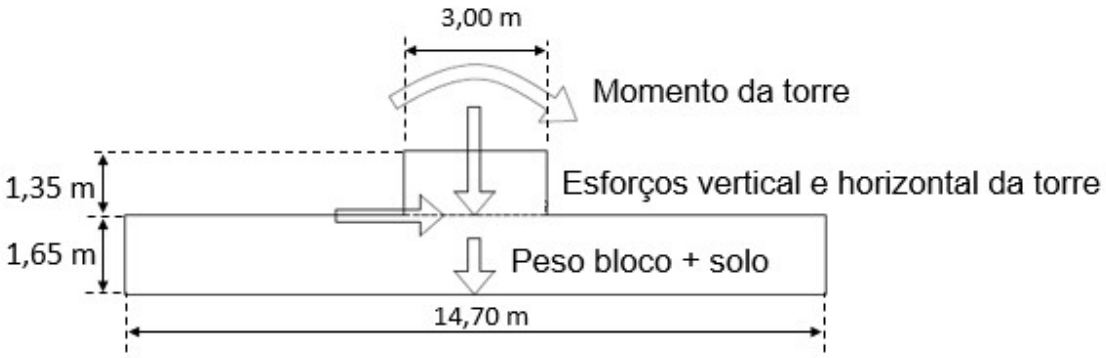


Figura 90 – Esforços atuantes na fundação.

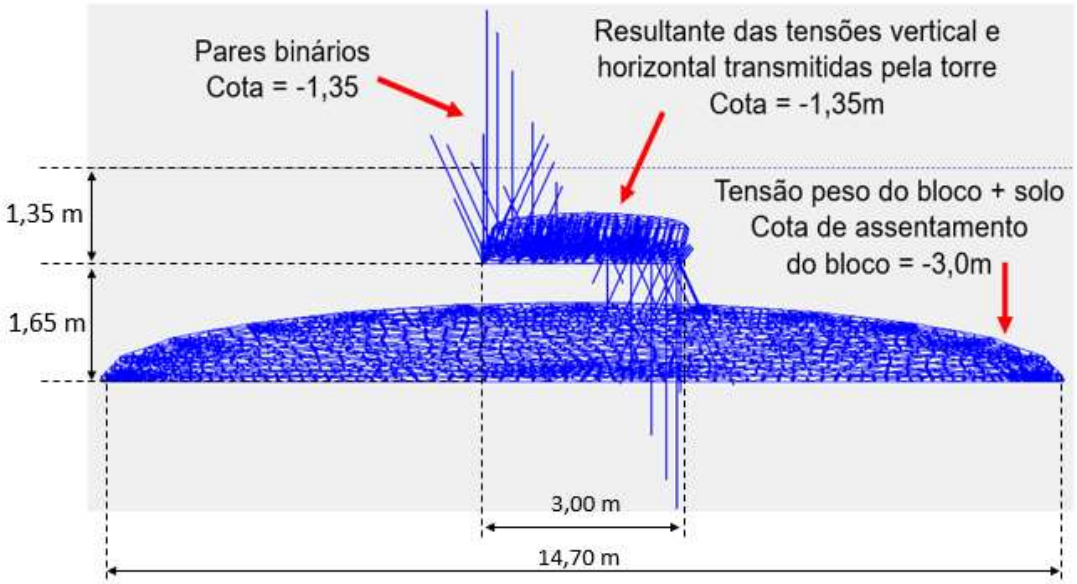


Figura 91 – Esforços atuantes na fundação convertidos em tensão uniformemente distribuídas e pares binários.

3.6.3 Perfil geotécnico e modelo constitutivo

Os perfis de sondagem apresentaram em média 13 metros de profundidade até atingir o impenetrável. Na modelagem, para a consideração adotada para um domínio vertical igual a 2,4 vezes o comprimento da estaca, foi considerada uma camada de 7 metros de impenetrável, que foi representada por parâmetros que conferem uma elevada rigidez.

Na modelagem do meio geotécnico foi considerado o modelo constitutivo elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb, enquanto que para o concreto utilizou-se o modelo elástico linear, disponível na biblioteca de modelos oferecidos pelo software.

Na interface solo-estrutura foi utilizado um elemento de interface, de modo a evitar descontinuidades na distribuição de tensões e deformações, em razão de ser uma região de mudança abrupta de condições de contorno. O software possibilita mensurar a magnitude e natureza da interação solo-estrutura modelada através da escolha de um valor adequado para o fator de redução de resistência da interface (R_{inter}). Nesta pesquisa foi adotado um fator de redução de resistência de interface (R_{INTER}) na ordem de 2/3 (0,67), conforme recomendação do manual supracitado para solos com coeficiente redutor não definido.

Para a camada inicial de areia siltosa, foram considerados parâmetros estimados para um aterro compactado. Os valores desta camada têm pouca importância nos resultados de deformação e distribuição de esforços entre as estacas e radier. Os parâmetros adotados para a camada de arenito foram obtidos a partir da retroanálise da prova de carga PCE3, que apresentou a curva carga-recalque com menor rigidez. Para a camada do impenetrável foram adotados parâmetros que representassem uma elevada rigidez, apenas para representar um material com uma deformabilidade insignificante para o problema em estudo. Os valores dos parâmetros geotécnicos, bem como os do concreto, estão apresentados na Tabela 26. Esses valores foram os considerados na retroanálise da prova de carga. A Figura 92 apresenta o desenho esquemático do perfil considerado na modelagem da fundação.

Tabela 26 - Parâmetros adotados na modelagem numérica da fundação.

Parâmetros	Areia Siltosa	Arenito	Impenetrável	Concreto (bloco e estaca)
ɣ (kN/m³)	19	26	26	24
E (kN/m²)	20.000	65.000	21.000.000	21.000.000
v	0,3	0,2	0,1	0,2
c (kN/m²)	1*	20	170	-
ϕ	35	36	40	-
k_{inter}	0,67	0,67	1	0,67

ɣ - peso específico; E – módulo de elasticidade; ν – coeficiente de Poisson; c – coesão; ϕ - ângulo de atrito; R_{inter} – coeficiente de adesão entre solo e o concreto.

* foi considerado um valor unitário apenas para evitar problemas quando do modelamento no Plaxis.

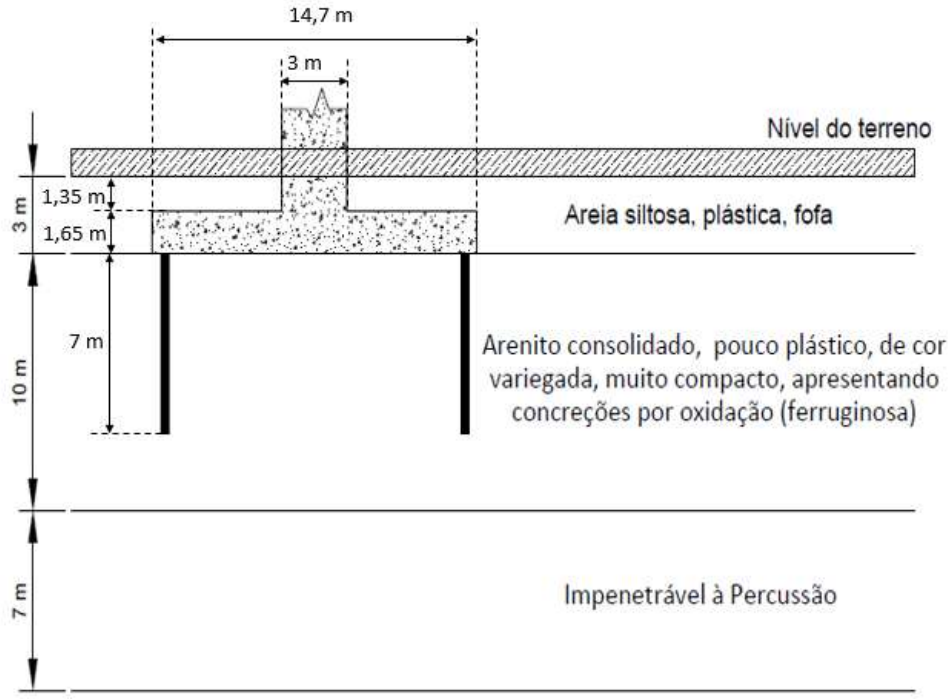


Figura 92 – Perfil do problema adotado na modelagem numérica.

3.6.4 Elementos Finitos

A malha de elementos finitos é composta por elementos prismáticos de 15 nós, sendo 6 nós em cada face triangular e 8 nós em cada face quadrangular, que desconsiderando os nós em comum nas arestas entre duas faces vizinhas, totalizam um prisma com 15 nós.

A malha gerada para cada uma das análises foi uma malha muito fina com refinos nas regiões das estacas e nas regiões de aplicação do carregamento. O número de elementos e o número nós para cada um dos casos a serem estudados, serão apresentados individualmente quando de sua apresentação.

Os processamentos dos casos levaram em média 5 minutos para finalizar, quando da modelagem para a carga de trabalho, e em média 30 minutos quando da modelagem da carga de ruptura. A diferença de tempo entre as modelagens para a carga de trabalho e para a carga de ruptura do bloco decorre do trecho em que cada um dos casos se posiciona na curva carga-recalque, se no trecho elástico ou no trecho plástico, para os quais a modelagem é processada de forma mais rápida ou mais lentamente, respectivamente.

3.6.5 Radiers analisados na pesquisa

Esta pesquisa tem a finalidade de analisar, para cada proposição de bloco, a distribuição de esforços entre o radier e as estacas, os recalques máximos, as distorções angulares, a rigidez rotacional, a rigidez translacional e o fator de segurança, verificando se estes atendem aos critérios de segurança.

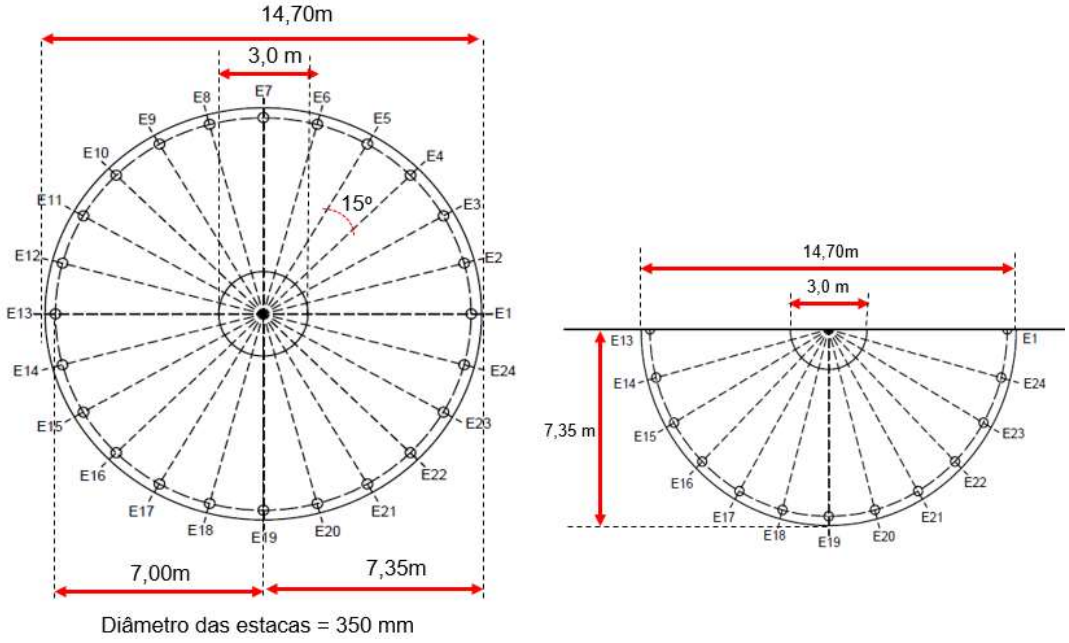
Para definição da carga de ruptura foram mantidos os esforços horizontais e de momento, aumentando a carga vertical na cota de assentamento do bloco. Foi considerado como carga de ruptura, a carga que promove um recalque igual a 10% do diâmetro da estaca, ou seja, 35 mm. Haja vista o radier não deformar uniformemente, foi verificado o ponto do radier com maior recalque. Mediante esta carga de ruptura do

sistema de fundação, o fator de segurança foi considerado como a relação entre esta carga de ruptura e o carregamento vertical extremo de projeto.

A Tabela 27 apresenta os blocos que foram analisados nesta pesquisa. Os blocos com nomenclatura A e B se diferenciam pela locação das estacas sob o bloco. As Figuras 93 a 108 apresentam o desenho esquemático de cada bloco analisado. Nestas figuras estão indicados o raio da circunferência onde as estacas estão posicionadas tem 7 metros e o raio do bloco tem 7,35 metros.

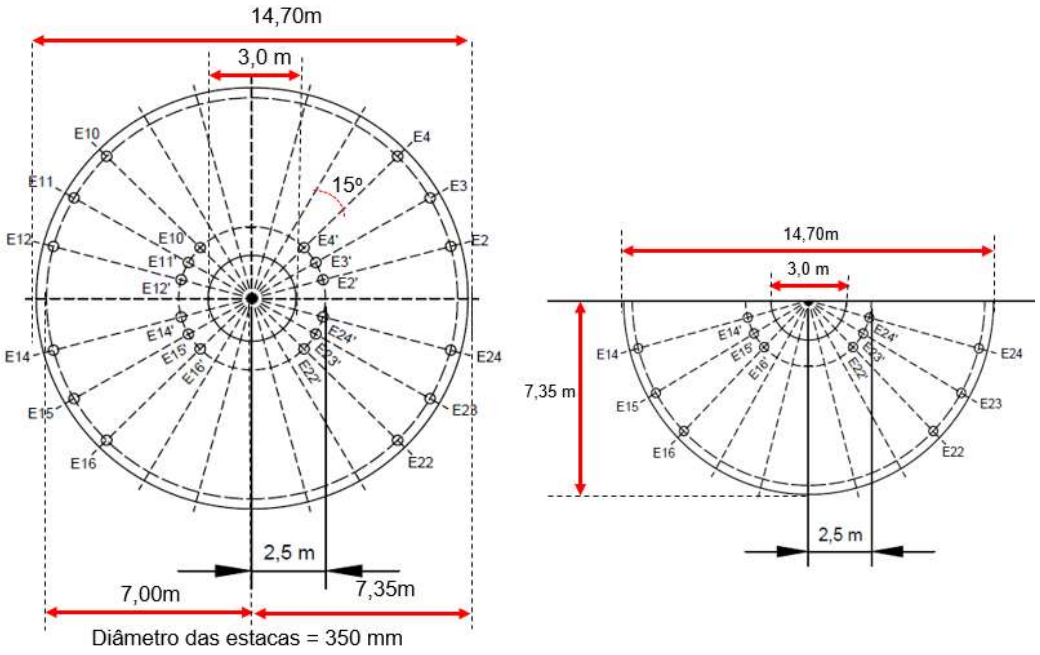
Tabela 27 - Blocos analisados na pesquisa.

Nomenclatura dos blocos	Descrição
RE24A	Radier Estaqueado sobre 24 estacas na extremidade
RE24B	Radier Estaqueado sobre 24 estacas, sendo 12 na extremidade e 12 internas (raio de locação de 2,5m)
RE20A	Radier Estaqueado sobre 20 estacas na extremidade
RE20B	Radier Estaqueado sobre 20 estacas na extremidade
RE16A	Radier Estaqueado sobre 16 estacas na extremidade
RE16B	Radier Estaqueado sobre 16 estacas na extremidade
RE12A	Radier Estaqueado sobre 12 estacas na extremidade
RE12B	Radier Estaqueado sobre 12 estacas na extremidade
RE10A	Radier Estaqueado sobre 10 estacas na extremidade
RE10B	Radier Estaqueado sobre 10 estacas na extremidade
RE8A	Radier Estaqueado sobre 8 estacas na extremidade
RE8B	Radier Estaqueado sobre 8 estacas na extremidade
RE6A	Radier Estaqueado sobre 6 estacas na extremidade
RE6B	Radier Estaqueado sobre 6 estacas na extremidade
RE4A	Radier Estaqueado sobre 4 estacas na extremidade
RE4B	Radier Estaqueado sobre 4 estacas na extremidade
RE2A	Radier Estaqueado sobre 2 estacas na extremidade



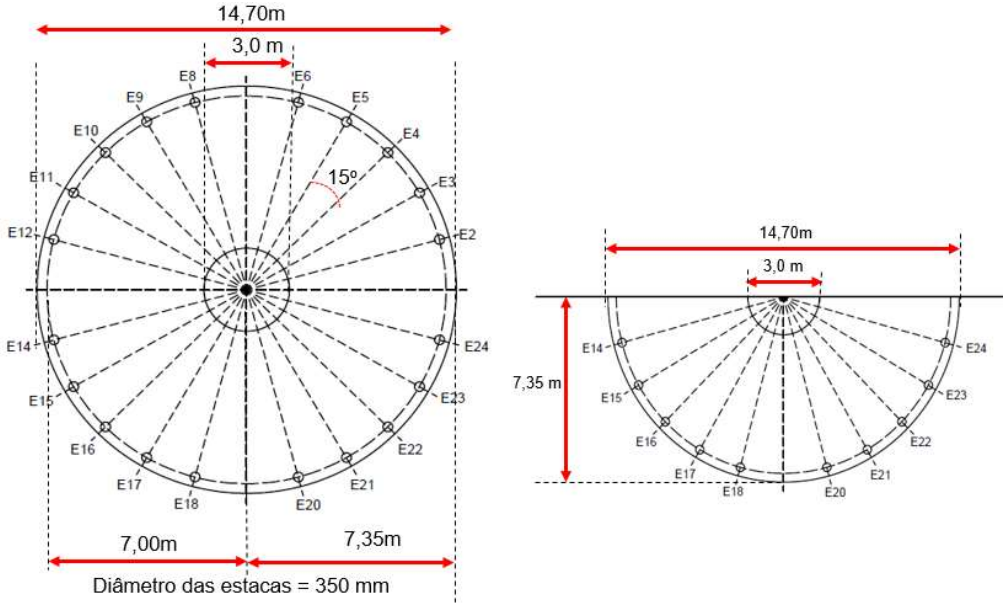
(a) (b)

Figura 93 – (a) RE24A - Radier Estaqueado sobre 24 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



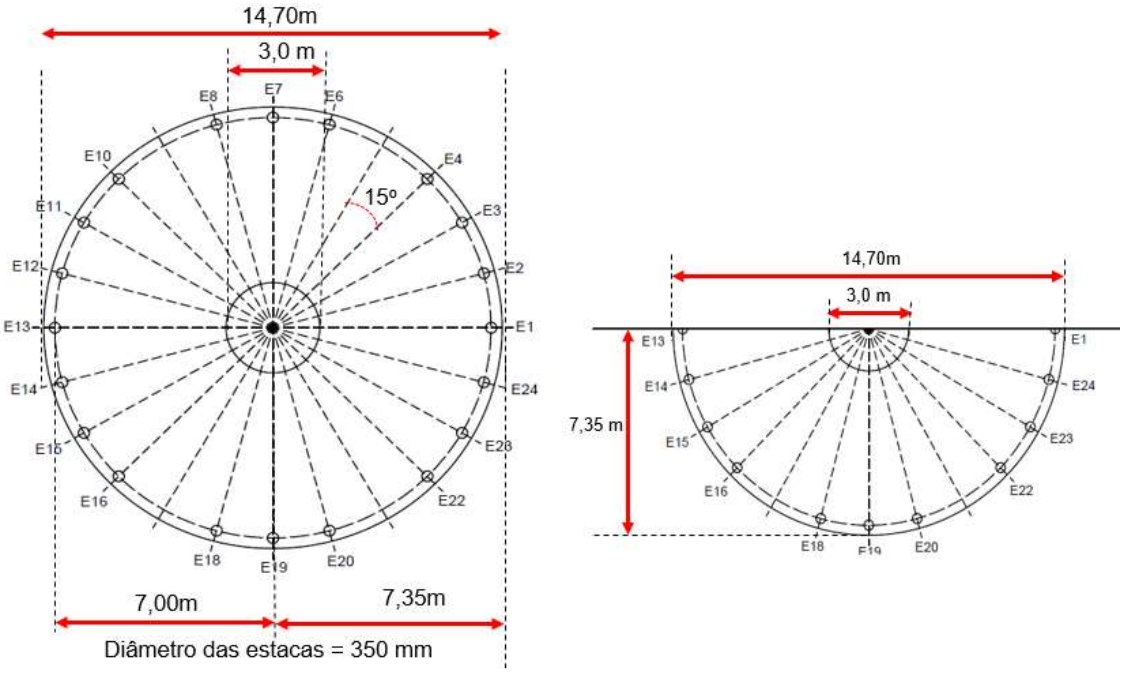
(a) (b)

Figura 94 – (a) RE24B - Radier Estaqueado sobre 24 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



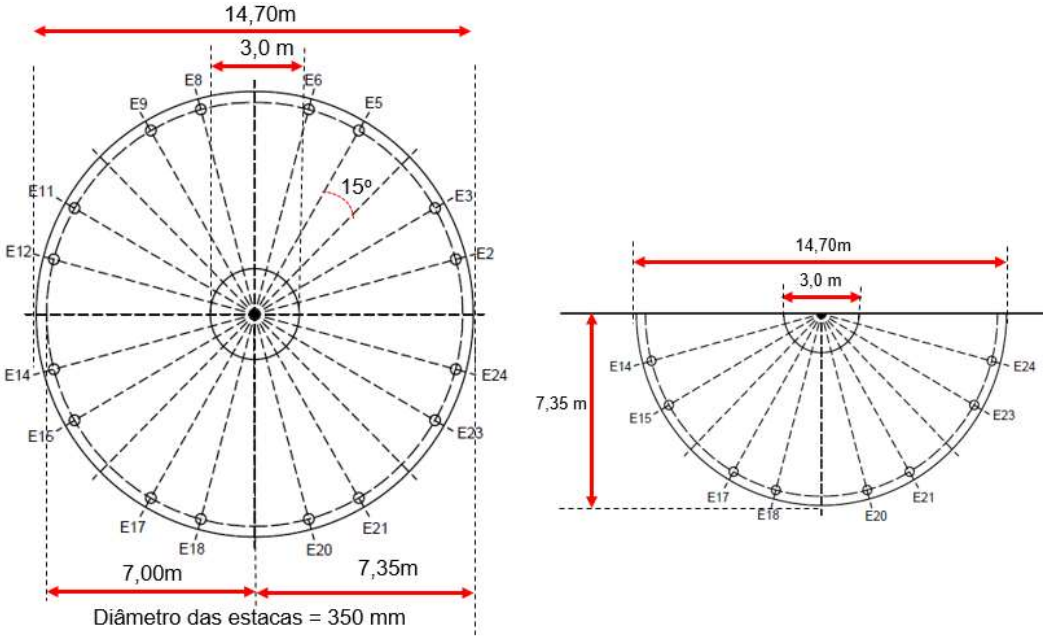
(a) (b)

Figura 95 – (a) RE20A - Radier Estaqueado sobre 20 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



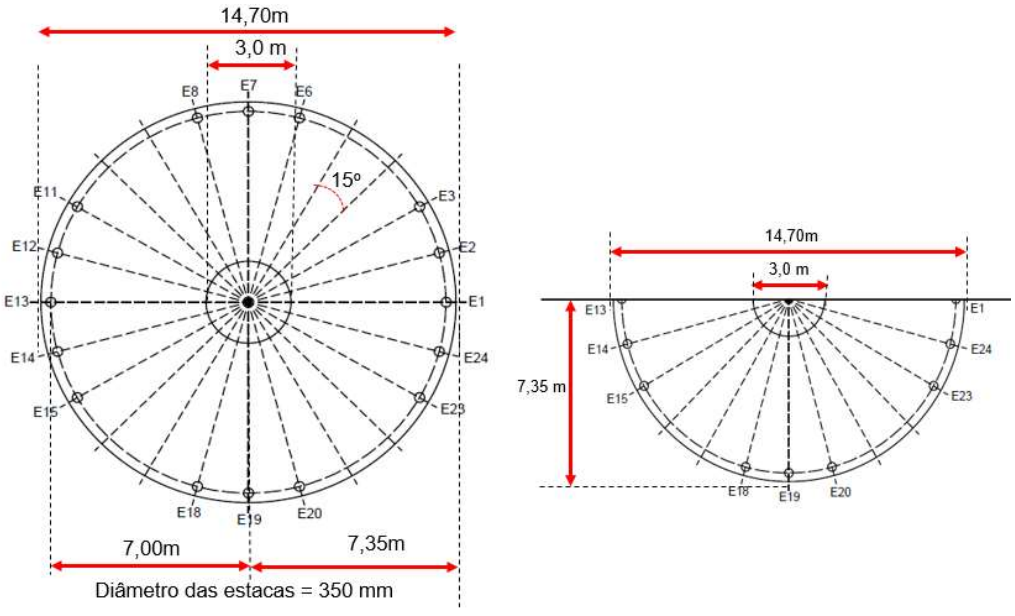
(a) (b)

Figura 96 – (a) RE20B - Radier Estaqueado sobre 20 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



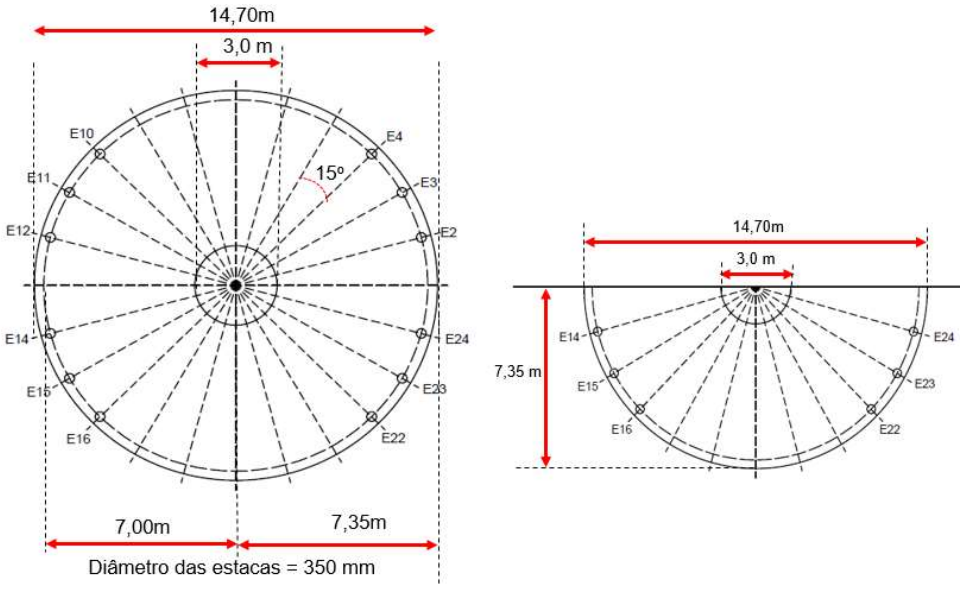
(a) (b)

Figura 97 – (a) RE16A - Radier Estaqueado sobre 16 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



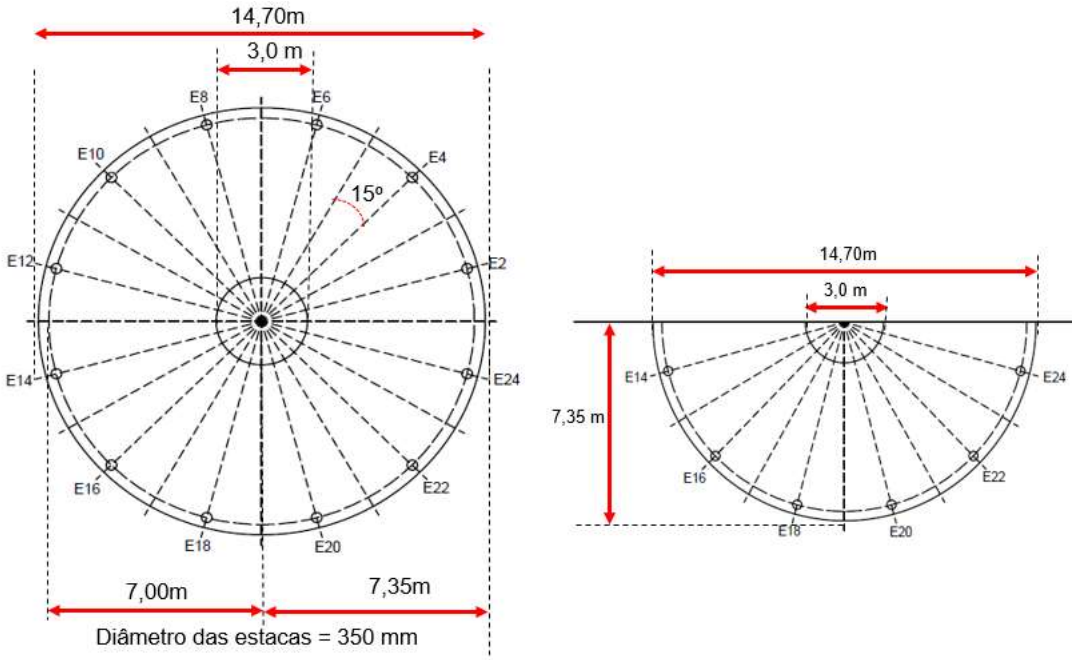
(a) (b)

Figura 98 – (a) RE16B - Radier Estaqueado sobre 16 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



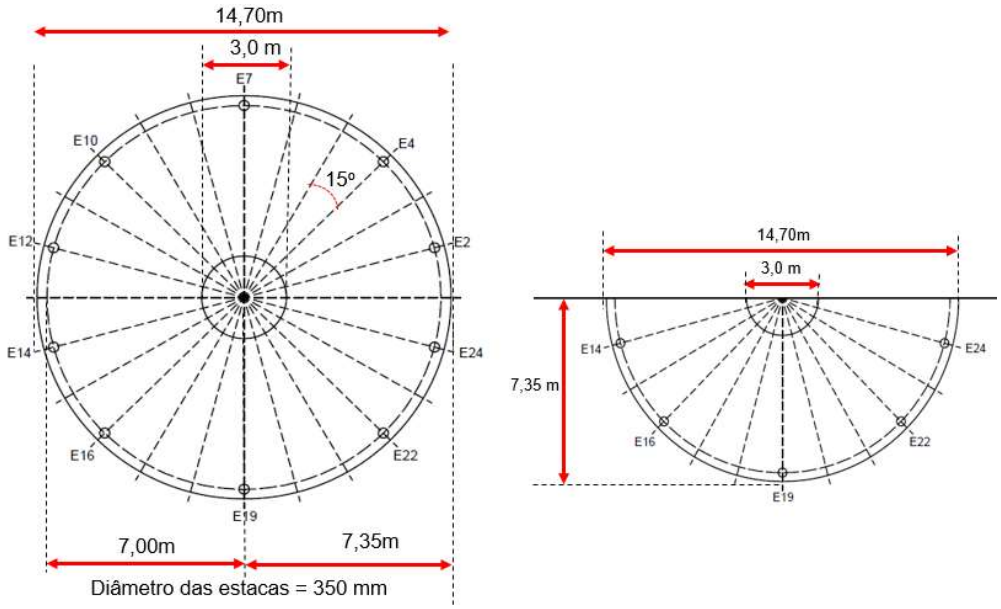
(a) (b)

Figura 99 – (a) RE12A - Radier Estaqueado sobre 12 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



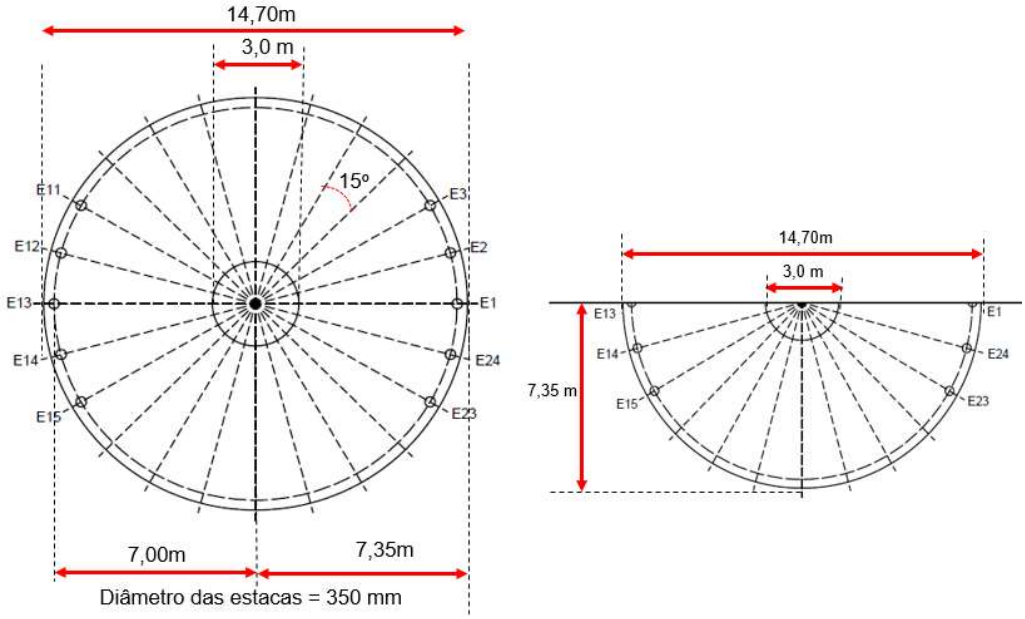
(a) (b)

Figura 100 – (a) RE12B - Radier Estaqueado sobre 12 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



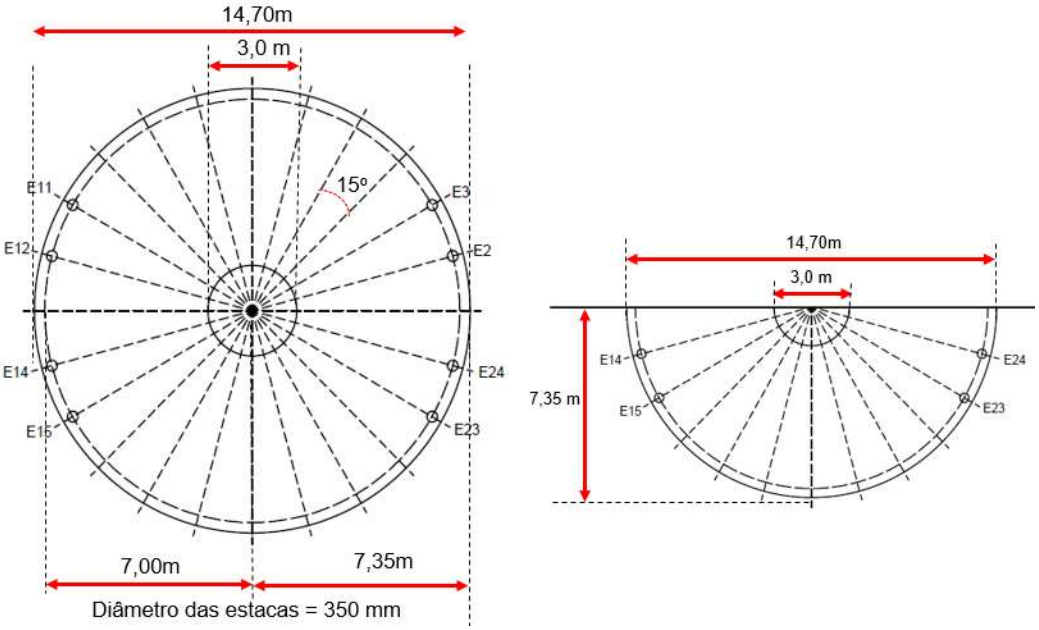
(a) (b)

Figura 101 – (a) RE10A - Radier Estaqueado sobre 10 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



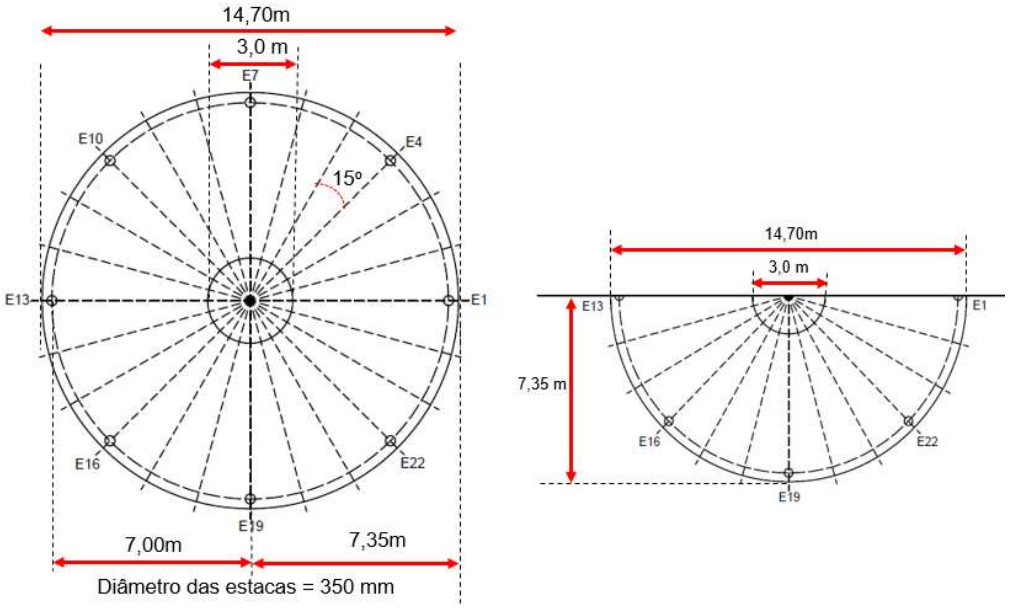
(a) (b)

Figura 102 – (a) RE10B - Radier Estaqueado sobre 10 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



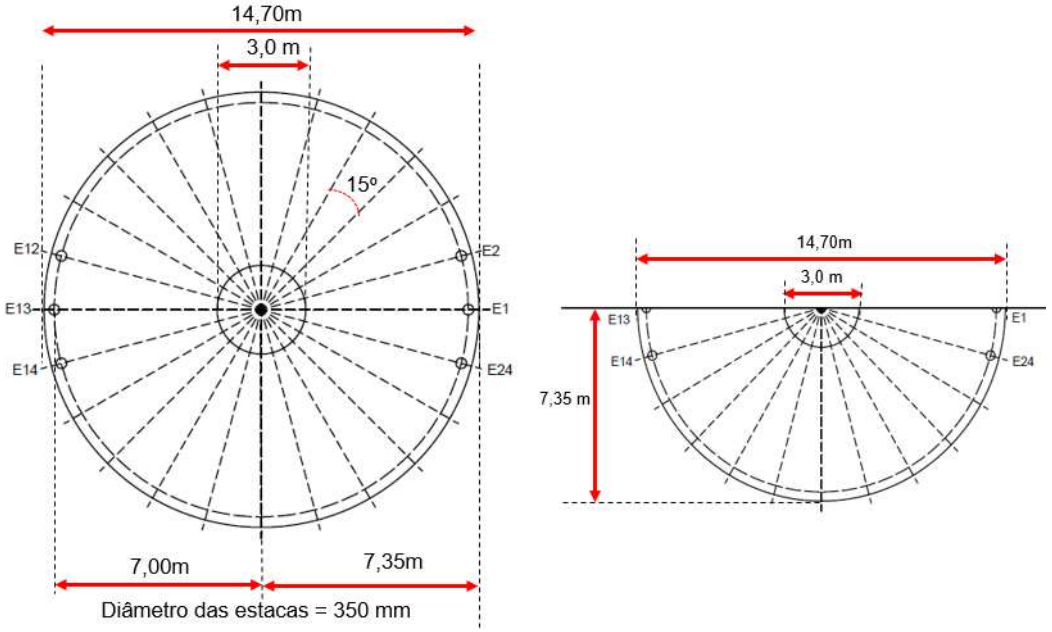
(a) (b)

Figura 103 – (a) RE8A - Radier Estaqueado sobre 8 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



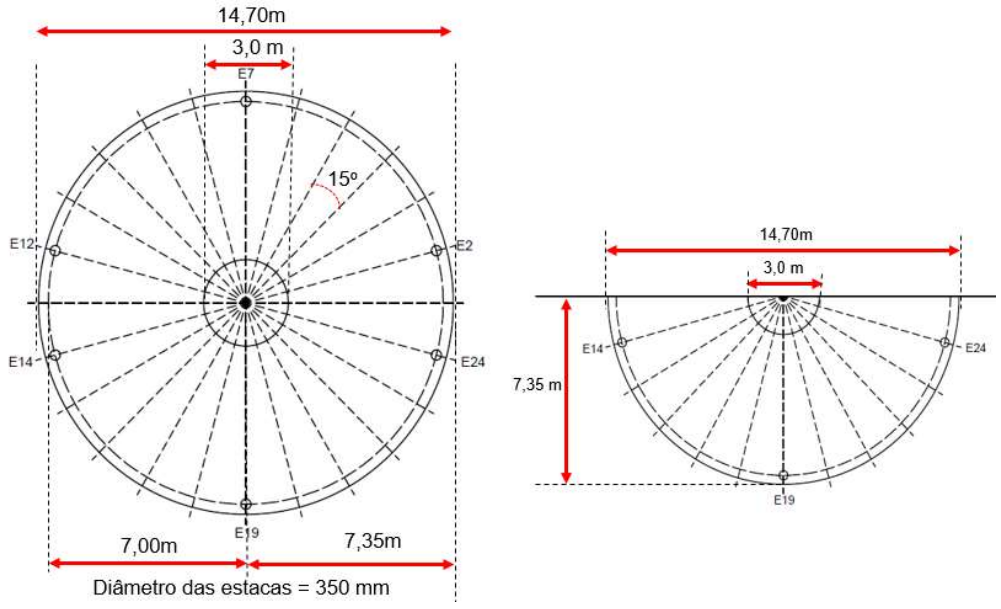
(a) (b)

Figura 104 – (a) RE8B - Radier Estaqueado sobre 8 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



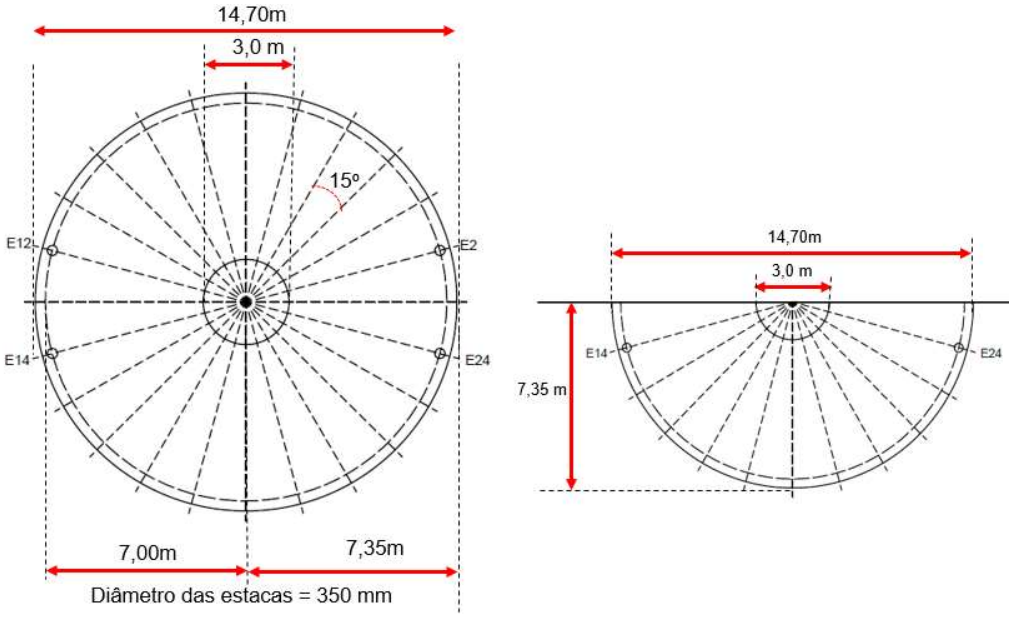
(a) (b)

Figura 105 – (a) RE6A - Radier Estaqueado sobre 6 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



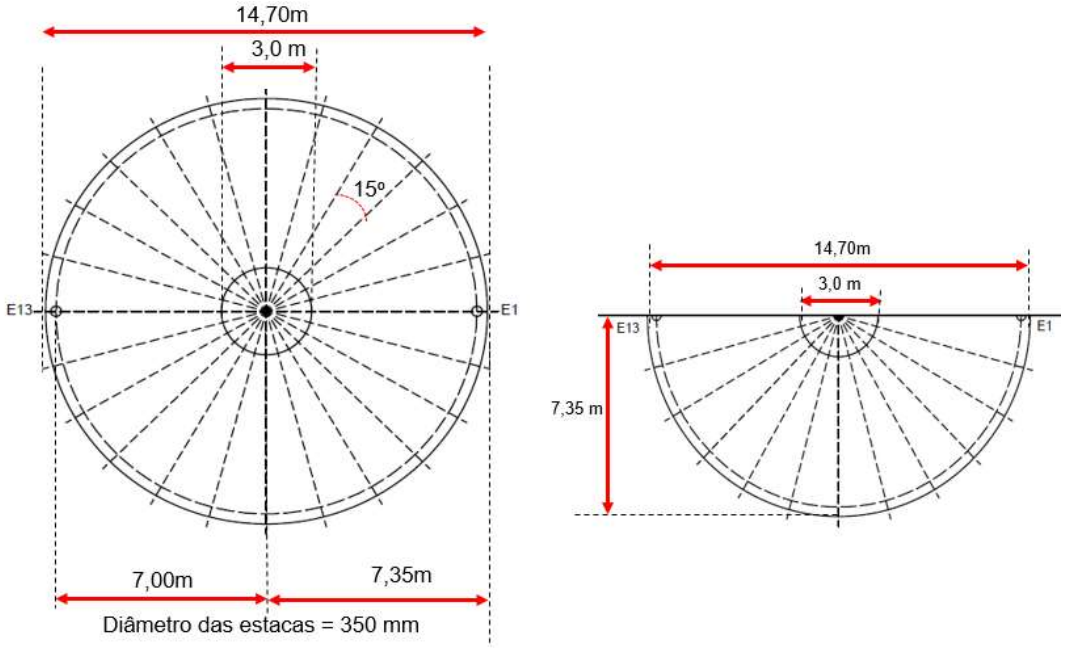
(a) (b)

Figura 106 – (a) RE6B - Radier Estaqueado sobre 6 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



(a) (b)

Figura 107 – (a) RE4A - Radier Estaqueado sobre 4 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.



(a) (b)

Figura 108 – (a) RE2A - Radier Estaqueado sobre 2 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo aborda os resultados do comportamento dos radiers, obtidos através da modelagem numérica, quais sejam: distribuição de esforços entre os elementos da fundação, recalques máximos, distorção angular, rigidez rotacional e translacional da fundação e fator de segurança para o carregamento vertical máximo que leva o bloco à ruptura.

Sabendo que o projeto foi concebido à luz da metodologia de cálculo de Grupo de Estacas e, estando o bloco com 98,6% de sua área em contato com um material de elevada resistência em sua base, as análises tiveram início com o objetivo de saber qual o percentual do carregamento aplicado estava sendo distribuído ao terreno através do radier.

Verificou-se que o radier estava sendo responsável pela transmissão de um percentual representativo do carregamento aplicado, as estacas trabalhando com um fator de segurança global superior a 2 e a estrutura atendendo aos critérios de rigidez rotacional e translacional exigido pelo fabricante da torre. Desta forma, foi verificada a distribuição de esforços entre o radier e as estacas com a supressão de algumas estacas, analisando para cada caso as distorções angulares, o critério de segurança à rotação e translação da torre e o fator de segurança para carregamento vertical.

Para que se pudesse realizar uma análise comparativa da carga atuante em cada estaca remanescente com a exclusão de algumas estacas, se manteve fixo o posicionamento das estacas. Verificou-se a redistribuição de esforços, a rigidez rotacional da fundação e o fator de segurança para o carregamento vertical. Mantendo-se fixo o posicionamento das estacas, cada cenário foi obtido retirando as estacas de forma simétrica em relação ao eixo de simetria geométrico e de carregamento. Desta forma, esta pesquisa apresenta o resultado das modelagens numéricas de blocos com 24, 20, 16, 12, 10, 8, 6, 4 e 2 estacas, bem como do radier isolado, sem nenhuma estaca.

Para as análises foram considerados o carregamento extremo, por ser este o que provoca as maiores distorções angulares. A variação do carregamento vertical entre os cenários operacional e extremo é mínima, 2,5%, em contrapartida o acréscimo do momento é bastante representativo, provocando um incremento de 67,4% e favorecendo a uma maior instabilidade rotacional da estrutura. Para todas as análises foram verificadas quanto ao enquadramento da rigidez rotacional da estrutura dentro do limite estabelecido pelo fabricante da torre de 61GN.m/rad, que representa a relação entre o momento extremo atuante na fundação pela distorção angular por ele provocada.

4.1 RADIER SOBRE 24 ESTACAS (RE24A e RE24B)

Primeiramente realizou-se a modelagem do radier estaqueado sobre 24 estacas executado em campo, RE24A, novamente representado na Figura 109.

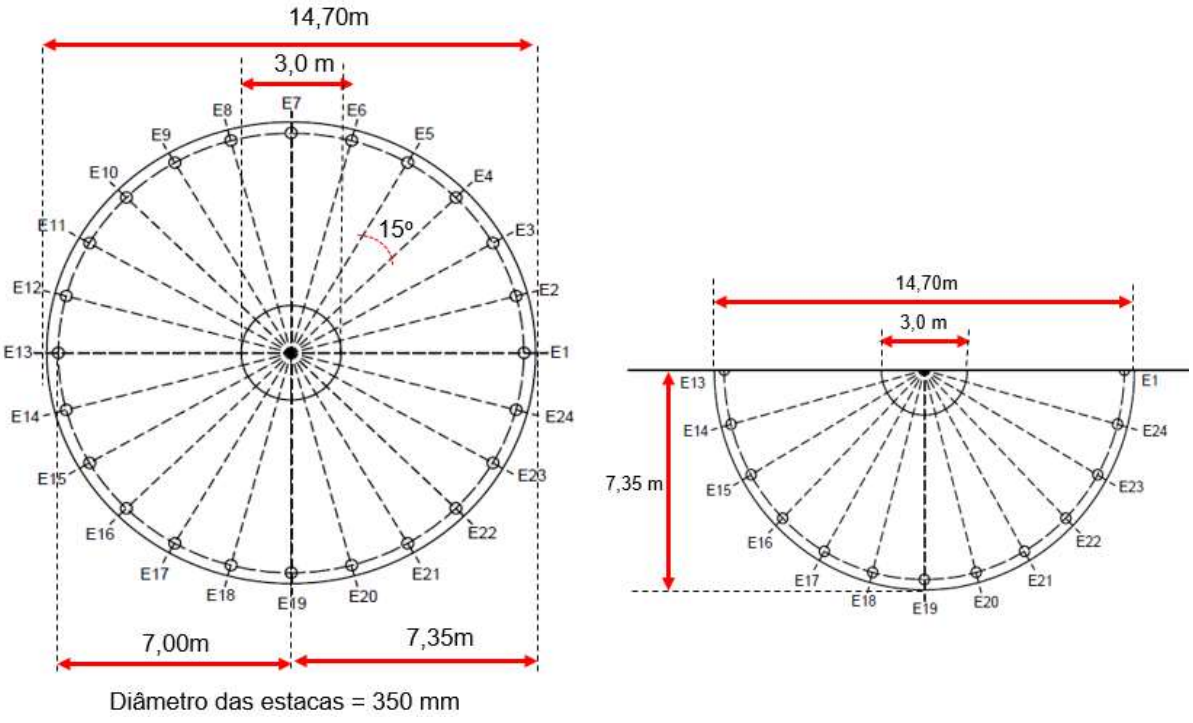


Figura 109 – (a) RE24A - Radier Estaqueado sobre 24 estacas; (b) desenho esquemático adotado para a modelagem.

Algumas figuras obtidas a partir da modelagem numérica serão apresentadas a seguir. A Figura 110 apresenta a malha de elementos finitos gerada para esta modelagem, apresentando 18.486 elementos e 52.800 nós. Foi definida uma malha muito fina para todo o domínio modelado e aplicados refinamentos nas regiões do radier e das estacas. A Figura 111 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier. Nela foram definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., J, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

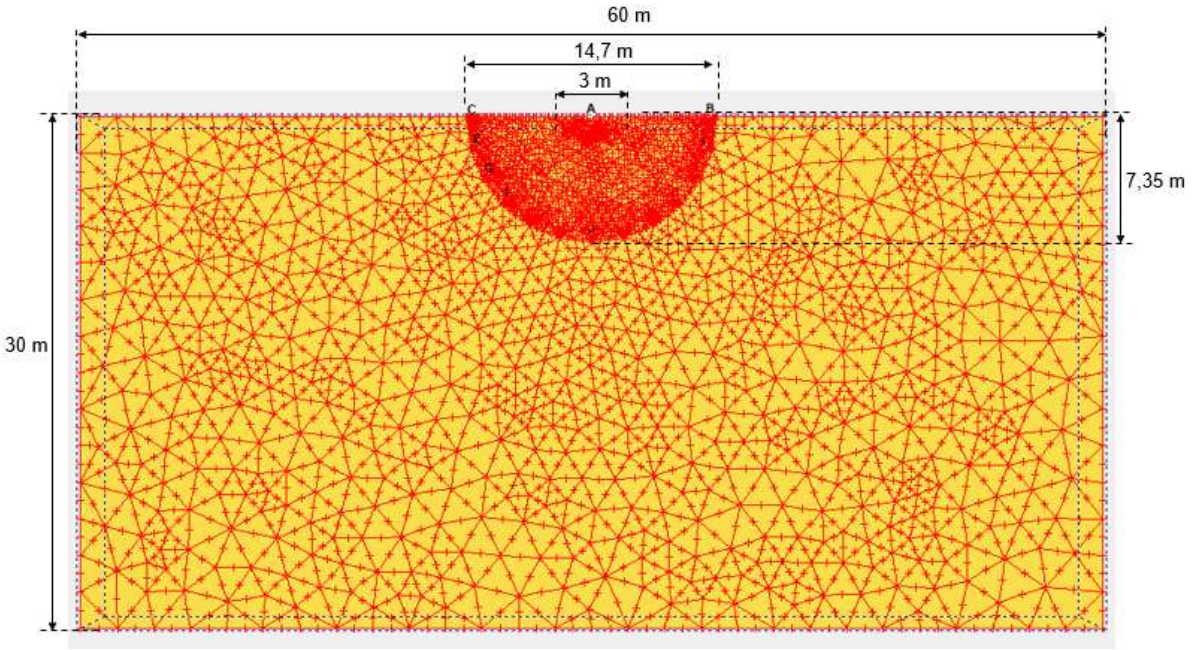


Figura 110 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE24A.

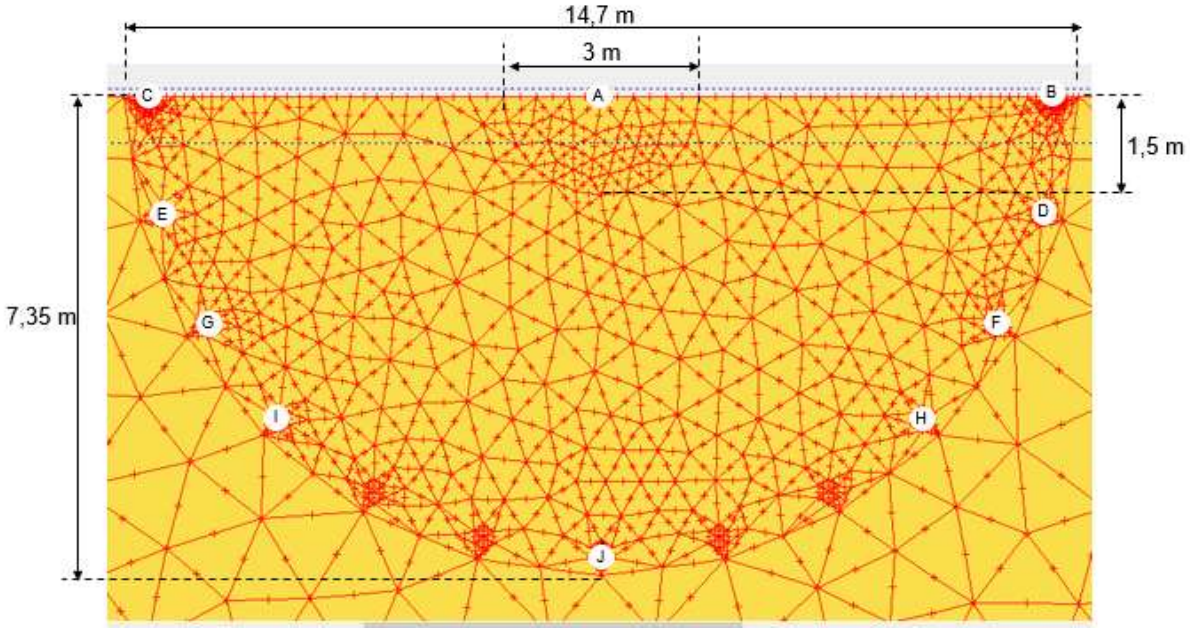


Figura 111 – Malha de elementos finitos na região do radier RE24A.

Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 112.

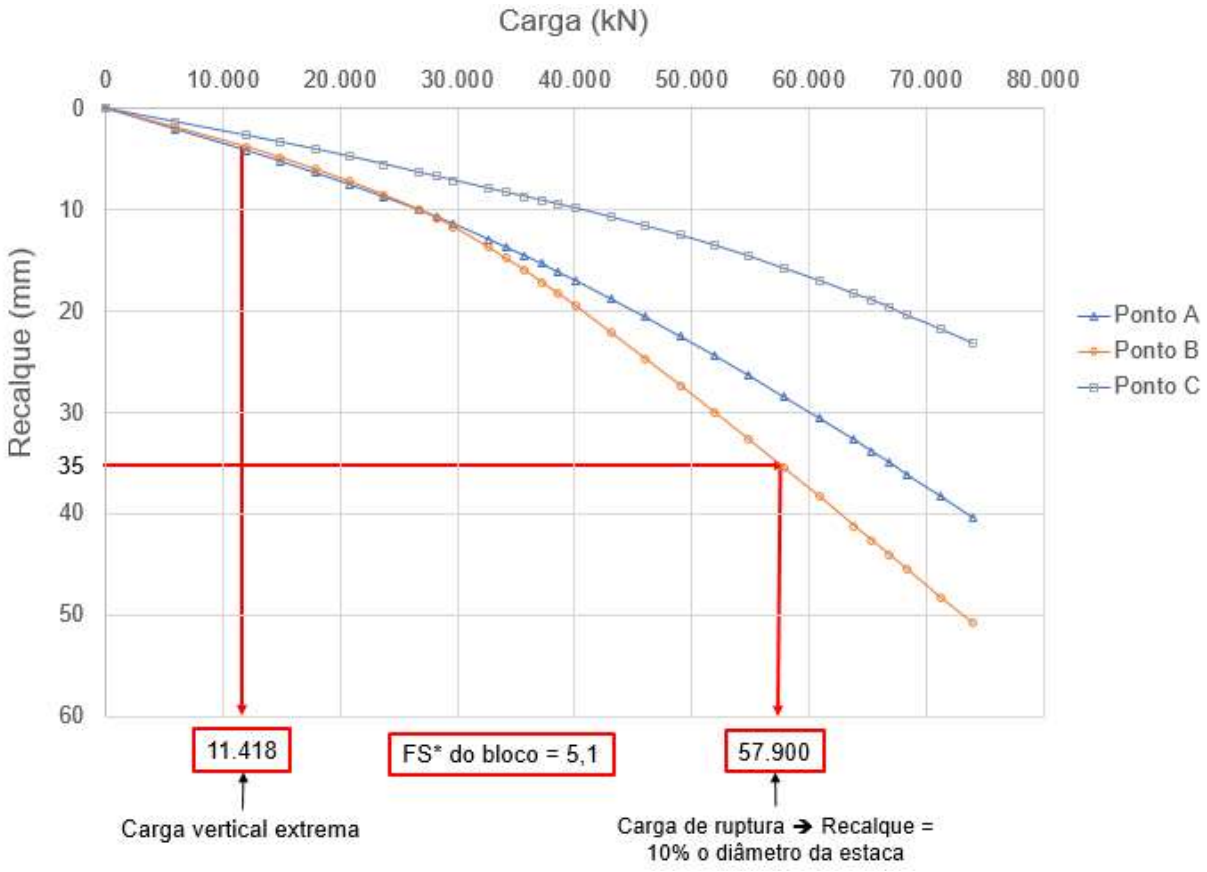


Figura 112 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE24A.

As Figuras 113 e 114 apresentam os deslocamentos verticais em vista de perfil e em planta, respectivamente. Estas imagens confirmam que as definições dos domínios da modelagem contemplam a área de influência das deformações e tensões em decorrência do carregamento atuante na fundação analisada.

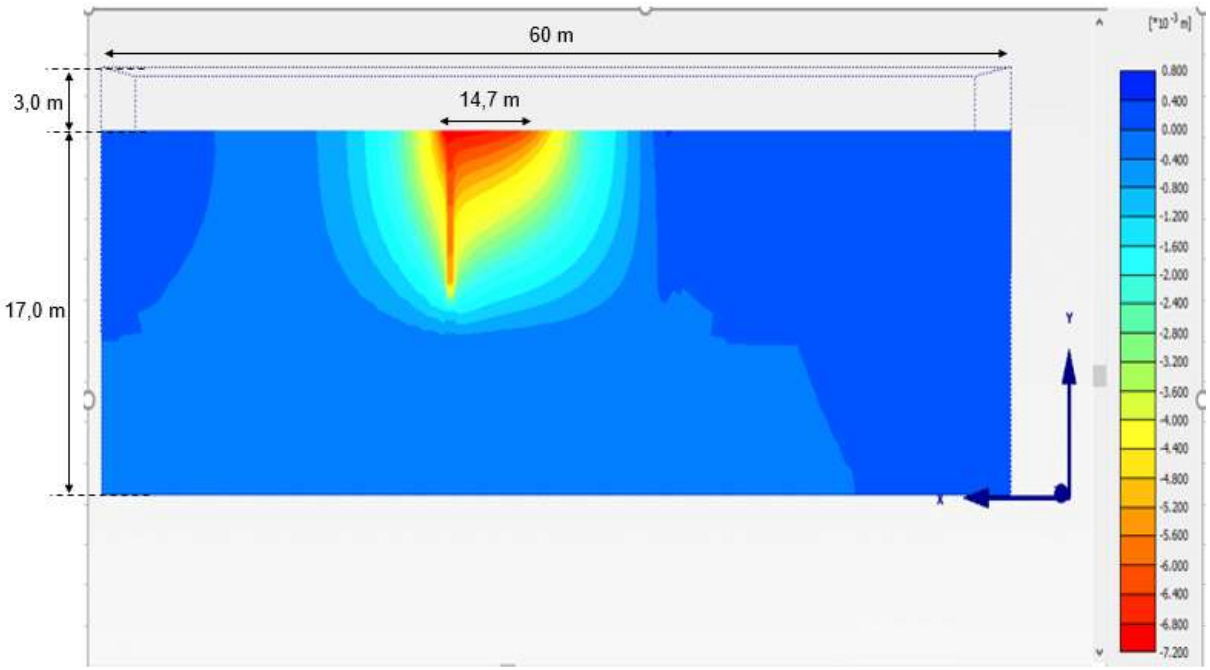


Figura 113 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE24A, vista na seção transversal na região central do bloco.

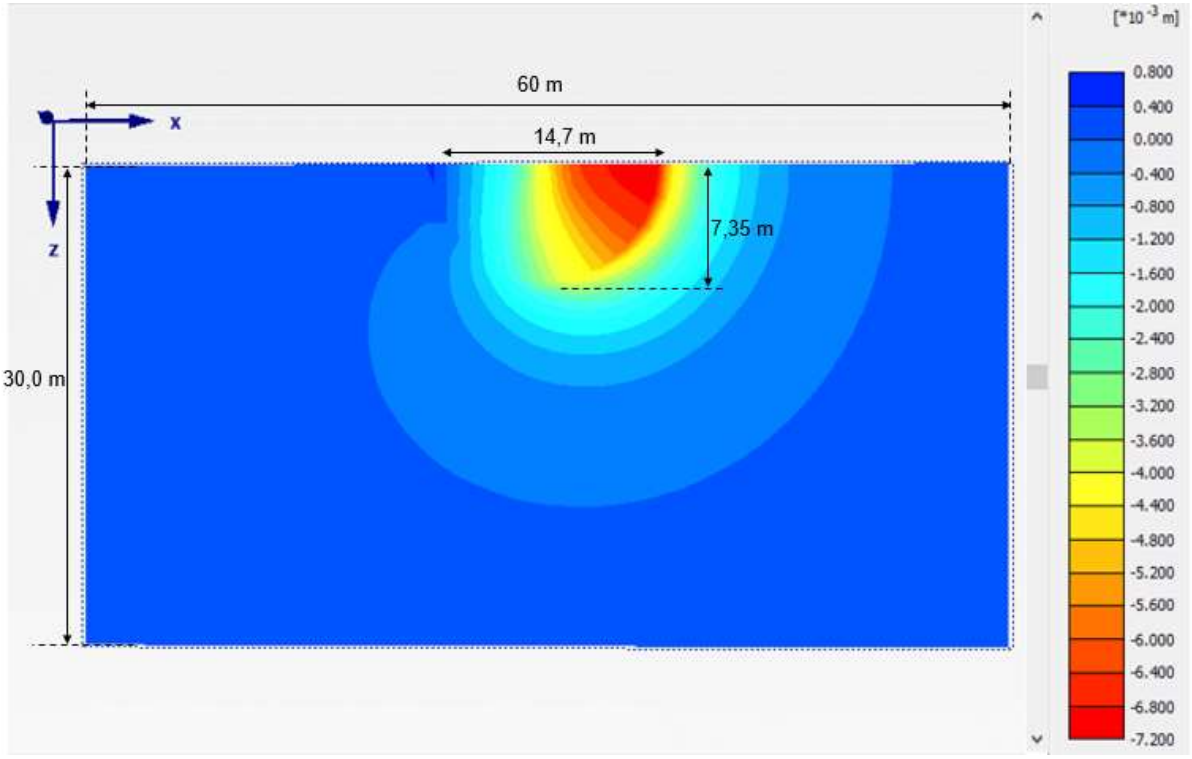


Figura 114 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE24A, vista em planta.

Os resultados obtidos através da modelagem realizada para o radier estaqueado RE24A estão apresentados nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 28 – Distribuição de esforços nas estacas do radier estaqueado RE24A.

Estaca	**Carga (kN)**
E1	461
E2 = E24	296
E3 = E23	299
E4 = E22	278
E5 = E21	260
E6 = E20	217
E7 = E19	176
E8 = E18	126
E9 = E17	76
E10 = E16	32
E11 = E15	0
E12 = E14	-18
E13	-46

Tabela 29 - Resultados obtidos através da modelagem realizada para o radier estaqueado RE24A.

Resultados	RE24A
Somatório do carregamento vertical nas estacas (kN)	3.899
Carregamento total vertical (cenário extremo) (kN)	11.418
% da carga vertical nas estacas	34%
% da carga vertical no radier	66%
Carga máxima de compressão na estaca (kN)	461
Carga máxima de tração na estaca (kN)	-46
Carga vertical de ruptura da fundação (kN)	57.900
FS*	5,1
Carga máxima na estaca para carga de ruptura do bloco (kN)	642
Recalque máximo (mm)	7,1
Distorção do radier**	1/2.000
Rigidez a rotação (GN.m/rad)	87,2
Distorção angular no centro***	1/943

* Carga de ruptura do bloco / Carga vertical no cenário extremo

** Entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento

*** Verificada na região central onde há a transferência de carga da torre para o bloco

Com base na análise dos resultados apresentados observa-se que o radier está absorvendo 66% do carregamento vertical aplicado. Para um projeto que foi concebido para trabalhar apenas com as estacas, este é um percentual bastante representativo.

Conforme resultado das provas de carga realizadas, a menor capacidade de carga foi observada na PCE3, com uma carga de ruptura de 1.015 kN, que ao considerar um fator de segurança global igual a dois, representa uma carga admissível de 507,5 kN. Para carregamento extremo admite-se em projetos de fundações que esse valor pode ser majorado em 30%, chegando a 660 kN. Para este bloco, a carga observada na estaca mais carregada foi 461 kN.

O fator de segurança para o estado limite último no valor de 5,1, sendo este muito maior do que o fator de segurança adotado para fundações profundas, 2, ou mesmo para

fundações superficiais, 3, deve ser analisado em conjunto com a rigidez rotacional e translacional mínimas exigida pelo fabricante da torre.

Com relação às distorções angulares observadas, duas análises foram realizadas. A primeira análise foi verificar a distorção entre o recalque máximo e o mínimo que ocorrem nas extremidades opostas do radier, na direção de aplicação do momento. Esta distorção, quando relacionada com o momento atuante, ou seja, ao dividir o momento máximo pela distorção angular, fornece a Rigidez Rotacional da fundação. Esta rigidez precisa respeitar um limite mínimo exigido pelo fabricante da torre, no caso 61 GN.m/rad. A rigidez rotacional apresentada pela fundação RE24A foi de 87,2 GN.m/rad, atendendo a exigência do fabricante. Quando comparada a distorção angular de 1/2.000, com os limites apresentados por Bjerrum (1963), vê-se que esta distorção é menor do que a mínima apresentada na tabela, 1/800, valor limite para máquinas sensíveis a recalques.

Foi verificada a rigidez translacional dividindo o carregamento horizontal extremo, 622 kN, pelo deslocamento horizontal por ele provocado, 0,3903 mm. Para esta modelagem, foram mantidos os esforços verticais e horizontais e desprezado o esforço de momento para verificar o deslocamento provocado pala carga horizontal. O resultado foi de uma rigidez translacional K_t = 1,59 GN/m, valor este superior ao mínimo de 1,40 GN/m exigido pelo fabricante da torre.

Ao analisar as distorções ao longo da direção de aplicação do momento, foi verificado que na região central, onde ocorre a transferência de carga da torre para o radier, uma distorção de 1/943, maior do que a verificada nas extremidades do bloco. Esta região central do bloco deverá estar devidamente reforçada para suportar esta flexão imposta pelos esforços nela concentrados. A Figura 115 apresenta a classificação quanto aos limites aceitáveis de distorção angular conforme Bjerrum (1963), acrescido com o limite para o aerogerador analisado nesta pesquisa. Para o cálculo da distorção angular máxima foi considerado o momento extremo atuante no valor de 45.066 kN.m dividido pela Rigidez Rotacional mínima de 61 GN/rad estabelecida pelo fabricante do aerogerador.

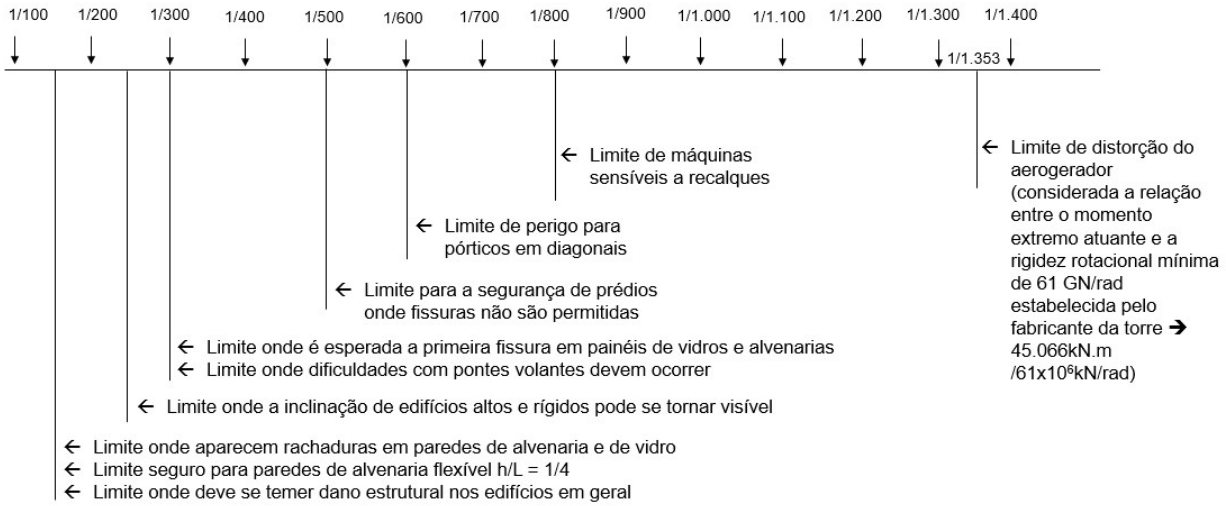


Figura 115 – Distorção angular limite Δh/L (modificado de Bjerrum, 1963).

Objetivando verificar o efeito da redistribuição das estacas nas distorções angulares, realizou-se a análise do bloco RE24B, apresentado na Figura 116. A Tabela 30 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos para os dois blocos modelados com 24 estacas.

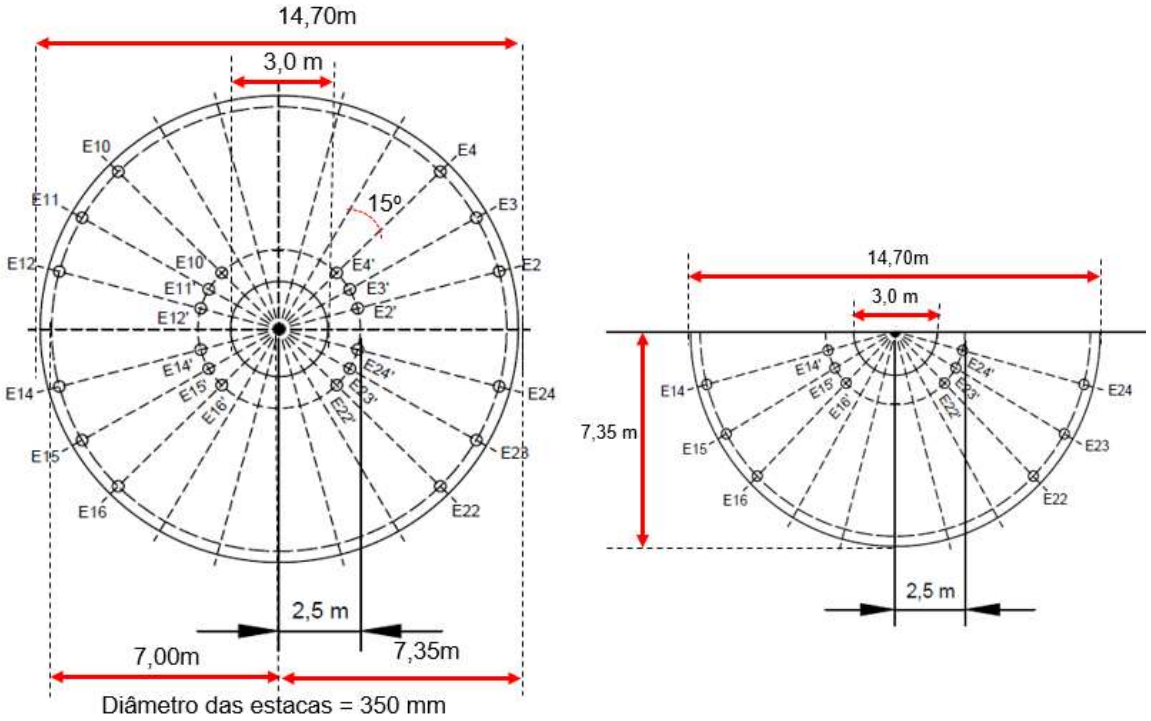


Figura 116 – Disposição das estacas no bloco RE24B.

Tabela 30 - Comparativo entre as distorções angulares em função da redistribuição das estacas no radier.

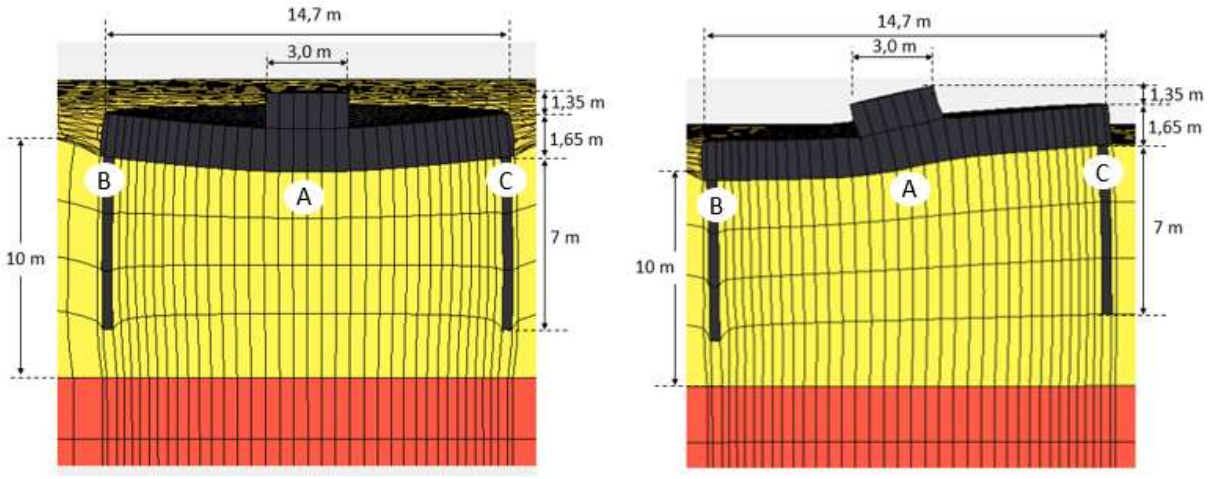
	RE24A	**RE24B**
Distorção angular do radier (recalque máximo e mínimo)	1/2.000	1/1.724
Rigidez rotacional (GN.m/rad)	87,15	77,23
Distorção angular na região central (ligação entre a torre e o bloco)	1/943	1/862

Analisando a Tabela 30, pode-se constatar que ao aproximar 12 estacas da região central do bloco, onde acontece a transferência do carregamento da torre para o bloco, faz com que a distorção angular aumente. A opção em posicionar as estacas na extremidade do bloco, favorece o combate dos momentos que são tão representativos nesse tipo de obra onde os esforços verticais tem pouca representatividade quando comparados aos momentos atuantes.

Para que se possa visualizar o efeito do momento no recalque da fundação, realizou-se uma simulação onde foi aplicado apenas a carga vertical extrema. Os deslocamentos verticais obtidos foram comparados com os deslocamentos obtidos para modelagem com todo o carregamento extremo atuante na fundação. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 31. A Figura 117 (a) apresenta a seção transversal no eixo de simetria do bloco RE24A, ocultando a camada de areia siltosa, obtida na modelagem onde foi considerada apenas o carregamento vertical e a Figura 117 (b) apresenta a mesma seção transversal, agora considerando o carregamento extremo completo. Na Figura 118 pode-se visualizar a mesma seção, agora ocultando o bloco e exibindo o carregamento considerado.

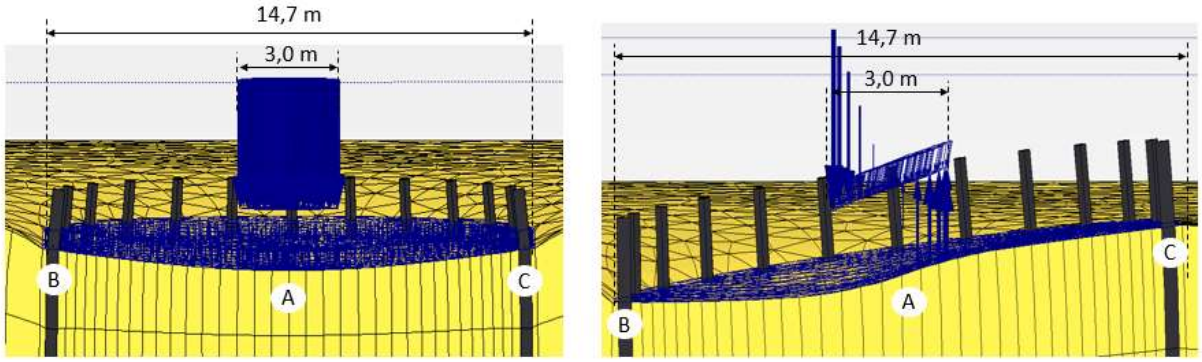
Tabela 31 - Deslocamentos verticais observados em pontos específicos na cota de assentamento do radier.

	Extremidade esquerda do bloco (ponto C)	**Centro do bloco (ponto A)**	**Extremidade direita do bloco (ponto B)**	**Média**
Carregamento Extremo (vertical, horizontal e momento)	+ 0,29 mm	- 4,37 mm	- 6,95 mm	- 3,68 mm
Carregamento Extremo (apenas vertical)	- 3,03 mm	- 4,21 mm	- 3,03 mm	- 3,42 mm



(a) (b)

Figura 117 – Seção transversal no eixo de simetria do bloco RE24A, (a) modelado apenas com a carga vertical; (b) modelado com a carga vertical, horizontal e momento.



(a) (b)

Figura 118 – Seção transversal no eixo de simetria do bloco RE24A, ocultando o bloco e exibindo o carregamento, (a) modelado apenas com a carga vertical; (b) modelado com a carga vertical, horizontal e momento.

4.2 RADIER SOBRE 20 ESTACAS (RE20A e RE20B)

Tendo verificado que as estacas do radier sobre 24 estacas estavam trabalhando com um fator de segurança superior ao mínimo aceitável, resolveu-se retirar 4 estacas e verificar como iria acontecer a redistribuição de esforços. Para este radier sobre 20

estacas, foram analisadas duas configurações de estacas sob o bloco, objetivando uma análise complementar quanto ao efeito da posição das estacas sob o bloco no comportamento da fundação. A Figura 119 e 120 apresentam as duas configurações analisadas. As análises procuraram não alterar a posição das estacas cravadas em campo, apenas excluindo, do bloco executado com 24 estacas, 4 estacas de duas formas distintas.

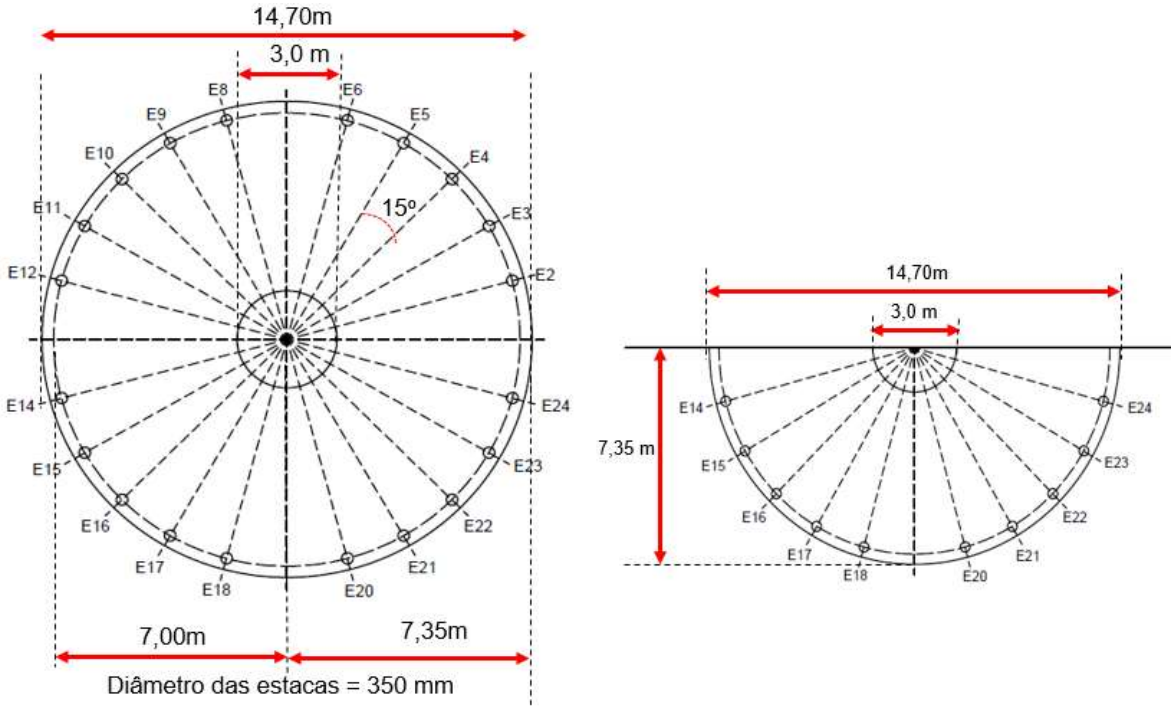


Figura 119 – Disposição das estacas no bloco RE20A.

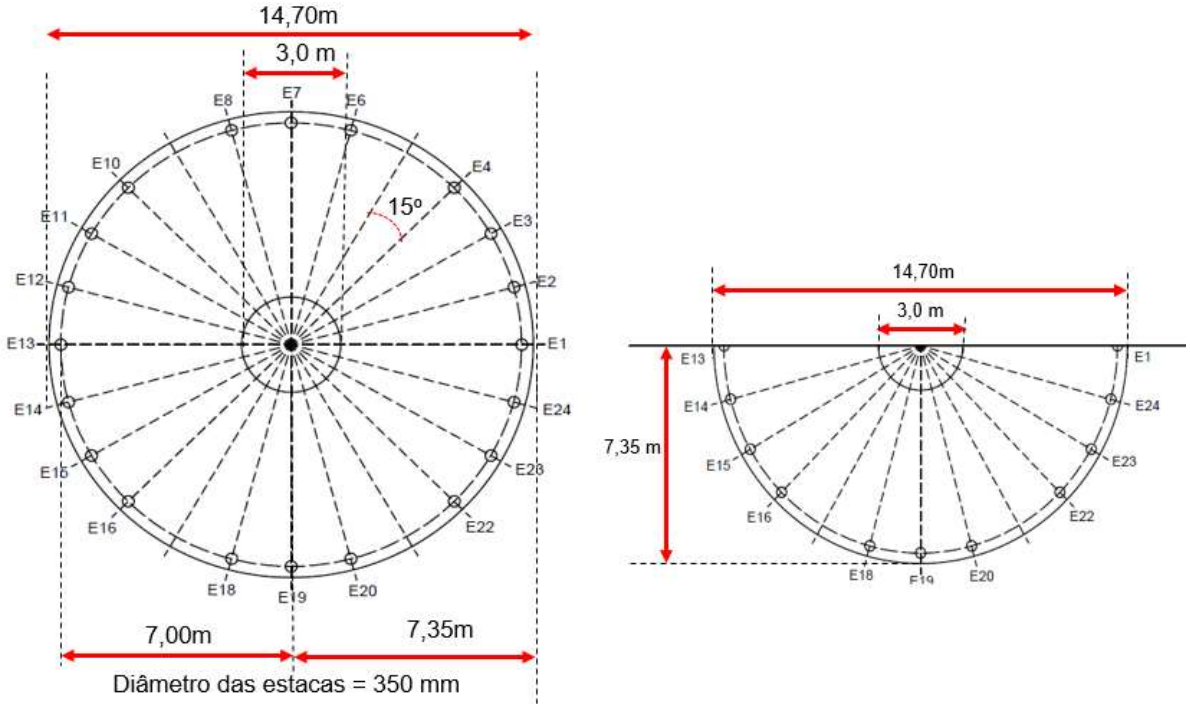


Figura 120 – Disposição das estacas no bloco RE20B.

A seguir são apresentadas algumas imagens obtidas através das modelagens realizadas. A Figura 121 apresenta a malha de elementos finitos que, no caso do bloco RE20A foi modelado com 18.828 elementos e 53.462 nós e o bloco RE20B foi modelado com 19.818 elementos e 56.492 nós. Nas modelagens foram definidas malhas muito finas para todo o domínio e aplicados refinamentos nas regiões do radier e das estacas. Nesta malha foram definidos pontos a partir dos quais o programa possibilita a emissão de alguns gráficos, como por exemplo a curva carga-recalque do respectivo ponto previamente definido. A Figura 122 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier. Nela foram definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., J, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

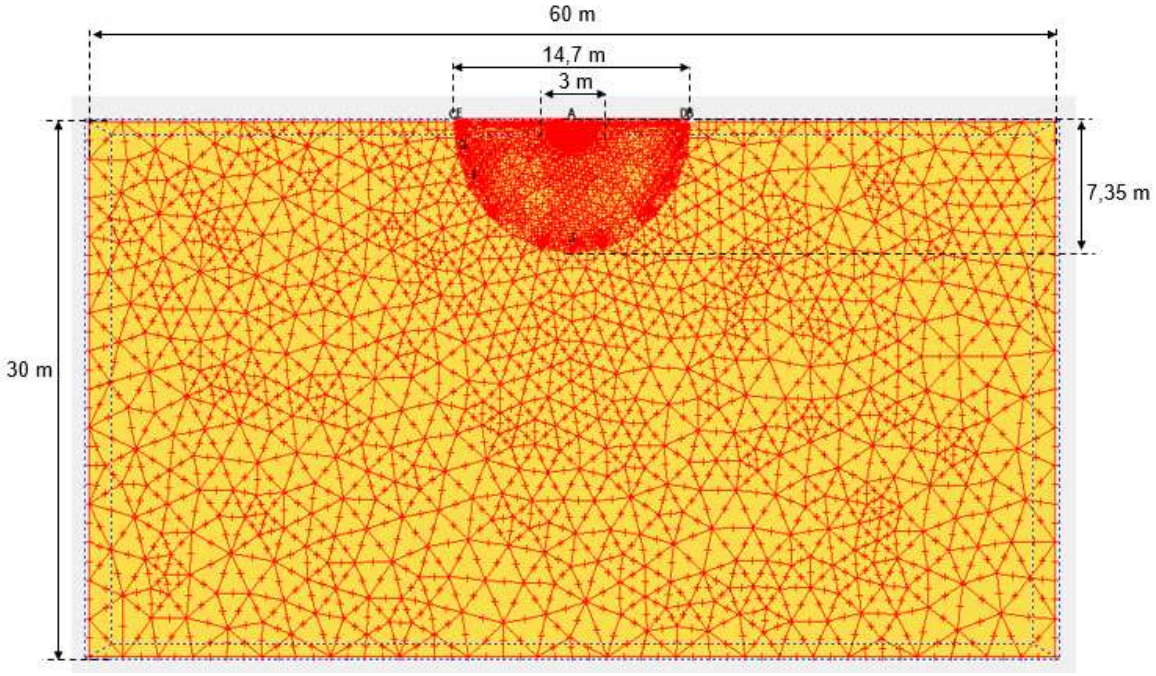
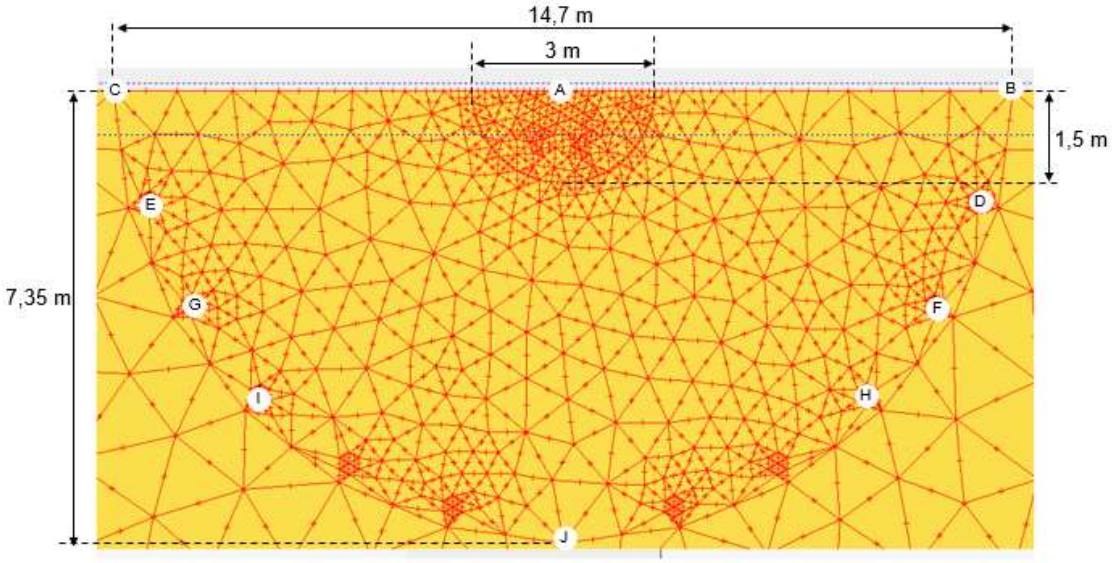
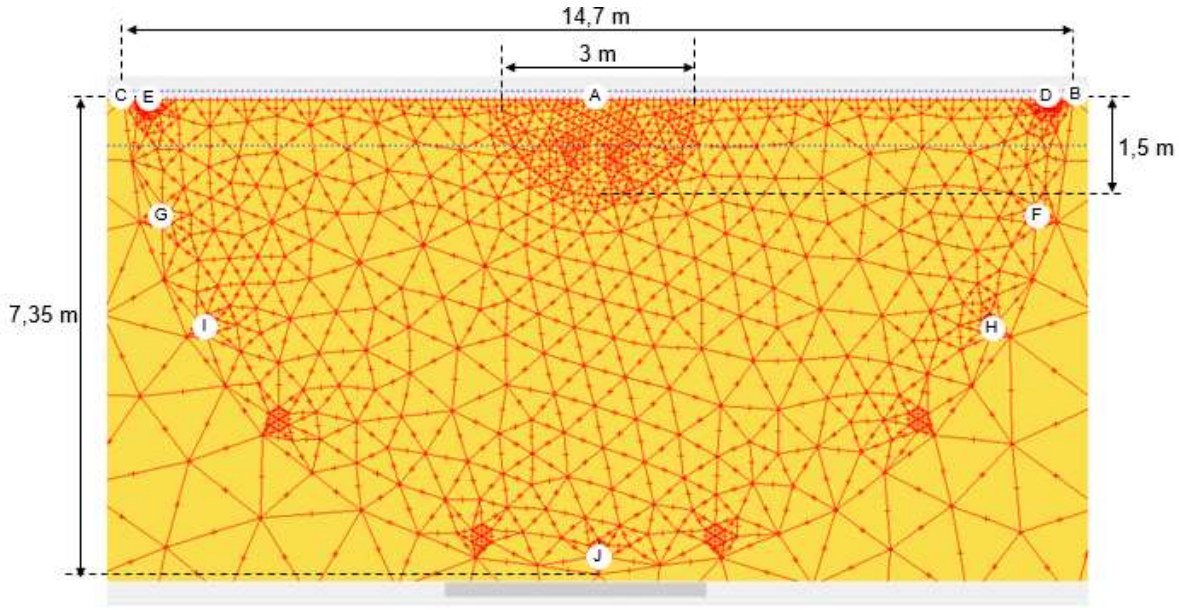


Figura 121 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE20B.



(a)



(b)

Figura 122 – Malha de elementos finitos na região do radier: (a) RE20A e (b) RE20B.

Para a verificação da carga vertical que leva o bloco a ruptura, foi selecionada a configuração A do radier sobre 20 estacas. Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos do bloco RE20A. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 123.

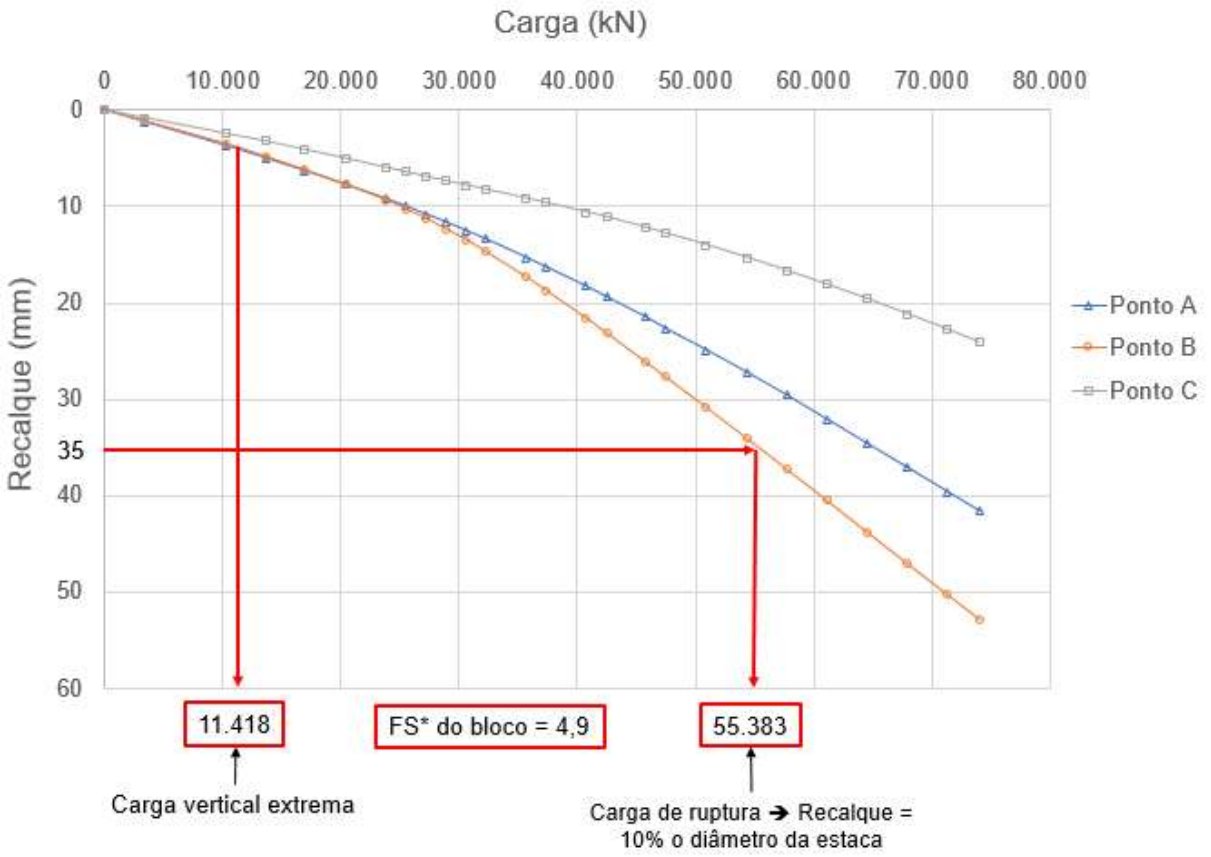


Figura 123 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE20A.

A carga de ruptura obtida garante um fator de segurança de 4,9. Ou seja, a exclusão de 4 estacas do bloco representou uma redução de 5,1 para 4,9 no fator de segurança, ambos bem superiores ao fator de segurança para fundação profunda, 2, e para fundação superficial, 3.

As Figuras 124 e 125 apresentam os deslocamentos verticais em vista de perfil e em planta, respectivamente, para o bloco RE20B. Estas imagens confirmam que as escolhas dos domínios da modelagem contemplam a área de influência das deformações em decorrência do carregamento atuante na fundação analisada.

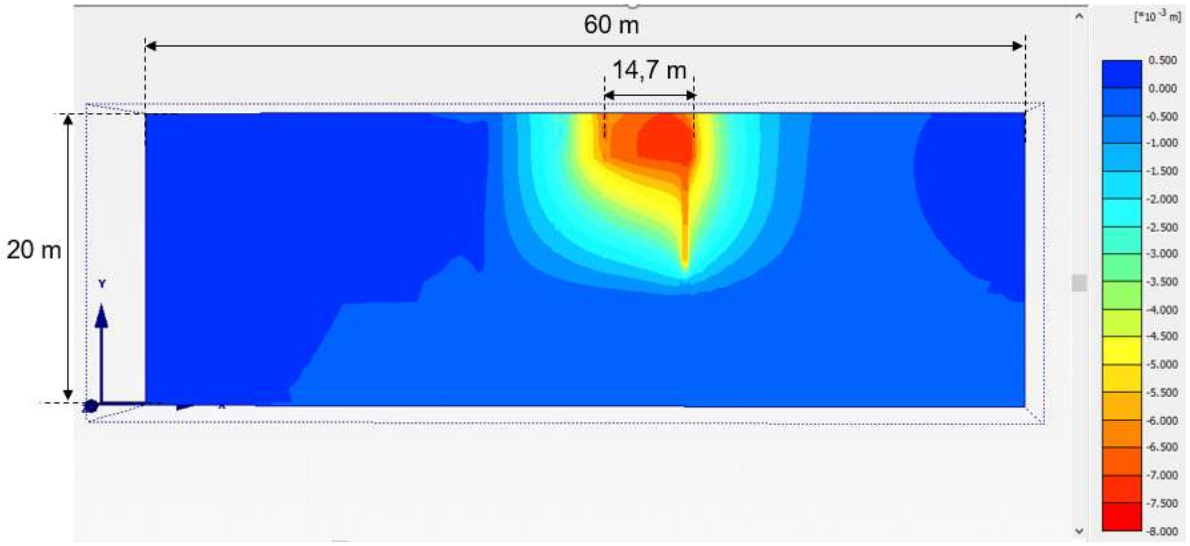


Figura 124 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE20B, vista na seção transversal na região central do bloco.

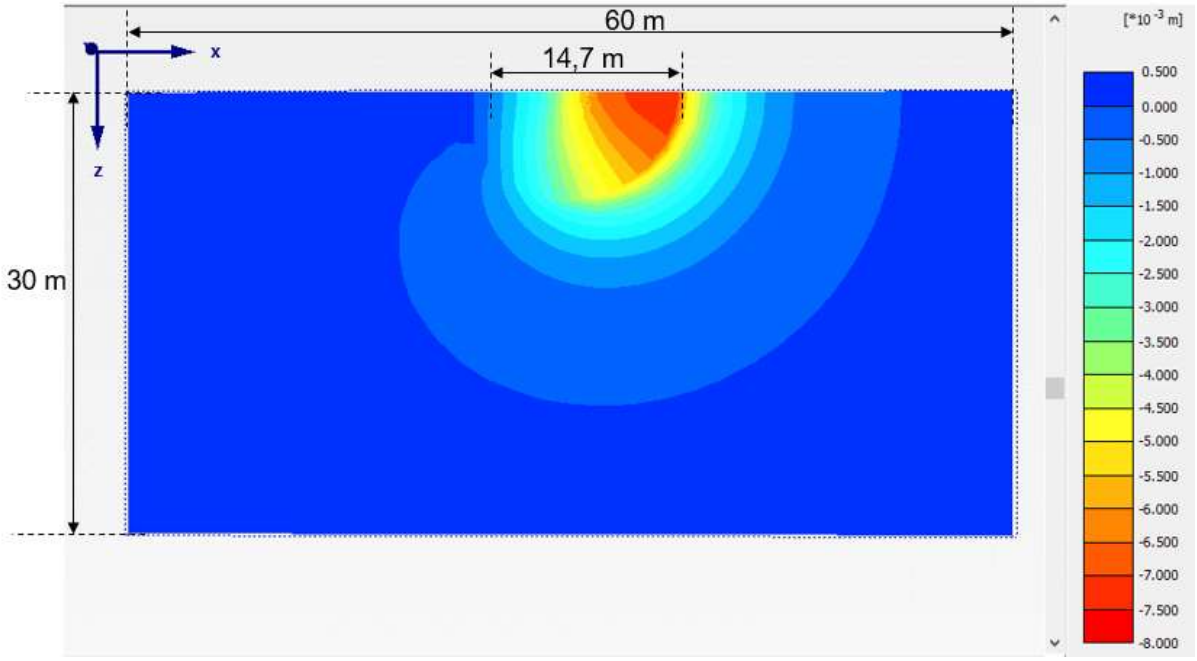


Figura 125 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE20B, vista em planta.

A Figura 126 apresenta uma vista na seção transversal no eixo de simetria do bloco RE20A, onde se ocultou a camada de Areia Siltosa e do bloco, elementos que ficam acima da cota de assentamento do radier, para uma melhor visualização dos esforços aplicados nas suas respectivas cotas de atuação. Nesta figura pode-se observar a deformação, fora de escala, e os esforços atuantes. Foi considerado na modelagem uma distribuição uniforme de tensão na cota de assentamento do bloco, -3 m, referente ao peso do bloco e do solo. Na cota -1,35 onde foi considerada a transferência de esforços da torre para o bloco, atua uma composição de esforços vertical e horizontal gerando uma distribuição de tensão uniforme nesta área. Nesta região onde foi considerada a ligação da torre com o bloco de fundação, também atuam os pares binários que representam o momento fletor atuante. Nesta figura observa-se o prolongamento das estacas que representam o engaste destas no bloco ocultado.

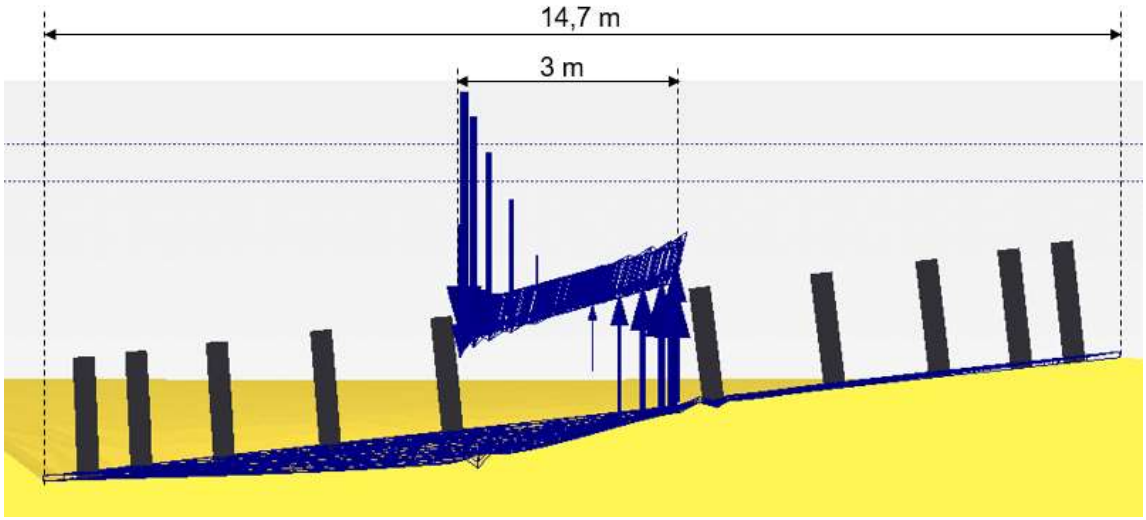


Figura 126 – Seção transversal através do eixo de simetria do bloco RE20A.

Os resultados das modelagens numéricas para os radiers assente sobre 20 estacas forneceram os resultados apresentados nas Tabelas 32 e 33.

Tabela 32 – Distribuição de esforços nas estacas dos radiers sobre 20 estacas, REA e REB.

Estaca	Carga (kN)	
	RE20A	RE20B
E1	Excluída	473
E2 = E24	314	301
E3 = E23	312	308
E4 = E22	292	295
E5 = E21	264	Excluídas
E6 = E20	240	243
E7 = E19	Excluídas	197
E8 = E18	149	144
E9 = E17	83	Excluídas
E10 = E16	31	43
E11 = E15	-5	3
E12 = E14	-29	-19
E13	Excluída	-48

Tabela 33 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 20 estacas, nas configurações RE20A e RE20B.

Resultados	RE20A	RE20B
Somatório do carregamento vertical nas estacas (kN)	3.302	3.455
Carregamento total vertical (cenário extremo) (kN)	11.418	11.418
% da carga vertical nas estacas	29%	30%
% da carga vertical no radier	71%	70%
Carga máxima de compressão na estaca (kN)	314	473
Carga máxima de tração na estaca	-29	-48
Carga vertical de ruptura da fundação (kN)	55.383	Não verificado
FS*	4,9	Não verificado
Carga máxima na estaca para carga de ruptura do bloco (kN)	617	Não verificado
Recalque máximo (mm)	7,76	7,61
Distorção do radier**	1/1.759	1/1.883
Rigidez a rotação (GN.m/rad)	79,3	84,9

* Considerado a relação entre a carga vertical que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca pela carga vertical extrema atuante na fundação. Nesta verificação, foi considerado o recalque máximo no radier, localizado no ponto B, definido na figura que apresenta a malha de elementos finitos. Este ponto fica localizado na extremidade da direita, no sentido de atuação do momento fletor.

** Distorção entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento

Comparando o rateio do carregamento entre o radier e as estacas destas soluções com 20 estacas com a solução com 24 estacas, anteriormente analisada, observa-se que houve um aumento da participação do bloco no rateio, antes com 66% e agora com 71 e 70% para as opções A e B, respectivamente. A parcela do carregamento absorvido pelas 4 estacas retiradas nesta análise, foram praticamente absorvidas pelo bloco que teve sua área de contato com o solo aumentada com a exclusão destas estacas.

Pode-se observar que a distribuição RE20A, apesar de proporcionar um recalque diferencial ligeiramente superior, apresenta uma menor dispersão entre os valores dos esforços entre as estacas, quando comparado com a distribuição de esforços entre as estacas do bloco RE20B. Neste, por haver uma estaca em cada lado no eixo de simetria, essas acabam absorvendo uma maior carga de compressão e tração nas extremidades opostas. A distribuição RE20A apresenta, para a estaca mais carregada, uma carga de trabalho 34% inferior à estaca mais carregada na distribuição do bloco RE20B. O fato de não ter as estacas posicionadas sobre o eixo de simetria do bloco, favorece a uma distribuição com menor dispersão.

Observa-se que para ambas as distribuições, a rigidez rotacional atende ao limite inferior de 61 GN.m/rad estabelecido pelo fabricante, com os blocos RE20A e RE20B apresentando os valores de 79,3 e 84,9 GN.m/rad, respectivamente, para a rigidez rotacional. No caso da distorção angular observada para as duas distribuições, observa-se que ambos os blocos apresentam uma distorção angular inferior ao limite máximo de 1/800 estabelecido por Bjerrum (1963) para máquinas sensíveis a recalques.

Com relação ao fator de segurança da estaca mais carregada, este é superior a 2. A carga observada na estaca mais carregada foi de 473 kN, inferior à carga admissível obtida através da capacidade de carga da PCE3, no valor de 507,5 kN para carregamento operacional e 660 kN para carregamento extremo, que majora em 30% a carga de trabalho operacional. Nas análises de radier estaqueado este fator de segurança pode ser reduzido, devido à contribuição do bloco na capacidade de carga, passando as estacas a ter a função de reduzir os recalques.

4.3 RADIER SOBRE 16 ESTACAS (RE16A e RE16B)

Tendo verificado que o radier estaqueado sobre 20 estacas estava trabalhando abaixo da sua capacidade de carga, respeitando ao limite de rigidez rotacional exigido pelo fabricante da torre, foi verificado o comportamento com a exclusão de mais 4 estacas do bloco, ficando agora um radier sobre 16 estacas. A Figura 127 e 128 apresentam as duas configurações analisadas, onde as locações das estacas consideradas foram as mesmas das consideradas para o radier sobre 24 estacas. Desta forma, ao final das análises, poderá ser feita uma verificação de como acontece a variação da carga em cada posição com a redução do estaqueamento sob o radier.

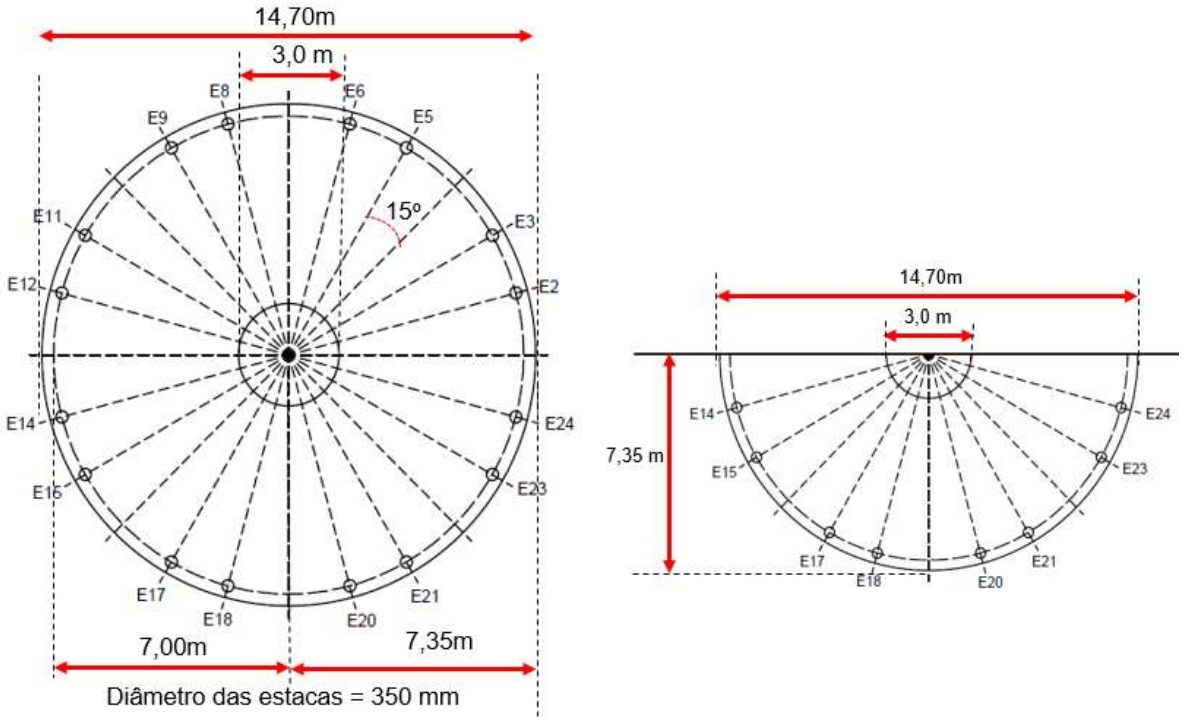


Figura 127 – Radier estaqueado sobre 16 estacas, RE16A.

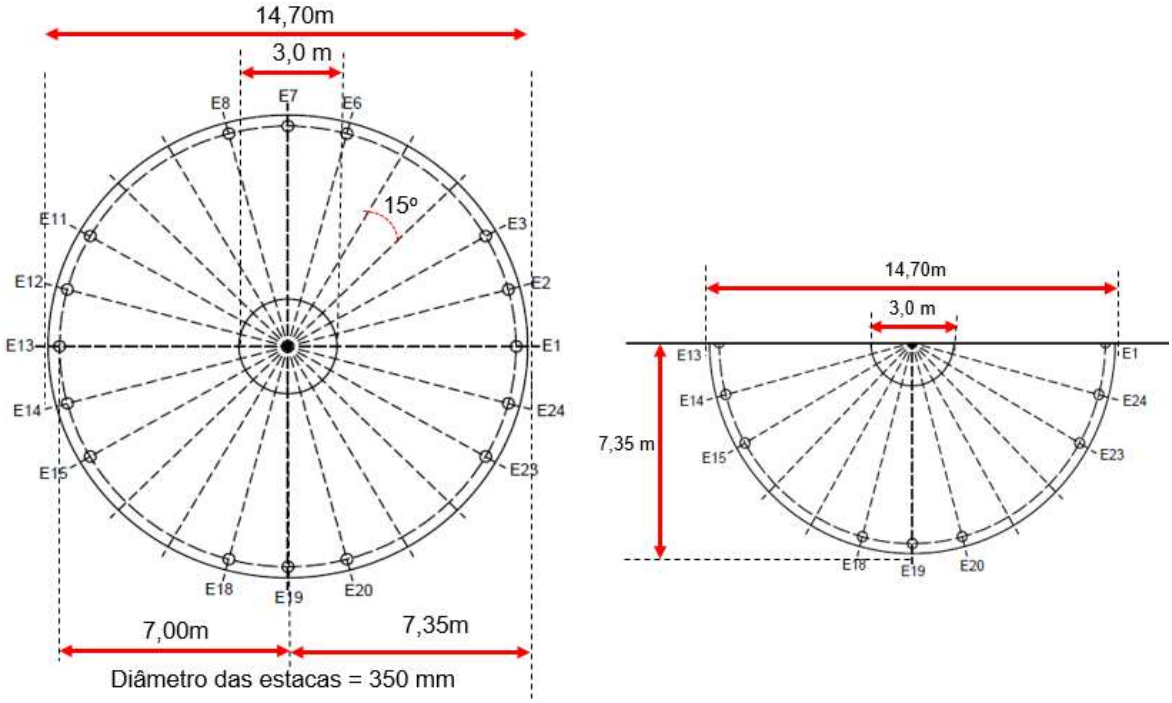


Figura 128 – Radier estaqueado sobre 16 estacas, RE16B.

Algumas figuras obtidas através da modelagem numérica serão apresentadas. A Figura 129 apresenta a malha de elementos finitos definida para o bloco RE16A com 18.414 elementos e 52.251 nós. O bloco RE16B foi modelado com 17.901 elementos e 51.088 nós. Foram definidas malhas muito finas para todo o domínio modelado e aplicados refinamentos nas regiões do radier e das estacas. A Figura 130 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier das duas configurações de bloco analisadas neste item. Nela foram definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., J, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

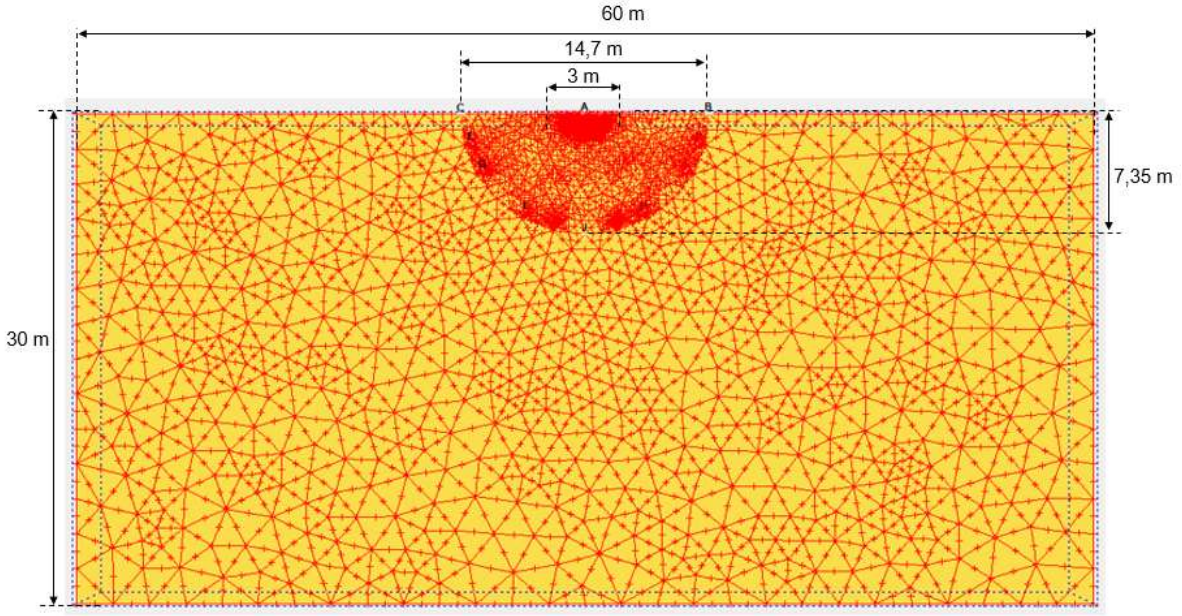
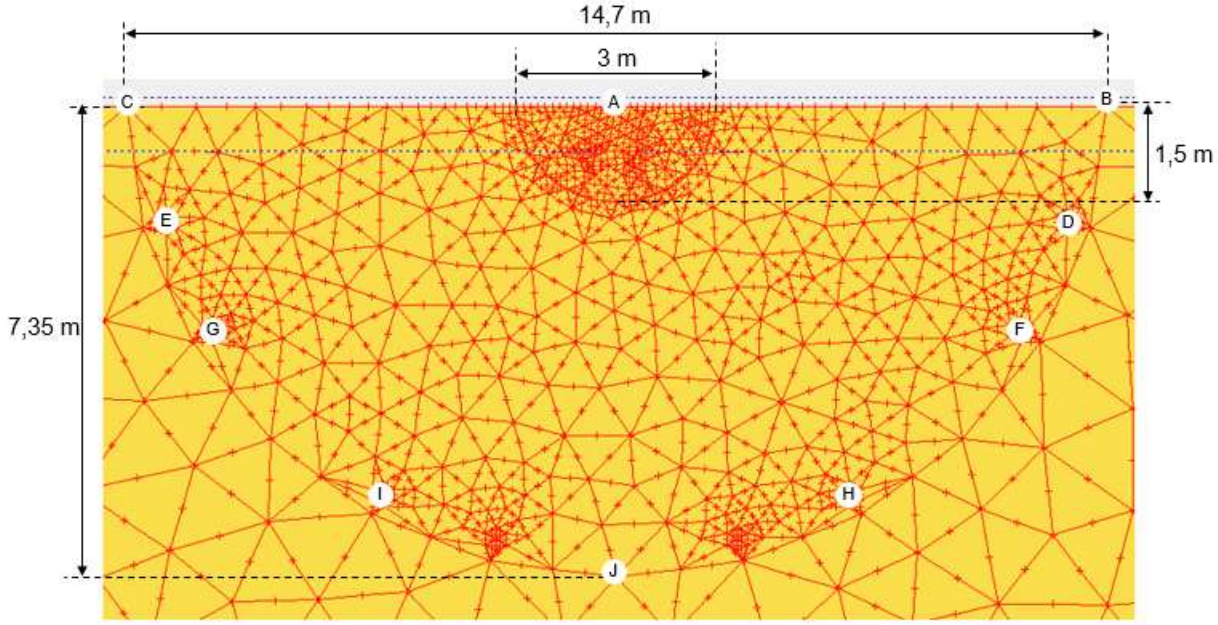
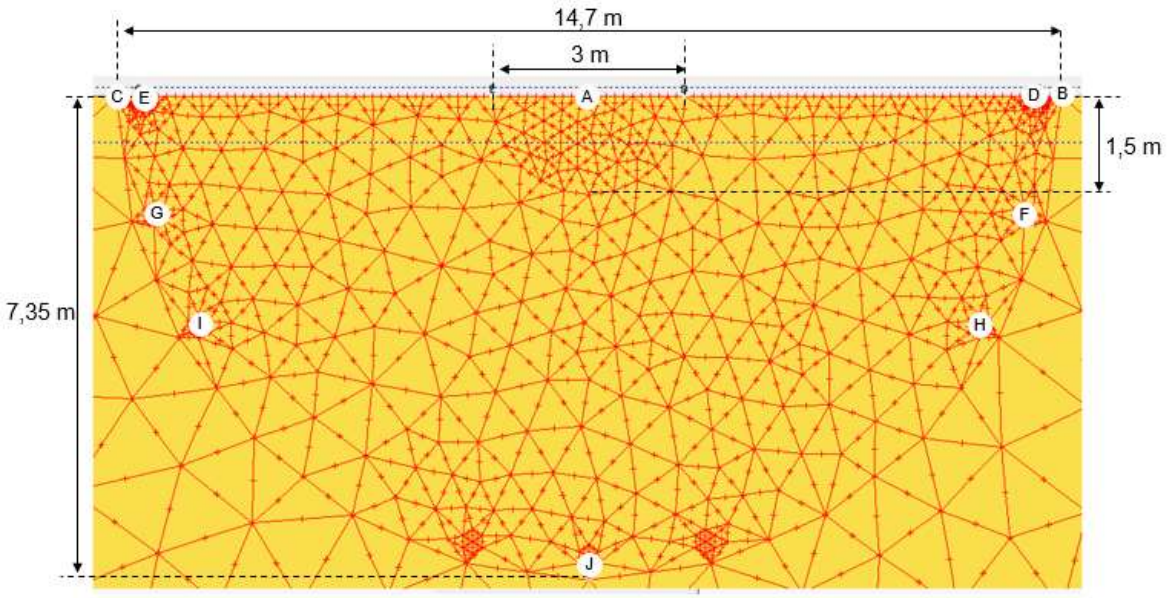


Figura 129 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE16A.



(a)



(b)

Figura 130 – Malha de elementos finitos na região do radier: (a) RE16A e (b) RE16B.

Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos do bloco RE16A. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 131.

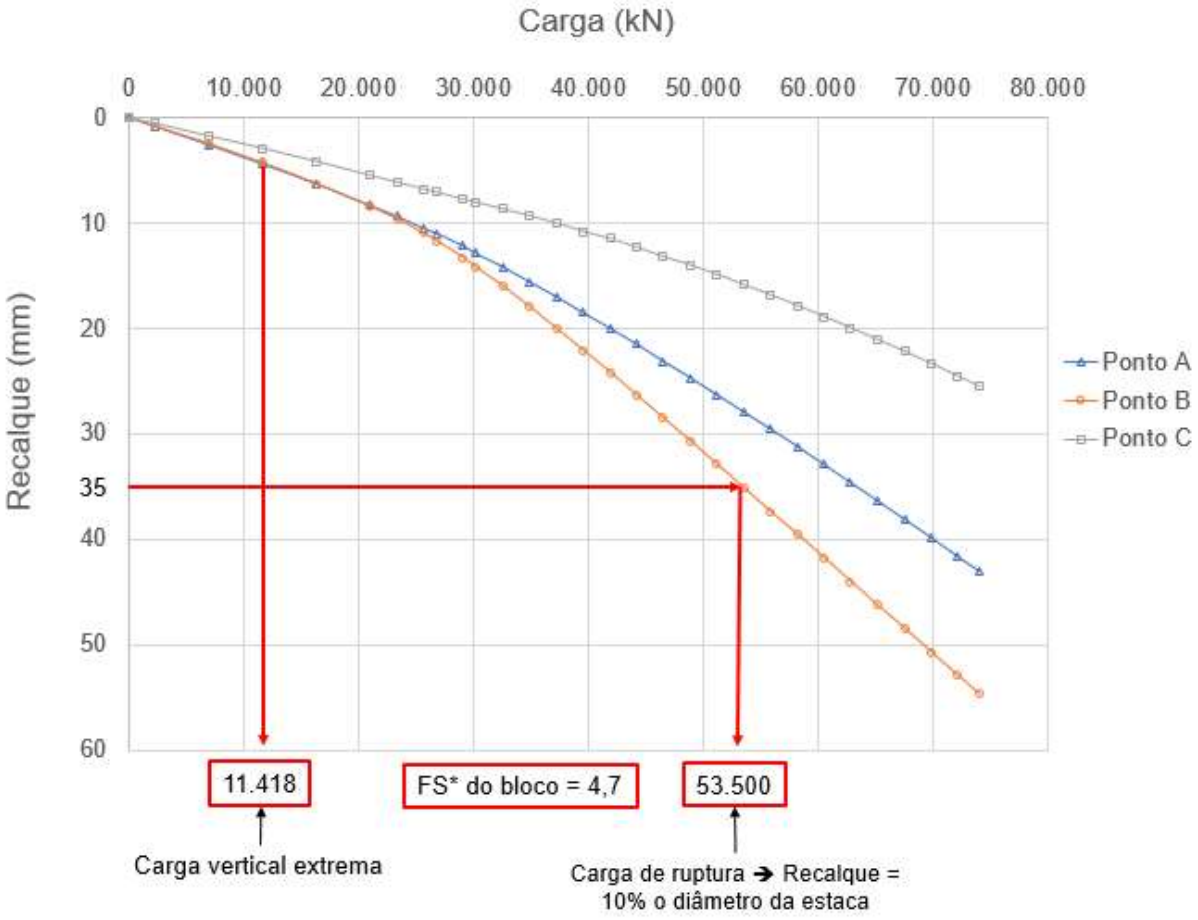


Figura 131 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE16A.

A Figura 132 apresenta os deslocamentos verticais em planta para o bloco RE16A. Esta imagem confirma que a escolha do domínio da modelagem contempla a área de influência das deformações em decorrência do carregamento atuante na fundação analisada.

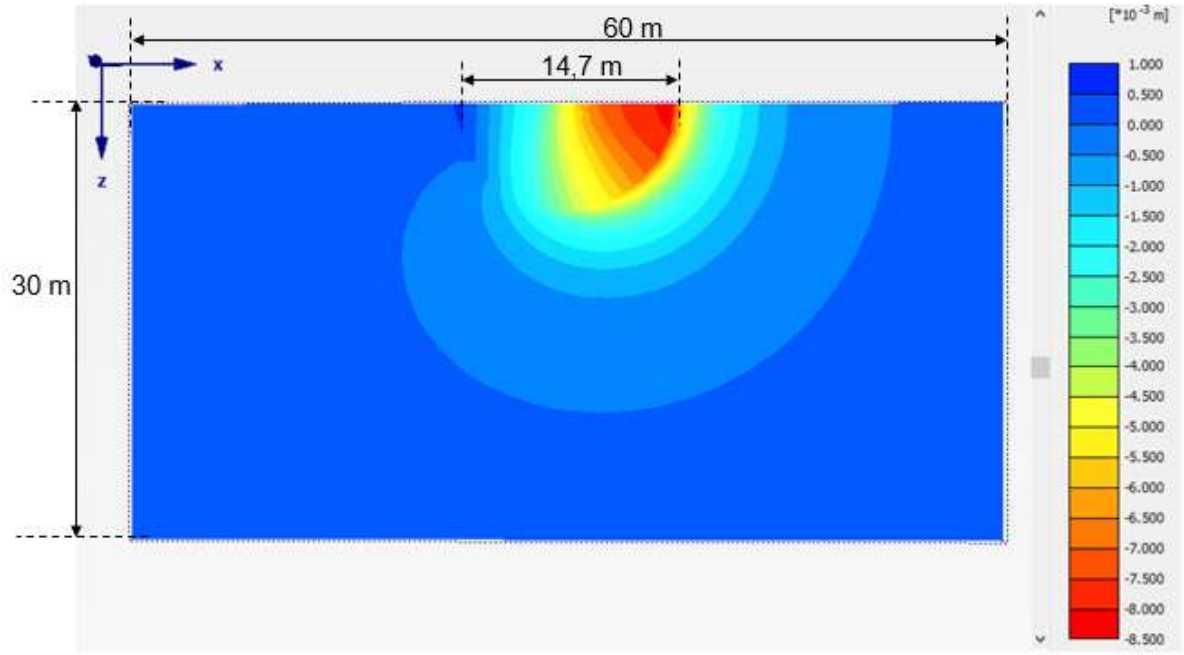


Figura 132 – Deslocamentos verticais no RE16A.

A Figura 133 apresenta a distribuição de tensão na cota de assentamento do radier do bloco RE16A. Observa-se uma maior tensão ao lado direito, correspondendo ao lado que recebe um maior esforço de compressão, devido ao momento fletor e ao carregamento horizontal que, atuando com um braço de alavanca igual a altura do bloco, provoca um aumento na tensão vertical na cota de assentamento do bloco.

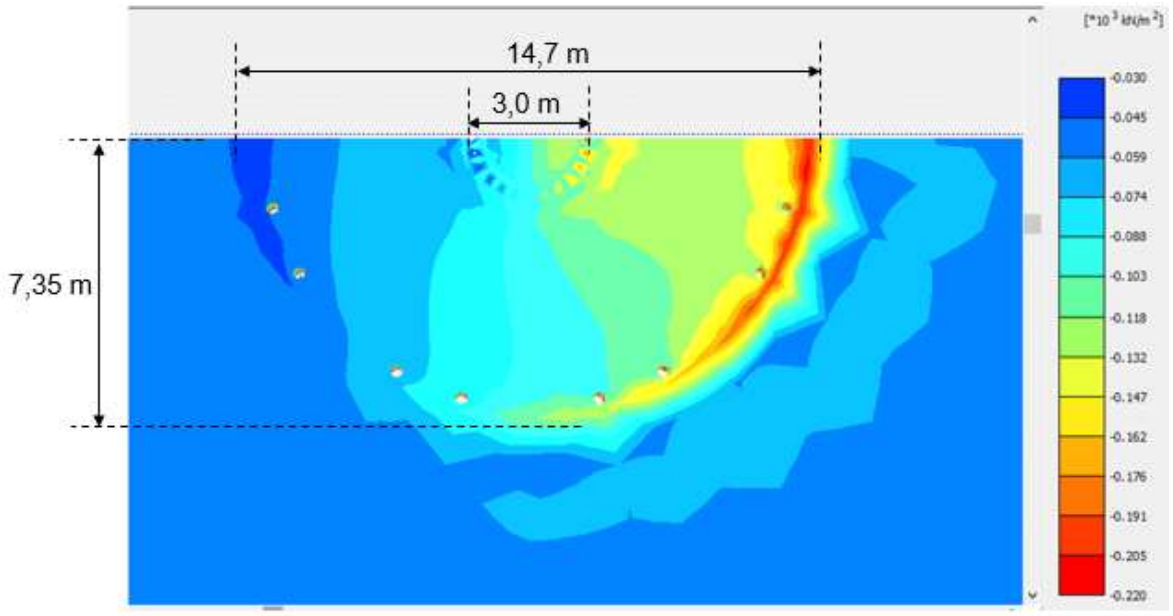


Figura 133 – Tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE16A.

A Figura 134 apresenta um corte no eixo de simetria do bloco RE16A onde pode-se visualizar o bloco, as estacas e os pares binários atuantes na região de transição de esforços da torre para o bloco. As forças dos pares binários vão reduzindo na medida em que se afastam do eixo de simetria, onde é observada a maior distância entre as forças do par de binário.

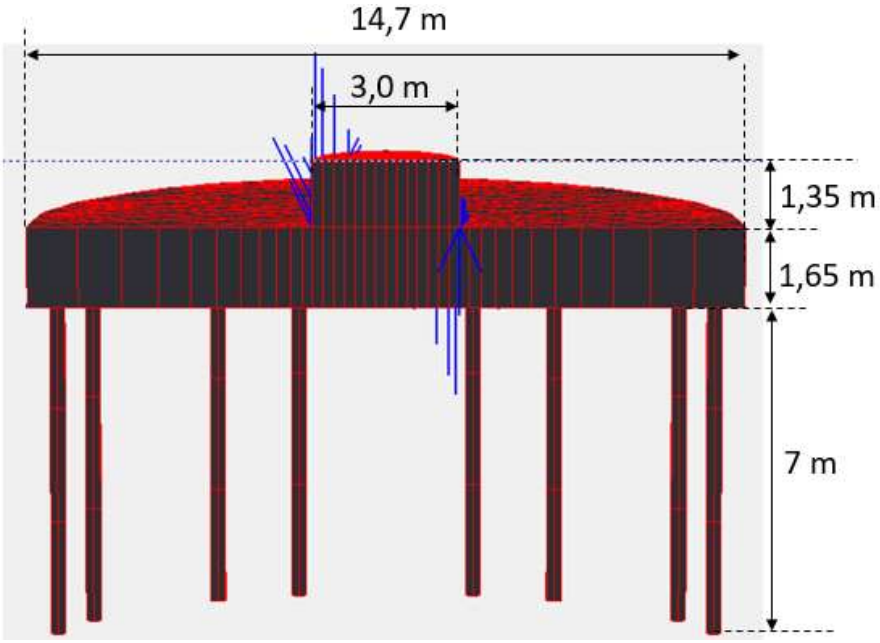


Figura 134 – Corte no eixo de simetria do bloco RE16A.

As Tabelas 34 e 35 apresentam os resultados das modelagens realizadas para as duas configurações de radier sobre 16 estacas, RE16A e RE16B.

Tabela 34 – Distribuição de esforços entre as estacas dos radiers sobre 16 estacas, nas configurações RE16A e RE16B.

Estacas	**Carga (kN)**	
	RE16A	**RE16B**
E1	Excluída	473
E2 = E24	330	310
E3 = E23	330	330
E4 = E22	Excluídas	Excluídas
E5 = E21	290	Excluídas
E6 = E20	251	257
E7 = E19	Excluídas	205
E8 = E18	155	153
E9 = E17	88	Excluídas
E10 = E16	Excluídas	Excluídas
E11 = E15	-4	6
E12 = E14	-31	-20
E13	Excluída	-52

Tabela 35 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 16 estacas, nas configurações RE16A e RE16B.

Resultados	RE16A	RE16B
Somatório do carregamento vertical nas estacas (kN)	2.818	2.903
Carregamento total vertical (cenário extremo) (kN)	11.418	11.418
% da carga vertical nas estacas	25%	25%
% da carga vertical no radier	75%	75%
Carga máxima de compressão na estaca (kN)	330	473
Carga máxima de tração na estaca (kN)	-31	-52
Carga vertical de ruptura da fundação (kN)	53.500	Não verificado
FS*	4,7	Não verificado
Carga máxima na estaca para carga de ruptura do bloco (kN)	625	Não verificado
Recalque máximo (mm)	8,2	7,8
Distorção do radier**	1/1.667	1/1.754
Rigidez a rotação (GN.m/rad)	74,6	79,3

* Considerado a relação entre a carga vertical que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca pela carga vertical extrema atuante na fundação. Nesta verificação, foi considerado o recalque máximo no radier, localizado no ponto B, definido na figura que apresenta a malha de elementos finitos. Este ponto fica localizado na extremidade da direita, no sentido de atuação do momento fletor.

** Distorção entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento

A distribuição RE16A, apesar de apresentar uma distorção angular maior do que a do bloco RE16B, apresenta uma melhor distribuição de esforços entre as estacas. No bloco RE16B, por haver estacas sobre o eixo de simetria, uma em cada extremidade, estas acabam absorvendo um maior carregamento, de compressão e tração nas extremidades opostas. Na distribuição RE16A, onde a estaca mais carregada absorve uma carga 30% inferior à estaca mais carregada do bloco RE16B. Para ambas as distribuições, a rigidez rotacional atende ao limite mínimo de 61 GN.m/rad estabelecido pelo fabricante, com os blocos RE16A e RE16B apresentando os valores de 74,56 e 79,26 GN.m/rad, respectivamente. No caso da distorção angular observada para as duas distribuições, observa-se que ambos os blocos apresentam uma distorção angular inferior ao limite máximo de 1/800 estabelecido por Bjerrum (1963) para máquinas sensíveis a recalques.

O fator de segurança da estaca mais carregada, 473 kN, é superior a 2 quando relacionada com a carga admissível obtida através da PCE3 no valor de 508 kN, que majorada em 30% para carregamento extremo é de 660 kN.

Ao realizar uma modelagem para levar o bloco RE16A à ruptura, obteve-se uma carga de ruptura para o bloco que garante um fator de segurança de 4,7. Ou seja, a exclusão de 4 estacas, do bloco com 20 estacas, representou uma redução de 4,9 para 4,7 no fator de segurança, ambos bem superiores ao fator de segurança para fundação profunda, 2, e para fundação superficial, 3.

4.4 RADIER SOBRE 12 ESTACAS (RE12A e RE12B)

Tendo verificado que o radier estaqueado sobre 16 estacas estava trabalhando abaixo da sua capacidade de carga, respeitando ao limite de rigidez rotacional exigido pelo fabricante da torre, foi verificado o comportamento com a exclusão de mais 4 estacas do bloco, ficando agora um radier sobre 12 estacas. Foram consideradas duas configurações de bloco, possibilitando uma análise complementar da interferência a posição das estacas na distribuição de esforços e na rigidez rotacional. As Figuras 135 e 136 apresentam as duas configurações analisadas.

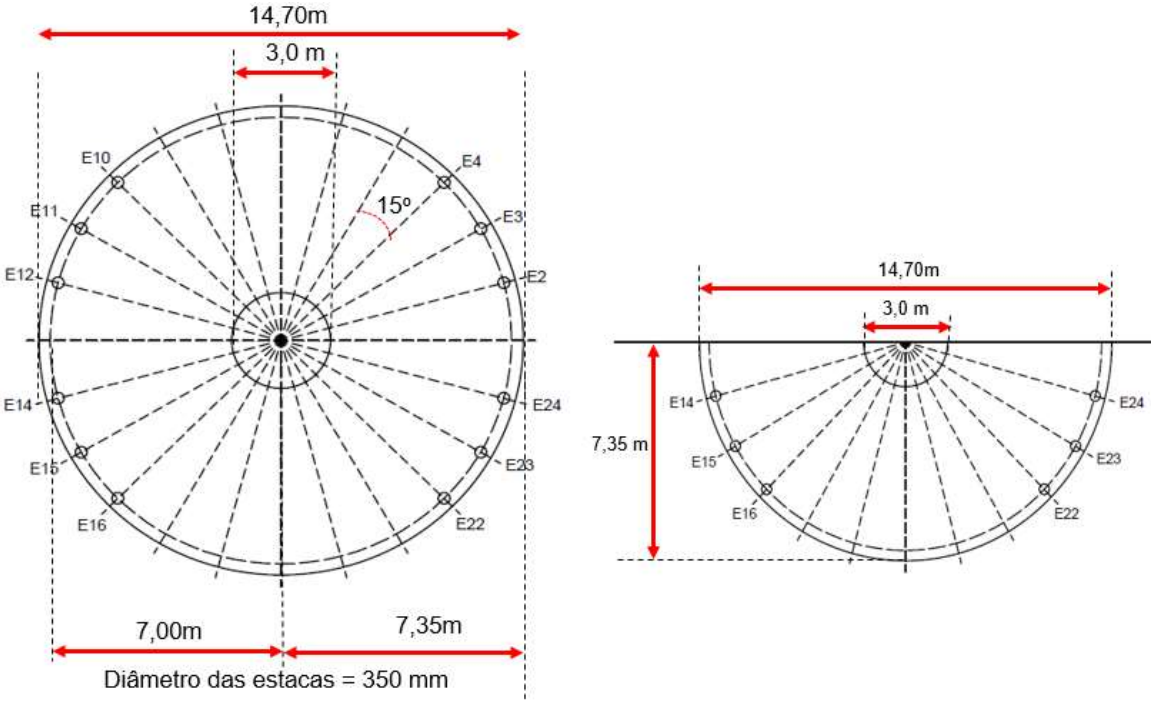


Figura 135 – Radier estaqueado sobre 12 estacas, RE12A.

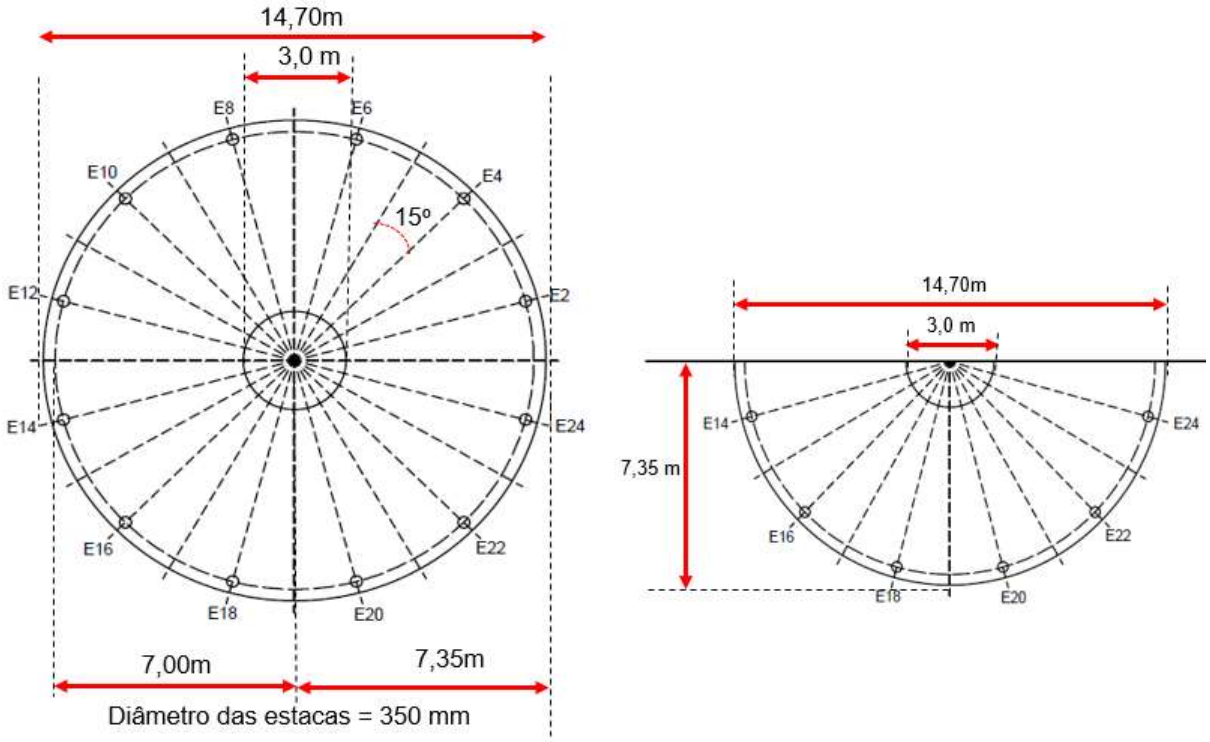


Figura 136 – Radier estaqueado sobre 12 estacas, RE12B.

Algumas figuras obtidas através da modelagem numérica serão apresentadas. A Figura 137 apresenta a malha de elementos finitos do RE12A com 22.950 elementos e 64.544 nós. O bloco RE12B foi modelado com 23.454 elementos e 65.916 nós. Foram definidas malhas muito finas para todo o domínio modelado e aplicados refinamentos nas regiões do radier e das estacas. A Figura 138 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier. Nela foram definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., J, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

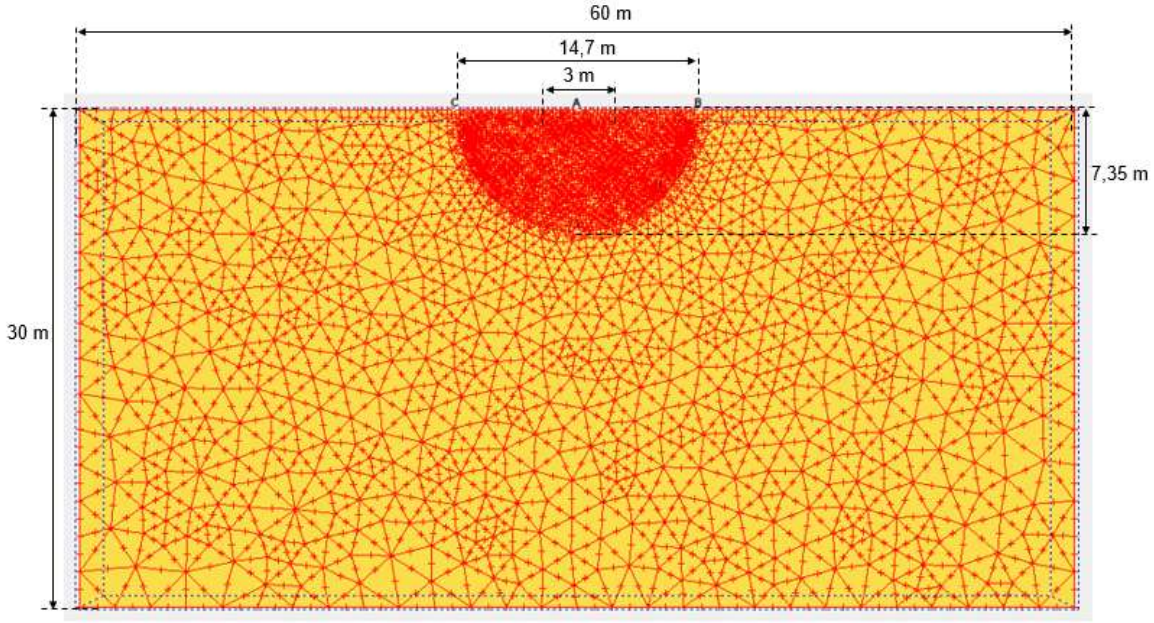
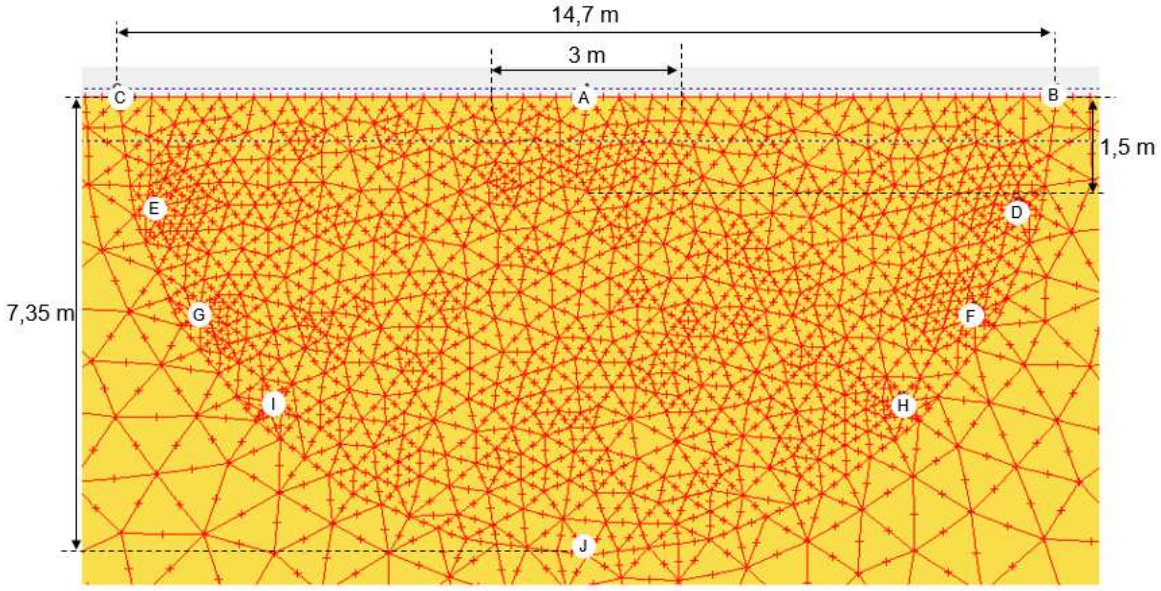
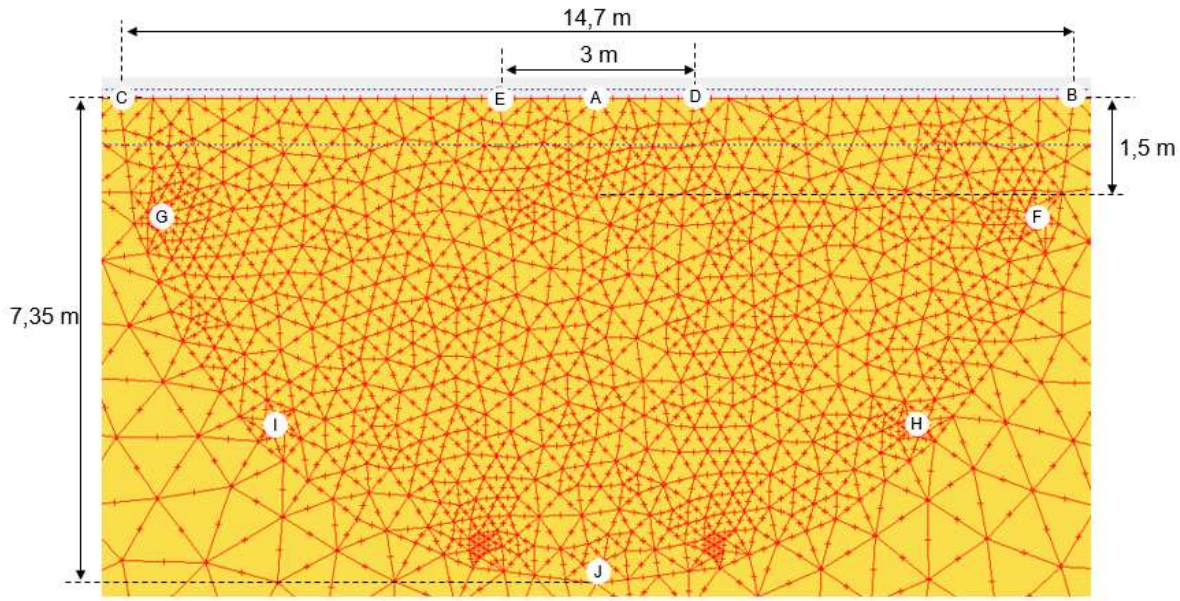


Figura 137 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE12A.



(a)



(b)

Figura 138 – Malha de elementos finitos na região do radier, (a) RE12A; e (b) RE12B.

Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos do bloco RE12A. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 139.

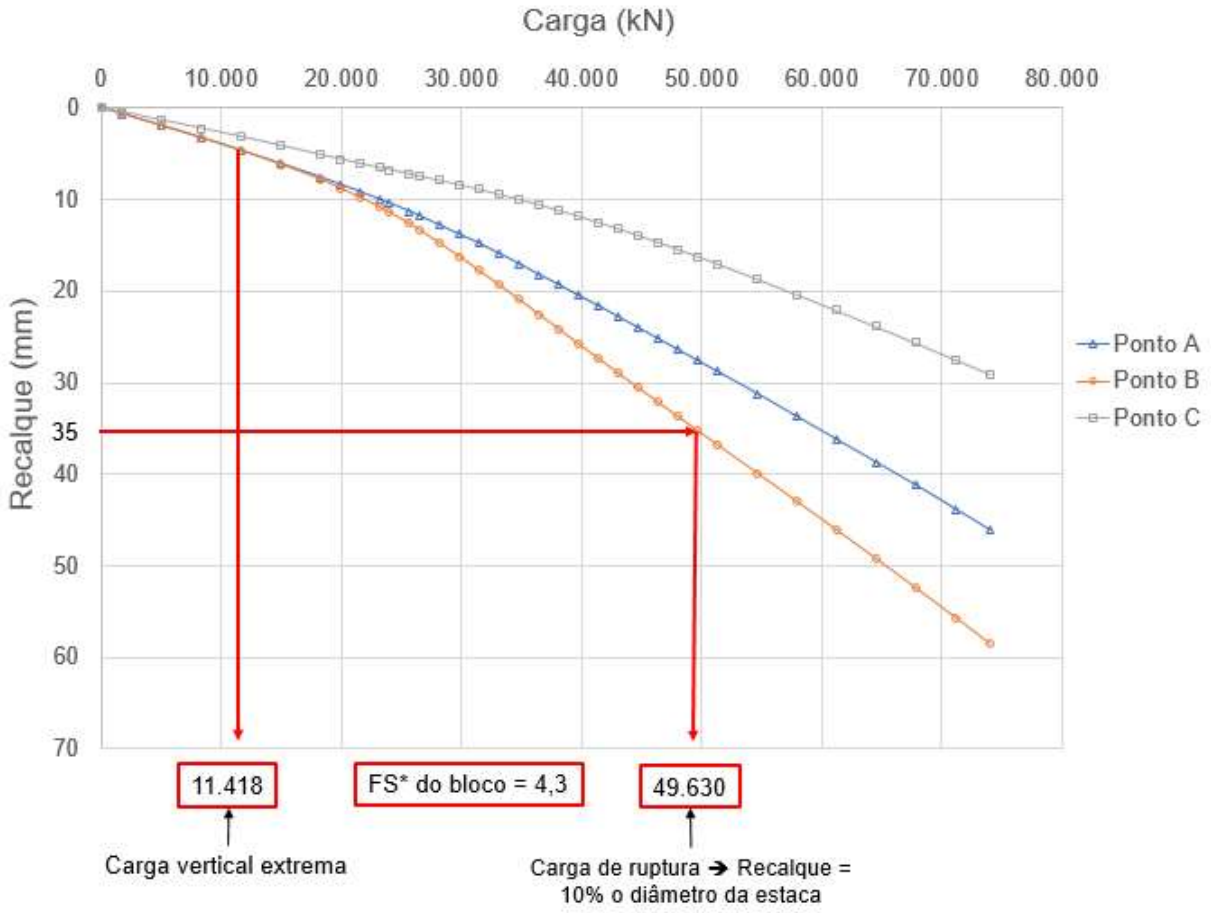


Figura 139 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE12A.

A Figura 140 apresenta os deslocamentos verticais em planta para o bloco RE12A. Esta imagem confirma que a escolha do domínio da modelagem contempla a área de influência das deformações em decorrência do carregamento atuante na fundação analisada.

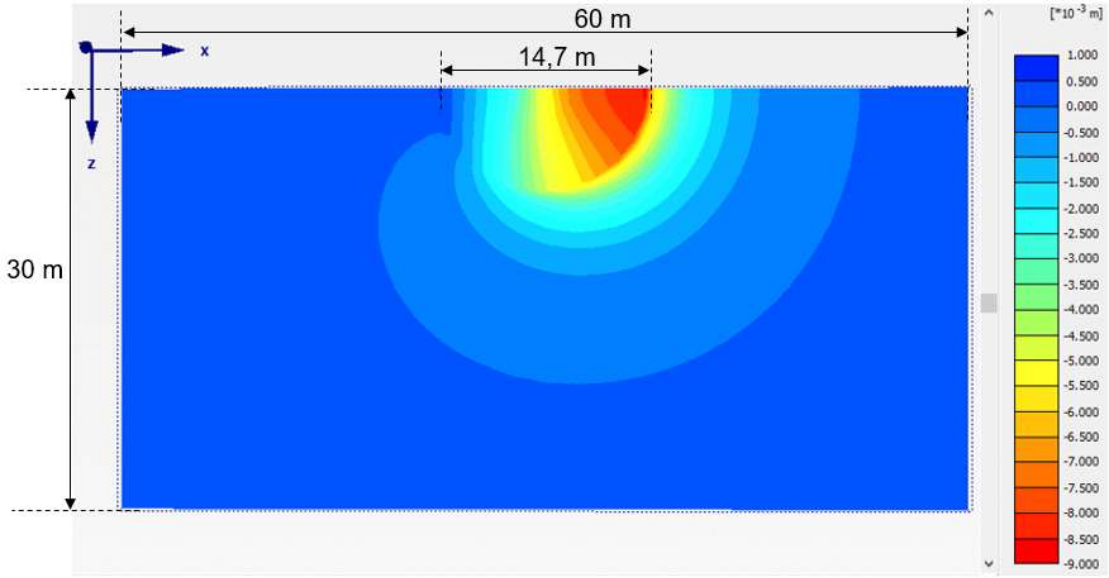


Figura 140 – Deslocamentos verticais no RE12A.

A Figura 141 apresenta a distribuição de tensão na cota de assentamento do radier do bloco RE12A. Observa-se uma maior tensão ao lado direito, correspondendo ao lado que recebe o esforço de compressão devido ao momento fletor e ao carregamento horizontal que, atuando com um braço de alavanca igual a altura do bloco, provoca um aumento na tensão vertical na cota de assentamento do bloco.

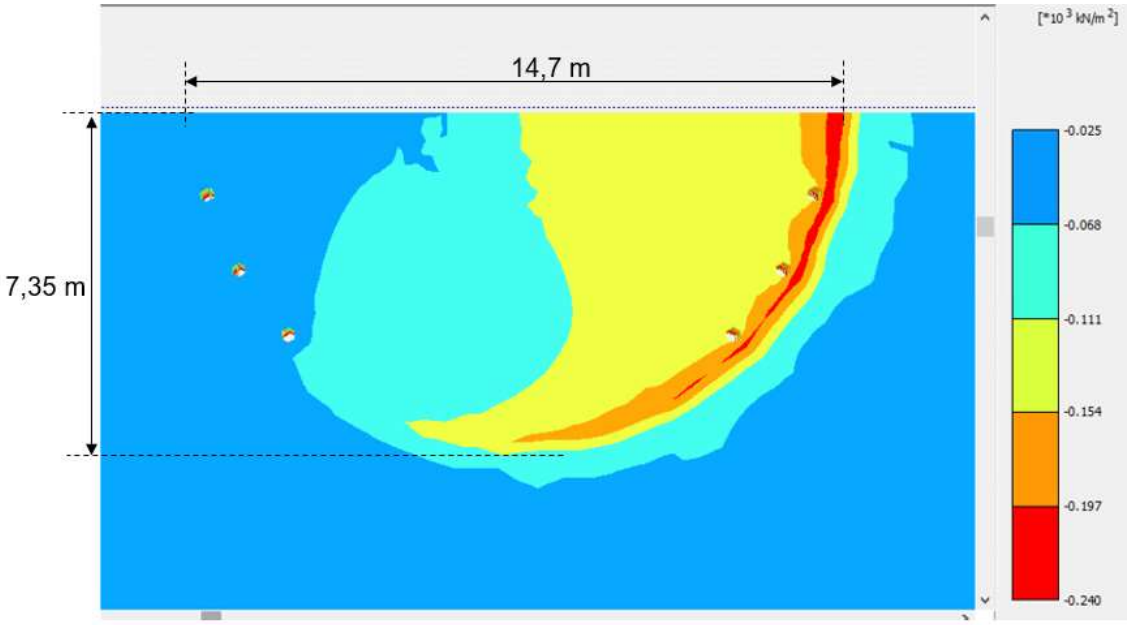


Figura 141 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE12A.

A Figura 142 apresenta um corte no eixo de simetria do bloco RE12A onde pode ser visualizado o bloco, as estacas e os pares binários atuantes na região de transição de esforços da torre para o bloco. Observa-se que os pares binários vão reduzindo de valor na medida em que se afastam do eixo de simetria, onde é observada a maior distância entre as forças.

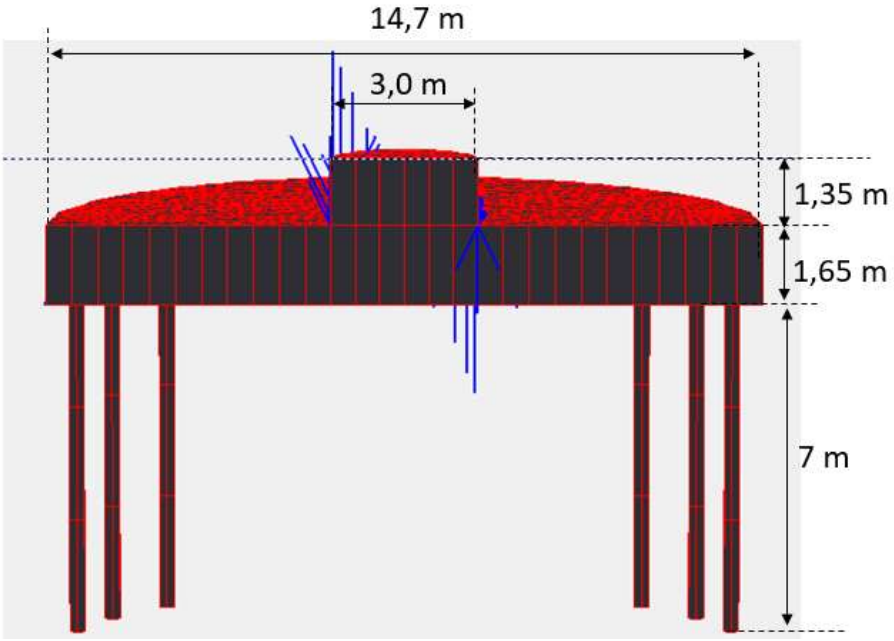


Figura 142 – Corte no eixo de simetria do bloco RE12A.

As Tabelas 36 e 37 apresentam os resultados das modelagens realizadas para as duas configurações de radier sobre 12 estacas, RE12A e RE12B.

Tabela 36 – Distribuição de esforços entre as estacas dos radiers sobre 12 estacas, nas configurações RE12A e RE12B.

Estacas	**Carga (kN)**	
	RE12A	**RE12B**
E1	Excluída	Excluída
E2 = E24	330	340
E3 = E23	320	Excluídas
E4 = E22	320	327
E5 = E21	Excluídas	Excluídas
E6 = E20	Excluídas	280
E7 = E19	Excluídas	Excluídas
E8 = E18	Excluídas	173
E9 = E17	Excluídas	Excluídas
E10 = E16	63	37
E11 = E15	9	Excluídas
E12 = E14	-22	-38
E13	Excluída	Excluída

Tabela 37 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 12 estacas, nas configurações RE12A e RE12B.

Resultados	RE12A	RE12B
Somatório do carregamento vertical nas estacas (kN)	2.040	2.238
Carregamento total vertical (cenário extremo) (kN)	11.418	11.418
% da carga vertical nas estacas	18%	20%
% da carga vertical no radier	82%	80%
Carga máxima de compressão na estaca (kN)	330	340
Carga máxima de tração na estaca (kN)	-22	-38
Carga vertical de ruptura da fundação (kN)	49.630	Não verificado
FS*	4,3	Não verificado
Carga máxima na estaca para carga de ruptura do bloco (kN)	592	Não verificado
Recalque máximo (mm)	9,0	9,0
Distorção do radier**	1/1.613	1/1.449
Rigidez a rotação (GN.m/rad)	72,5	65,3

* Considerado a relação entre a carga vertical que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca pela carga vertical extrema atuante na fundação. Nesta verificação, foi considerado o recalque máximo no radier, localizado no ponto B, definido na figura que apresenta a malha de elementos finitos. Este ponto fica localizado na extremidade da direita, no sentido de atuação do momento fletor.

** Distorção entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento

A disposição das estacas no bloco RE12B promove um acréscimo de 10% no rateio do carregamento para as estacas deste bloco, quando comparado ao bloco RE12A. Analisando a distribuição das estacas, observa-se que o bloco RE12B apresenta uma distribuição das estacas mais uniforme ao redor da extremidade do bloco, quando comparado ao bloco RE12A, onde estacas estão concentradas nas proximidades do eixo de simetria. A maior uniformidade de distribuição garante às estacas do bloco RE12B um maior percentual do carregamento, quando comparado com o bloco com estacas mais concentradas. Por outro lado, a maior concentração de estacas mais afastadas do centro do bloco, RE12A, favorecem a uma menor distorção angular, como é de se esperar pela maior contribuição na reação aos momentos atuantes.

Para ambas as configurações, a carga de trabalho extrema na estaca mais carregada é muito aproximada, divergindo apenas 2,7% entre elas. Para as duas configurações, a rigidez rotacional atende ao limite mínimo de 61 GN.m/rad definido pelo fabricante, sendo elas 72,5 e 65,3 GN.m/rad para os blocos RE12A e RE12B, respectivamente. Para ambas

configurações de bloco, a distorção angular é inferior ao limite máximo de 1/800 estabelecido por Bjerrum (1963) para máquinas sensíveis a recalques.

O fator de segurança da estaca mais carregada, 340 kN, é superior a 2 quando relacionada com a carga admissível obtida através da PCE3 no valor de 508 kN, que majorada em 30% para carregamento extremo é de 660 kN.

Ao realizar uma modelagem para levar o bloco RE12A à ruptura, obteve-se uma carga de ruptura para o bloco que garante um fator de segurança de 4,3. Ou seja, a exclusão de 4 estacas, do bloco com 16 estacas, representou uma redução de 4,7 para 4,3 no fator de segurança, ambos bem superiores ao fator de segurança para fundação profunda, 2, e para fundação superficial, 3.

4.5 RADIER SOBRE 10 ESTACAS (RE10A e RE10B)

Tendo verificado que o radier estaqueado sobre 12 estacas estava trabalhando abaixo da sua capacidade de carga, respeitando ao limite de rigidez rotacional exigido pelo fabricante da torre, foi verificado o comportamento com a exclusão de mais 2 estacas do bloco, ficando agora um radier sobre 10 estacas. Foram consideradas duas configurações de bloco, possibilitando uma análise complementar da interferência a posição das estacas na distribuição de esforços e na rigidez rotacional. As Figuras 143 e 144 apresentam as duas configurações analisadas.

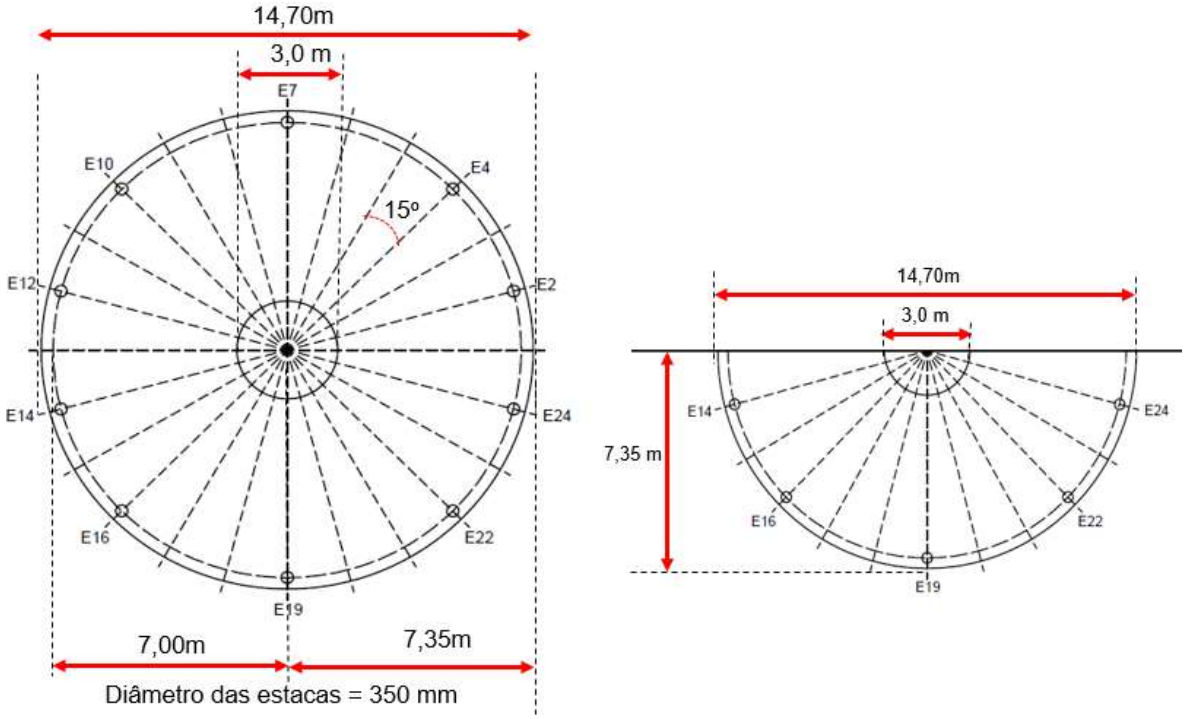


Figura 143 – Radier estaqueado sobre 10 estacas, RE10A.

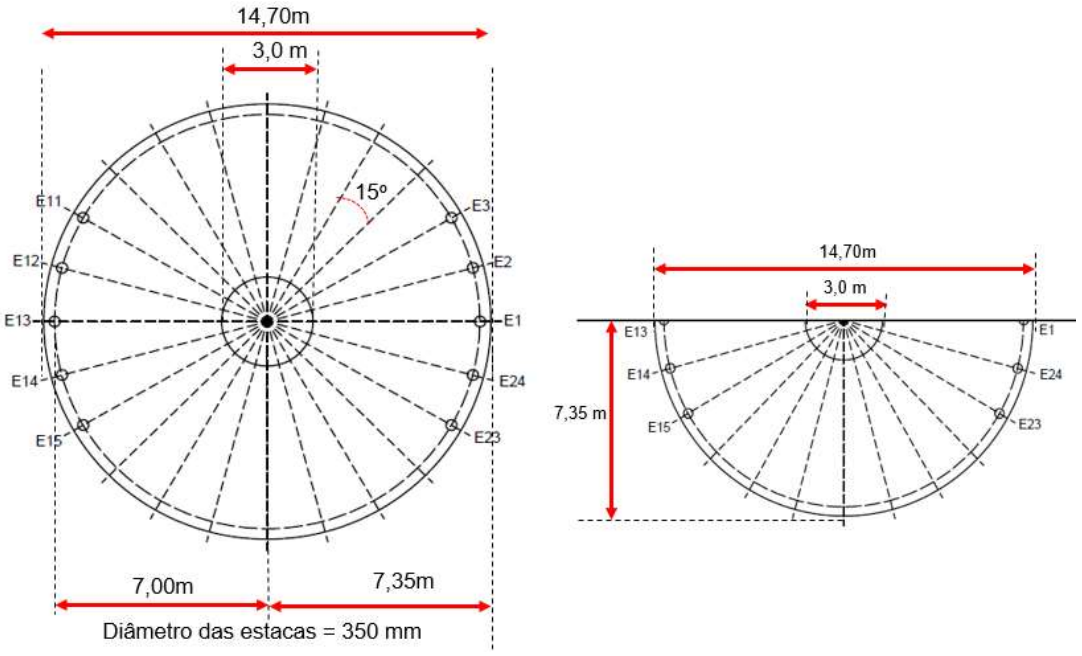


Figura 144 – Radier estaqueado sobre 10 estacas, RE10B.

Algumas figuras obtidas através da modelagem numérica serão apresentadas. A Figura 145 apresenta a malha de elementos finitos do RE10B com 23.580 elementos e 66.204 nós. O bloco RE10A foi modelado com 23.040 elementos e 64.747 nós. Foram definidas malhas muito finas para todo o domínio modelado e aplicados refinamentos nas regiões do radier e das estacas. A Figura 146 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier. Nela foram definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., J, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

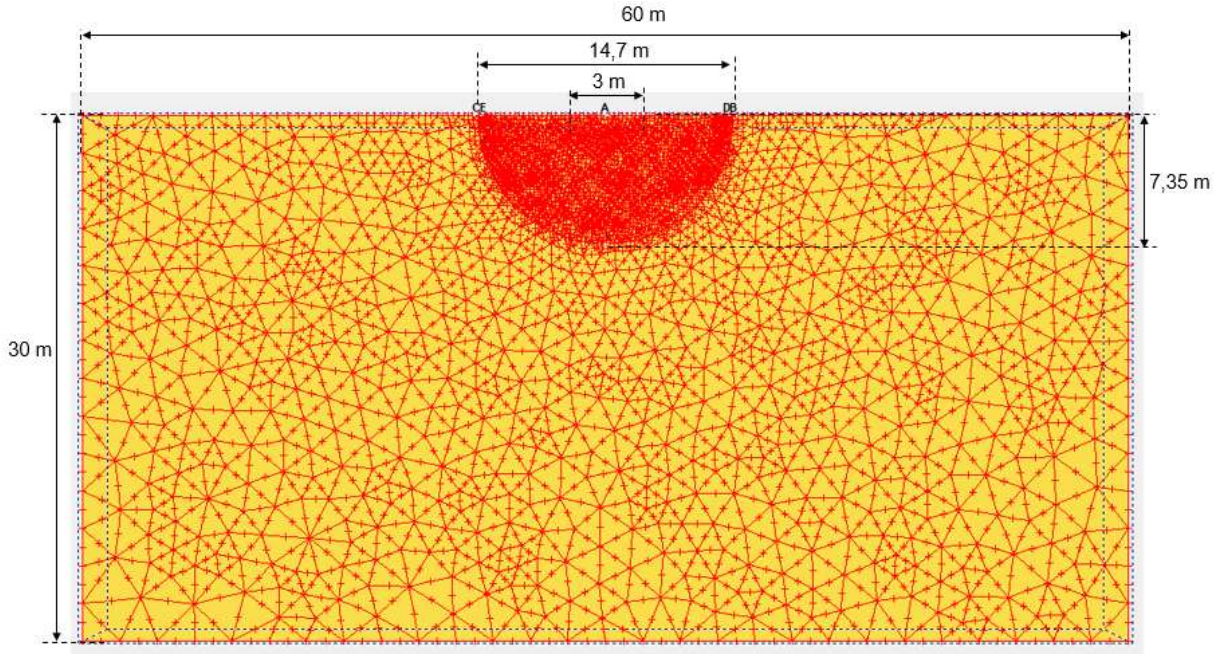
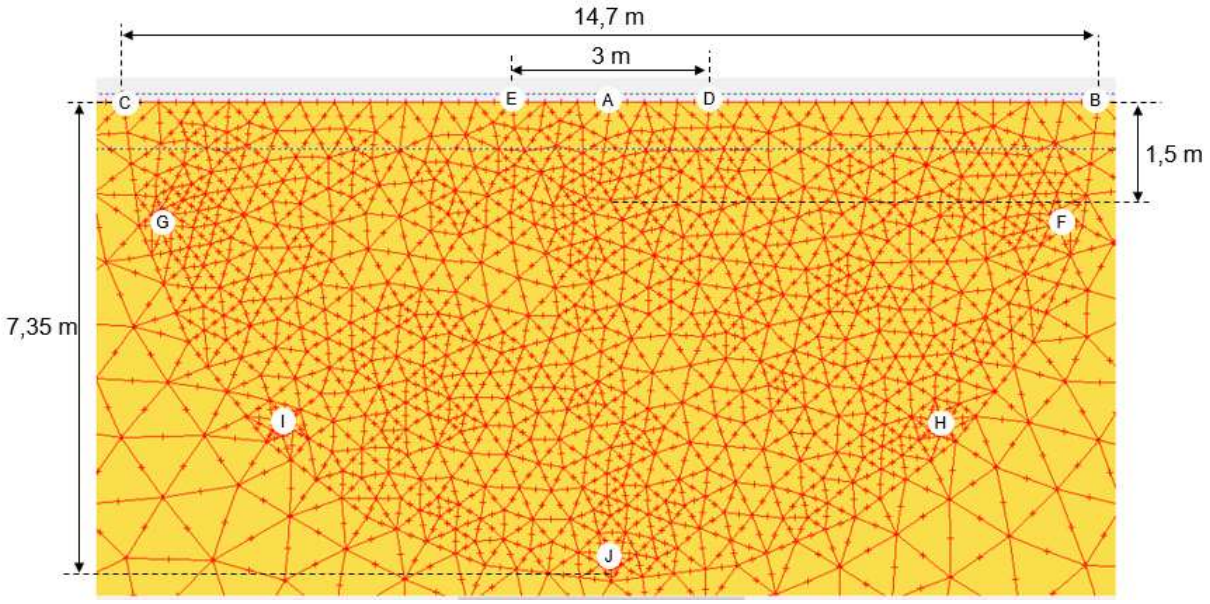
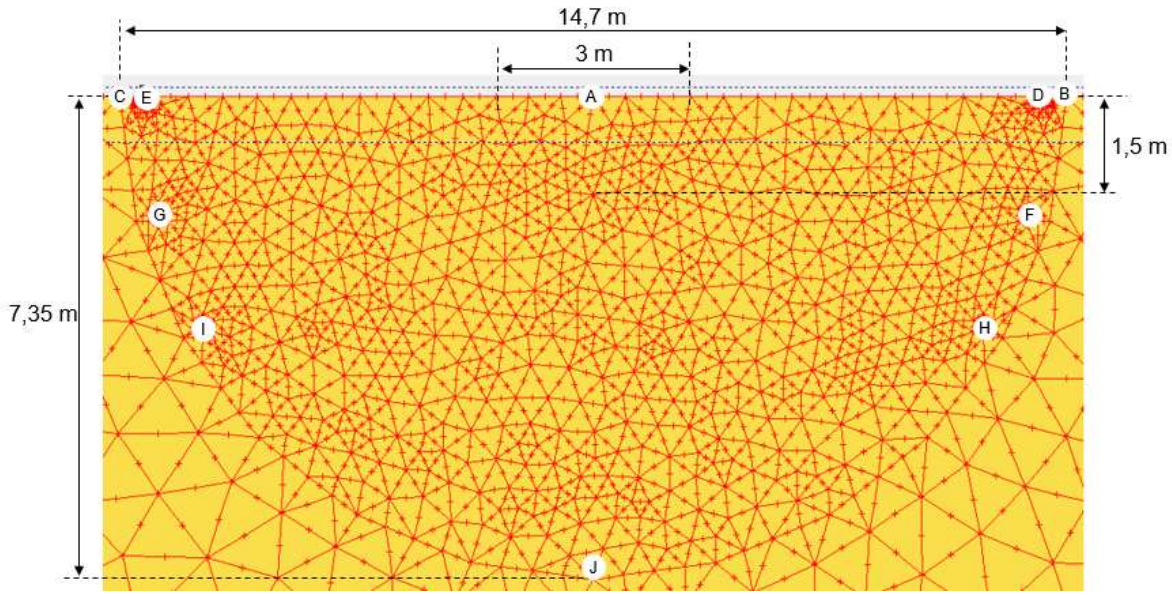


Figura 145 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE10B.



(a)



(b)

Figura 146 – Malha de elementos finitos na região do radier, (a) RE10A; e (b) RE10B.

Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos do bloco RE10A. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 147.

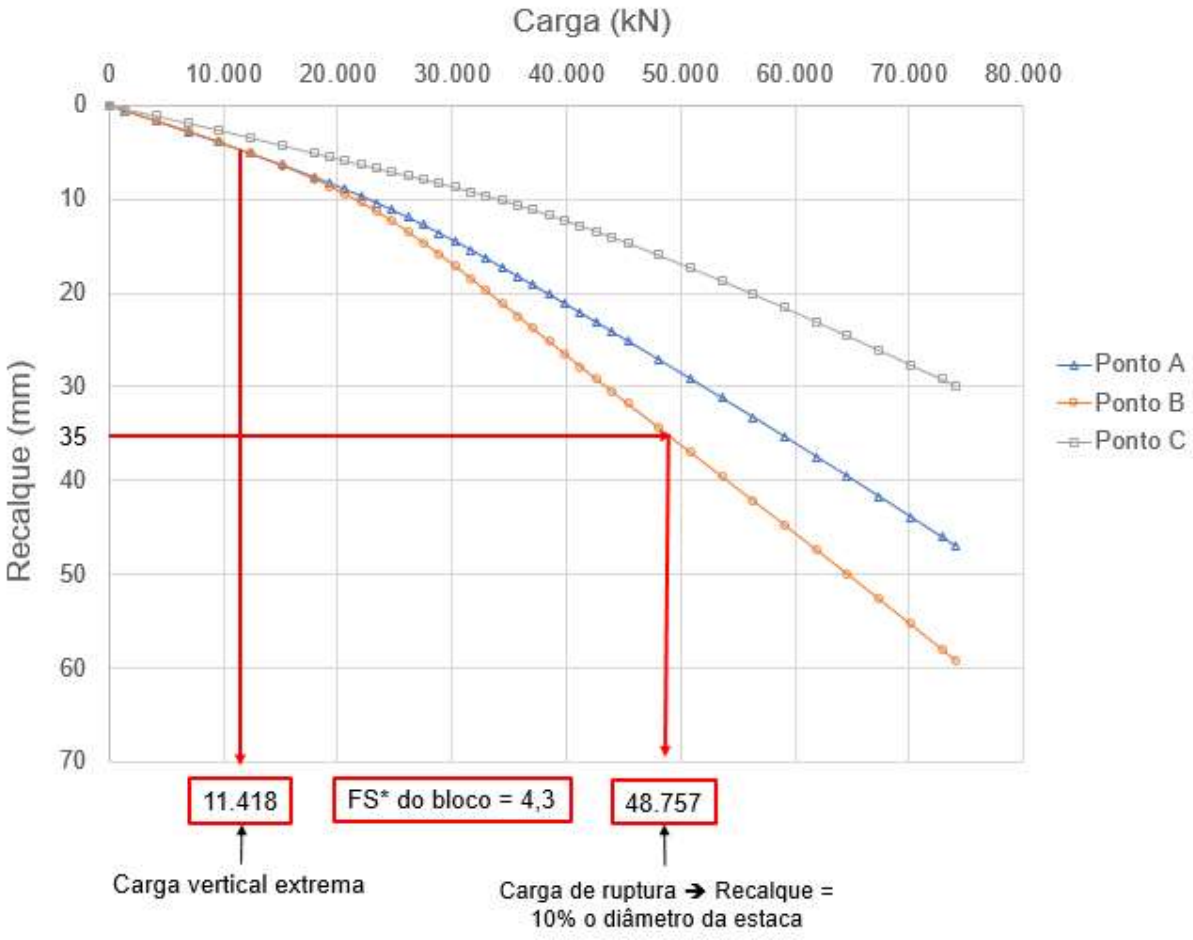


Figura 147 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE10A.

As Figuras 148 e 149 apresentam os deslocamentos verticais em vista de perfil e em planta, respectivamente, para o bloco RE10B. Estas imagens confirmam que a escolha

do domínio da modelagem contempla a área de influência das deformações em decorrência do carregamento atuante na fundação analisada.

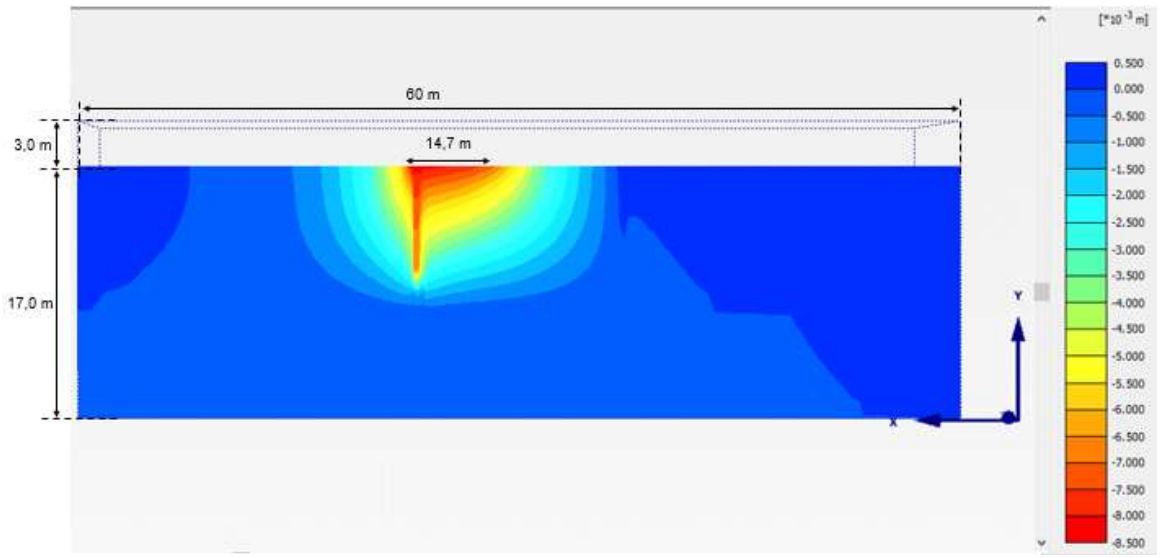


Figura 148 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE10B, vista na seção transversal na região central do bloco.

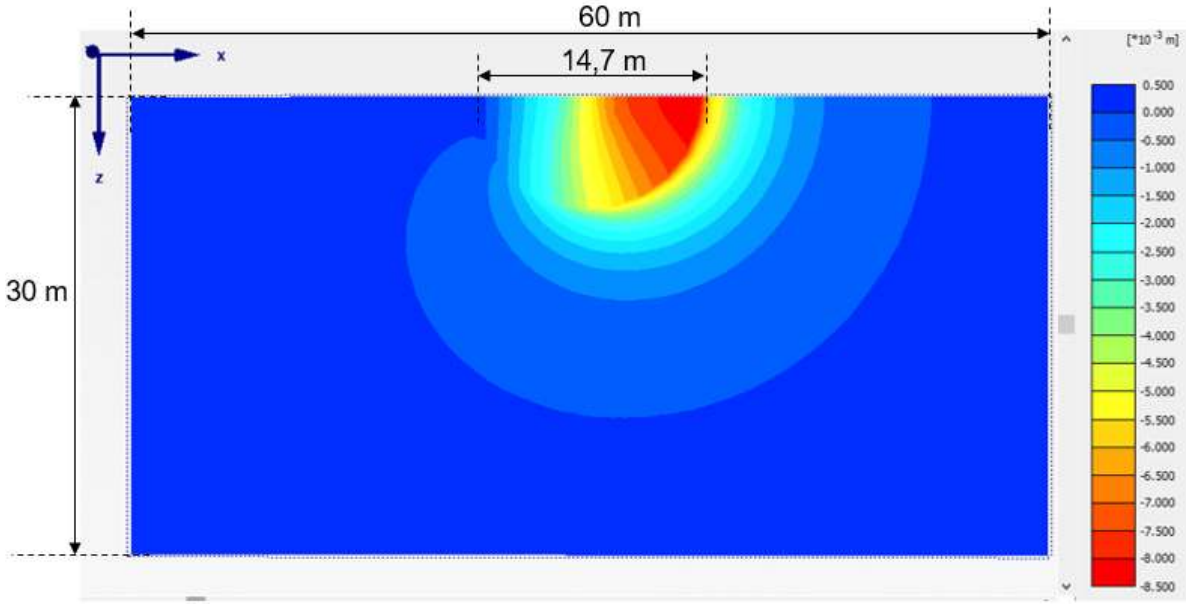


Figura 149 – Deslocamentos verticais no RE10B.

A Figura 150 apresenta a distribuição de tensão na cota de assentamento do radier do bloco RE10B. Observa-se uma maior tensão ao lado direito, correspondendo ao lado que recebe o esforço de compressão devido ao momento fletor e ao carregamento horizontal que, atuando com um braço de alavanca igual a altura do bloco, provoca um aumento na tensão vertical na cota de assentamento do bloco.

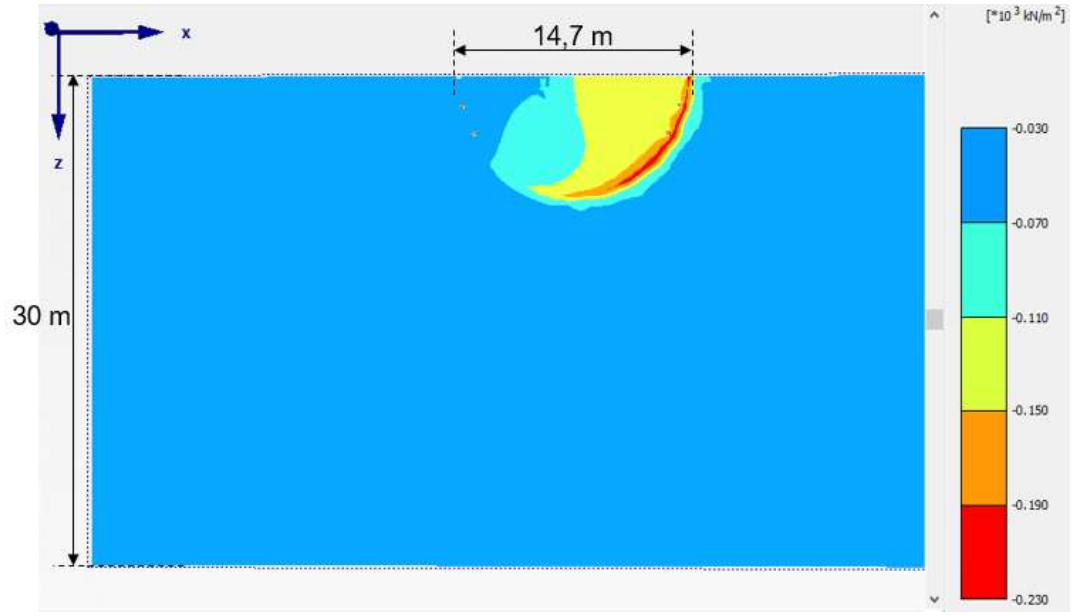


Figura 150 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE10B.

As Tabelas 38 e 39 apresentam os resultados das modelagens realizadas para as duas configurações de radier sobre 10 estacas, RE10A e RE10B.

Tabela 38 – Distribuição de esforços entre as estacas dos radiers sobre 10 estacas, nas configurações RE10A e RE10B.

Estacas	Carga (kN)	
	RE10A	RE10B
E1	Excluída	510
E2 = E24	345	330
E3 = E23	Excluídas	330
E4 = E22	329	Excluídas
E5 = E21	Excluídas	Excluídas
E6 = E20	Excluídas	Excluídas
E7 = E19	243	Excluídas
E8 = E18	Excluídas	Excluídas
E9 = E17	Excluídas	Excluídas
E10 = E16	46	Excluídas
E11 = E15	Excluídas	23
E12 = E14	-35	-10
E13	Excluída	-50

Tabela 39 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 10 estacas, nas configurações RE10A e RE10B.

Resultados	RE10A	RE10B
Somatório do carregamento vertical nas estacas (kN)	1.856	1.806
Carregamento total vertical (cenário extremo) (kN)	11.418	11.418
% da carga vertical nas estacas	16%	16%
% da carga vertical no radier	84%	84%
Carga máxima de compressão na estaca (kN)	345	510
Carga máxima de tração na estaca (kN)	-35	-50
Carga vertical de ruptura da fundação (kN)	48757	Não verificado
FS*	4,3	Não verificado
Carga máxima na estaca para carga de ruptura do bloco (kN)	603	Não verificado
Recalque máximo (mm)	9,5	8,4
Distorção do radier**	1/1.429	1/1.667
Rigidez a rotação (GN.m/rad)	64,0	76,0

* Considerado a relação entre a carga vertical que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca pela carga vertical extrema atuante na fundação. Nesta verificação, foi considerado o recalque máximo no radier, localizado no ponto B, definido na figura que apresenta a malha de elementos finitos. Este ponto fica localizado na extremidade da direita, no sentido de atuação do momento fletor.

** Distorção entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento

As estacas dos dois blocos absorvem praticamente o mesmo percentual do carregamento aplicado à fundação. Apesar do bloco RE10A apresentar uma distribuição mais uniforme das estacas, favorecendo a um acréscimo do percentual do carregamento para as estacas, o bloco RE10B, ainda que apresente uma distribuição mais concentrada, trabalha com estacas no eixo de simetria do bloco, posição que garante uma maior absorção da carga decorrente do momento.

O bloco RE10B, por apresentar estacas mais afastadas na direção de atuação dos momentos, onde são observados os maiores recalques, este posicionamento contribui na redução da distorção angular, contribuindo com a rigidez rotacional do bloco. O valor da rigidez rotacional obtida para o bloco RE10B foi de 75,56 GN.m/rad, enquanto o bloco RE10A, com as estacas uniformemente distribuídas ao redor da extremidade do bloco, apresentou uma rigidez rotacional de 64,36 GN.m/rad. Para as duas configurações, a rigidez rotacional atende ao limite mínimo de 61 GN.m/rad definido pelo fabricante, assim como a distorção angular é inferior ao limite máximo de 1/800 estabelecido por Bjerrum (1963) para máquinas sensíveis a recalques.

O fator de segurança da estaca mais carregada, 510 kN, é igual a 2 quando relacionada com a carga admissível obtida através da PCE3 no valor de 508 kN, que majorada em 30% para carregamento extremo é de 660 kN.

Ao realizar uma modelagem para levar o bloco RE10A à ruptura, obteve-se uma carga de ruptura para o bloco que garante um fator de segurança de 4,3. Ou seja, a exclusão de 2 estacas, do bloco com 12 estacas, representou uma redução mínima no fator de segurança, que se equivalem quando arredondados para uma casa decimal, 4,3, ambos bem superiores ao fator de segurança para fundação profunda, 2, e para fundação superficial, 3.

4.6 RADIER SOBRE 8 ESTACAS (RE8A e RE8B)

Tendo verificado que o radier estaqueado sobre 10 estacas estava trabalhando abaixo da sua capacidade de carga, respeitando ao limite de rigidez rotacional exigido pelo fabricante da torre, foi verificado o comportamento com a exclusão de mais 2 estacas do bloco, ficando agora um radier sobre 8 estacas. Foram consideradas duas configurações de bloco, possibilitando uma análise complementar da interferência a posição das estacas na distribuição de esforços e na rigidez rotacional. As Figuras 151 e 152 apresentam as duas configurações analisadas.

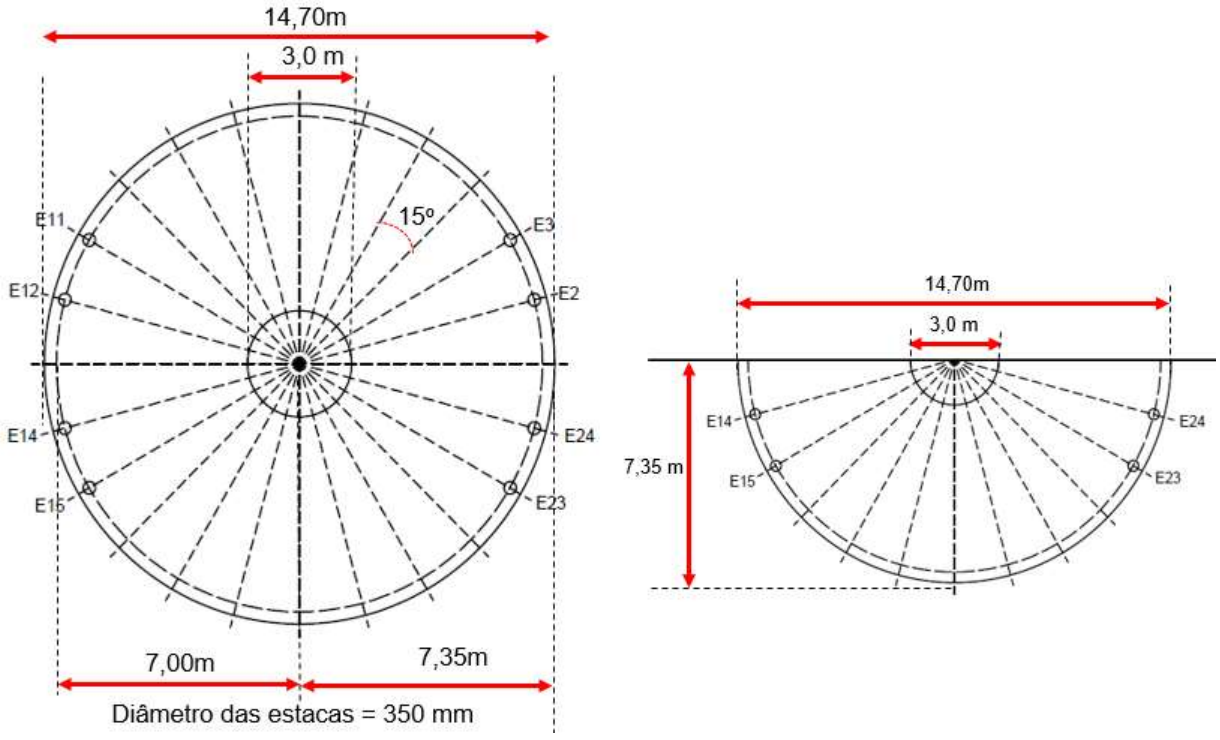


Figura 151 – Radier estaqueado sobre 8 estacas, RE8A.

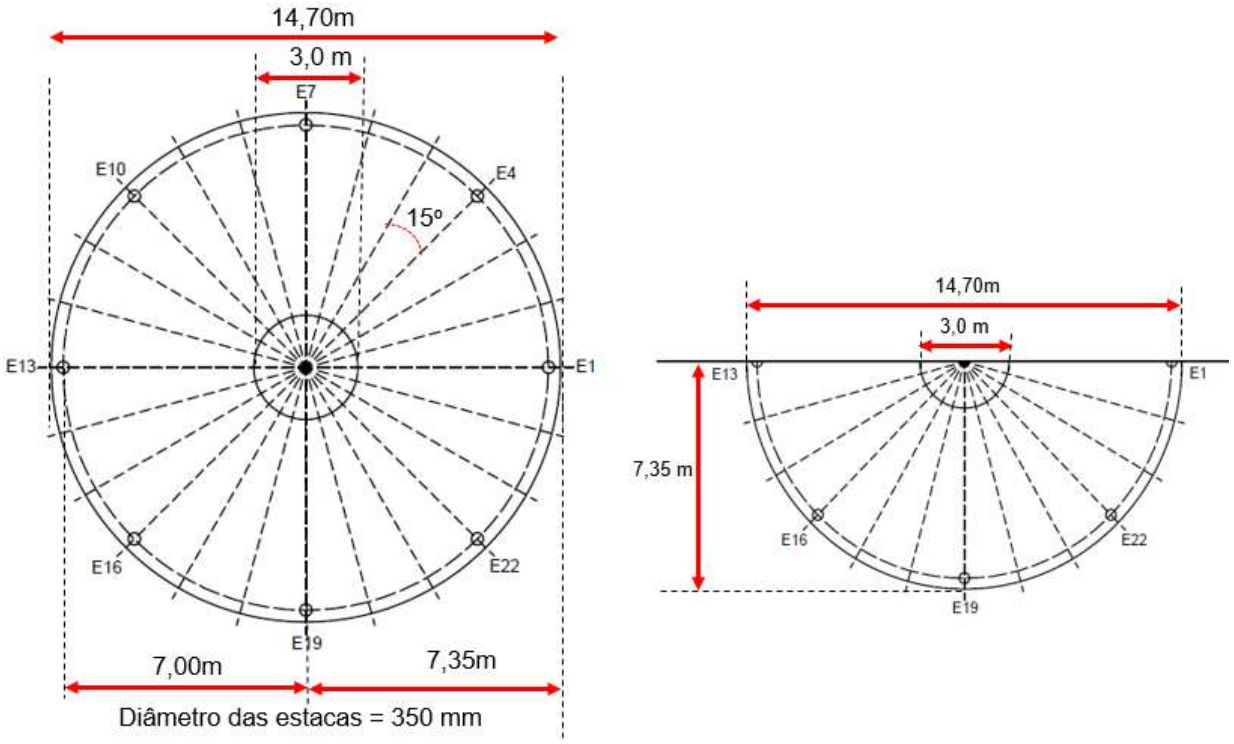


Figura 152 – Radier estaqueado sobre 8 estacas, RE8B.

Algumas figuras obtidas através da modelagem numérica serão apresentadas. A Figura 153 apresenta a malha de elementos finitos do RE8A com 22.644 elementos e 63.627 nós. O bloco RE8B foi modelado com 23.004 elementos e 64.594 nós. Foram definidas malhas muito finas para todo o domínio modelado e aplicados refinamentos nas regiões do radier e das estacas. A Figura 154 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier. Nela foram definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., J, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

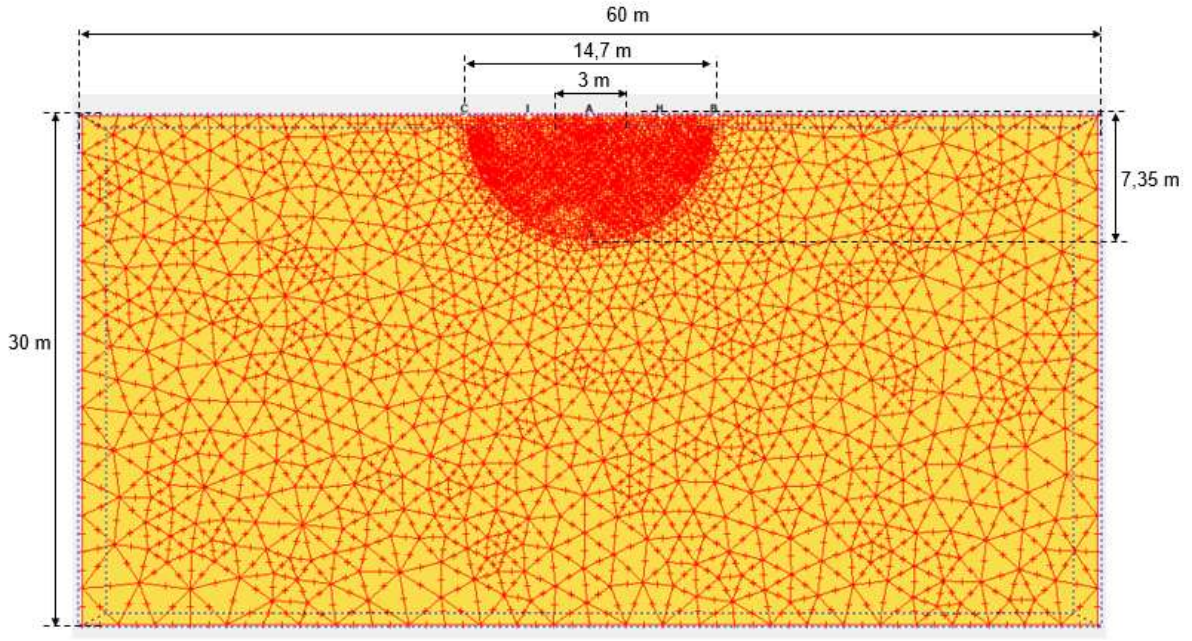
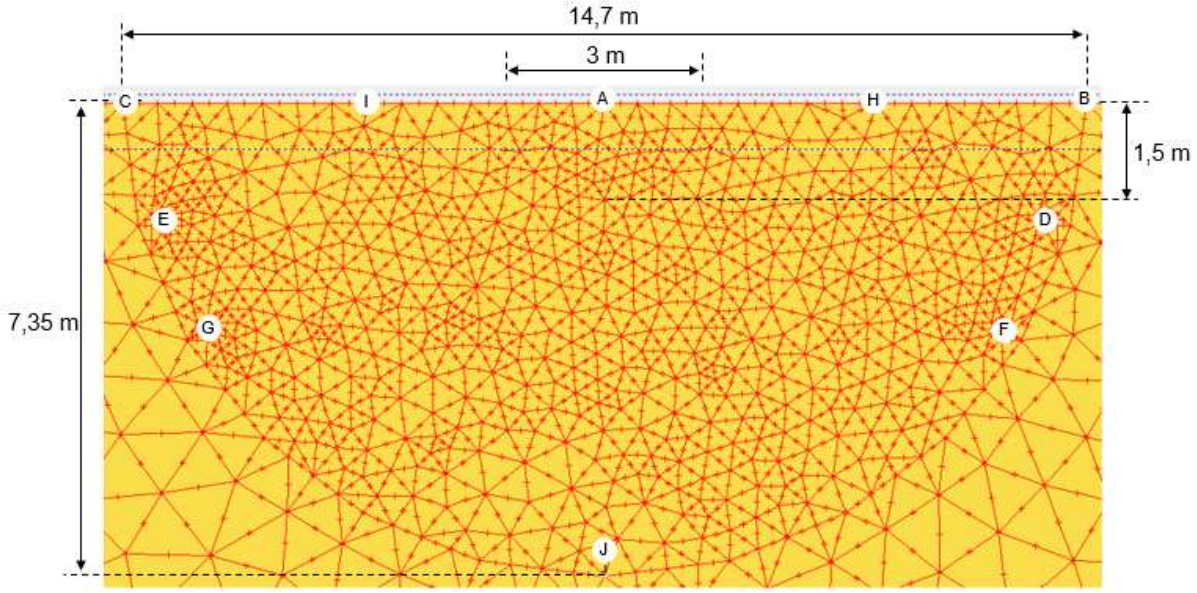
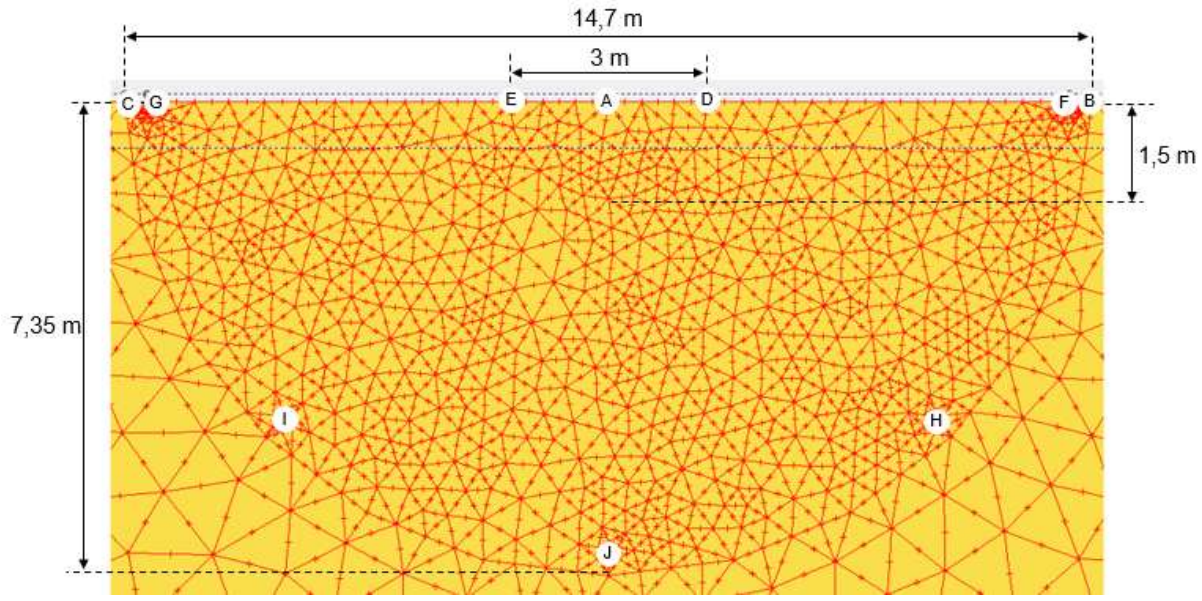


Figura 153 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE8A.



(a)



(b)

Figura 154 – Malha de elementos finitos na região do radier, (a) RE8A; e (b) RE8B.

Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos do bloco RE8A. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 155.

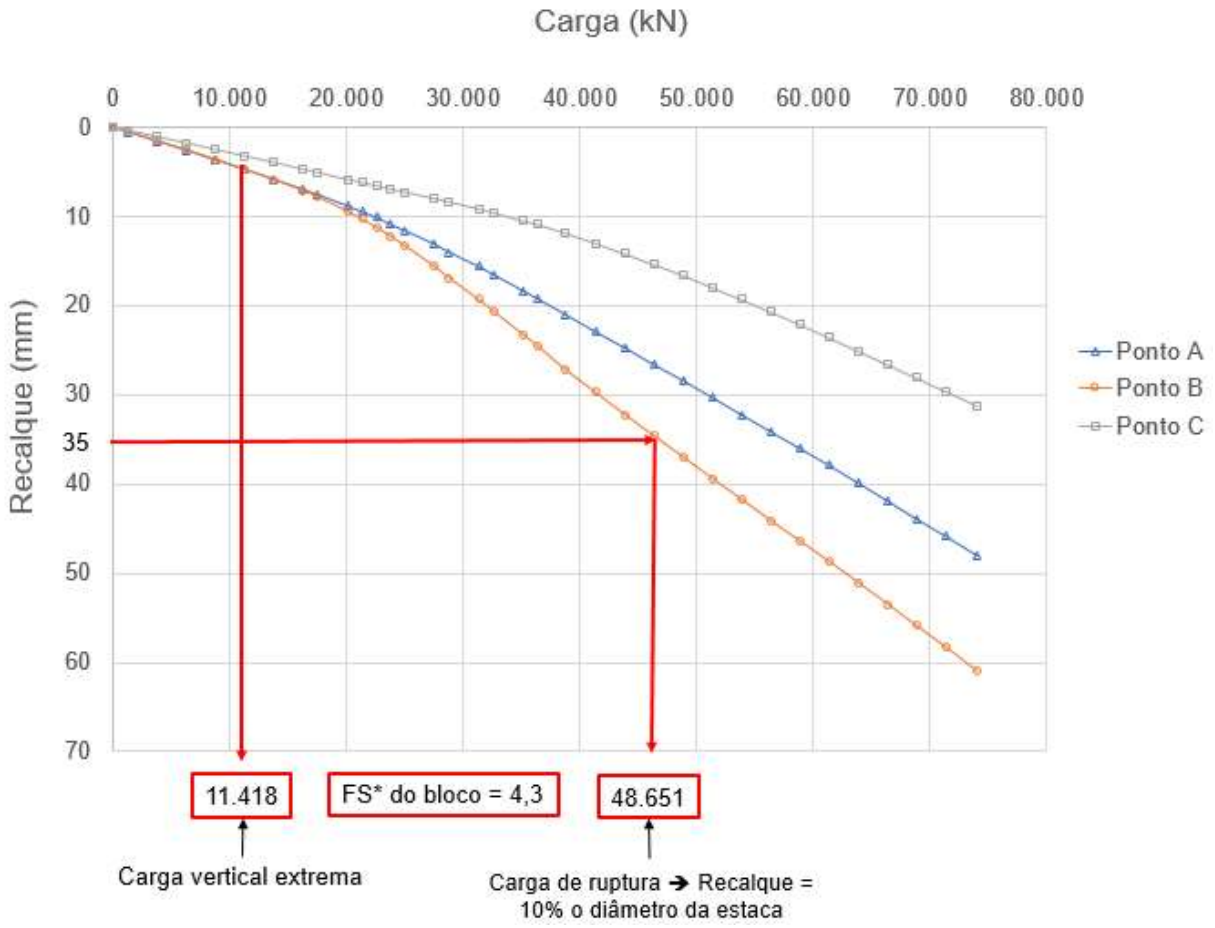


Figura 155 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE8A.

A Figura 156 apresenta os deslocamentos verticais em planta do bloco RE8A. Esta imagem confirma que a escolha do domínio da modelagem contempla a área de influência das deformações em decorrência do carregamento atuante na fundação analisada.

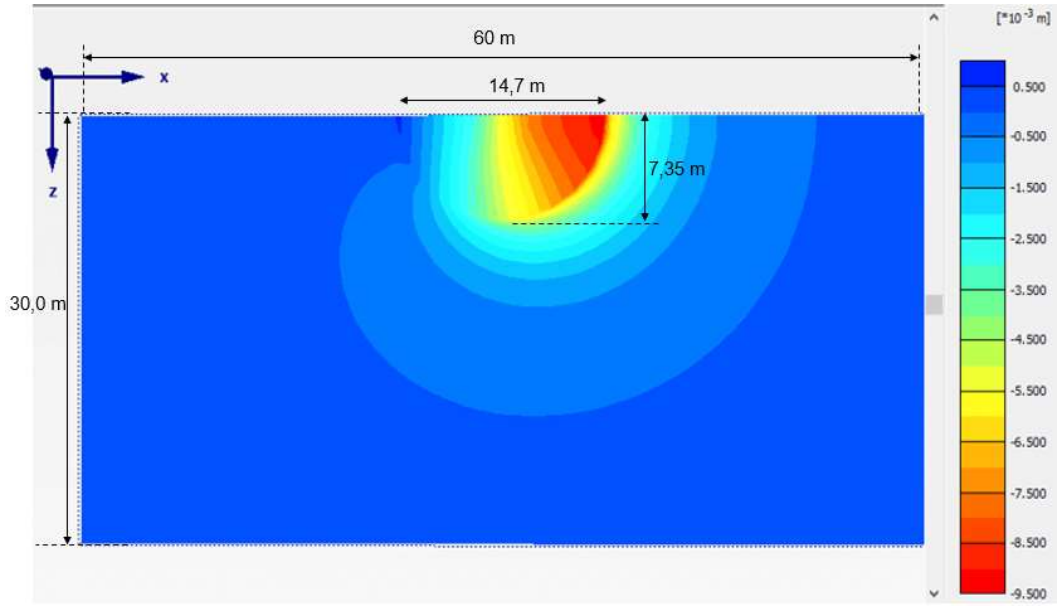


Figura 156 – Deslocamentos verticais no RE8A.

A Figura 157 apresenta a distribuição de tensão na cota de assentamento do radier do bloco RE8A. Observa-se uma maior tensão ao lado direito, correspondendo ao lado que recebe o esforço de compressão devido ao momento fletor e ao carregamento horizontal que, atuando com um braço de alavanca igual a altura do bloco, provoca um aumento na tensão vertical na cota de assentamento do bloco.

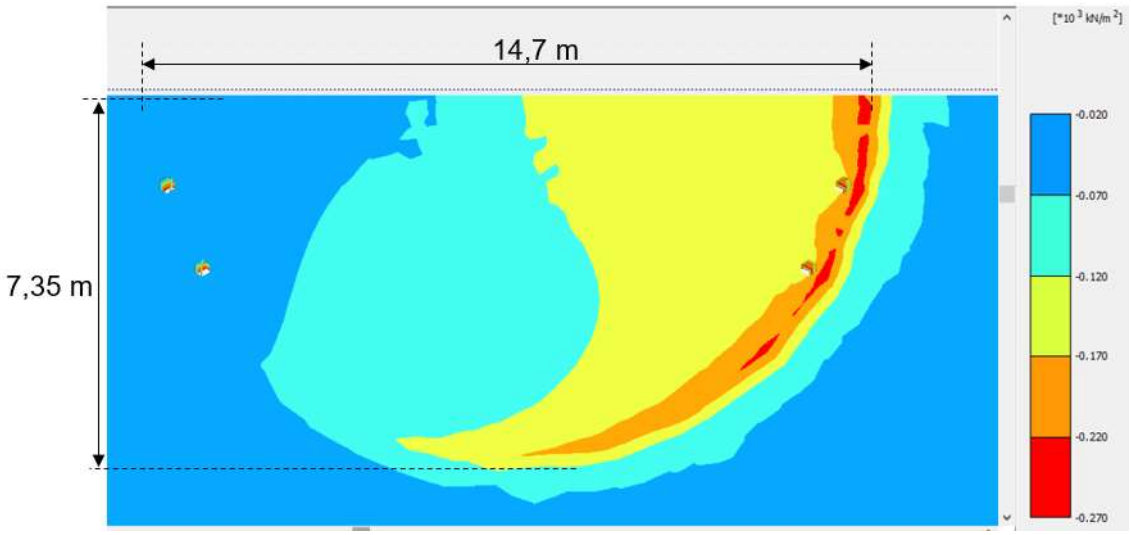


Figura 157 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE8A.

A Figura 158 apresenta uma vista em perfil do bloco RE8B, onde foi ocultada a camada de Areia Siltosa localizada acima da cota de assentamento do radier. Nesta figura pode-se observar a deformação, fora de escala, e os esforços atuantes na região de transferência de carga da torre para o bloco. Observa-se uma composição de esforços vertical e horizontal gerando uma distribuição de tensão uniformemente distribuída na região de transferência de carga da torre para o bloco, bem como os pares binários que representam o momento fletor atuante também nesta região de transferência de carga.

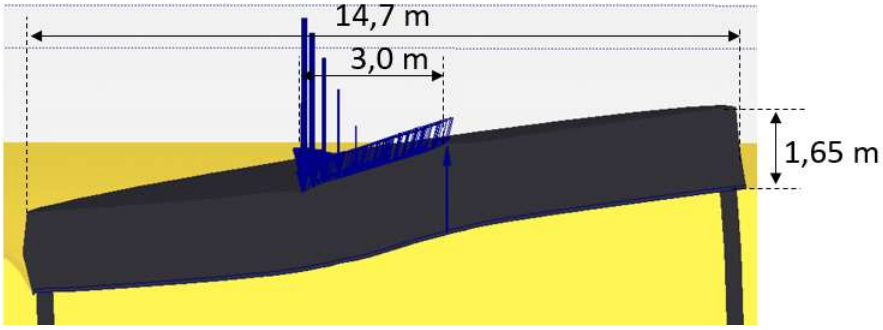


Figura 158 – Seção transversal através do eixo de simetria do bloco RE8B.

As Tabelas 40 e 41 apresentam os resultados das modelagens realizadas para as duas configurações de radier sobre 8 estacas, RE8A e RE8B.

Tabela 40 – Distribuição de esforços entre as estacas do radier estaqueado sobre 8 estacas, nas configurações RE8A e RE8B.

Estacas	Carga (kN)	
	RE8A	RE8B
E1	Excluída	525
E2 = E24	340	Excluídas
E3 = E23	336	Excluídas
E4 = E22	Excluídas	334
E5 = E21	Excluídas	Excluídas
E6 = E20	Excluídas	Excluídas
E7 = E19	Excluídas	247
E8 = E18	Excluídas	Excluídas
E9 = E17	Excluídas	Excluídas
E10 = E16	Excluídas	42
E11 = E15	13	Excluídas
E12 = E14	-24	Excluídas
E13	Excluída	-94

Tabela 41 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 8 estacas, nas configurações RE8A e RE8B.

Resultados	RE8A	RE8B
Somatório do carregamento vertical nas estacas (kN)	1.330,0	1.677,0
Carregamento total vertical (cenário extremo) (kN)	11.418,0	11.418,0
% da carga vertical nas estacas	12%	15%
% da carga vertical no radier	88%	85%
Carga máxima de compressão na estaca (kN)	340	525
Carga máxima de tração na estaca (kN)	-24	-94
Carga vertical de ruptura da fundação (kN)	48.651,0	Não verificado
FS*	4,3	Não verificado
Carga máxima na estaca para carga de ruptura do bloco (kN)	602,0	Não verificado
Recalque máximo (mm)	9,3	10,0
Distorção do radier**	1/1.493	1/1.351
Rigidez a rotação (GN.m/rad)	66,9	61,0

* Considerado a relação entre a carga vertical que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca pela carga vertical extrema atuante na fundação. Nesta verificação, foi considerado o recalque máximo no radier, localizado no ponto B, definido na figura que apresenta a malha de elementos finitos. Este ponto fica localizado na extremidade da direita, no sentido de atuação do momento fletor.

** Distorção entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento

As estacas do bloco RE8B absorvem um maior percentual do carregamento quando comparadas às estacas do bloco RE8A. O bloco RE8B, além apresentar estacas distribuídas de forma mais uniforme ao longo da extremidade do bloco, apresenta também estacas do eixo de simetria, que absorvem maiores esforços.

O bloco RE8A, por apresentar as estacas mais concentradas nas proximidades do eixo de simetria do bloco, e consequentemente mais afastadas do centro do bloco, apresenta uma menor distorção angular e, consequentemente, uma maior rigidez rotacional, 66,9 GN.m/rad. As estacas mais afastadas do centro, onde é aplicado um momento elevado, contribuem com maior eficiência para redução dos maiores recalques observados na extremidade do bloco. O bloco RE8B apresenta uma rigidez rotacional de 61,02 GN.m/rad. Para as duas configurações analisadas, a rigidez rotacional atende ao limite mínimo de 61 GN.m/rad definido pelo fabricante, assim como a distorção angular é inferior ao limite máximo de 1/800 estabelecido por Bjerrum (1963) para máquinas sensíveis a recalques.

O fator de segurança da estaca mais carregada, 525 kN, é aproximadamente igual a 2 quando relacionado com a carga admissível obtida através da PCE3 no valor de 508 kN, que majorada em 30% para carregamento extremo é de 660 kN.

Ao realizar uma modelagem para levar o bloco RE8A à ruptura, obteve-se uma carga de ruptura para o bloco que garante um fator de segurança de 4,3. Ou seja, a exclusão de 2 estacas, do bloco com 10 estacas, representou uma redução mínima no fator de segurança, que se equivalem quando arredondados para uma casa decimal, 4,3, ambos bem superiores ao fator de segurança para fundação profunda, 2, e para fundação superficial, 3.

4.7 RADIER SOBRE 6 ESTACAS (RE6A e RE6B)

Tendo verificado que o radier estaqueado sobre 8 estacas estava trabalhando abaixo da sua capacidade de carga, respeitando ao limite de rigidez rotacional exigido pelo fabricante da torre, foi verificado o comportamento com a exclusão de mais 2 estacas do bloco, ficando agora um radier sobre 6 estacas. Foram consideradas duas configurações de bloco, possibilitando uma análise complementar da interferência a posição das estacas na distribuição de esforços e na rigidez rotacional. As Figuras 159 e 160 apresentam as duas configurações analisadas.

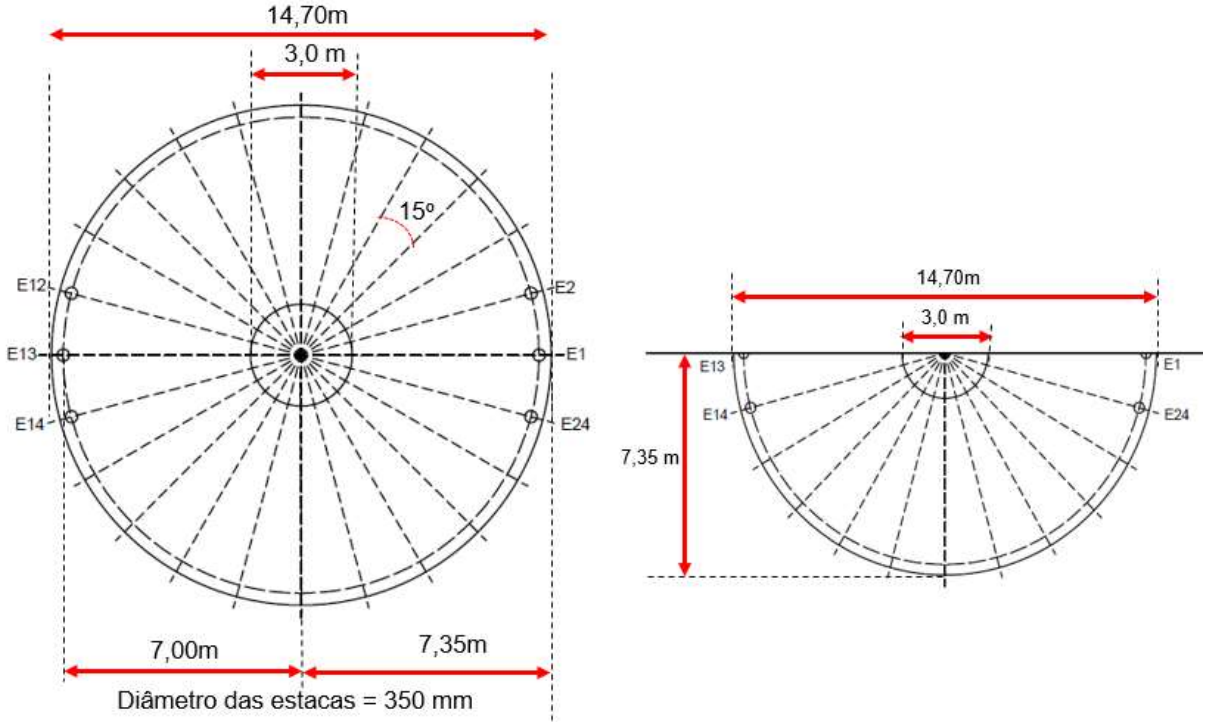


Figura 159 – Radier estaqueado sobre 6 estacas, RE6A.

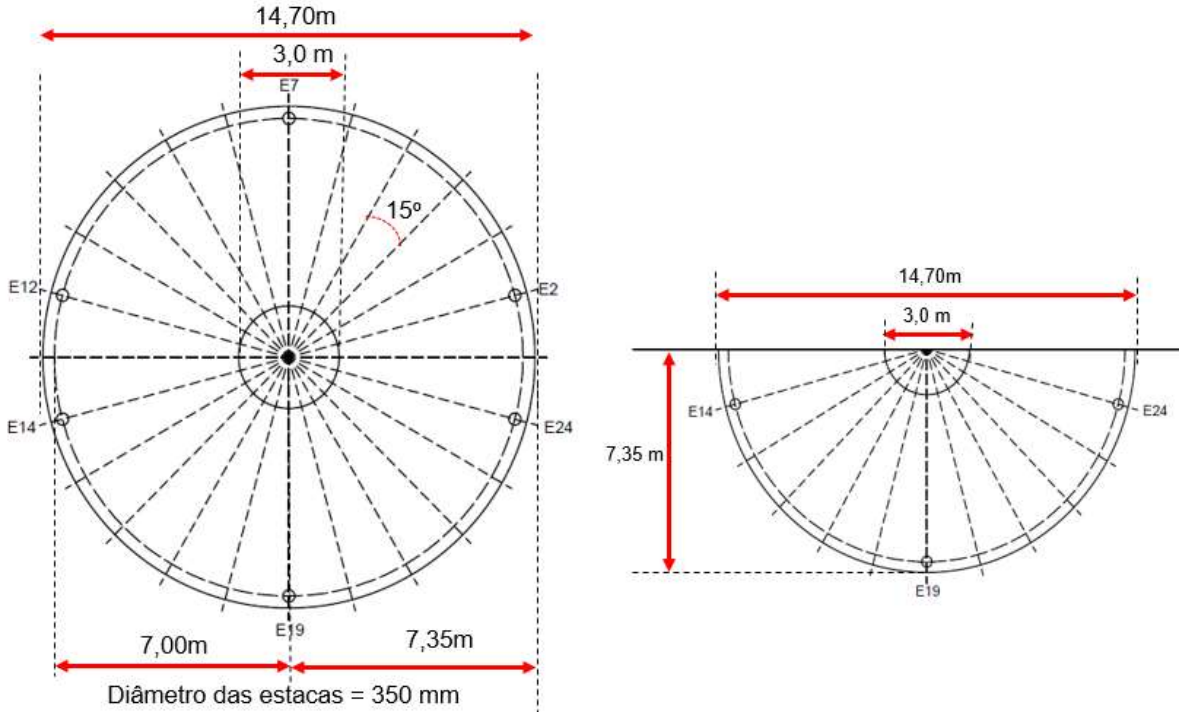


Figura 160 – Radier estaqueado sobre 6 estacas, RE6B.

Algumas figuras obtidas através da modelagem numérica serão apresentadas. A Figura 161 apresenta a malha de elementos finitos do RE6A com 23.976 elementos e 67.314 nós. O bloco RE6B foi modelado com 23.103 elementos e 65.023 nós. Foram definidas malhas muito finas para todo o domínio modelado e aplicados refinamentos nas regiões do radier e das estacas. A Figura 162 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier. Nela foram definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., J, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

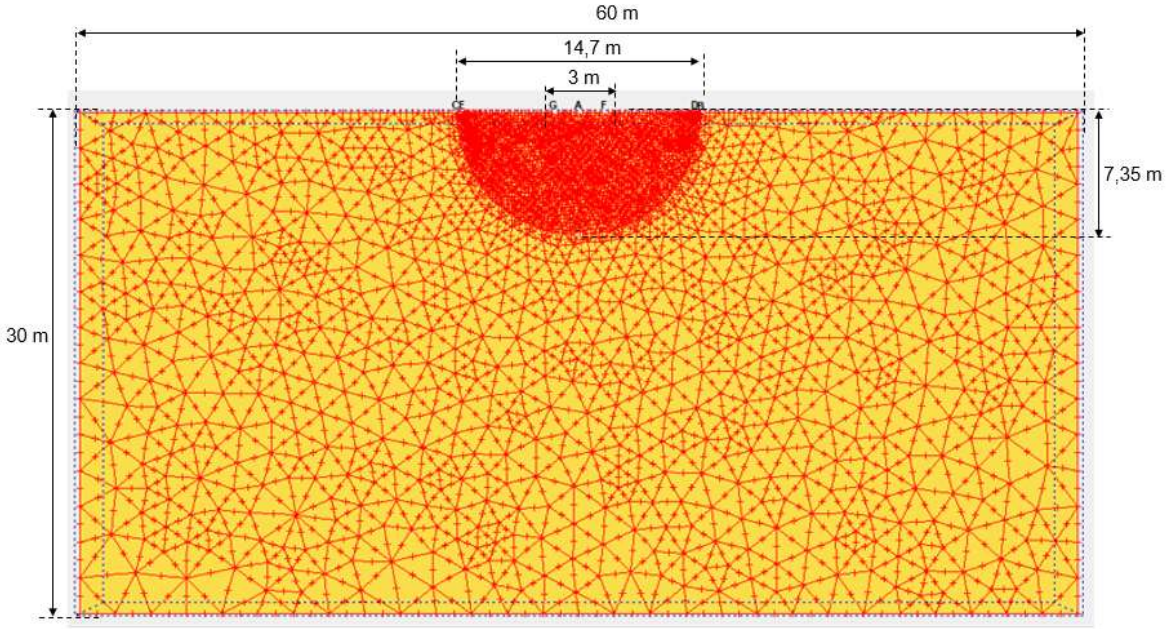
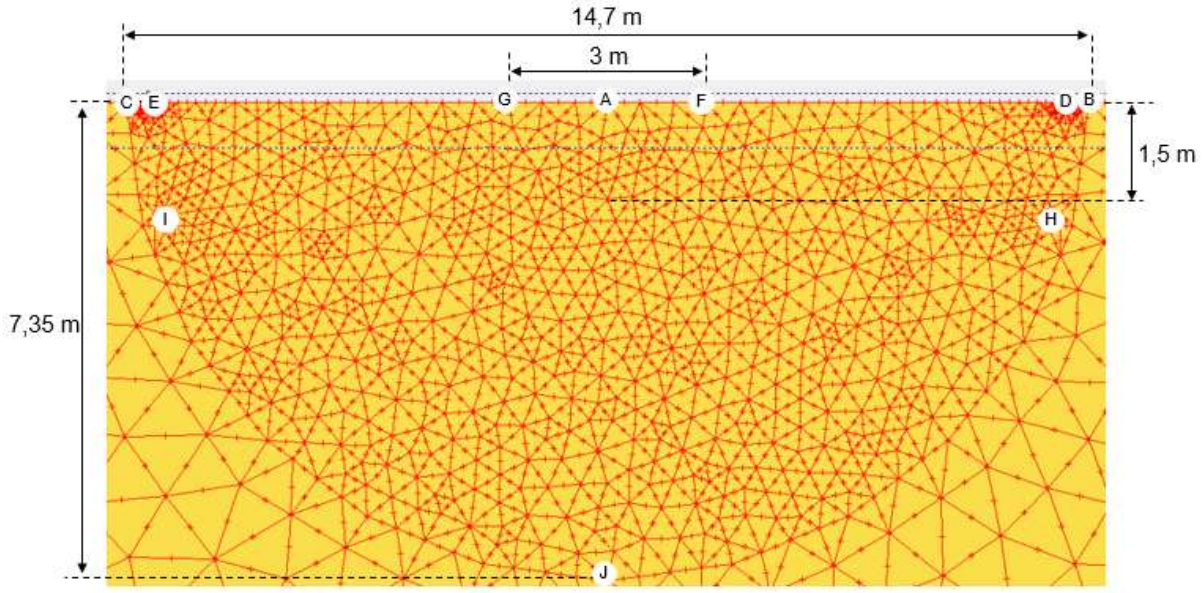
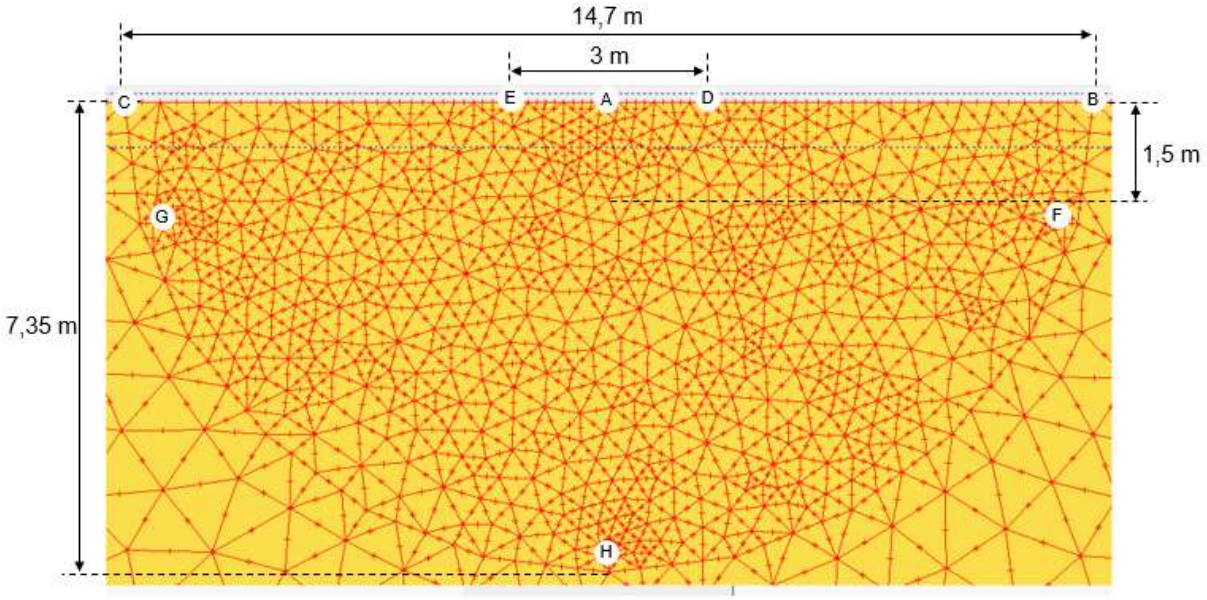


Figura 161 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE6A.



(a)



(b)

Figura 162 – Malha de elementos finitos na região do radier, (a) RE6A; e (b) RE6B.

Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos do bloco RE6A. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 163.

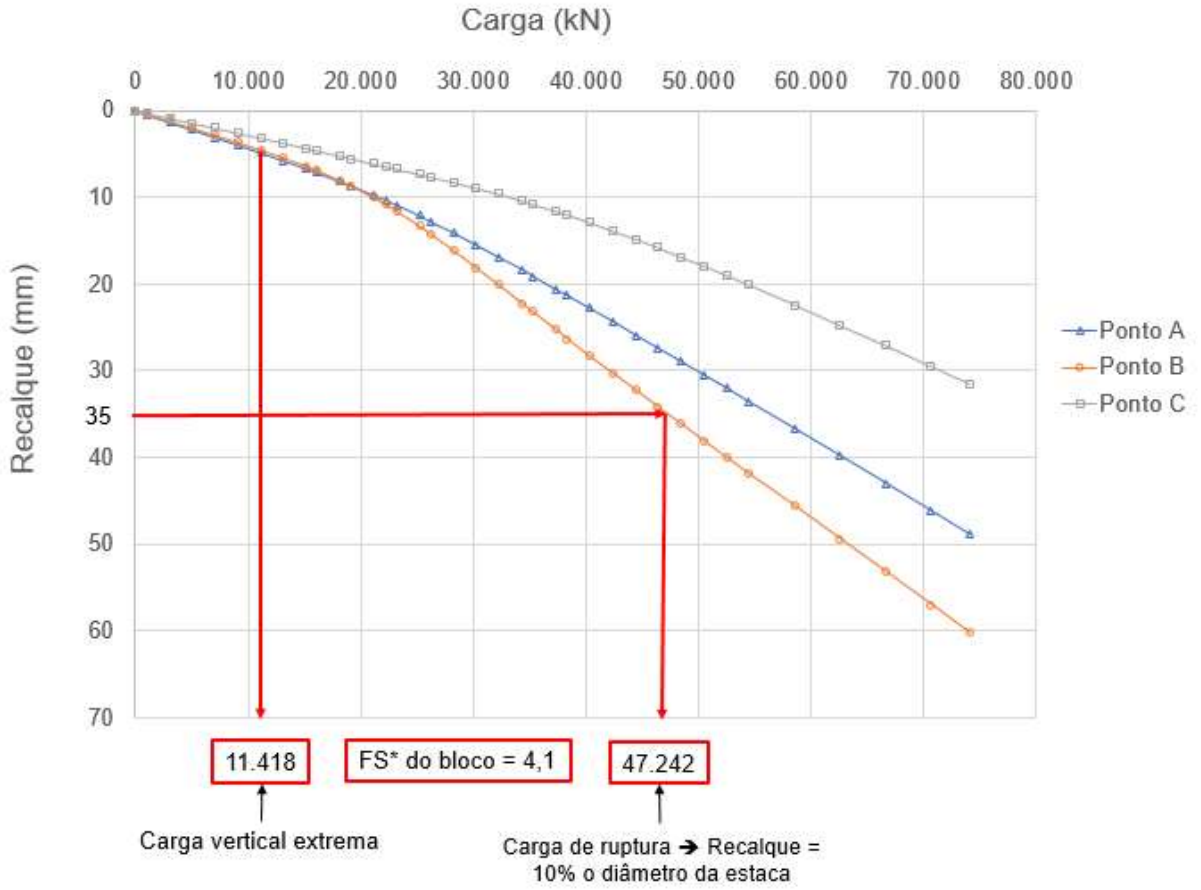


Figura 163 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE6A.

As Figuras 164 e 165 apresentam os deslocamentos verticais em vista de perfil e em planta, respectivamente, para o bloco RE6A. Estas imagens confirmam que a escolha do domínio da modelagem contempla a área de influência das deformações em decorrência do carregamento atuante na fundação analisada.

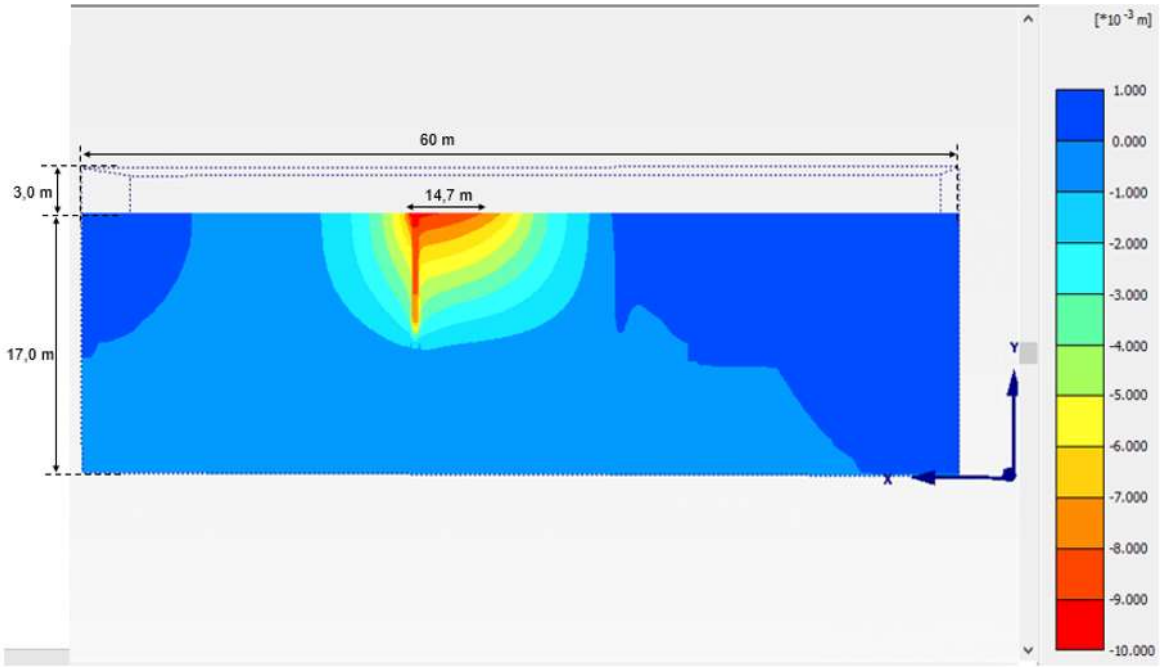


Figura 164 – Deslocamentos verticais obtidos da modelagem do RE6A, vista na seção transversal na região central do bloco.

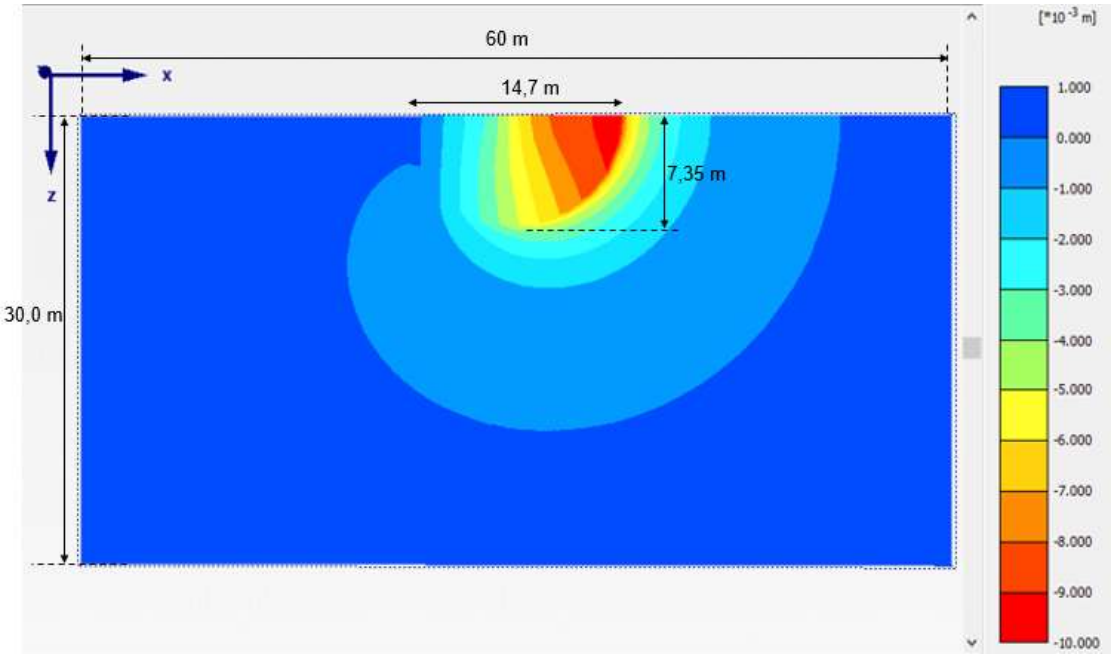


Figura 165 – Vista em planta dos deslocamentos verticais no RE6A.

A Figura 166 apresenta a distribuição das tensões na cota de assentamento do radier do bloco RE6A. Observa-se uma maior tensão ao lado direito, correspondendo ao lado que recebe o esforço de compressão devido ao momento fletor e ao carregamento horizontal que, atuando com um braço de alavanca igual a altura do bloco, provoca um aumento na tensão vertical na cota de assentamento do bloco.

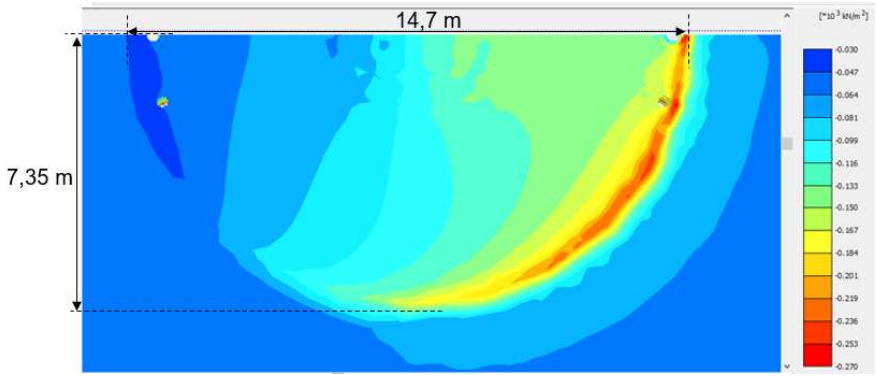


Figura 166 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE6A.

As Tabelas 42 e 43 apresentam os resultados das modelagens realizadas para as duas configurações de radier sobre 6 estacas, RE6A e RE6B.

Tabela 42 – Distribuição de esforços entre as estacas do radier estaqueado sobre 6 estacas, nas configurações RE6A e RE6B.

Estacas	**Carga (kN)**	
	RE6A	**RE6B**
E1	488	Excluída
E2 = E24	343	363
E3 = E23	Excluídas	Excluídas
E4 = E22	Excluídas	Excluídas
E5 = E21	Excluídas	Excluídas
E6 = E20	Excluídas	Excluídas
E7 = E19	Excluídas	256
E8 = E18	Excluídas	Excluídas
E9 = E17	Excluídas	Excluídas
E10 = E16	Excluídas	Excluídas
E11 = E15	Excluídas	Excluídas
E12 = E14	-17	-41
E13	-59	Excluída

Tabela 43 - Resultados obtidos através das modelagens realizadas para o radier estaqueado sobre 6 estacas, nas configurações RE6A e RE6B.

Resultados	RE6A	RE6B
Somatório do carregamento vertical nas estacas (kN)	1.081	1.156
Carregamento total vertical (cenário extremo) (kN)	11.418	11.418
% da carga vertical nas estacas	9%	10%
% da carga vertical no radier	91%	90%
Carga máxima de compressão na estaca (kN)	488	363
Carga máxima de tração na estaca (kN)	-59	-41
Carga vertical de ruptura da fundação (kN)	47.242	Não verificado
FS*	4,1	Não verificado
Carga máxima na estaca para carga de ruptura do bloco (kN)	656	Não verificado
Recalque máximo (mm)	9,5	10,4
Distorção do radier**	1/1.449	1/1.299
Rigidez a rotação (GN.m/rad)	65,5	58,2

* Considerado a relação entre a carga vertical que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca pela carga vertical extrema atuante na fundação. Nesta verificação, foi considerado o recalque máximo no radier, localizado no ponto B, definido na figura que apresenta a malha de elementos finitos. Este ponto fica localizado na extremidade da direita, no sentido de atuação do momento fletor.

** Distorção entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento

Apesar de haver um rateio do carregamento muito aproximado entre o estaqueamento e o radier para as duas configurações dos blocos, o bloco RE6B, apesar de atender aos critérios de distorção angular de Bjerrum (1963), não atende à exigência de rigidez rotacional de 61 GN.m/rad exigida pelo fabricante da torre. Este bloco apresentou uma rigidez rotacional de 58,2 GN.m/rad. Como o fator preponderante nesta solução de fundação é o combate aos momentos que se destacam frente ao carregamento vertical, o posicionamento das estacas o mais afastadas possível do centro do bloco é decisivo para conferir estabilidade à fundação. Observa-se que a distribuição do estaqueamento sob o bloco RE6A apresenta as estacas mais concentradas nas proximidades do eixo de simetria, onde é possível um maior afastamento do centro de um bloco circular, favorecendo desta forma uma maior rigidez à fundação, 65,5 GN.m/rad.

O fator de segurança da estaca mais carregada, 488 kN, é maior do que 2 quando relacionado com a carga admissível obtida através da PCE3 no valor de 508 kN, que majorada em 30% para carregamento extremo é de 660 kN.

Ao realizar uma modelagem para levar o bloco RE6A à ruptura, obteve-se uma carga de ruptura para o bloco que garante um fator de segurança de 4,1. Ou seja, a exclusão de 2 estacas, do bloco com 8 estacas, representou uma redução mínima no fator de segurança, de 4,3 para 4,1, valor bem superior ao fator de segurança para fundação profunda, 2, e para fundação superficial, 3.

Cabe destacar que, mesmo para um reduzido número de estacas, ao comparar a carga atuante na estaca mais carregada do bloco com 6 estacas, 487,8 kN, com a carga atuante na estaca mais carregada do bloco com 24 estacas, 461,3 kN, para estacas com o mesmo posicionamento no bloco, os valores são bastante próximos. Esta aproximação se deve ao fato de que no bloco com 6 estacas o radier está trabalhando absorvendo 91% do carregamento enquanto que o bloco com 24 estacas o radier está trabalhando absorvendo 66% do carregamento. Desta forma, a carga a ser rateada entre as estacas do bloco com 6 passa a ser bem inferior do que a carga a ser rateada entre as estacas do bloco com 24 estacas.

4.8 RADIER SOBRE 4 ESTACAS (RE4A)

Tendo verificado que o radier estaqueado sobre 6 estacas, na configuração apresentada no bloco RE6A, estava trabalhando abaixo da sua capacidade de carga, respeitando ao limite de rigidez rotacional exigido pelo fabricante da torre, foi verificado o comportamento com a exclusão de mais 2 estacas do bloco, ficando agora um radier sobre 4 estacas. Foi considerada uma única configuração de bloco, RE4A. A Figura 167 apresenta a configuração analisada.

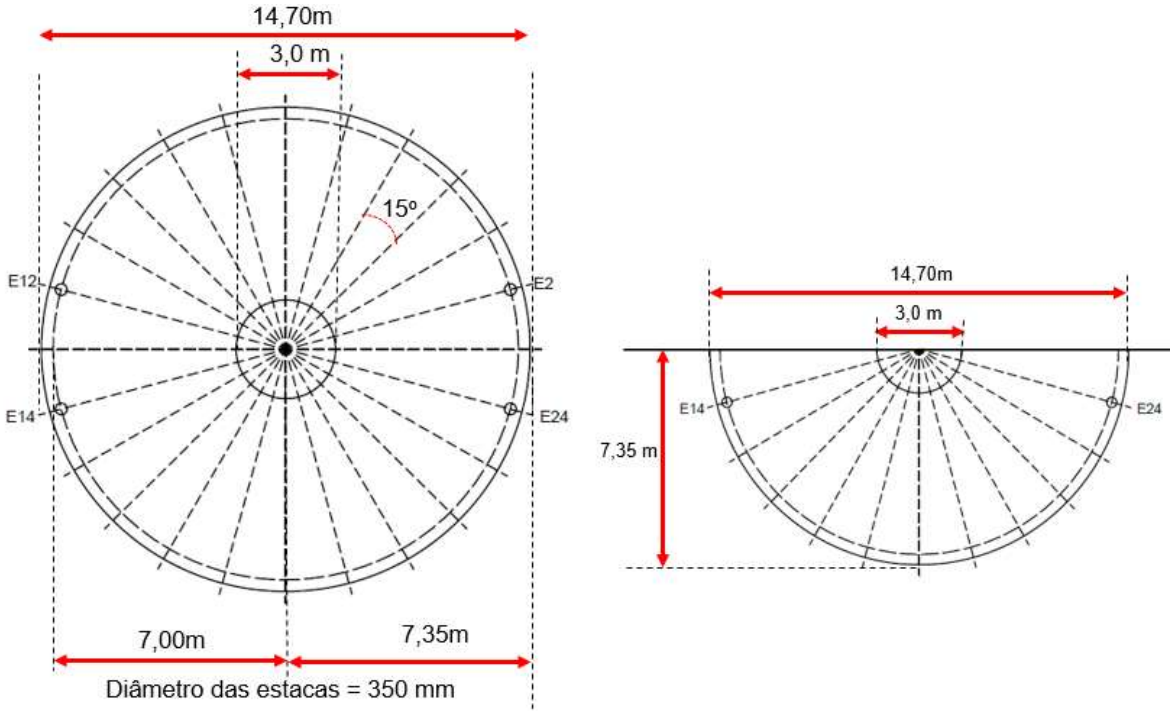


Figura 167 – Radier estaqueado sobre 4 estacas, RE4A.

Algumas figuras obtidas através da modelagem numérica serão apresentadas. A Figura 168 apresenta a malha de elementos finitos do RE4A com 21.834 elementos e 61.338 nós. Foram definidas malhas muito finas para todo o domínio modelado e aplicados refinamentos nas regiões do radier e das estacas. A Figura 169 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier. Nela foram definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., I, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

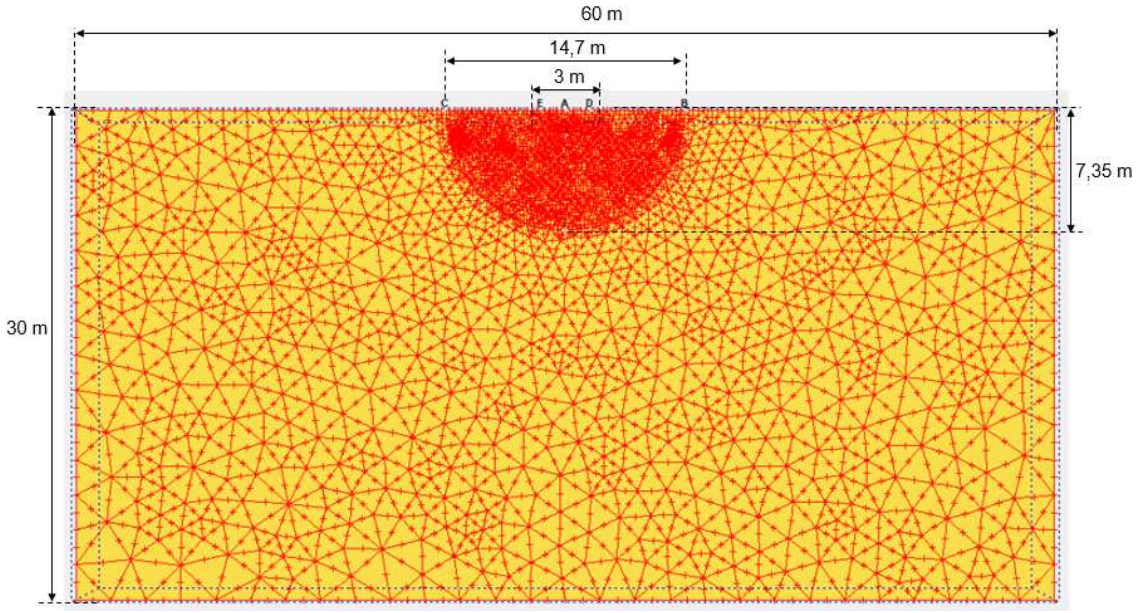


Figura 168 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE4A.

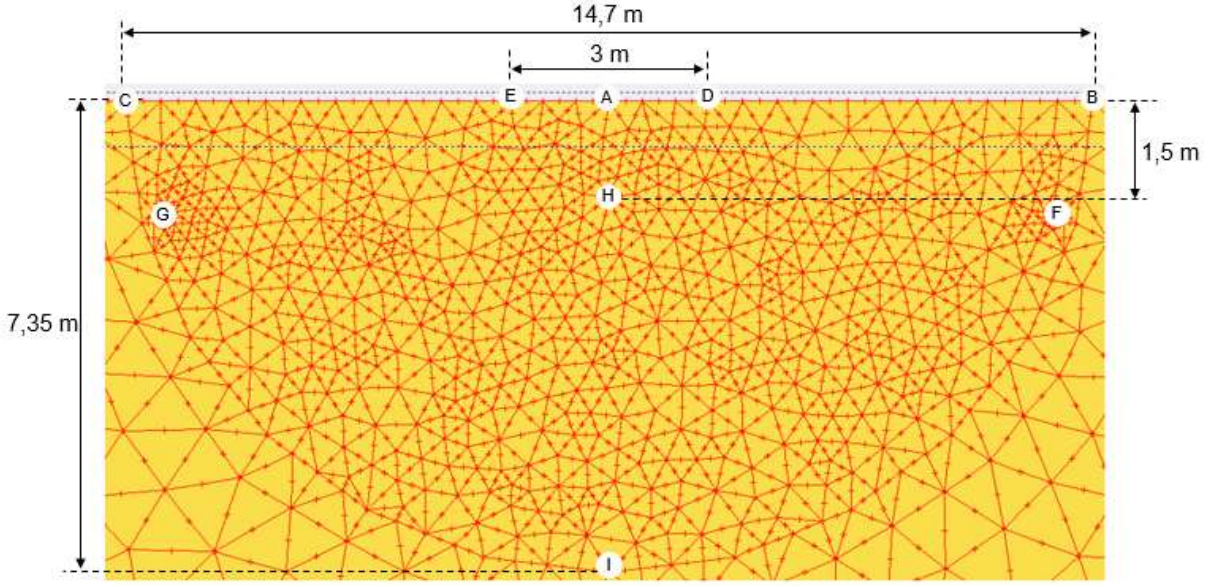


Figura 169 – Malha de elementos finitos na região do radier RE4A.

Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos do bloco RE4A. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um

recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 170.

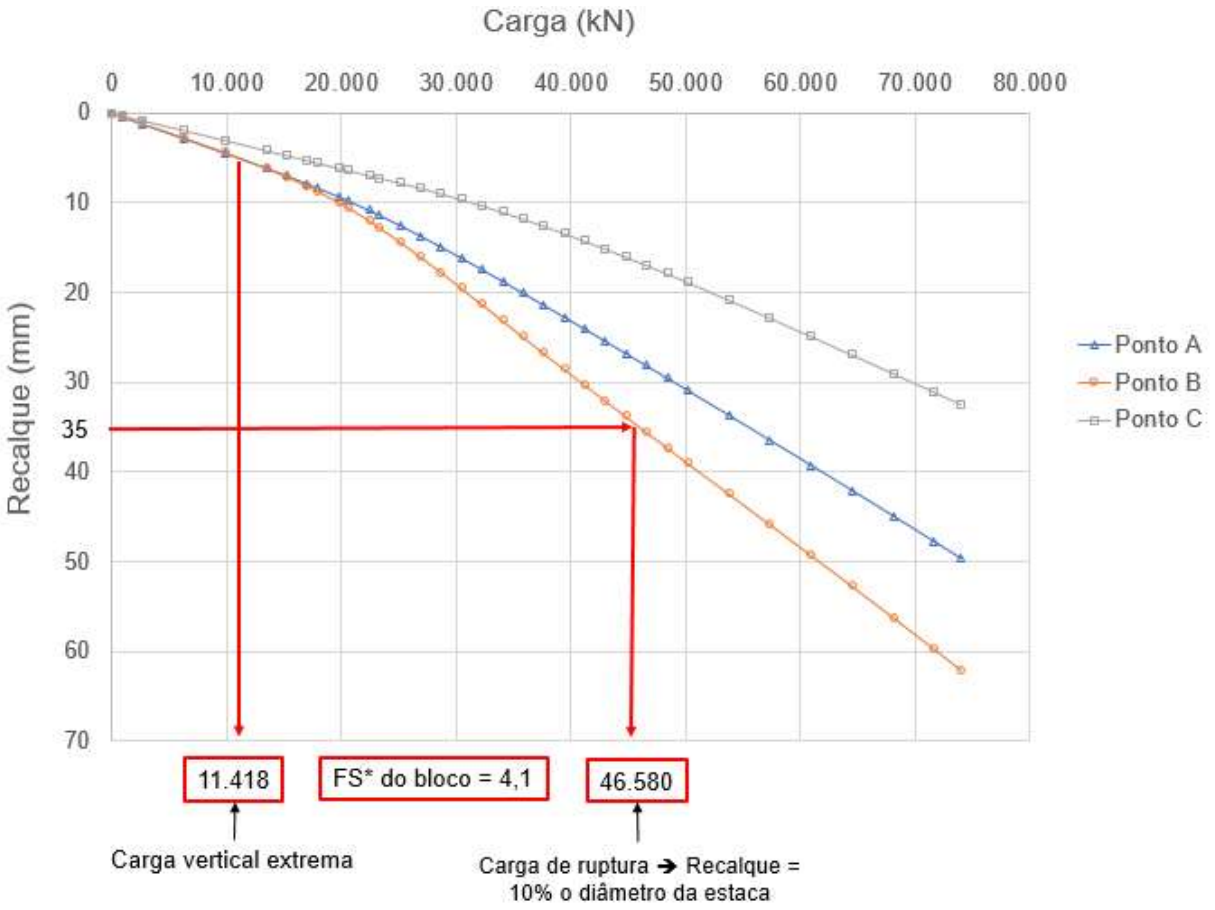


Figura 170 – Curva carga x recalque dos pontos A B e C do bloco RE4A.

A Figura 171 apresenta a distribuição de tensão na cota de assentamento do radier do bloco RE4A. Observa-se uma maior tensão ao lado direito, correspondendo ao lado que recebe o esforço de compressão devido ao momento fletor e ao carregamento horizontal que, atuando com um braço de alavanca igual a altura do bloco, provoca um aumento na tensão vertical na cota de assentamento do bloco.

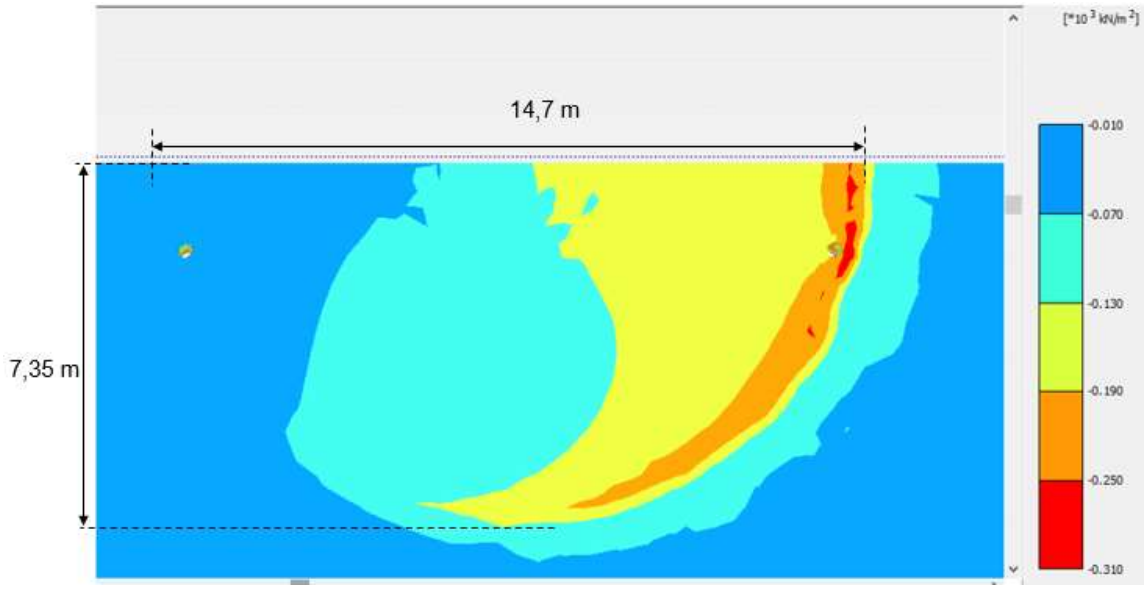


Figura 171 – Distribuição de tensão vertical na cota de assentamento do bloco RE4A.

As Tabelas 44 e 45 apresentam os resultados da modelagem realizada para o radier sobre 4 estacas, RE4A.

Tabela 44 – Distribuição de esforços entre as estacas do radier estaqueado sobre 4 estacas, RE4A.

Estacas	**Carga (kN)**
E1	Excluída
E2 = E24	357
E3 = E23	Excluídas
E4 = E22	Excluídas
E5 = E21	Excluídas
E6 = E20	Excluídas
E7 = E19	Excluídas
E8 = E18	Excluídas
E9 = E17	Excluídas
E10 = E16	Excluídas
E11 = E15	Excluídas
E12 = E14	-38
E13	Excluída

Tabela 45 - Resultados obtidos através da modelagem realizada para o radier estaqueado sobre 4 estacas, RE4A.

Resultados	RE4A
Somatório do carregamento vertical nas estacas (kN)	638
Carregamento total vertical (cenário extremo) (kN)	11.418
% da carga vertical nas estacas	6%
% da carga vertical no radier	94%
Carga máxima de compressão na estaca (kN)	357
Carga máxima de tração na estaca (kN)	-38
Carga vertical de ruptura da fundação (kN)	46.580
FS*	4,1
Carga máxima na estaca para carga de ruptura do bloco (kN)	590
Recalque máximo (mm)	10,6
Distorção do radier**	1/1.282
Rigidez a rotação (GN.m/rad)	57,5

* Considerado a relação entre a carga vertical que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca pela carga vertical extrema atuante na fundação. Nesta verificação, foi considerado o recalque máximo no radier, localizado no ponto B, definido na figura que apresenta a malha de elementos finitos. Este ponto fica localizado na extremidade da direita, no sentido de atuação do momento fletor.

** Distorção entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento

Observa-se que o bloco RE4A não atende ao limite mínimo de rigidez rotacional exigido pelo fabricante da torre, mesmo que para a capacidade de carga da estaca e a distorção angular do bloco estejam dentro dos limites de segurança.

O fator de segurança da estaca mais carregada, 357 kN, é maior do que 2 quando relacionado com a carga admissível obtida através da PCE3 no valor de 508 kN, que majorada em 30% para carregamento extremo é de 660 kN.

Ao realizar uma modelagem para levar o bloco RE4A à ruptura, obteve-se uma carga de ruptura para o bloco que garante um fator de segurança de 4,1. A exclusão de 2 estacas, do bloco com 6 estacas, representou uma redução mínima no fator de segurança, que quando arredondado para uma casa decimal ficam em 4,1, valor bem superior ao fator de segurança para fundação profunda, 2, e para fundação superficial, 3. Contudo, a exclusão dessas duas estacas alterou a condição de estabilidade quanto à rotação do bloco, passando de estável, com rigidez rotacional de 65,5 GN.m/rad no bloco com 6 estacas, para não estável, com rigidez rotacional de 57,5 GN.m/rad, inferior ao

limite mínimo exigido pela fabricante da torre para garantir a segurança quanto à rotação. Essas duas estacas excluídas do bloco com 6 estacas exerciam uma função de redutoras de recalque, a exclusão destas afetou apenas a segurança quanto à rotação que é função do recalque diferencial observado na fundação.

4.9 RADIER SOBRE 2 ESTACAS (RE2A)

Considerando que os blocos com estacas posicionadas no eixo de simetria, posição mais afastada do centro do bloco e, portanto, garantindo um maior braço de alavanca para combater os momentos atuantes na fundação, foi realizada a modelagem de um bloco com duas estacas nesse posicionamento, RE2A. A Figura 172 apresenta a configuração analisada.

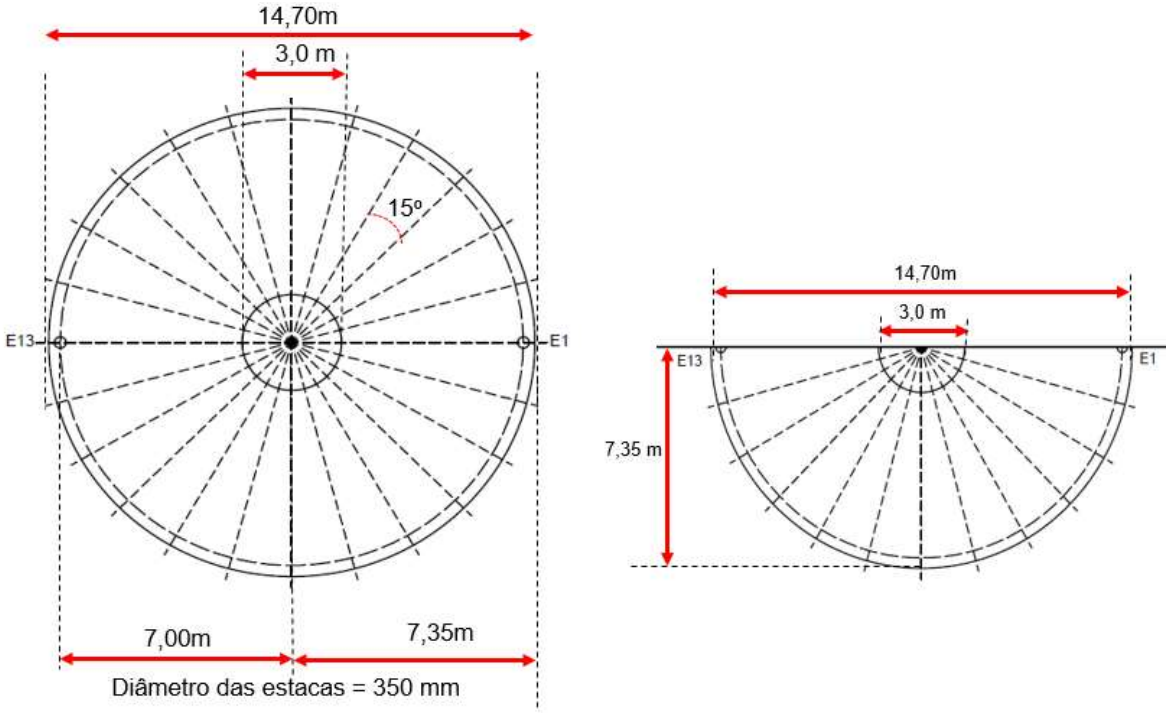


Figura 172 – Radier estaqueado sobre 2 estacas, RE2A.

Algumas figuras obtidas através da modelagem numérica serão apresentadas. A Figura 173 apresenta a malha de elementos finitos do RE2A com 22.914 elementos e 64.397 nós. Foram definidas malhas muito finas para todo o domínio modelado e aplicados refinamentos nas regiões do radier e das estacas. A Figura 174 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier. Nela foram definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., I, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

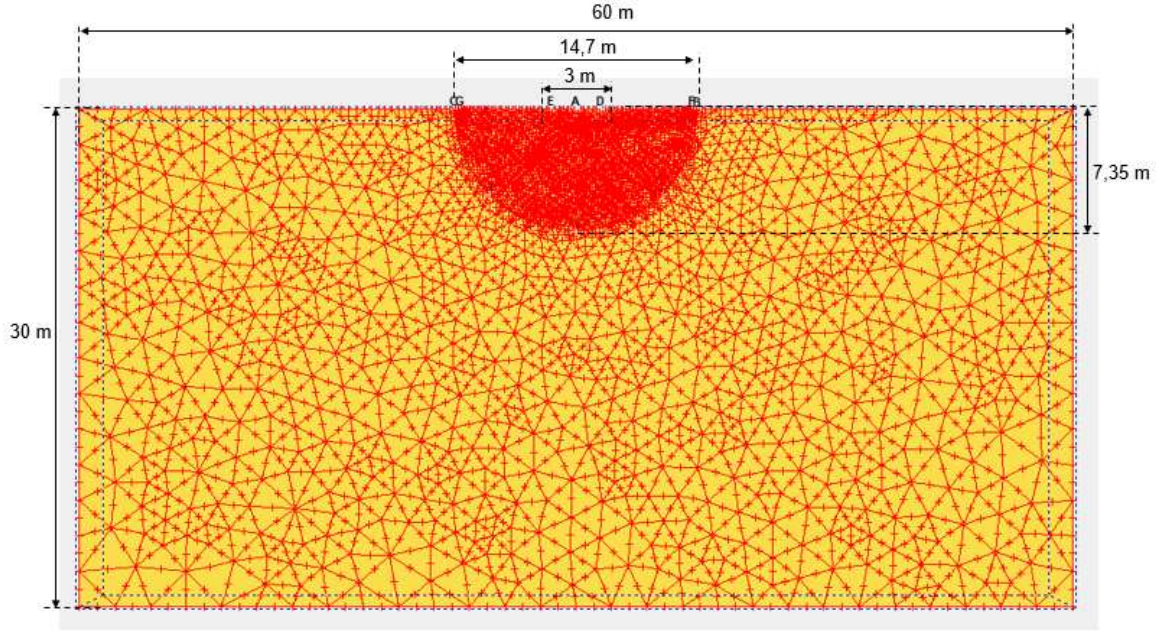


Figura 173 – Malha de elementos finitos definida para o bloco RE2A.

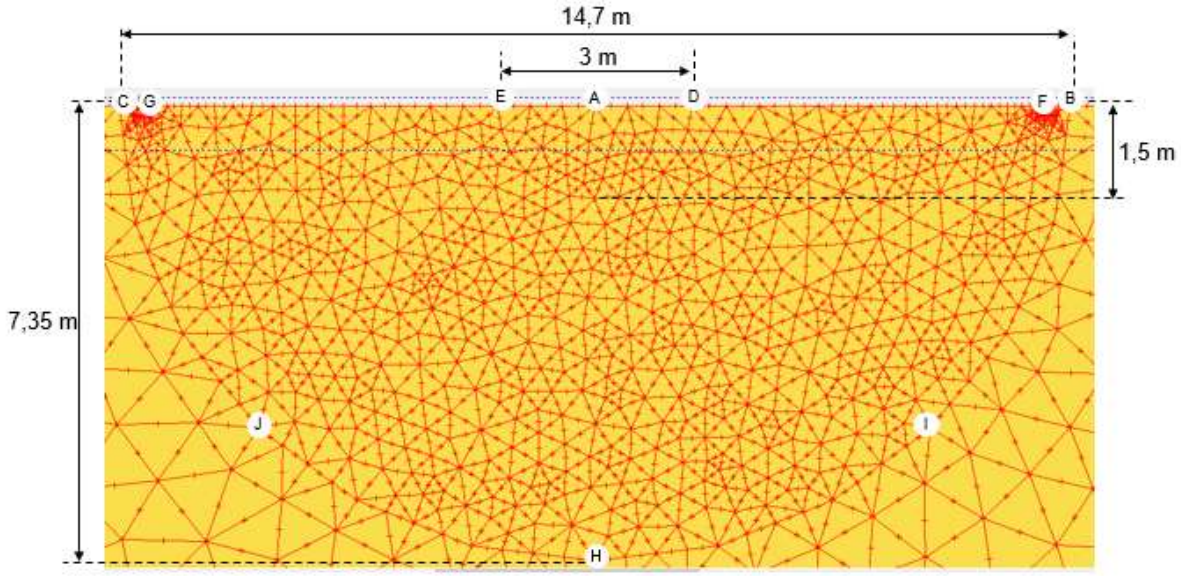


Figura 174 – Malha de elementos finitos na região do radier RE2A.

Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos do bloco RE2A. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 175.

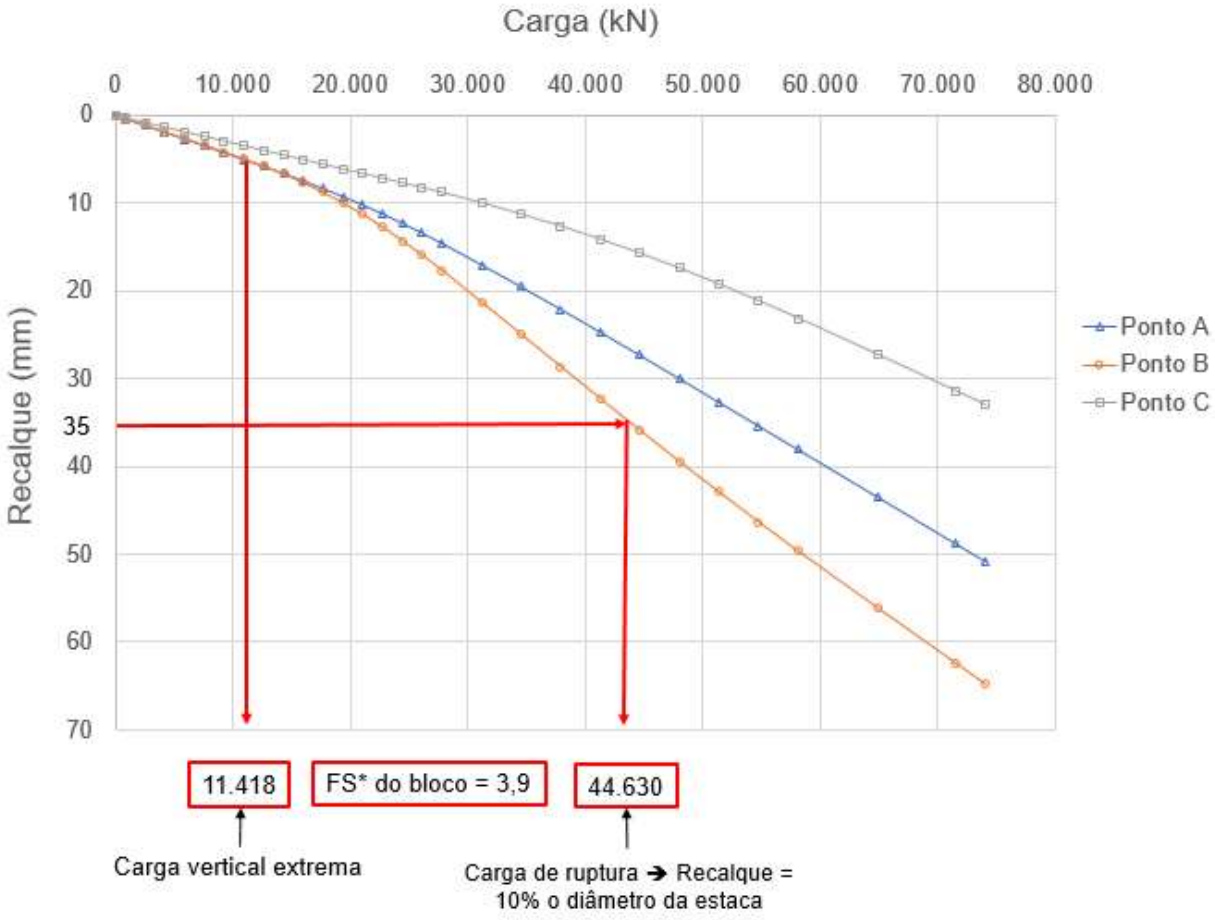


Figura 175 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do bloco RE2A.

As Tabelas 46 e 47 apresentam os resultados da modelagem realizada para o radier sobre 4 estacas, RE4A.

Tabela 46 – Distribuição de esforços entre as estacas do radier estaqueado sobre 2 estacas, RE2A.

Estacas	Carga (kN)
E1	531
E2 = E24	Excluídas
E3 = E23	Excluídas
E4 = E22	Excluídas
E5 = E21	Excluídas
E6 = E20	Excluídas
E7 = E19	Excluídas
E8 = E18	Excluídas
E9 = E17	Excluídas
E10 = E16	Excluídas
E11 = E15	Excluídas
E12 = E14	Excluídas
E13	-102

Tabela 47 - Resultados obtidos através da modelagem realizada para o radier estaqueado sobre 2 estacas, RE2A.

Resultados	RE2A
Somatório do carregamento vertical nas estacas (kN)	429
Carregamento total vertical (cenário extremo) (kN)	11418
% da carga vertical nas estacas	4%
% da carga vertical no radier	96%
Carga máxima de compressão na estaca (kN)	531
Carga máxima de tração na estaca (kN)	-102
Carga vertical de ruptura da fundação (kN)	44630
FS*	3,9
Carga máxima na estaca para carga de ruptura do bloco (kN)	630
Recalque máximo (mm)	11,2
Distorção do radier**	1/1.205
Rigidez a rotação (GN.m/rad)	54,2

* Considerado a relação entre a carga vertical que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca pela carga vertical extrema atuante na fundação. Nesta verificação, foi considerado o recalque máximo no radier, localizado no ponto B, definido na figura que apresenta a malha de elementos finitos. Este ponto fica localizado na extremidade da direita, no sentido de atuação do momento fletor.

** Distorção entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento

O fator de segurança da estaca mais carregada, 531 kN, é aproximadamente igual a 2 quando relacionado com a carga admissível obtida através da PCE3 no valor de 508 kN, que majorada em 30% para carregamento extremo é de 660 kN.

Ao realizar uma modelagem para levar o bloco RE2A à ruptura, obteve-se uma carga de ruptura para o bloco que garante um fator de segurança de 3,9. A exclusão de 2 estacas, do bloco com 4 estacas, representou uma redução mínima no fator de segurança, que antes era de 4,1, valor bem superior ao fator de segurança para fundação profunda, 2, e para fundação superficial, 3.

Observa-se que o bloco RE2A não atende ao limite mínimo de rigidez rotacional exigido pelo fabricante da torre, mesmo que para a capacidade de carga da estaca e do bloco estejam dentro dos limites de segurança.

Esta configuração de bloco com as estacas na posição mais afastadas do centro do bloco, estacas estas não presentes na configuração RE4A, garantindo um maior braço de alavanca para combate ao momento atuante na fundação, não conferiram ao bloco uma rigidez rotacional mínima necessária para garantir a segurança da fundação. A rigidez rotacional do bloco RE2A foi de 54,2 GN.m/rad, inferior aos 61 GN.m/rad exigido pelo fabricante da torre.

4.10 RADIER ISOLADO (RI)

Também foi verificado o comportamento do radier isolado, sem estacas, para um melhor entendimento e maiores conclusões sobre o comportamento da solução de fundação executada.

Algumas figuras obtidas através da modelagem numérica serão apresentadas. A Figura 176 apresenta a malha de elementos finitos do RI com 21.618 elementos e 60.666 nós. Foram definidas malhas muito finas para todo o domínio modelado e aplicados refinamentos nas regiões do radier. A Figura 177 apresenta um zoom para melhor visualização da malha de elementos finitos gerada na região do radier. Nela foram

definidos alguns pontos, denominados por A, B, C,..., I, na base do radier para uma futura análise gráfica, por exemplo, curva carga x recalque ou curva carga x deslocamento horizontal.

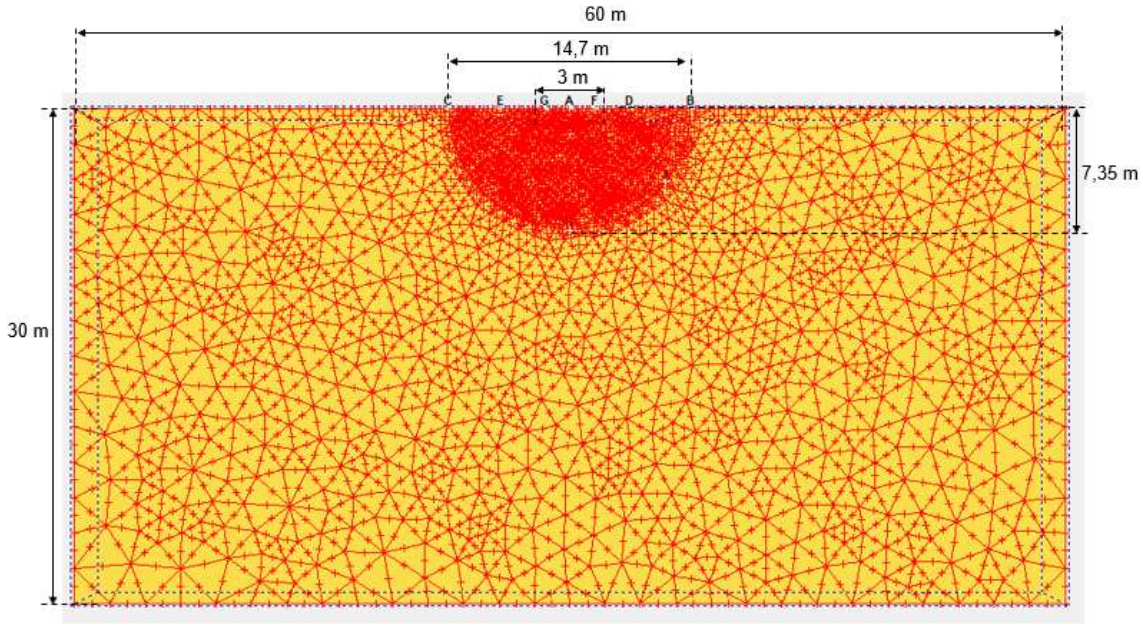


Figura 176 – Malha de elementos finitos definida para o radier isolado, RI.

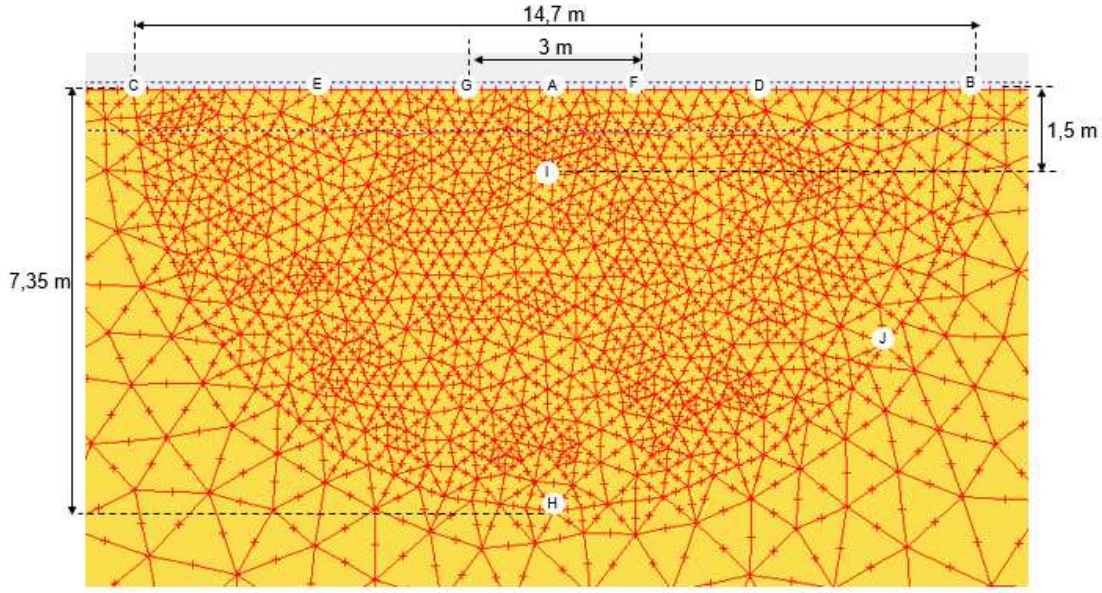


Figura 177 – Malha de elementos finitos na região do radier isolado, RI.

Foi verificada a curva carga x recalque dos pontos A, B e C definidos na malha de elementos finitos do radier isolado, RI. Para esta modelagem foram mantidos os esforços extremos horizontal e de momento e aumentando o esforço vertical de modo a verificar a ruptura do bloco. Foi adotada como carga de ruptura do bloco a carga que provoca um recalque igual a 10% o diâmetro da estaca, no caso 35 mm, no ponto de maior recalque, no caso o ponto B na extremidade direita do bloco. Esta curva pode ser verificada na Figura 178.

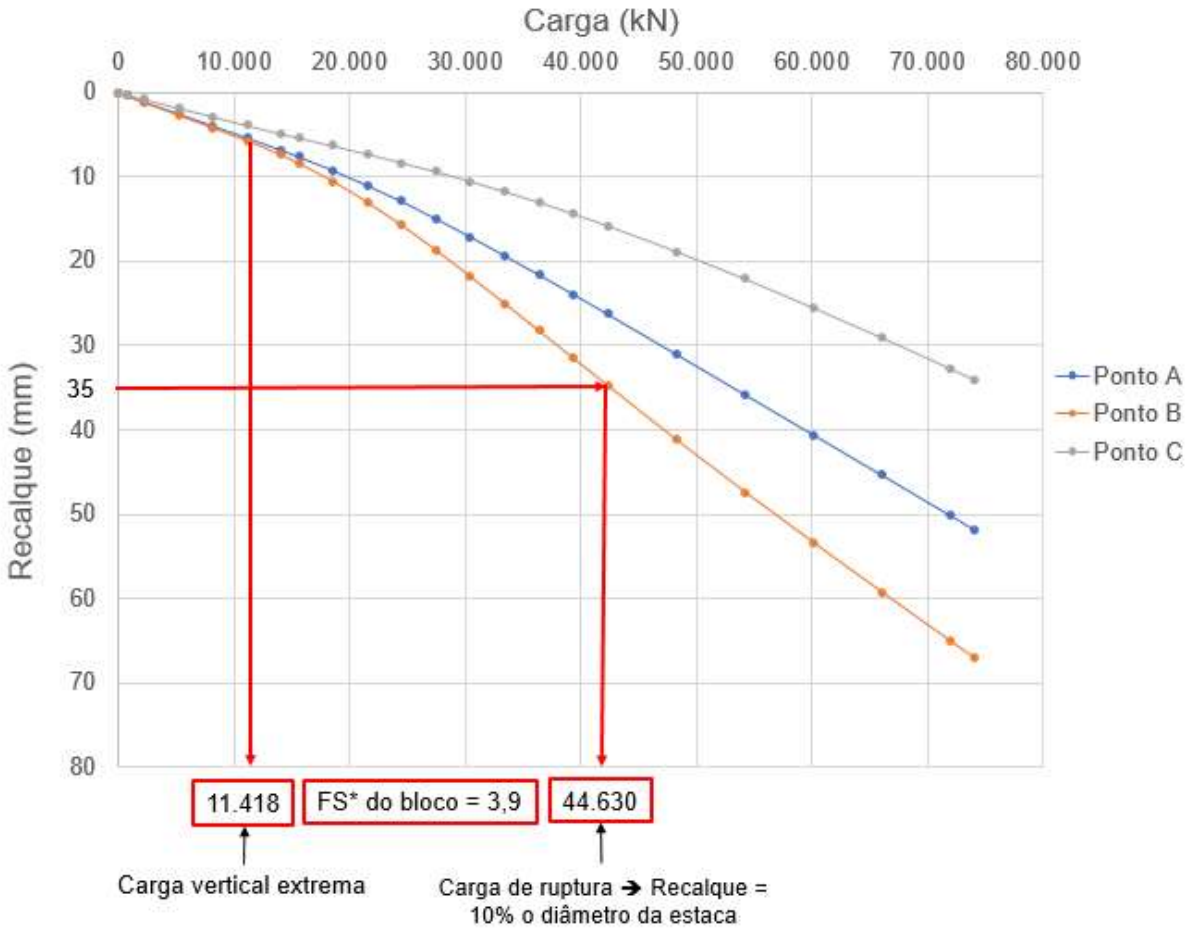


Figura 178 – Curva carga x recalque dos pontos A, B e C do radier isolado, RI.

A rigidez translacional foi obtida dividindo o carregamento horizontal extremo, 622 kN, pelo deslocamento horizontal por ele provocado, 0,402 mm. Para esta modelagem, foram mantidos os esforços verticais e horizontais e desprezado o esforço de momento para

verificar o deslocamento provocado pala carga horizontal. O resultado foi de uma rigidez translacional K_t = 1,55 GN/m, valor este superior ao mínimo de 1,40 GN/m exigido pelo fabricante da torre. Ou seja, a rigidez translacional obtida a partir da modelagem quando se considerou apenas o radier isolado como fundação garantiu a exigência do fabricante da torre. Entendeu-se por não ser necessário verificar este critério de segurança para as configurações do radier estaqueado, visto que as estacas só viriam a aumentar a rigidez translacional combatendo ainda mais o deslocamento horizontal da fundação.

O recalque máximo observado foi de 12,84 mm. A distorção angular foi de 1/967, ainda dentro do limite máximo admitido por Bjerrum para máquinas sensíveis a recalques e a rigidez rotacional foi de 43,6 GN.m/rad, estando em desacordo com o valor mínimo 61 GN.m/rad estabelecido pelo fabricante da torre.

Ao realizar uma modelagem para levar o radier isolado, RI, à ruptura, obteve-se uma carga de ruptura para o bloco que garante um fator de segurança de 3,7. A exclusão de 2 estacas, do bloco anteriormente modelado com 2 estacas, representou uma redução mínima neste fator de segurança, que antes era de 3,9, valor bem superior ao fator de segurança para fundação profunda, 2, e para fundação superficial, 3.

4.11 ASPECTOS RELEVANTES DA DISCUSSÃO

Nesta pesquisa foram analisados os seguintes pontos:

- ✓ Efeito da consideração do contato do bloco, de uma fundação concebida como grupo de estacas, da distribuição de esforços entre os elementos da fundação;
- ✓ Efeito da redução do número de estacas, verificando duas alternativas de locação das estacas sob o radier;
- ✓ Estados limites último e de serviço, através da verificação da carga de ruptura do bloco, rigidez rotacional e rigidez translacional.

Para cumprir os objetivos previstos, a pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas:

- ✓ Aferição do programa de elementos finitos Plaxis 3D Foundation através da modelagem numérica de casos da literatura;
- ✓ Retroanálise das provas de carga realizadas em campo para a obtenção dos parâmetros para modelagem da fundação;
- ✓ Modelagem do radier executado em campo, verificando o rateio do carregamento extremo entre o radier e as estacas, bem como a distorção angular, a rigidez rotacional e a rigidez translacional da fundação;
- ✓ Modelagem de outras configurações de radier estaqueado, mantendo fixa as dimensões do radier e o comprimento das estacas;
- ✓ Verificação do Fator de Segurança das soluções analisadas.

Para obtenção dos parâmetros foi utilizada a retroanálise da PCE3, curva carga-recalque que apresentou a menor carga de ruptura e a menor rigidez. Além conduzirem a uma análise a favor da segurança do ponto de vista de capacidade de carga, proporcionam um rateio de cargas que minimizam a contribuição do radier. Sendo um dos objetivos analisar a contribuição do bloco como elemento de transferência de carga, foi escolhido o cenário onde o bloco tem menor participação, para constatar se, mesmo assim, esta contribuição é representativa.

O estudo de caso utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa é a fundação de uma torre de aerogerador concebida através da teoria de grupo de estacas, onde a contribuição do bloco de fundação não é considerada na transferência de carregamento. Contudo, o cenário identificado é um terreno com elevada resistência e um bloco de fundação com 98,7% da sua área em contato com este terreno. Esta condição favorável a uma solução em radier estaqueado, onde o bloco de fundação contribui na transferência do carregamento, motivou o desenvolvimento desta pesquisa.

O objetivo desta pesquisa era verificar a participação do bloco no rateio de esforços e o comportamento da fundação em termos de carga e recalque para configurações onde o posicionamento das estacas eram mantidos, porém algumas estacas eram retiradas nas simulações, verificando o desempenho e a redistribuição dos esforços na fundação.

Para estas análises, foram realizadas modelagens numéricas com a configuração executada, além de simulações com configurações onde foram excluídas algumas estacas. Os blocos analisados apresentavam 24, 20, 16, 12, 10, 8, 6, 4 e 2 estacas. Também foi realizada uma simulação do radier isolado. Para os blocos com de 20 até 6 estacas, foram verificadas duas configurações distintas das estacas sob o bloco. A Tabela 48 apresenta os resultados obtidos que serão a seguir analisados

Tabela 48 - Resultados obtidos através das modelagens numéricas realizadas nesta pesquisa.

Estacas	Carga (kN)															
	RE24A	RE20A	RE20B	RE16A	RE16B	RE12A	RE12B	RE10A	RE10B	RE8A	RE8B	RE6A	RE6B	RE4A	RE2A	RI
E1	461,3	-	473,4	-	473,4	-	-	-	508	-	525,3	487,8	-	-	530,6	-
E2 = E24	295,8	314,1	301,1	331	312,7	340,1	331	345,4	331	340,1	-	343	362,7	357,4	-	-
E3 = E23	299,2	311,7	308,4	330,5	325,7	-	320,9	-	327,6	336,3	-	-	-	-	-	-
E4 = E22	278	292	295,4	-	-	326,6	316	328,6	-	-	333,8	-	-	-	-	-
E5 = E21	259,8	264,1	-	292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E6 = E20	217	239,6	243,4	251,1	257,4	279	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E7 = E19	175,6	-	196,8	-	205,4	-	-	243,4	-	-	246,8	-	256,4	-	-	-
E8 = E18	126	148,6	144,3	154,9	153	172,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E9 = E17	75,5	82,7	-	87,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E10 = E16	32,2	30,8	42,8	-	-	37	62,5	46,2	-	-	41,9	-	-	-	-	-
E11 = E15	0	-4,8	3,4	-4,3	6	-	8,7	-	22,6	12,5	-	-	-	-	-	-
E12 = E14	-17,8	-28,9	-18,8	-31,3	-19,7	-37,5	-21,7	-35,1	-10,1	-23,6	-	-17,3	-41,4	-38	-	-
E13	-46,2	-	-48,1	-	-51,5	-	-	-	-49,6	-	-94	-58,7	-	-	-102	-
	Resultados															
% da carga vertical nas estacas	34%	29%	30%	25%	25%	20%	18%	16%	16%	12%	15%	9%	10%	6%	4%	0%
% da carga vertical no radier	66%	71%	70%	75%	75%	80%	82%	84%	84%	88%	85%	91%	90%	94%	96%	100%
Recalque máximo (mm)	7,08	7,76	7,61	8,23	7,84	9,3	8,57	9,47	8,35	9,27	10	9,52	10,44	10,64	11,17	12,84
FS* do bloco	5,1	4,9		4,7		4,3		4,3		4,3		4,1		4,1	3,9	3,7
Distorção do radier **	1/2.000	1/1.759	1/1.883	1/1.667	1/1.754	1/1.449	1/1.613	1/1.429	1/1.667	1/1.493	1/1.351	1/1.449	1/1.299	1/1.282	1/1.205	1/967
Rigidez Translacional (GN/m)	1,59															1,55
Rigidez Rotacional (GN/rad)	87,15	79,34	84,87	74,56	79,26	65,29	72,48	64,36	75,56	66,92	61,02	65,45	58,22	57,5	54,21	43,6

* Considerado como sendo a divisão entre a carga vertical que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca pela carga vertical extrema atuante na fundação. Nesta verificação, foi considerado o recalque máximo no radier, localizado no ponto B, definido na figura que apresenta a malha de elementos finitos. Este ponto fica localizado na extremidade da direita na direção de atuação do momento fletor.

** Entre os recalques máximo e mínimo no sentido de atuação do momento.

Foi verificado que o bloco não apenas contribuía com a transferência de carregamento, mas o fazia de forma bastante representativa, sendo responsável por 66% do carregamento transmitido ao terreno. Comprovada esta expectativa da participação do bloco na transferência de carga, a pesquisa seguiu analisando o efeito da retirada de algumas estacas do bloco original. Para cada quantitativo de estacas proposto, duas configurações foram modeladas.

A Figura 179 apresenta o rateio do carregamento vertical entre o radier e as estacas para as configurações de bloco que atenderam aos critérios de segurança de capacidade de carga e de rigidez rotacional e translacional exigidas pelo fabricante. Para ilustração, foi considerado apenas uma das configurações para cada quantitativo de estacas, no caso os modelos com nomenclaturas terminadas com a letra A.

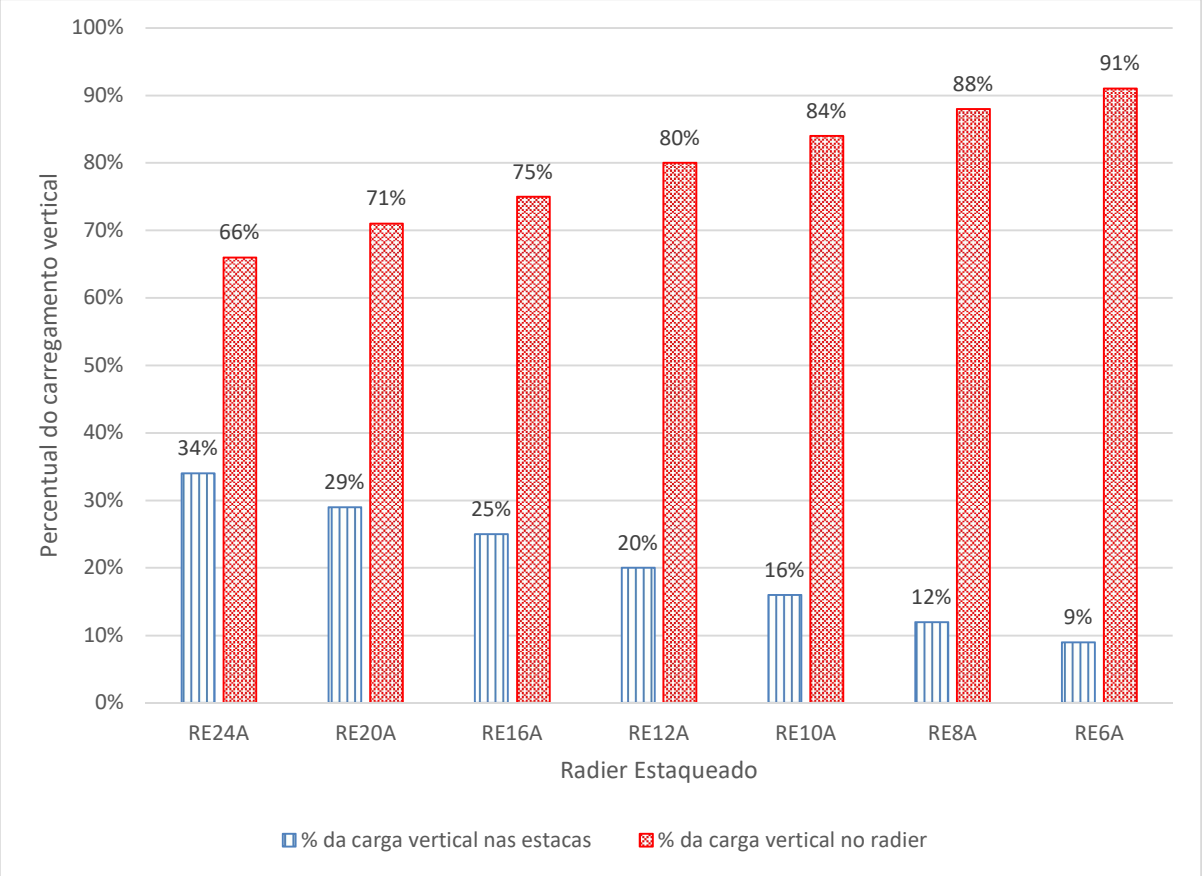


Figura 179 – Rateio do carregamento vertical entre o radier e as estacas.

Pode-se observar que na medida em que as estacas vão sendo retiradas da análise, o bloco passa a trabalhar aumentando ainda mais a sua participação no rateio do carregamento, indo de 66% para o radier sobre 24 estacas, até 91% para o radier sobre 6 estacas. Para todos esses blocos, os critérios de capacidade de carga, rigidez rotacional e rigidez translacional atenderam aos critérios de segurança.

No caso da rigidez translacional, observou-se que o radier isolado, com base nos parâmetros considerados para a modelagem, atendia a exigência mínima de 1,4 GN/m exigida pelo fabricante da torre. Desta forma, a inclusão das estacas viria apenas como um reforço nesta rigidez.

Outra verificação realizada através dos dados obtidos da modelagem numérica foi que a exclusão de estacas do bloco original praticamente não interfere no carregamento das estacas remanescentes. Essa verificação leva a concluir que o carregamento antes transmitido pelas estacas excluídas passa a ser absorvido pelo bloco. A Figura 180 apresenta a variação na carga atuante em cada uma das estacas em função da quantidade de estacas no bloco. Observa-se que as estacas posicionadas na região de descompressão devido à atuação do momento estão submetidas a esforços de tração. A Figura 181 apresenta a vista em planta do bloco original com as 24 estacas, para facilitar a identificação das estacas mencionadas na Figura 182, onde também foi traçada uma linha de tendência para melhor identificar a dispersão no comportamento da carga verificada para cada estaca a depender do quantitativo de estacas sob o radier. A Tabela 49 apresenta a média, o desvio-padrão e o coeficiente de variação para esta dispersão no carregamento de cada estaca.

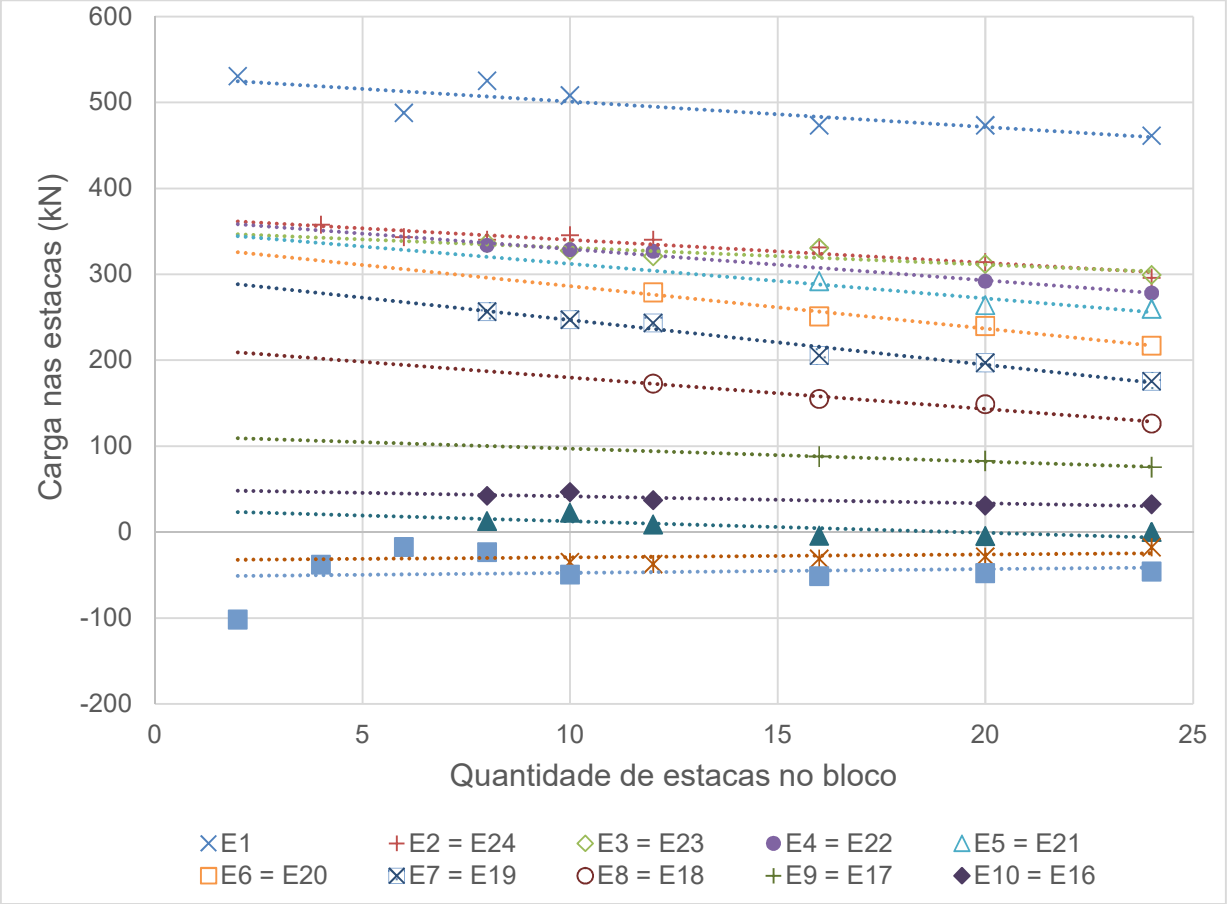


Figura 180 – Dispersão de pontos representativos do carregamento absorvido por cada estaca em função da quantidade de estacas do bloco.

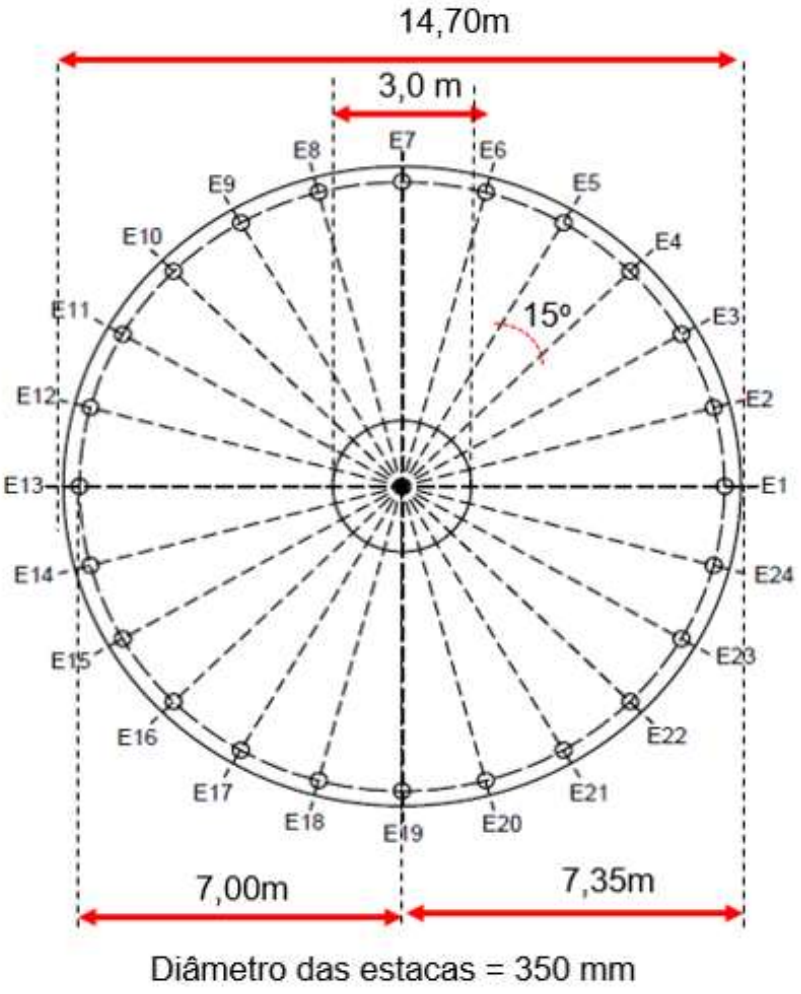


Figura 181 – Vista em planta do bloco de fundação executado em campo com 24 estacas.

Tabela 49 - Média, desvio-padrão e coeficiente de variação para dispersão do carregamento verificado para cada estaca para as diversas configurações de bloco.

Estacas	Média (kN)	Desvio Padrão (kN)	Coeficiente de Variação
E1	488	27	6%
E2 = E24	340	20	6%
E3 = E23	324	14	4%
E4 = E22	327	25	8%
E5 = E21	264	18	7%
E6 = E20	245	26	11%
E7 = E19	224	33	15%
E8 = E18	152	19	13%
E9 = E17	83	6	7%
E10 = E16	37	7	19%
E11 = E15	4	11	275%
E12 = E14	-30	8	-27%
E13	-47	26	-55%

Observa-se que a variação é pequena, com valor máximo observado para estacas 7 e 19 que apresentaram um desvio-padrão de 33 kN. O coeficiente de variação para as estacas E11, E12, E13, E14 e E15 não têm significado por relacionar uma dispersão com valores negativos e positivos.

Com relação aos recalques máximos verificados em cada um dos blocos analisados na pesquisa, o menor valor foi de 7,1 mm para o bloco RE24A e o maior recalque para o radier isolado, RI, no valor de 12,84 mm. Comparando os recalques obtidos, verifica-se uma pequena dispersão com valor médio de 9,3 mm, desvio-padrão de 1,5 mm, que para este nível de grandeza de recalques é pouco representativo. A variação do recalque máximo em função dos blocos analisados pode ser melhor observada na Figura 182.

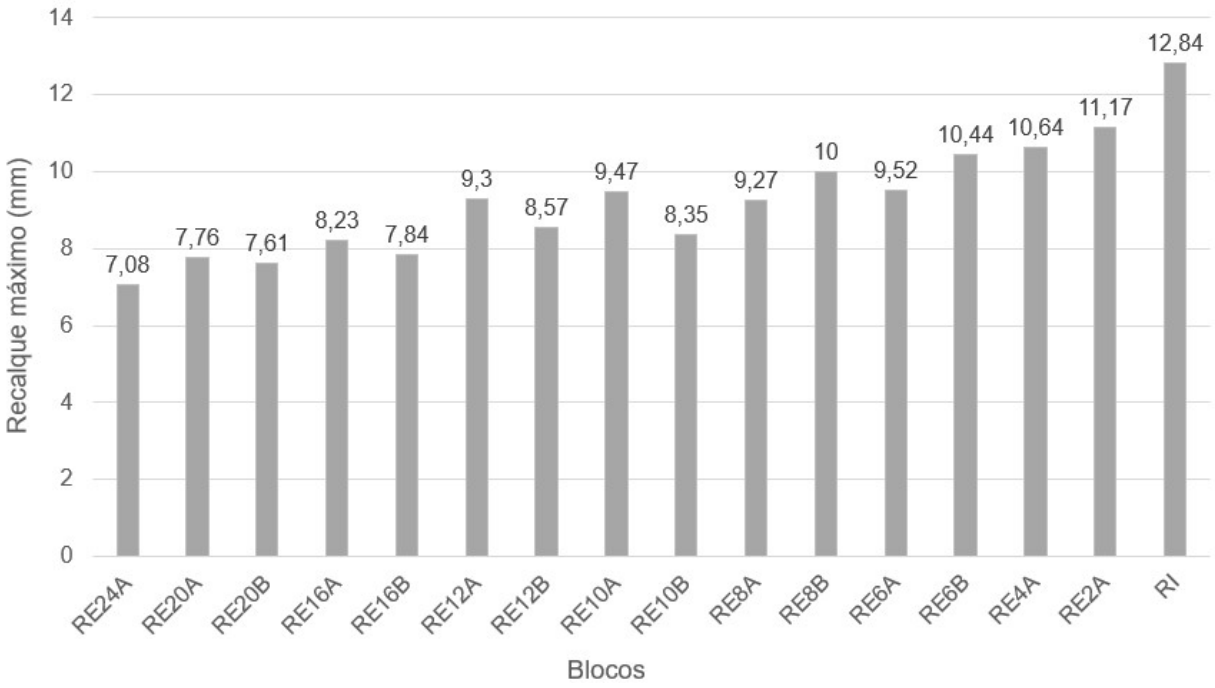


Figura 182 – Recalque máximo observado para os blocos analisados nesta pesquisa.

Ainda em relação à Tabela 38, observa-se que do ponto de vista de capacidade de carga o sistema solo-fundação está trabalhando com uma margem de segurança elevada, representada através do que foi definido como Fator de Segurança para as análises da carga de ruptura. No entanto, o limitante na redução das estacas foi a rigidez rotacional. Por ser uma estrutura esbelta, com um carregamento vertical reduzido quando comparado com a magnitude do momento atuante, associado a um terreno de fundação que fornece elevada resistência, a maior restrição é a estabilidade rotacional. Para a finalidade de combater as distorções angulares, as estacas posicionadas a uma maior distância do centro do carregamento combatem de forma mais efetiva os esforços que tendem a desestabilizar a estrutura. As Figuras 183 e 184 apresentam o comportamento do Fator de Segurança e da Rigidez Rotacional analisados nesta pesquisa, esta última destacando o limite mínimo definido pelo fabricante do aerogerador. Por fim, a Figura 185 apresenta, de forma gráfica, os valores extremos de Fator de Segurança, Rigidez Rotacional e Rigidez Translacional dos blocos analisados nesta dissertação.

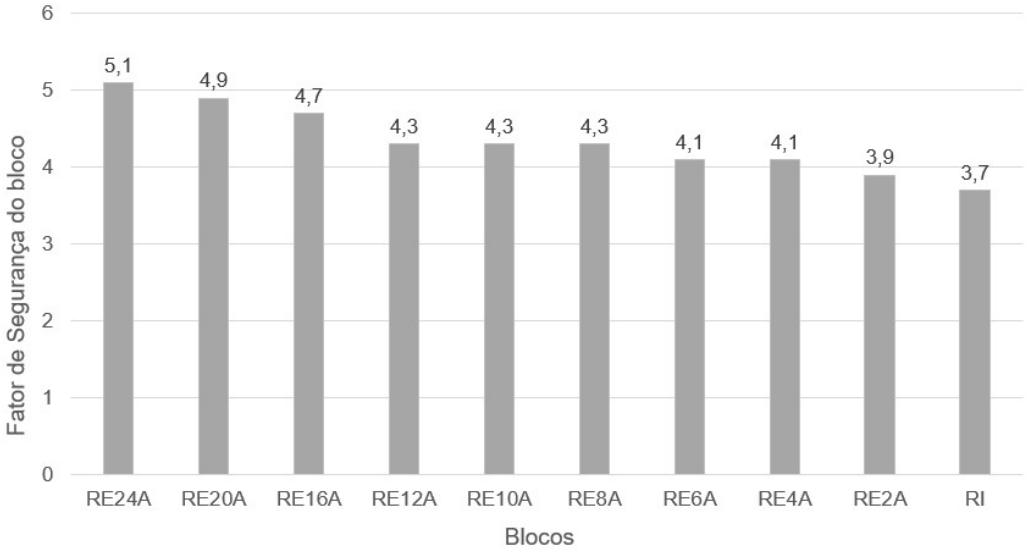


Figura 183 – Fator de Segurança: relação entre a carga de ruptura, definida como a carga que provoca um recalque de 10% do diâmetro da estaca, e a carga extrema atuante.

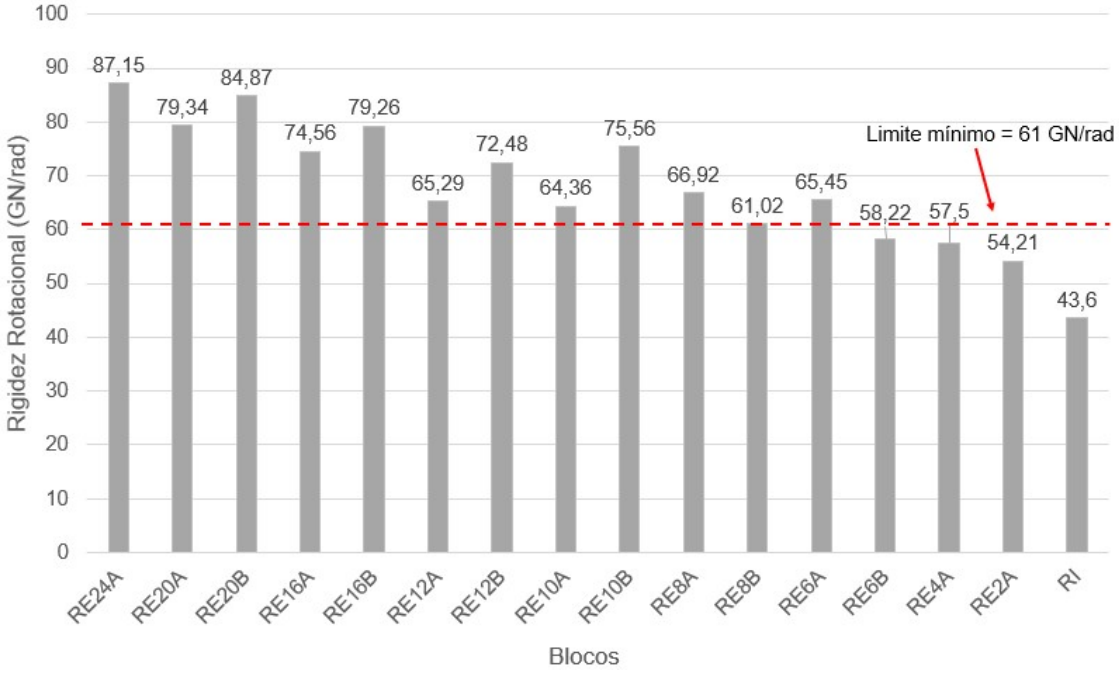


Figura 184 – Rigidez Rotacional dos blocos analisados nesta pesquisa.

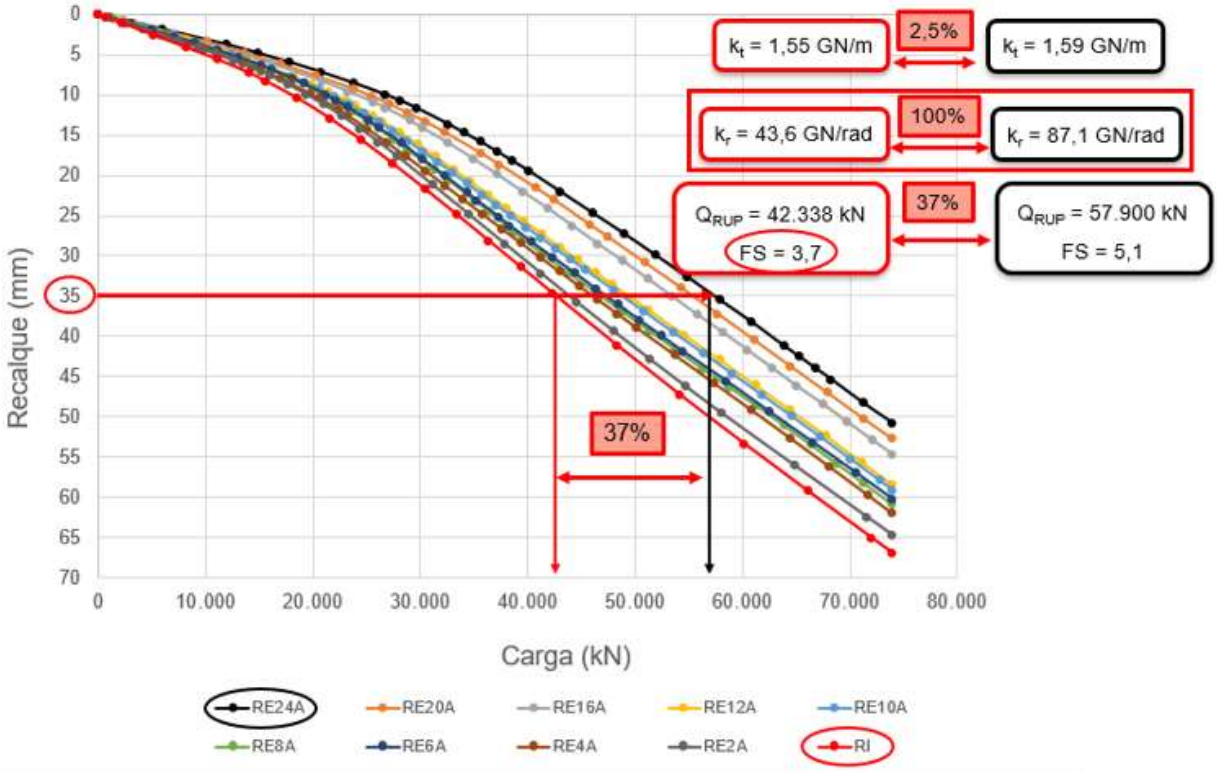


Figura 185 – Valores extremos de Fator de Segurança, Rigidez Rotacional e Rigidez Translacional dos blocos analisados nesta dissertação.

5 CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi avaliada a fundação de um aerogerador, assente sobre um arenito consolidado, tendo sido objeto da pesquisa:

- ✓ Verificação do efeito da consideração do contato do bloco, de uma fundação concebida como grupo de estacas, na distribuição de esforços entre os elementos da fundação;
- ✓ Análise do efeito da redução do número de estacas, verificando duas alternativas de locação das estacas sob o radier;
- ✓ Verificação do Estado limite último e de serviço, através da verificação da carga de ruptura do bloco, rigidez rotacional e rigidez translacional.

Os aerogeradores são estruturas que demandam grandes blocos de fundação por conta da elevada magnitude dos momentos atuantes e a contribuição destes, quando em terreno com elevada resistência, podem favorecer ao controle de custo financeiro e de tempo na execução da obra. As análises realizadas nessa pesquisa mostraram que uma grande economia pode ser obtida com a consideração da capacidade de carga do bloco nas soluções de fundações de torres de aerogeradores, quando estas estão assentes em terreno com elevada resistência. As conclusões alcançadas ao logo da pesquisa foram as seguintes:

- ✓ Do ponto de vista de capacidade de carga, o sistema solo-fundação está trabalhando com uma margem de segurança elevada;
- ✓ O limitante na redução das estacas foi a rigidez rotacional, afetada pela elevada magnitude do momento atuante na estrutura;
- ✓ As estacas posicionadas a uma maior distância do centro do bloco são decisivas na estabilidade quanto ao critério de rigidez rotacional. Estas estacas absorvem mais carga do que as mais próximas do centro do bloco;
- ✓ O bloco participa de forma significativa na transferência do carregamento, respondendo por 66% do rateio de carga na fundação executada;

- ✓ O critério de rigidez translacional foi atendido para todos os blocos analisados, inclusive o radier isolado;
- ✓ Foi possível a desconsideração de 18 estacas, e mesmo com apenas 6 estacas remanescentes a solução se mostrou estável quanto a sua capacidade de carga e rigidez rotacional;
- ✓ A exclusão das estacas não provocou maiores reflexos na capacidade de carga do bloco quando comparado com o efeito causado na estabilidade rotacional da estrutura;
- ✓ As estacas excluídas nas simulações não geravam acréscimo de carga nas estacas remanescentes, e sim uma maior participação do bloco de fundação no rateio do carregamento;
- ✓ A consideração da contribuição do bloco na transmissão de esforços pode favorecer ao controle de custo e de tempo na execução da obra.

O monitoramento em campo desse tipo de obra, com verificação da distribuição do carregamento entre o bloco e o estaqueamento, associado a registro dos recalques diferenciais, viriam a reforçar os resultados obtidos matematicamente através das modelagens. Talvez desta forma, essa prática fosse melhor aceita entre os projetistas.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De um modo geral, a perspectiva da compreensão de uma fundação em radier estaqueado constitui um amplo campo para pesquisas e discussões. Os resultados apresentados neste trabalho merecem ser complementados para que esta prática seja melhor aceita entre os projetistas. Como sugestões para pesquisas futuras:

- ✓ Realizar monitoramento em campo de uma fundação de aerogerador em radier estaqueado, objetivando verificar a distribuição do carregamento entre o bloco e o estaqueamento, associado ao registro dos recalques, como forma de validar os resultados obtidos matematicamente através das modelagens.

- ✓ Realizar uma análise deste mesmo estudo de caso, modelando através de um software que permita considerar um carregamento dinâmico, existente neste tipo de estrutura, também viria a agregar os resultados obtidos nessa pesquisa.

REFERÊNCIAS DA LITERATURA

AMARO, V.E.; LIMA, F.G.F.; SANTOS, M.S.T., (2013). “An evaluation of digital elevation models to short-term monitoring of a high energy barrier island, northeast Brazil”. World Academy of Science, v. 76, p. 317-324.

ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J., (1994). Bacia Potiguar. Bol. de Geoc. da PETROBRAS.

AOKI, N. (1984). “Previsão da curva carga-recalque”. Palestra proferida na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. (1975). “An Approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING, 5., 1975, Buenos Aires. Proceedings… Buenos Aires, 1975. V. 1. P. 367-376.

AKINMUSURU, J. O. (1980). “Interaction of piles and cap in piled footing”. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 106 (11); 1263-1268.

AKINMUSURU, J. O. (1973). “The influence of a pile cap on bearing capacity of piles in Sand”. Dissertação de mestrado. University of Zaria Nigéria.

BACELAR, C.J. R. (2003). “Análises de Recalque em Radiers Estaqueados”, 193p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

BALAKUMAR, V.; ANIRUDHAN, I. V. (2011). “Piled Raft Behaviour – Model Studies and Field Performance”. Proceedings of Indian Geotechnical Conference. December, p.15-17, Kochi.

BEZERRA, J. E. (2003). “Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações”, 193 p. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G.DM-104/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF.

BITTENCOURT, D. M. A. & LIMA, B. E. A. (2009). “Análise dos fatores de interação em radier estaqueado: comparação entre duas abordagens numéricas”, 136 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

BITTENCOURT, E. de C., (2018). “Comportamento de radiers estaqueados assentes em solos arenosos”. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018, 190 f.

BJERRUM, L. (1963). “Interaction between structure and soil”. In: European Conference on Soil Mechanics and Foudation Engineering, Wiesbaden: ECSMFE, p. 135–137.

CAPUTO, V., and VIGGIANI, C., (1984). “Pile foundation analysis: a simple approach to nonlinearity effects”. Rivista Italiana di Geotecnica, 18(2), 32-51.

CHAUDHARY, M. T. A. (2007). MEF modelagem de um radier estaqueado cumprido para o controle do recalque em rocha mole. (Em Inglês). Article. Engineering Structures, Volume 29, Pages 2901–2907. 7p.

CINTRA, J. C. A, AOKI, N., ALBIERO, J. H. (2011). Fundações diretas, pg. 46 e pg. 92.

COMODROMOS, E. M., ANAGNOSTOPOULOS, C. T., and GEORGIADIS, M. K. (2003) Avaliação numérica da resposta do grupo de estacas baseado em teste de carga axial. (Em Inglês). Article. Computers and Geotechnics, Volume 30. 11 Pag. 505-515

COMODROMOS, E. M., PAPADOPOULOU, M. C., and RENTZEPERIS, I. K., (2009). “Pile foundation analysis and design using experimental data and 3-D numerical analysis”. Computers and Geotechnics, 36(5), 819-836.

COOKE, R. W. (1986) “Piled raft foundations on stiff clays – a contribution to design Philosophy”.

CRUZ, J. B., BENTO, D. M., BEZERRA, F. H. R., FREITAS, J. I., CAMPOS, U. P., SANTOS, D. J. (2010). “Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte”, revista Brasileira de Espeleologia, Volume 1, Número 1, Ano 2010.

CUNHA, R.P e PANDO, M. (2013). “Influence of Pile-Soil-Raft Parameters on the Behavior of Piled Raft and Conventional Piled Group Foundations”. Soils and Rocks. Vol.36, p. 21-35.

DÉCOURT, L. (1993). “Prediction of load settlement relationships for foudations on the Basis of the SPT-T”. Ciclo de Conferencias Internacinales Leonardo Zeevaert, p. 87-104, México.

DE SANCTIS, L., and MANDOLINI, A., (2006). “Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132 (12), 1600-1610.

EL-MOSSALLAMY and FRANKE (1997). “Piled Rafts-Numerical Modelling to Simulate the Behaviour of Piled Raft Foundations”. The Authors, Darmstadt, Germany.

FARIAS, P.R.C., (1997). “Geologia de Superfície da Área de Macau- RN”. (Relatório Final Petrobrás), GEXP, GELAB, 76 p.

FERREIRA, A.T.S.; AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T., (2014). “Geodésia aplicada na integração de dados topográficos e batimétricos na caracterização de superfícies de praia”. Revista Brasileira de Cartografia, v. 66, p. 167-184.

FIORAVANTE, V., and GIRETTI, D., (2010). Contact versus noncontact piled raft foundations. Canadian Geotechnical Journal, 47(11), 1271-1287.

FREITAS NETO, O. (2013). Avaliação Experimental e Numérica de Radiers Estaqueados com Estacas Defeituosas em Solo Tropical do Brasil. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-088/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 253p.

GARCIA, J. P. (2015). “Análise Experimental e Numérica de Radiers Estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP” - Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp.

GARHY, B. E., GALIL, A. A., YOUSSEF, A. F., RAIA, M. A., (2013). “Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study”. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 389-399.

GODOY, N. S. (1972), Notas de Aula, Curso de Graduação. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1972.

GODOY, N. S. (1983), “Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. Palestras. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1983.

GUSMÃO, A.D. (1990), “Estudo da Interação Solo Estrutura e sua Influência em Recalques de Edificações”, Tese de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GUSMÃO FILHO, J.A., (1990) – “Segurança de obras: solo-fundação-estrutura”. In: CIVIL 90, Recife, ITEP. Anais, Vol. 1, p.259-286.

GUSMÃO FILHO, J.A., (1998) – “Fundações: do conhecimento geológico à prática da engenharia”, Editora Universitária – UFPE, páginas 153 e 154.

IBAÑEZ, J. P. (2003). “Modelagem Constitutiva para Solos com Ênfase em Solos Não Saturados”. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado. 241 Pag.

KATZENBACH, R., ARSLAN, U., MOORMANN, C. & REUL, O. (1998). “Piled Raft Foundation – Interaction Between Piles and Raft”. Darmstadt Geotechnics, Darmstadt Univ. of Technology, n. 4, p. 279-296.

KATZENBACH, R.; ASLAN, U.; MOORMANN, C. (2000). “Piled raft foundation project in Germany”. In: HEMSLEY, J. A. “Design applications of raft foudndations”. 1ª ed. Londres: Thomas Telford LTDA, 626 p.

KATZENBACH, R., SCHIMITT, A., TUREK, J., (2005). “Assessing Settlement of High-Rise Structures by 3D Simulations”. Computer-aided civil and infrastructure engineering 20, 221-229.

KUWABARA, F. (1989). “An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil. Soils and Foundations”, v. 29, n. 1, p. 82-92.

LEE, J., KIM, Y. & JEONG, S. (2010). “Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay”. Computers and Geotechnics, v. 37, p.103–114.

LEWIN, T. J. (2010). “An investigation of design alternatives for 328-ft (100-m) tall wind turbine towers.” M.S. thesis, Iowa State Univ., Ames, IA.

MACEDO, J. W. N. (2017). “Modelagem numérica de radier estaqueado em solo arenoso”. Monografia (Graduação) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

MANDOLINI, A. (2003). “Design of pile draft foundations: Practice and development”. In: Proceedings 4th international geotechnical seminar on deep Foundation on bored and auger piles. Rotterdam, p.59-80.

MANDOLINI, A., RUSSO, G. & VIGGIANI, C. (2005). “Piled foundations: Experimental investigations, analysis and design”. State-of-the-Art Rep. Proc. 16th ICSMGE, Osaka, Japan, v. 1, p.177–213.

MANDOLINI, A.; DI LAORA, R.; MASCARUCCI, Y. (2013) “Rational Design of Piled Raft”. Proc. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST (57): 45 - 52.

MANDOLINI, A., DI LOARA, R., IODICE, C. (2017). “Simple approach to static and seismic design of piled rafts”. 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations—Volume 1, p. 107-124.

MARANHÃO, G. (2014). “Modelagem de fundação para torre eólica, considerando solo e estacas”. 56º Congresso brasileiro de concreto.

MATSUMOTO, T. (1998). Analyses of piled raft model provided by ISSMGE TC-18 – Part4: “Analyses of piled raft subjected to vertical loading and lateral loading”. TC-18 Japanese. Geot. Society Member’s Meeting on Piled Rafts. Tokyo. p .4.1-4.7.

MOHAMED, W & AUSTRELL, P.E. (2017). “A comparative study of three onshore wind turbine foundation solutionas”. Computers and Geotechnics.

MOLEMAAR, D.P., TEMPEL,J. V.D, (2002). “Wind Turbine Structural Dynamics – A Review of the Principles for Modern Power Generation, Onshore and Offshore”, Wind Engineering, 26, No. 4, p. 211-220.

MORGAN, K., NTAMBAKWA, E. (2008). “Wind Turbine Foundation Behavior and Design Considerations”, in: AWEA Windpower Conference. AWEA, Houston, pp. 1–14.

MOURA, A. S. (2007). Avaliação de Metodologias de Projetos de Fundações Superficiais de Aerogeradores Assentes em Areia de Duna. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-051/2007, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 323p.

NBR 6118 (2014). “Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento”. ABNT. Rio de Janeiro, 2014.

NOVAK, J. L., REESE, L.C. & WANG, S. T. (2005). “Analysis of Pile-Raft Foundations with 3D Finite-Element Method”. Proceedings of the Structures congress.

OTTAVIANI, M. (1975). “Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups”. Géotechnique, v. 25, n. 2, p. 159-174.

PEREIRA, A. de L. (1993). “Análise Aeroelástica de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal. Tese de Mestrado em Estruturas da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 153 p.

PEZO, O. B. (2013). “Análises Numéricas de Provas de Carga em Radier Estaqueado Utilizando o Método dos Elementos Finitos”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil. 140p.

POULOS, H.G., AND DAVIS, E.H., (1980). “Pile Foundations Analysis and Design”. Wiley, New York.

POULOS, H.G. (1991). “Foundation economy via piled raft systems”. Keynote Paper of Pile talk International’ 91. Kuala Lumpur, p. 97-106.

POULOS, H.G. (1994). “An approximate numerical analysis of pile-raft interaction”. Int. Journal for Num. & Anal.Meth.in Geomechanics, v. 18, p.73-92.

POULOS, H. G., SMALL, J. C., TA, L. D., SINHA, J. & CHEN, L. (1997). “Comparison of some methods for analysis of piled rafts”. Proced. XIV ICSMFE, Hamburg, v. 2, p. 1119-1129.

POULOS, H.G., 2000. “Practical design procedures for piled raft foundations”. In “Design applications of raft foundations”, Hemsley J.A. ed., Thomas Telford, pp. 425-467.

POULOS, H. G.; (2001). “Pile draft foundations: design and applications”. Geotechnique, vol. 51, n. 2, p. 95-113.

RANDOLPH, M. F. (1983). “Design of Piled Raft Foundations”. Cambridge University, Eng. Depart. Research Report, Soils TR143.

RANDOLPH, M. F.; (1994). “Design methods for pile groups and piled rafts”. State of art report. Proc. 13h Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., New Delhi, v. 5, p. 61-82.

RIOS, V. P. L., AMARO, V. E., VIEIRA, M. M., MATOS, M. F. A., PRUDÊNCIO, M. C., CAMARA, M. R., (2016). “Influência Neotectônica na Morfologia do Sistema de Ilhas Barreiras, Nordeste do Brasil”. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.17, nº 3.

RUSSO, G., AND VIGGIANI, C., (1998). “Factors controlling soil-structure interaction for piled rafts”. Proc. Int. Conf. on Soil-Structure Interaction in Urban Civil Engineering, Darmstadt, pp. 297-322.

SALES, M. M. (2000). “Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas”, 229p. Tese de Dsc. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pub. G.TD-002A/00.

SALES, M. M., LIMA, B. S., ALMEIDA, S. R. M., FARIAS, M. M., (2015). “Automatic optimization of piled raft design on branch and bound method”. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 24, 351 – 365.

SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E., (2013). “Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no Nordeste do Brasil”. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 14, p. 151-162.

SANTOS, A.L.S.; AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T., (2014). “Geodésia de precisão aplicada à análise da evolução morfodinâmica de curto prazo na Ilha Barreira do Corta Cachorro, litoral do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil”. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 15 p. 425-442.

SANTOS, C. L. A., VITAL, H., AMARO, V. E., KIKUCHI, R. K. P. (2007). “Mapeamento de recifes submersos na costa do Rio Grande do Norte, NE Brasil: Macau a Maracajau”, Revista Brasileira de Geofísica, ISSN 0102-261X, Vol.25 suppl.1 São Paulo.

SHRESTHA, S., RAVICHANDRAN, N., E RAHBARI, P., (2017). “Geotechnical Design and Design Optimization of a Pile-Raft Foundation for Tall Onshore Wind Turbines in Multilayered Clay”, ASCE - American Society of Civil Engineers.

SILVA, R.L.; NOGUEIRA, A.M.B., (1995). “Estratigrafia da porção emersa da costa do Rio Grande do Norte”. In: Simpósio sobre Processos Sedimentares e Problemas Ambientais na Zona Costeira do Nordeste do Brasil, Recife, Anais..., 1., p. 144-147.

SINHA, J. (1997). “Piled Raft Foundations Subjected to Swelling and Shrinking Soils”. PhD Thesis, Univ. of Sydney, Australia.

SMALL, J. & POULOS, H. (2007). “Non-Linear Analysis of Piled Raft Foundations”. Contemporary Issues In Deep Foundations: Geotechnical Special Publication (GSP), n. 158, p. 1-9.

SOARES, W. C. (2011). “Radier Estaqueado Com Estacas Hollow Auger Em Solo Arenoso”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE ,302p.

SOARES, W. C., COUTINHO, R. Q E CUNHA, R. P. (2014). “PILED RAFT WITH HOLLOW AUGER PILES FOUNDED IN A BRAZILIAN GRANULAR DEPOSIT”. Canadian Geotechnical Journal, 2014, Vol.52(8), pp.1005-1022.

SOSA, S. F. (2010). Análise do Comportamento de Radier Estaqueados pelo Método dos Elementos Finitos em 3D. (Em Espanhol). Instituto Superior Politécnico “Jose A. Echeverría”. Tesis. 134 Pag.

SOUZA, R. D. S. (2010). “Análise dos Fatores de Interação entre Estacas em Radier Estaqueado: Comparação entre Duas Ferramentas Numéricas”. Universidade Federal de Goiás. Dissertação. 170 Pag.

STATTEGGER, T.K.; CALDAS, L.H.O.; VITAL, H., (2006). “Holocene Coastal Evolution of the Northern Rio Grande do Norte Coast, NE, Brazil”. Journal of Coastal Research, v. 39, p. 150-155.

SVENSSON H., (2010). “Design of Foundations for Wind Turbines”. Master's Dissertation, Lund University, Suécia.

TA, L. D. & SMALL, J. C. (1996). “Analysis of piled raft systems in layered soils”. Int. Journal for Num. & Anal.Meth.in Geomechanics, v. 20, p. 57-72.

TANG, Y. J., PEI, J., ZHAO, X. H. (2013). “Design and measurement of piled-raft foundations”. Geotechnical Engineering, Volume 167 Issue GE5.

TEIXEIRA, A. H., (1996). “Projeto e Execução de Fundações”. In: III Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. São Paulo, SP. Anais. v. 1, p. 1-18.

TEIXEIRA, A.H. & GODOY, N.S (1996). “Análise, projeto e execução de fundações rasas”. In: Fundações: teoria e prática. São Paulo: PINI, 1996. p. 227-264.

TERZAGHI, K. (1942). “Discussion on pile formulas”. ASCE, 68(2). p. 311-323.

VELLOSO D. A. e LOPES F. R., (2004). Fundações - Volume 1. Oficina de Textos, Rio de Janeiro.

VELLOSO D. A. e LOPES F. R., (2010). Fundações - Volume 2. Oficina de Textos, Rio de Janeiro, pg. 310.

WARREN-CODRINGTON, (2013). “Geotechnical Considerations for Onshore Wind Turbines”, Dissertação de mestrado, University of Cape Town, África do Sul.

WOOD, D. M. (2004). *Modelagem Geotécnica.* (Em Inglês). (Versão 2, 496 Pag).

YAMASHITA, K. (1998). “Analyses of piled raft model provided by ISSMGE TC-18 - Part 2: Estimation by three dimensional finite element analysis”. TC-18 Japanese Geot. Society Member’s Meeting on Piled Rafts. Tokyo. p .2.1-2.8.

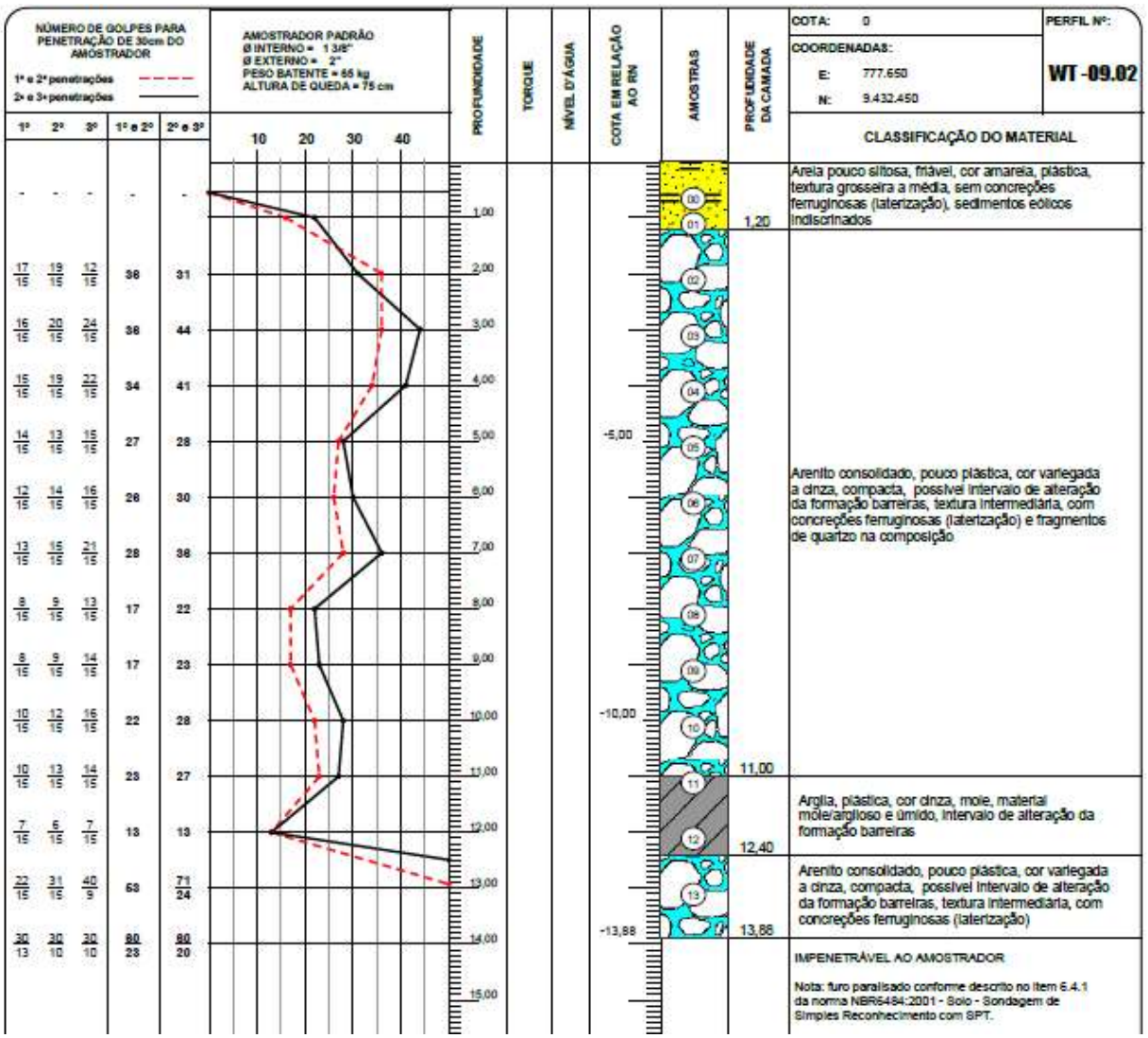
Dados Mensais de fevereiro de 2018, ABEEólica.

Relatório Técnico INF-8403 emitido pela Alstom em 18/02/2018.

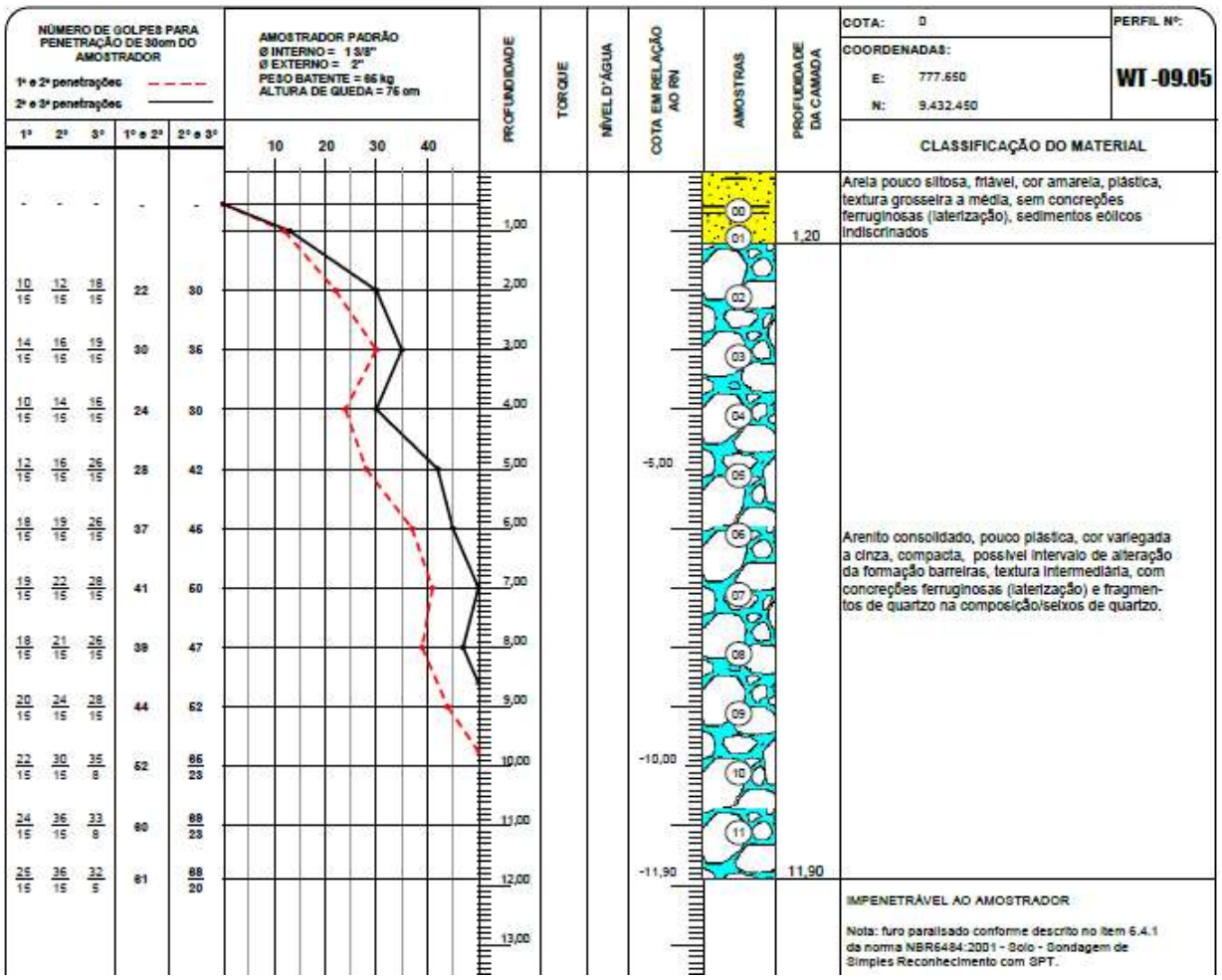
ANEXOS

ANEXO A – RESULTADOS DAS SONDAGENS À PERCUSSÃO DISPONIBILIZADAS PARA ESTA PESQUISA

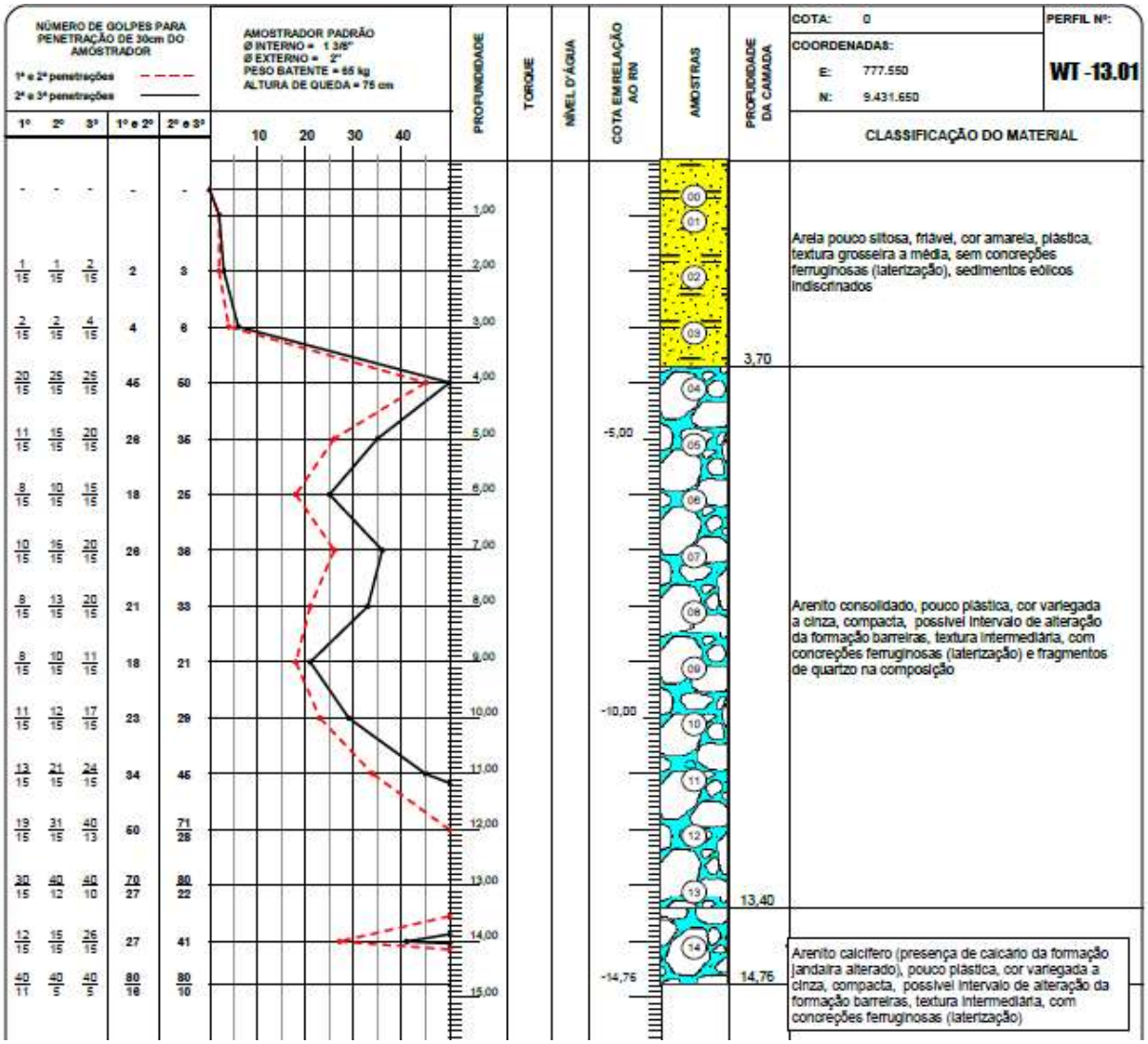
SONDAGEM SPT 01 (WT – 09.02) EXECUTADA NA ÁREA DA BASE DO AEROGERADOR 9.



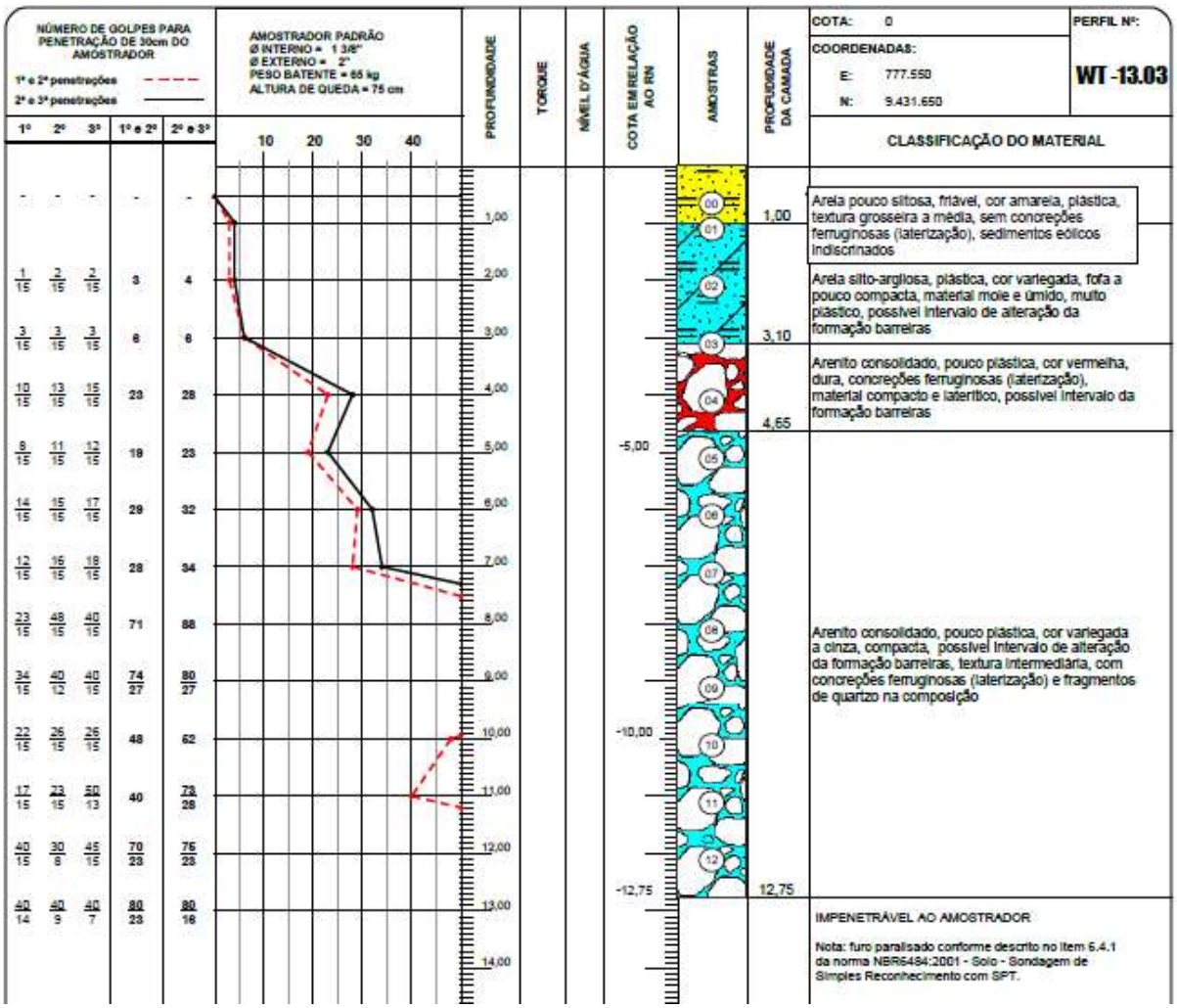
SONDAGEM SPT 02 (WT – 09.05) EXECUTADA NA ÁREA DA BASE DO AEROGERADOR 9.



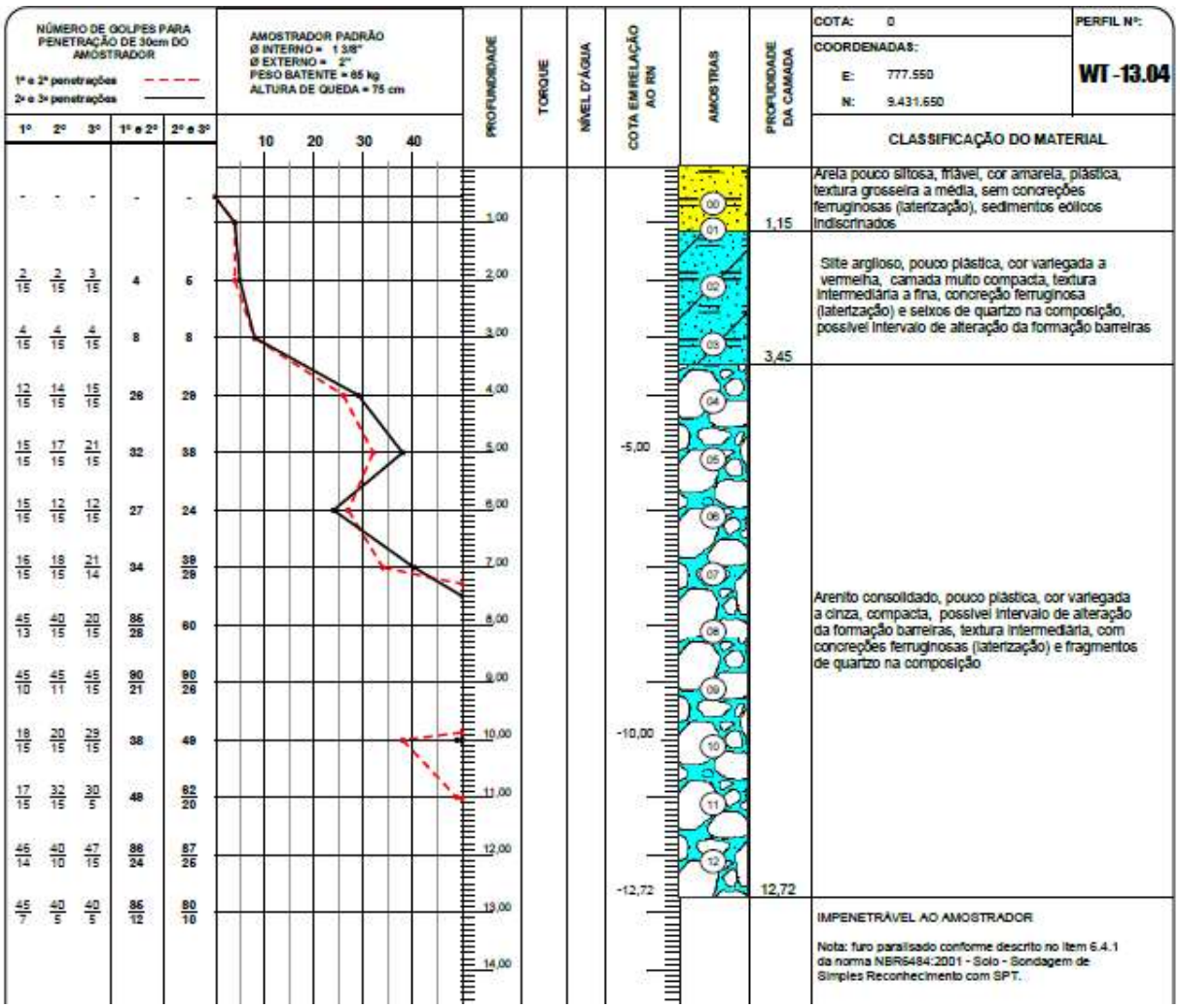
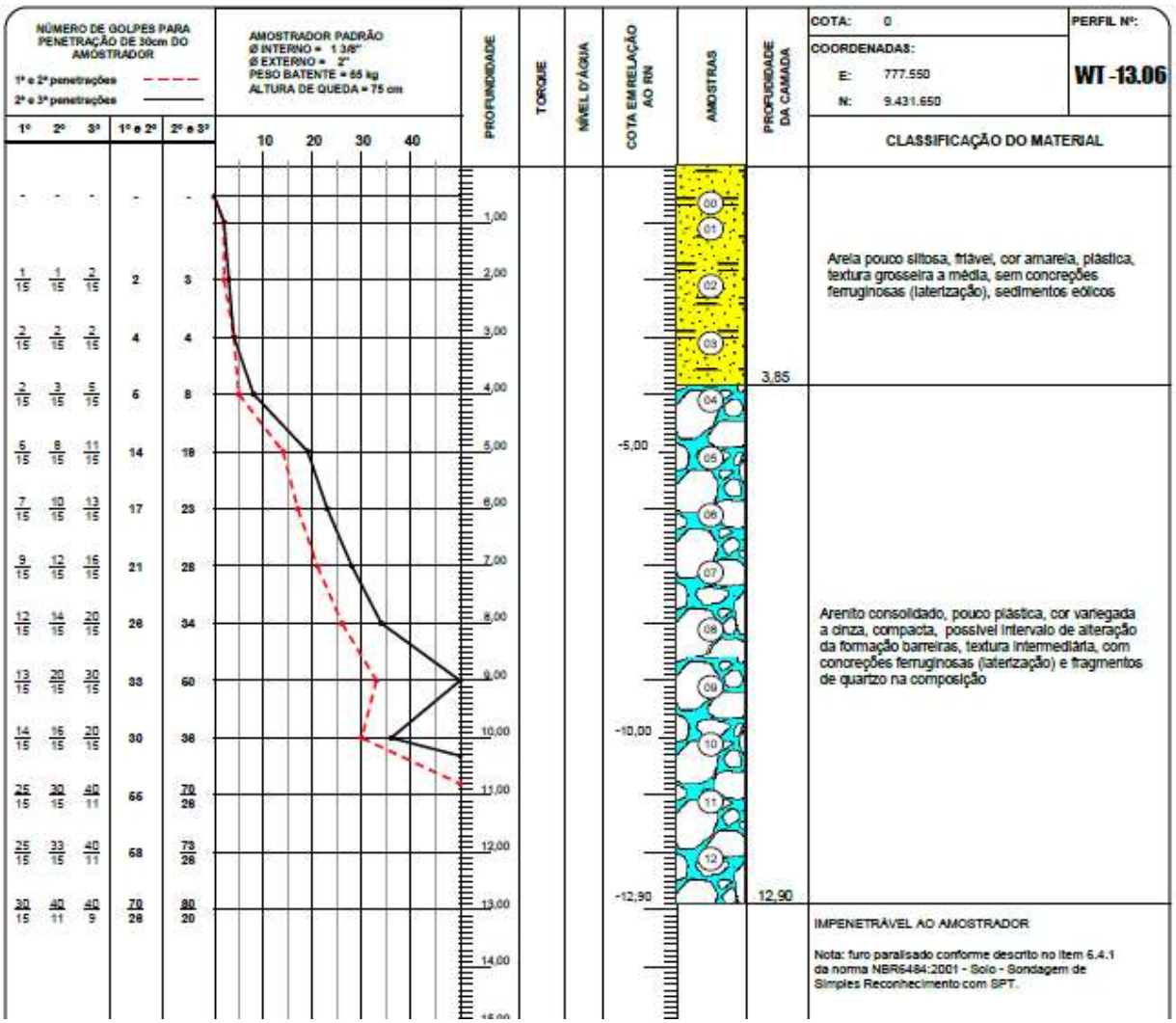
SONDAGEM SPT 03 (WT – 13.01) EXECUTADA NA ÁREA DA BASE DO AEROGERADOR 13.



SONDAGEM SPT 04 (WT – 13.03) EXECUTADA NA ÁREA DA BASE DO AEROGERADOR 13.



SONDAGEM SPT 05 (WT – 13.04) EXECUTADA NA ÁREA DA BASE DO AEROGERADOR 13.



SONDAGEM SPT 06 (WT – 13.06) EXECUTADA NA ÁREA DA BASE DO AEROGERADOR 13.