



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

JONNY DANTAS PATRICIO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RADIERS NA REGIÃO METROPOLITANA  
DO RECIFE**

Recife  
2019

JONNY DANTAS PATRICIO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RADIERS NA REGIÃO METROPOLITANA  
DO RECIFE**

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

**Área de Concentração:** Geotecnia.

**Orientador Interno:** Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira.  
**Orientador Externo:** Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão.

Recife

2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

P314a Patricio, Jonny Dantas.  
Avaliação de desempenho de radiers na região metropolitana do Recife /  
Jonny Dantas Patricio. - 2019.  
209 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador Interno: Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira.  
Orientador Externo: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.  
Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia Civil. 2. Radier. 3. Paredes de concreto. 4. Recalque. 5.  
Estágio construtivo. 6. Medição de recalque. I. Ferreira, Sílvio Romero de  
Melo. (Orientador Interno). II. Gusmão, Alexandre Duarte. (Orientador  
Externo). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-120

JONNY DANTAS PATRICIO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE RADIERS NA REGIÃO METROPOLITANA  
DO RECIFE**

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

Aprovada em: 20/02/2019

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira(Orientador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Alexandre Duarte Gusmão (Orientador Externo)  
Universidade de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Marcio Roberto Silva Corrêa (Examinador Externo)  
Universidade de São Paulo

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva (Examinador Externo)  
Universidade Católica de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira (Examinador Externo)  
Universidade Católica de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Romilde Almeida de Oliveira (Examinador Externo)  
Universidade Católica de Pernambuco

Dedico esse trabalho aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

À Solange Maria da Rocha Patricio, minha mãe, que tudo fez por mim. Eternamente grato!

Ao meu orientador, Prof. Silvio Romero, pela orientação e por acreditar no meu potencial. Deixo minha profunda admiração como profissional e pessoa, tornando-o uma fonte de inspiração. Eternamente grato!

Ao meu orientador, Prof. Alexandre Gusmão, por tantos ensinamentos e incentivos, sempre procurando passar seus conhecimentos práticos e técnicos. Agradeço por acreditar no trabalho e sem o seu apoio esta tese não seria possível. Eternamente grato!

Ao Prof. Fernando Artur, pela paciência e dedicação nos seus ensinamentos.

Ao Prof. John Kennedy, por todos os conselhos e apoio quando precisei.

À Prof. Lêda Lucena e ao Prof. Adriano Lucena, pelo companheirismo e incentivo durante toda essa jornada.

Aos amigos da UFCG, Paulo Marinho, Anderson Rodrigues, Enoque Marinho, Daniel Bezerra e Jadilson Trigueiro, pela amizade e companheirismo.

À Monic Cordeiro e Bernardo Cordeiro pelo incansável apoio.

À Universidade Federal de Pernambuco, instituição que me orgulho de fazer parte.

Ao CNPq pelo financiamento do doutorado.

## RESUMO

Devido ao desenvolvimento da Construção Civil na última década, procuraram-se sistemas construtivos mais eficientes e com alta produtividade. Entre as soluções encontradas, ganhou destaque o sistema de paredes de concreto. Para edificações de pequeno porte (menor que 8 pavimentos), na Região Metropolitana do Recife (RMR), destaca-se como elemento de fundação associado a esse sistema construtivo, o radier. Como outros tipos de fundações diretas, a solução em radiers não deve causar recalques excessivos. Esta tese tem como objetivo avaliar o desempenho de elementos de fundações em radier com sistemas construtivos de paredes de concreto na RMR. Para isto, foram estudados 63 blocos residenciais com 8 pavimentos, localizados no município de São Lourenço da Mata - PE, com soluções em fundações em radier por meio de monitoramento de recalques durante fase construtiva. Ainda, foi realizada retroanálise do módulo de elasticidade com os dados obtidos nas medições dos recalques, a fim de determinar parâmetros geotécnicos utilizados na previsão de recalque por meio da teoria da elasticidade em projetos de fundações. Por meio de modelagem numérica utilizando o SAP2000, simulou-se a metodologia construtiva com caso de carga em estágio construtivo não linear. Os resultados mostraram que a principal variável que contribui para o desenvolvimento dos recalques foi o movimento de terraplenagem. A retroanálise do módulo de elasticidade - E por meio dos recalques medidos e tensões transmitidas estimadas indicou, de maneira geral, redução no valor E com o aumento das tensões transmitidas. Foram observadas reduções de até 4 vezes no valor do E retroanalisado. O modelo numérico utilizando o SAP 2000 indicou a importância da simulação do processo construtivo em análises desse tipo, visto que a execução modular das paredes de concreto interferiu no desenvolvimento dos recalques e na análise de interação solo-estrutura. Embora tenha sido observado velocidades de recalque de até 1600 micra/dia e rotações de 1/350 da placa de radier, a não ocorrência de recalques excessivos e distorções angulares elevadas mostrou que sistema construtivo de paredes de concreto associados a fundações em radier apresentaram bom desempenho.

**Palavras-chave:** Radier. Paredes de concreto. Recalque. Estágio construtivo. Medição de recalque.

## ABSTRACT

Efficient and high productivity Constructive Systems were sought with great development of Civil Construction in the last decade. Among the solutions found, the concrete walls system was highlighted. For small buildings (less than 8 floors), at Metropolitan Region of Recife, stands out mat foundations as foundation element associated with this constructive system. Like other types of shallow foundations, the solution with mat foundations should not cause excessive settlement. This thesis had as objective to evaluate the performance of mat foundations with constructive systems of concrete walls in the Metropolitan Region of Recife. For this, it was studied the behavior of 63 residential blocks with 8 floors, located in the city of São Lourenço da Mata - PE, with solutions in mat foundations by means of monitoring of settlements during construction phase. In addition, the elasticity modulus was retroanalyzed with the data obtained from the measurements of the settlements, in order to determine geotechnical parameters used in the prediction of settlements using theory of elasticity in foundations projects. By means of numerical modeling using the SAP2000, the constructive methodology was simulated with non-linear constructive load case. The results showed that the main variable that contributes to the development of the settlements was the earthmoving movements. The retroanalysis of the modulus of elasticity - E by means of the measured pressures and estimated transmitted indicates a reduction in the value E with the increase of the transmitted tensions. It was observed reduction of 4 times in retroanalyzed E. The numerical model using SAP 2000 indicated the importance of the simulation of the constructive process in analyzes of this type, since the modular execution of the concrete walls interfered in the development of the settlements and in the soil structure interaction. Although speeds of 1600 micron a day of settlement and rotations of 1/350 were observed, due to the absence of excessive settlement and elevated angular distortions, the construction of concrete walls associated with mat foundations presented good performance.

**Keywords:** Mat foundations. Concrete wall. Settlement. Constructive stages. Settlement measurement.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Curva tempo x recalque .....	26
Figura 2 –	Hipótese de recalque para fundações flexíveis em solo elástico (a) e granular (c) e fundações rígidas em solo elástico (b) e granular (d) .....	29
Figura 3 –	Tipos de radiers: (a) liso;(b) com pedestais; (c) nervurados; (d) caixão.....	33
Figura 4 –	Corte geológico do Recife.....	40
Figura 5 –	Carta geológica do Recife .....	40
Figura 6 –	Perfis Típicos observados e suas faixas de espessuras das camadas .....	43
Figura 7 –	Tipos de movimentos dos elementos de fundação .....	50
Figura 8 –	Distorções angulares e danos associados .....	51
Figura 9 –	Elementos de área (a) quadrilátero e (b) triangular.....	58
Figura 10 –	Modelo numérico utilizando o DIANA. (a) representação completa e condições de contorno: (b) simetria do eixo Y e (c) restrição de deslocamento do maciço .....	61
Figura 11 –	Empreendimento estudado .....	63
Figura 12 –	Projeto arquitetônico do pavimento térreo .....	64
Figura 13 –	Nomeação e locação das Quadras e Blocos .....	65
Figura 14 –	Localização dos furos de sondagens .....	66
Figura 15 –	Sondagem SP 01 - Quadra 4 – Bloco 4.....	67
Figura 16 –	Sondagem SP 58 Quadra 3 – Bloco 1 .....	67
Figura 17 –	Sondagem SP 02 - Quadra 9 – Bloco 3.....	68
Figura 18 –	Soluções de radier e sequencia construtiva.....	69
Figura 19 –	Planta baixa do radier.....	69
Figura 20 –	Registro fotográfico da execução do radier em (a) concreto armado e (b) concreto protendido .....	70
Figura 21 –	Levantamento Topográfico do Terreno – Curvas de Nível .....	71
Figura 22 –	Indicação de áreas de corte .....	71
Figura 23 –	Divisão das fôrmas de paredes de concreto .....	72
Figura 24 –	Esquema de localização dos pinos de controle de recalque.....	74
Figura 25 –	Parâmetros para obtenção de fatores corretivos para retroanálise do Módulo de Elasticidade: (a) cota de profundidade rígida-h e (b) Produto $I_s I_h$ para $m=1$ .....	77
Figura 26 –	Malha de Elementos Finitos do Radier para cálculo da deformada.....	80
Figura 27 –	Carregamento linear no radier.....	81

Figura 28 – Diagramas de tensão para (a) $f_{ck}= 25$ MPa e (b) $f_{ck}= 35$ MPa .....	84
Figura 29 – Representação do modelo numérico do SAP2000 .....	85
Figura 30 – Malha de elementos finitos das paredes de concreto executadas com 0,15 m... 86	86
Figura 31 – Malha de elementos finitos das paredes de concreto executadas com 0,1 m.... 86	86
Figura 32 – Malha de elementos finitos das lajes..... 86	86
Figura 33 – Representação gráfica do SAP 2000 na parte inferior do modelo numérico .... 87	87
Figura 34 – Representação gráfica do SAP 2000 na parte superior do modelo numérico .... 87	87
Figura 35 – (a) Malha de elementos finitos do radier e (b) representação gráfica de área de influência do nó .....	90
Figura 36 – Graus de Liberdade em Sistema de coordenada (a) Local e (b) Global e (c) sistema de coordenadas utilizadas no modelo numérico .....	91
Figura 37 – ACP: (a) pesos e (b) escores .....	96
Figura 38 – ACP (Componente 01): (a) pesos e (b) escores .....	97
Figura 39 – Indicação de recalques médios finais medidos (a) menores que 10mm; (b) maiores que 10mm.....	98
Figura 40 – ACP (Componente 02): (a) pesos e (b) escores .....	99
Figura 41 – Destaque de escores por tipo de solo .....	100
Figura 42 – Frequência relativa de recalques medidos.....	100
Figura 43 – Desenvolvimento do recalque médio medido em função da (a) tensão transmitida e do (b) tempo (Grupo 01) .....	101
Figura 44 – (a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de Velocidade de Carregamento do Bloco 01 da Quadra 19.....	103
Figura 45 – (a) Superfície de recalque e (b) rotação dos pinos do Bloco 01 da Quadra 19 na última leitura .....	104
Figura 46 – (a) Superfície de recalque e (b) deformadas do Bloco 02 da Quadra 30 .....	106
Figura 47 – (a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 02 da Quadra 30.....	107
Figura 48 – Evolução das rotações do Q30-BL02: (a) L1-L2, (b) L1- L3 e (c) L1-L4.....	108
Figura 49 – Análise de distorção angular do Bloco 02 da Quadra 30.....	109
Figura 50 – Superfície de recalque do Bloco 05 da Quadra 34.....	110
Figura 51 – (a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 05 da Quadra 34.....	110
Figura 52 – Esquema de perfil de sondagem do Bloco 05 da Quadra 34 .....	111

Figura 53 –	Evolução das rotações do Q34-BL05: (a)L1-L3; (b) L1-L4 e (c) L1- L5 .....	112
Figura 54 –	Análise de distorção angular do Bloco 05 da Quadra 34 .....	113
Figura 55 –	Desenvolvimento do recalque médio medido em função da (a) tensão transmitida e do (b) tempo (Grupo 02) .....	114
Figura 56 –	(a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 01 da Quadra 02.....	115
Figura 57 –	(a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 02 da Quadra 02.....	116
Figura 58 –	Superfície de recalque do Bloco 01 da Quadra 02 .....	117
Figura 59 –	Superfície de recalque do Bloco 02 da Quadra 02 .....	117
Figura 60 –	Esquema de perfil de sondagem do Bloco 02 da Quadra 02 .....	118
Figura 61 –	(a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 01 da Quadra 05.....	119
Figura 62 –	Superfície de recalque do Bloco 01 da Quadra 05 .....	120
Figura 63 –	Esquema de perfil de sondagem do Bloco 01 da Quadra 05 .....	120
Figura 64 –	Velocidade de recalque do Bloco 02 da Quadra 19 .....	122
Figura 65 –	Superfície de recalque do Bloco 02 da Quadra 19.....	122
Figura 66 –	Rotações do Q19-BL02: (a) L1-L2; (b) L1-L3, (c) L1- L4 e (c) L1- L5.....	123
Figura 67 –	Análise de distorção angular da seção formada pelos pinos: (a) S, T e K e (b) P,Q,R e S.....	124
Figura 68 –	Velocidade de recalque do Bloco 04 da Quadra 29 .....	125
Figura 69 –	Superfície de recalque do Bloco 04 da Quadra 29 .....	125
Figura 70 –	Superfície de recalque do Bloco 01 da Quadra 30.....	126
Figura 71 –	Desenvolvimento do recalque médio medido em função da tensão transmitida (Grupo 3).....	127
Figura 72 –	Desenvolvimento do recalque médio medido em função do tempo (Grupo 3)	128
Figura 73 –	Blocos que apresentaram leituras negativas de deslocamento .....	135
Figura 74 –	Deslocamentos x tempo dos blocos que indicaram levantamento total.....	135
Figura 75 –	Levantamento parcial do radier: (a) Q03-BL01 e Q29-BL01.....	137
Figura 76 –	Recalque médio medido de todos os blocos .....	138
Figura 77 –	Registro de proximidade dos Blocos da Quadra 19 .....	139
Figura 78 –	Evolução dos coeficientes de variação.....	143
Figura 79 –	Fatores de recalque máximos e mínimos .....	144

Figura 80 – Módulos de elasticidade retroanalizados dos blocos do Grupo 01 .....	147
Figura 81 – Módulos de elasticidade retroanalizados dos blocos do Grupo 02 .....	148
Figura 82 – Módulos de elasticidade retroanalizados dos blocos do Grupo 03 .....	149
Figura 83 – Módulos de elasticidade retroanalizados dos blocos do Grupo 04 .....	150
Figura 84 – Curva de evolução do módulo de elasticidade retroanalizado em função da tensão transmitida .....	150
Figura 85 – Curva tensão x recalque típica de prova de carga em placa.....	151
Figura 86 – Prolongamento da linha tendência da curva característica .....	152
Figura 87 – Módulos de elasticidade utilizados no modelo numérico no ELPLA.....	153
Figura 88 – Curvas de recalque para modelo numérico com E variável.....	155
Figura 89 – Curvas de recalque para modelo numérico E constante.....	156
Figura 90 – Recalque médio para as diferentes tensões e profundidades de camada compressível para hipóteses de (a) E variável e (b) de E Constante .....	157
Figura 91 – Análise comparativa entre as hipóteses módulo de elasticidade constante e variável e os recalques medidos para o (a) Q04-BL02e (b) Q04-BL03 .....	158
Figura 92 – FRM x tensão transmitida pela placa .....	159
Figura 93 – Módulos de elasticidade retroanalizados dos blocos em seção de corte .....	161
Figura 94 – Módulo de elasticidade retroanalizado dos blocos: Q03-BL04 e Q09-BL05....	162
Figura 95 – Análise comparativa de recalque médio dos blocos:(a)Q03-BL04 e (b)Q09- BL05 .....	163
Figura 96 – Coeficientes de Reação obtidos com base na curva de evolução de módulo de elasticidade para variações de profundidade de camada compressível .....	165
Figura 97 – Coeficientes de Reação obtidos com base na curva de evolução de módulo de elasticidade para variações de tensão transmitidas .....	165
Figura 98 – Análise comparativa entre os recalques médios medidos e os obtidos no modelo numérico dos blocos (a)Q3-BL04 e (b)Q09-BL05.....	168
Figura 99 – ACP para avaliação das velocidades de deformação de fluência: (a) pesos e (b) escores.....	171
Figura 100 – Representação gráfica dos modelos numéricos.....	174
Figura 101 – Análise comparativa entre os coeficientes de variação dos modelos numéricos .....	177
Figura 102 – Momentos fletores das placas de radier dos modelos numéricos em três estágios construtivos .....	178

Figura 103 – Análise comparativa de momentos fletores para o fim da execução dos blocos .....	179
Figura 104 – Análise comparativa de superfícies de recalque obtidas no modelo numérico ISE-EC e ISE-CI e dos recalques medidos .....	180
Figura 105 - Fatores de recalque máximos e mínimos dos modelos numéricos ISE-EC e PRC .....	180
Figura 106 – Definição de eixos de deformadas .....	182
Figura 107 – Deformadas dos estágios construtivos (a) Eixo A e (b) Eixo B.....	183
Figura 108 – Rotação entre as extremidades da placa que dividem a entrada .....	183
Figura 109 – Diagrama de momentos fletores máximos para execução parcial dos pavimentos execução completa pavimento .....	184
Figura 110 – Coeficiente de variação do modelo numérico .....	185
Figura 111 – Amplitude de variação do CV e redução % .....	186
Figura 112 – Fatores de recalques máximo e mínimos do modelo numérico .....	186
Figura 113 – Amplitude de variação e redução percentual dos fatores de recalque (a) mínimos e (b) máximos .....	187
Figura 114 – Análise conjunta da redução de amplitudes .....	187
Figura 115 – Seções estudadas para avaliação de esforços máximos .....	188
Figura 116 – Análise de esforços normais máximos da Seção A.....	189
Figura 117 – Análise de esforços normais máximos da Seção B.....	190
Figura 118 – Análise de esforços normais máximos da Seção C.....	191
Figura 119 – Analogia apresentada por Goshy (1978).....	191
Figura 120 – Análise de esforços normais máximos da Seção D.....	192
Figura 121 – Análise de variação de fator de recalque.....	193

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de forma $I_s$ .....	30
Tabela 2 – Fatores de $I_s I_h$ para carregamento na superfície ( $I_d=1$ ) de um meio de espessura finita– Placa Rígida .....	31
Tabela 3 – Resumo dos Depósitos Sedimentares no Recife.....	39
Tabela 4 – Quantidade e porcentagem dos perfis típicos .....	43
Tabela 5 – Frequência de tipos de fundações em Recife, 2000-2010 .....	44
Tabela 6 – Valores de $k_v$ apresentados por Terzaghi (1955) .....	47
Tabela 7 – Valores de $k_v$ apresentados por Moraes (1976).....	47
Tabela 8 – Limites toleráveis de distorções angulares .....	52
Tabela 9 – Nomenclatura dos Quadras e Blocos do Empreendimento .....	64
Tabela 10 – Solução de radier dos blocos em estudo .....	70
Tabela 11 – Previsão do carregamento do peso próprio dos blocos.....	75
Tabela 12 – Peso total da estrutura .....	76
Tabela 13 – Fatores de $I_s I_h$ para carregamento na superfície ( $I_d=1$ ) de um meio de espessura finita– Placa Rígida para $m=1$ .....	77
Tabela 14 – Correlações entre $N_{SPT}$ e peso específico de solos argilosos .....	78
Tabela 15 – Correlações entre $N_{SPT}$ e peso específico de solos arenosos .....	78
Tabela 16 – Correlação entre $N_{SPT}$ e coesão das argilas .....	79
Tabela 17 – Valores de $\alpha$ .....	79
Tabela 18 – Valores do coeficiente K .....	80
Tabela 19 – Propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico no SAP2000 .....	82
Tabela 20 – Fatores indicados pela CEB-FIP-90 para determinação dos parâmetros dependentes do tempo .....	85
Tabela 21 – Parâmetros utilizados no modelo de carregamento em estágio construtivo .....	88
Tabela 22 – Autovalores da Análise de Componentes Principais .....	94
Tabela 23 – Velocidade média de recalque de blocos do Grupo 03.....	128
Tabela 24 – Recalque médios medidos para os blocos do Grupo 04 .....	130
Tabela 25 – Recalques médios medidos para os blocos do Grupo 05.....	131
Tabela 26 – Velocidade de recalque máximas e mínimas observadas para maiores velocidades de carregamento .....	133
Tabela 27 – Blocos com leituras de deslocamento negativas.....	134

Tabela 28 – Ensaio de expansão livre .....	136
Tabela 29 – Recalque medido dos blocos da Quadra 19 .....	140
Tabela 30 – Parâmetros Geotécnicos dos blocos em estudo .....	152
Tabela 31 – Recalques obtidos no modelo numérico utilizando E variável.....	154
Tabela 32 – Recalques obtidos no modelo numérico utilizando E Constante.....	155
Tabela 33 – Diferença dos recalques obtidos nas hipóteses .....	156
Tabela 34 – Fatores de redução de módulo de elasticidade .....	159
Tabela 35 – Propriedades geotécnicas dos blocos em seção de corte .....	162
Tabela 36 – Coeficientes de reação para ensaios de placa .....	166
Tabela 37 – Coeficientes de reação para os blocos em seção de corte.....	166
Tabela 38 – Análise comparativa entre os recalques médios medidos e estimados nos modelos numéricos.....	167
Tabela 39 – Velocidade de deformações de fluência .....	169
Tabela 40 – Análise de componentes principais .....	169
Tabela 41 – Desenvolvimento de recalques por fluência .....	172
Tabela 42 – Recalques, desvio padrão e coeficiente de variação dos modelos numéricos ...	176
Tabela 43 – Variações de fator de recalque.....	194

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
AR	Fator de Recalque
CPT	Cone Penetration Test
CV	Coefficiente de Variação
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
FRM	Fator de redução de módulo
SPT	Standard Penetration Test
<i>RH</i>	Umidade relativa do ar
RMR	Região Metropolitana do Recife

## LISTA DE SIMBOLOS

$I_h$	fator de espessura da camada compressível
$I_d$	fator de embutimento da camada
$I_s$	fator de forma do elemento de fundação
$f_{cm}(t)$	resistência média à compressão do concreto na idade $t$
$f_{cm}$	resistência média à compressão do concreto aos 28 dias
$f_{ck}$	resistência característica à compressão do concreto
$\bar{w}$	recalque médio
$w_{iref}$	recalque médio absoluto do modelo sem ISE
$w_{ise}$	recalque médio absoluto do modelo com ISE
$\beta_{SC}$	Fator dependente do tipo de cimento utilizado
$\beta_{cc}(t)$	coeficiente dependente da idade do concreto
$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$	retração total
$\varepsilon_{CSO}$	Coefficiente de retração
$w_i$	recalque imediato
$w_c$	recalque primário ou de adensamento
$w_s$	recalque secundário
$w_t$	recalque total
$\Delta AR$	Variação de fator de recalque
$N_{SPT}$	índice de resistência à penetração dinâmica
$R$	Grau de liberdade de rotação
$U$	Grau de liberdade de translação
$B$	menor dimensão do elemento
$E$	módulo de elasticidade
$K$	coeficiente de reação
$q$	tensão distribuída
$s$	coeficiente que depende do tipo de cimento
$t$	Idade do concreto
$\nu$	coeficiente de Poisson

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo.....</b>	<b>22</b>
1.2.1	Objetivo Geral .....	22
1.2.2	Objetivos Específicos .....	22
<b>1.3</b>	<b>Organização da Tese.....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Fundações Superficiais ou Diretas .....</b>	<b>25</b>
2.1.1	Previsão de Recalques .....	25
2.1.2	Rigidez da Estrutura .....	27
2.1.3	Solução de cálculo de recalque utilizando a Teoria da Elasticidade .....	29
<b>2.2</b>	<b>Projeto de Radier .....</b>	<b>31</b>
2.2.1	Conceitos e aplicações.....	31
2.2.2	Capacidade de Carga e Recalque .....	34
2.2.3	Cálculo Estrutural.....	35
<b>2.3</b>	<b>Geologia e Prática de Fundações na Cidade de Recife.....</b>	<b>38</b>
2.3.1	Geologia, morfologia e ocupação do solo do Recife.....	38
2.3.2	Perfis Geotécnicos Típicos .....	41
2.3.3	Prática de Fundações .....	43
<b>2.4</b>	<b>Interação Solo-Estrutura .....</b>	<b>44</b>
2.4.1	Aspectos Gerais .....	44
2.4.2	Recalques: Estados Limites e Danos Associados.....	49
2.4.3	Parâmetros de análise da ISE .....	52
<b>2.5</b>	<b>Modelagem dos Elementos de Fundação .....</b>	<b>54</b>
2.5.1	ELPLA.....	54
2.5.2	SAP2000.....	56
2.5.3	Pesquisas sobre o tema .....	59
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>62</b>
<b>3.1</b>	<b>Descrição do empreendimento.....</b>	<b>62</b>
3.1.1	Descrição Geral .....	62
3.1.2	Investigação Geotécnica.....	65

3.1.3	Soluções de Fundações do Empreendimento e Sequência Construtiva .....	68
3.1.4	Movimentos de Terra .....	70
3.1.5	Metodologia Construtiva das Edificações .....	72
3.1.6	Medições de Recalque e Estimativa de Carregamento .....	73
<b>3.2</b>	<b>Retroanálise dos Módulos de Elasticidades.....</b>	<b>76</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelos Numéricos em Elementos Finitos.....</b>	<b>77</b>
3.3.1	ELPLA.....	78
3.3.1.1	<i>Parâmetros Geotécnicos .....</i>	<i>78</i>
3.3.1.2	<i>Malha representativa do Radier e Propriedade do Elemento de Fundação .....</i>	<i>80</i>
3.3.1.3	<i>Carregamento do Radier.....</i>	<i>81</i>
3.3.2	SAP 2000.....	82
3.3.2.1	<i>Definição dos Materiais .....</i>	<i>82</i>
3.3.2.2	<i>Representação do Edifício no modelo numérico.....</i>	<i>85</i>
3.3.2.3	<i>Recurso de Estágio Construtivo .....</i>	<i>87</i>
3.3.2.4	<i>Determinação dos coeficientes de reação.....</i>	<i>89</i>
<b>3.4</b>	<b>Análise de Componentes Principais - ACP.....</b>	<b>91</b>
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO - MEDIÇÃO DE RECALQUES .....</b>	<b>94</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise de Componentes Principais - ACP.....</b>	<b>94</b>
<b>4.2</b>	<b>Evolução dos Recalques Medidos.....</b>	<b>100</b>
4.2.1	Grupo 1 .....	101
4.2.2	Grupo 2.....	113
4.2.3	Grupo 3.....	126
4.2.4	Grupo 4.....	129
4.2.5	Grupo 5.....	131
<b>4.3</b>	<b>Análise de Velocidade de Recalque .....</b>	<b>133</b>
<b>4.4</b>	<b>Avaliação das Leituras de Deslocamento Negativas.....</b>	<b>134</b>
<b>4.5</b>	<b>Análise de Efeito de Superposição de Carregamento.....</b>	<b>138</b>
<b>4.6</b>	<b>Parâmetros de Interação Solo Estrutura.....</b>	<b>140</b>
4.6.1	Distribuição dos Carregamentos .....	141
4.6.2	Coefficientes de Variação e Fatores de Recalque.....	143
<b>4.7</b>	<b>Conclusão do Capítulo.....</b>	<b>144</b>
<b>5</b>	<b>RETROANÁLISE DOS PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE .....</b>	<b>146</b>
<b>5.1</b>	<b>Modulo de Elasticidade - Seções de Aterro .....</b>	<b>146</b>

5.1.1	Evolução do módulo de elasticidade retroanalisado em função da tensão transmitida (Seções de Aterro).....	150
5.1.2	Estimativa de Recalque a partir da curva de evolução do módulo de elasticidade retroanalisado em função da tensão transmitida.....	153
<b>5.2</b>	<b>Modulo de Elasticidade - Seções de Corte .....</b>	<b>160</b>
<b>5.3</b>	<b>Coefficiente de Reação .....</b>	<b>164</b>
5.3.1	Coeficientes de Reações para Seções de Aterro.....	164
5.3.2	Coeficiente de Reações para Seções de Corte.....	166
<b>5.4</b>	<b>Deformação de Fluência das camadas de Aterro.....</b>	<b>168</b>
<b>5.5</b>	<b>Conclusão do Capítulo.....</b>	<b>172</b>
<b>6</b>	<b>MODELAGEM NÚMÉRICA .....</b>	<b>174</b>
<b>6.1</b>	<b>Análise comparativa entre os recalques dos modelos numéricos .....</b>	<b>175</b>
<b>6.2</b>	<b>Análise do Efeito Construtivo nos Recalques.....</b>	<b>180</b>
<b>6.3</b>	<b>Influência da metodologia construtiva na ISE .....</b>	<b>185</b>
<b>6.4</b>	<b>Influência da ISE na redistribuição dos esforços nas paredes.....</b>	<b>188</b>
<b>6.5</b>	<b>Conclusão do Capítulo.....</b>	<b>194</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>195</b>
<b>7.1</b>	<b>Medições de Recalque.....</b>	<b>195</b>
<b>7.2</b>	<b>Retroanálise dos Parâmetros de Deformabilidade dos solos .....</b>	<b>195</b>
<b>7.3</b>	<b>Modelagem numérica .....</b>	<b>196</b>
<b>7.4</b>	<b>Sugestões para futuras pesquisas .....</b>	<b>196</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>198</b>
	<b>ANEXO A – RECALQUES MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS.....</b>	<b>207</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em março de 2009, foi lançado no Brasil o Programa Habitacional Minha Casa, Minha Vida – MCMV, programa do Governo Federal com objetivo de promover a produção e aquisição de novas unidades habitacionais em todo país para famílias com renda mensal de zero a dez salários mínimos, que gerou emprego e renda por meio do aumento do investimento na Construção Civil.

Segundo dados da Secretaria de Habitação do Estado de Pernambuco, em sua primeira fase, entre 2009 e 2011, o Programa contratou mais de um milhão de moradias com cerca de R\$ 34 bilhões em investimentos. Na segunda etapa a meta até o ano de 2014 seria de construir 2,4 milhões de moradias pelo país. Para o estado de Pernambuco foram destinadas 45.510 novas habitações, sendo 18.773 para atender a população com renda de até 1,6 mil reais.

Visto o importante desenvolvimento da Construção Civil nesses anos, procurou-se sistemas construtivos eficientes e com alta produtividade. Dentre as soluções encontradas, destacaram-se os sistemas em blocos estruturais e de paredes de concreto, este, objeto desta pesquisa.

O sistema de parede de concreto parte do princípio em que as lajes e as paredes são moldadas no local, em concreto armado, com uso de fôrmas moduladas, formando um elemento monolítico. Segundo Nunes (2011), as paredes de concreto apresentam vantagens como rapidez de execução, pouca exigência de mão-de-obra, custos globais mais baixos quando executados em grande escala e reduzida geração de entulho.

Segundo Farias (2018), o surgimento da norma brasileira de paredes de concreto NBR 16055 (2012) evidenciou a necessidade e o interesse do meio técnico sobre o tema. Ainda segundo o autor, a escassez de referências bibliográficas sobre o assunto, a publicação da norma de paredes de concreto e o aumento do emprego do referido sistema estrutural são fatores que indicam a necessidade de novos estudos e publicações sobre o assunto.

Associada ao sistema construtivo de paredes de concreto, as soluções de fundações em radier passaram a ser utilizada com maior frequência, visto sua alta produtividade e bom desempenho quando utilizada junto ao sistema construtivo. Santos (2011), ao estudar o panorama de soluções de fundações empregadas na Grande Recife entre o período de 2000-2010, observou que em 2009, 30% das soluções adotadas foram em radier sendo assim a solução mais adotada na região neste ano e, em 2010, 24%, ficando em segundo lugar no panorama.

As fundações em radier, como outros tipos de fundações diretas, não devem apresentar recalques excessivos (controle de recalque), satisfazendo assim as condições de estado limite de serviço. Conforme prescrito na NBR 6122 (2010), considera-se de especial interesse a instrumentação para monitoramento do comportamento das fundações, não só para o controle da obra em si como também para o avanço da técnica e obtenção de informações técnica sob condições reais de execução.

Outro aspecto importante contemplado na NBR 6122 (2010) é a consideração da interação solo-estrutura na avaliação do comportamento do elemento de fundação. Nas análises estruturais convencionais são considerados, usualmente, apoios indeslocáveis e os recalques dos elementos de fundação são estimados com base nas cargas distribuídas indicadas. Contudo, essa hipótese pode não ser satisfatória, principalmente, no tocante do sistema construtivo em questão, que possui rigidez global significativa.

A maioria das análises de interação solo-estrutura atuais foram realizadas para estrutura em pórticos (pilares, vigas e lajes) e a literatura atual carece de análises de interação solo-estrutura para edifícios de paredes de concreto com fundações em radier.

### **1.1 Justificativa**

O recente aumento do emprego do sistema construtivo de paredes de concreto associados a elementos de fundações em radier na Região Metropolitana do Recife - RMR, é essencial o desenvolvimento de trabalhos com enfoque na avaliação do comportamento desses elementos de fundação, principalmente no que diz respeito aos recalques desenvolvidos.

A velocidade de construção, metodologia construtiva (modular) e a significativa rigidez global da estrutura indicam a necessidade de avaliação de parâmetros de desempenho específicos para este tipo de projeto, como por exemplo: velocidades de recalque, rotações dos elementos de fundação, distorções angulares, entre outros.

Com base nos dados de monitoramento de recalque do radier é possível determinar por meio de retroanálise os parâmetros de deformabilidade dos solos e assim, contribuir de forma direta e objetiva em projetos destes tipos. As medições de recalque em conjunto com uma estimativa confiável dos carregamentos nos estágios construtivos conseguem reproduzir comportamento tensão x deformação do solo, o que torna o procedimento de monitoramento, um modelo real de prova de carga.

Os trabalhos desenvolvidos por Nunes (2011), Testoni (2013), Santos (2016.a), Santos (2016.b) e Farias (2018) apresentam importante contribuição sobre o sistema construtivo de paredes de concreto, principalmente no tocante à análise de interação solo estrutura, com enfoque na superestrutura. Este trabalho vem a complementar e apresentar contribuição no estudo do sistema construtivo de paredes de concreto com o enfoque geotécnico

## 1.2 Objetivo

Neste subitem são apresentados o objetivo geral e específicos da tese.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento de elementos de fundações em radier com sistemas construtivos de paredes de concreto em empreendimento localizado no Município de São Lourenço da Mata - PE.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo geral, são previstos como objetivos específicos:

- indicar as principais variáveis que influenciaram nos desenvolvimentos dos recalques;
- avaliar as velocidades de recalque durante à etapa construtiva de edificações com paredes de concreto moldadas *in loco*;
- avaliar o desempenho das placas de radier no que diz respeito às rotações e distorções angulares;
- realizar retroanálise do módulo de elasticidade durante a fase construtiva com os dados de recalque de monitoramento;
- avaliar por meio de modelos numéricos, parâmetros de interação solo estrutura considerando a metodologia construtiva.

### 1.3 Organização da Tese

Esta tese encontra-se em um volume único distribuído da seguinte forma.

[Capítulo 1] Considerações iniciais, Justificativa, Objetivos da Pesquisa e Organização do Trabalho – são descritos uma visão geral do trabalho com a introdução, mostrando as justificativas e motivações para o estudo em questão. São apresentados os objetivos a serem alcançados e a forma de organização do trabalho.

[Capítulo 2] Fundamentação Teórica é apresentado revisão bibliográfica sobre: métodos de estimativas de recalques, projetos de radier; geologia da Região da Metropolitana do Recife; Interação Solo-Estrutura (ISE); Programas computacionais com base em elementos finitos utilizados nesta pesquisa (ELPLA e SAP2000).

[Capítulo 3] Materiais e Métodos– é descrito os dados disponibilizados do empreendimento em estudo: descrição geral (localização, arquitetura do empreendimento e planta baixa dos blocos); investigação geotécnica; soluções de fundações utilizadas e sequência construtiva; movimentos de terra realizados antes da execução das fundações; e metodologia construtiva de execução das paredes de concreto. Ainda é apresentado no capítulo a metodologia utilizada nas medições de recalque e estimativa dos carregamentos, indicando o método para determinação da retroanálise dos módulos de elasticidade. Foi discretizado os modelos numéricos utilizando o ELPLA e o SAP2000. Por fim, foi indicado a metodologia utilizada nas análises de componentes principais realizadas no trabalho.

[Capítulo 4] Medições de Recalque: É avaliado por meio de Análise de Componentes Principais (ACP) as principais variáveis que influenciaram no desenvolvimento dos recalques. Os desempenhos dos elementos de fundação foram analisados por meio da evolução dos recalques medidos seguindo divisão de grupos com base em faixas de recalque médios obtidos na medição. Também foram avaliados neste capítulo as velocidades de recalque e rotações dos pinos de recalque. É indicado fator que ocasionou leituras de deslocamento negativas dos pinos de recalque.

[Capítulo 5] Retroanálise dos Parâmetros de Deformabilidade: são avaliados a evolução dos módulos de elasticidade retroanalisados em função do avanço construtivo (aumento da tensão transmitida) para os blocos construídos em seções de aterro e corte. Foram determinados coeficientes de reação para ambas as seções. Por meio de ACP foi avaliado os fatores que influenciaram no desenvolvimento de recalques por fluência nos blocos construídos em

seções de corte.

[Capítulo 6] Modelagem Numérica –São avaliados modelos numéricos de bloco do empreendimento, com base em elementos finitos utilizando SAP 2000. É considerado apoios determinados com base nos coeficientes de reação obtidos na retroanálise para avaliação da Interação Solo-Estrutura. São consideradas três hipóteses de carregamento nas modelagens numéricas: estágio construtivo (ISE – EC); carregamento instantâneo (ISE – CI) e Placa de radier carregada (PCR). São analisados no capítulo: o efeito construtivo no desenvolvimento dos recalques; a influência da metodologia construtiva em parâmetros de ISE e as redistribuições de esforços nas paredes de concreto do modelo numérico.

[Capítulo 7] Conclusões – são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

É apresentada uma revisão bibliográfica, que foi dividida em cinco tópicos. Na primeira etapa uma revisão sobre as metodologias para previsão de recalques de fundações diretas é conduzida. Na segunda etapa é realizada uma revisão sobre projetos de fundações com solução em radier. Na terceira etapa é abordada a Geologia da Região da Metropolitana do Recife bem como perfis geotécnicos típicos da região. Na quarta etapa é abordado a interação solo-estrutura. Na quinta etapa, é realizada uma abordagem sobre os programas computacionais com base em elementos finitos utilizados nesta pesquisa (ELPLA e SAP2000).

### 2.1 Fundações Superficiais ou Diretas

Neste subitem é apresentada revisão sobre métodos de previsão de recalque com ênfase em solução de cálculo utilizando a Teoria da Elasticidade.

#### 2.1.1 Previsão de Recalques

No Brasil, a NBR 8681 (2003) – Ações e segurança nas estruturas, classifica as ações nas estruturas como: permanentes, variáveis e excepcionais. As ações permanentes ocorrem constantemente com pequenas variações durante toda a vida da edificação (peso próprio, empuxos, esforços devidos a recalque nos apoios, entre outros), ao contrário das variáveis, onde existem variações significativas (vento, ondas, entre outras ações ambientais). Já as ações excepcionais, são aquelas que tem baixa probabilidade de ocorrer, mas que devem ser consideradas para determinados estruturas (explosões, colisões, enchentes, tremores, entre outros)

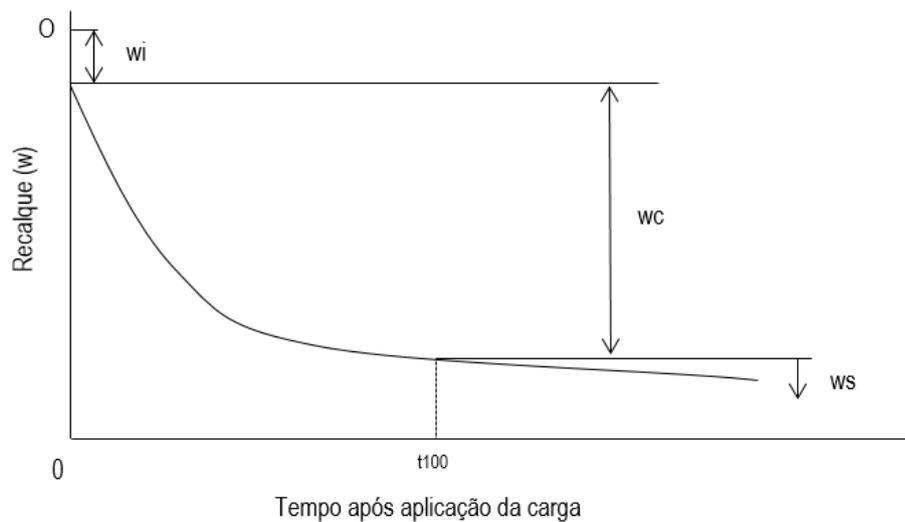
As combinações desses tipos de carregamentos são utilizadas na verificação dos estados limites de toda estrutura. São eles, o Estado de Limite Último (ELU) e o Estado de Limite de Serviço (ELS). O ELU está diretamente associado ao colapso da estrutura, seja ele total ou parcial, sendo basicamente avaliados a segurança ao colapso do solo de fundação, também chamado de estabilidade externa e dos elementos estruturas propriamente ditas, chamado de estabilidade interna. O ELS está associado as deformações, de modo que o projeto de fundações estabeleça deformações aceitáveis sob as condições de trabalho.

A fim de avaliar o desempenho das fundações de uma edificação e da camada de solo que o suporta, é frequentemente necessário estimar os recalques com base no carregamento que edificação irá transferir para as camadas de solo. Segundo Bowles (1982) os recalques devem

ser avaliados de maneira mais acurada possível em obras como: edifícios, pontes, torres e centrais elétricas.

Segundo o autor, recalques são causados por situações de tensões induzidas pelo elemento de fundação, que com o tempo, as partículas do solo se deslocam resultando em uma nova estrutura permanente, com diminuição de volume. A Figura 1 ilustra a curva tempo x recalque de um ponto de um elemento de fundação.

Figura 1 - Curva tempo x recalque



Fonte: adaptado de Teixeira & Godoy (1998)

Observa-se que um elemento de fundação ao ser carregado, sofre recalque que se desenvolvem, em parte, imediatamente após o carregamento e, em parte, com o decorrer do tempo. Assim, o recalque total ou final é dividido em três parcelas, conforme apresenta a Equação 1.

$$w_t = w_i + w_c + w_s \quad (1)$$

Onde:

$w_t$  : recalque total;

$w_i$  : recalque imediato;

$w_c$  : recalque primário ou de adensamento;

$w_s$  recalque secundário (fluência).

A primeira parcela,  $w_i$ , ocorre imediatamente após a aplicação do carregamento. A análise dessa parcela de adensamento é importante em solos mais finos (siltes e argilas) com grau de saturação menor que 90%. Todos os solos com alto coeficiente de permeabilidade (rápida drenagem), incluindo solos com menor coesão sofrem recalques imediatos. A segunda parcela,  $w_c$ , se deve ao adensamento, que é basicamente a migração de água dos poros, devido a aplicação do carregamento, com conseqüente redução no índice de vazios. A análise do recalque no tempo é apropriada para todos os solos saturados, ou próximos da saturação e depósitos de solos finos (Bowles, 1982). O recalque secundário ( $w_s$ ), também denominado de fluência, está associado a deformações observadas após o final de recalque primário, quando as tensões efetivas já se estabilizaram e, portanto, não ocorrendo saída de água. O processo é atribuído a mudanças no arranjo das partículas após dissipação do excesso de poro pressão.

Os métodos de previsão de recalque podem ser separados em: métodos racionais, semi-empíricos e empíricos. Nos métodos racionais, os parâmetros de deformabilidade, obtidos em laboratório ou *in situ* são combinados com modelos para previsão de recalque teoricamente exatos. Nos métodos semi-empíricos, os parâmetros de deformabilidade, obtidos por correlações com ensaios *in situ* de penetração (Standard Penetration Test - SPT ou Cone Penetration Test - CPT) são combinados a modelos para previsão de recalques teoricamente exatos ou adaptações. Métodos empíricos fazem uso de tabelas de valores típicos de tensões admissíveis para diferentes solos.

### 2.1.2 Rigidez da Estrutura

As discussões sobre recalques em fundações diretas passam pelo entendimento dos conceitos fundamentais e das diferenças entre uma fundação flexível e rígida. Supondo uma fundação direta apoiada sobre um meio elástico, predominantemente argiloso, submetida a uma carga uniformemente distribuída, quando uma fundação é considerada flexível, a tensão de contato será uniforme e os recalques serão de maior intensidade no centro, conforme apresentado na Figura 2.a. Já em uma hipótese de solo um solo granular, os recalques serão maiores nas extremidades, devido à falta de confinamento desta situação, conforme ilustrado na Figura 2.b. Já numa fundação direta rígida os recalques são os mesmos em todos os pontos, variando as tensões de contatos, conforme ilustrado na Figura 2.c e d. (DAS, 1999).

Shulze e Simmer (1970) *apud* Brandi (2004) consideram as tensões de contato dependentes

dos seguintes aspectos.

- Rigidez da estrutura, expressa pelo produto E.I, com os casos limites de uma estrutura rígida ( $EI=\infty$ ) ou flexível ( $EI = 0$ );
- Tipo de carregamento;
- Profundidade de assentamento da fundação;
- Tipo e estratificação do solo.

Os autores propõem equações (Equações 2, 3 e 4) para avaliar os coeficientes de rigidez ( $K'$ ) de modo que a fundação é admitida rígida quando  $K'>0,5$  e flexível ou elástica quando  $0<K'<0,5$ .

- Rigidez global da estrutura

$$K' = \frac{EI}{E_s B^3 L} \quad (2)$$

- Rigidez para placas retangulares

$$K' = \frac{E}{12E_s} \left(\frac{d}{B}\right)^3 \quad (3)$$

- Rigidez para placas circulares

$$K' = \frac{E}{12E_s} \left(\frac{d}{D_1}\right)^3 \quad (4)$$

Onde:

EI : Rigidez da estrutura

E : Módulo de elasticidade do concreto

$E_s$  : Módulo de compressibilidade elástica do solo

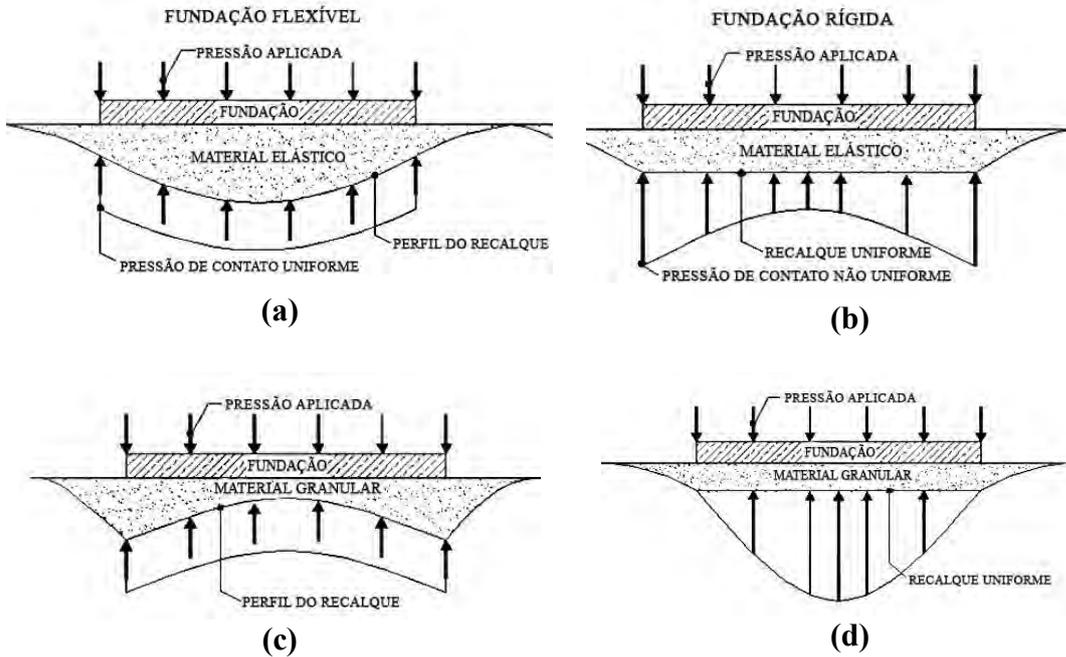
B : Dimensão da estrutura no sentido do eixo de flexão estudado

L: Dimensão da estrutura transversal ao eixo de flexão estudado

D: Espessura da viga ou placa de fundação

D1: Diâmetro da placa circular

Figura 2 - Hipótese de recalque para fundações flexíveis em solo elástico (a) e granular (c) e fundações rígidas em solo elástico (b) e granular (d)



Fonte: BRANDI, 2004.

### 2.1.3 Solução de cálculo de recalque utilizando a Teoria da Elasticidade

Velloso e Lopes (2010) dividem os procedimentos para cálculo de recalques, utilizando método racional, em dois grupos: Cálculos diretos, onde o recalque é fornecido diretamente pela solução empregada; e cálculo indireto, onde o recalque é fornecido por meio de deformações específicas, posteriormente integradas.

O cálculo direto pode ser realizado utilizando-se a Teoria da Elasticidade ou por Métodos Numéricos (Método das Diferenças Finitas - MDF e Método dos Elementos Finitos - MEF)

Existem diversas publicações que fornecem soluções utilizando a Teoria da Elasticidade para cálculo de acréscimos de tensões e recalques: Harr (1966), Giroud (1972), Poulos e Davis (1974), Perloff (1975), Padfield e Sharrock (1983) e U.S Army Corps of Engineers (1994) (*apud* VELLOSO E LOPES, 2010).

Os autores destacam a Equação 5 como solução para previsão de recalque de uma sapata sob carga centrada.

$$w = q \cdot B \frac{1 - \nu^2}{E} I_s I_d I_h \quad (5)$$

Onde:

$q$  = pressão média aplicada;

$B$  = menor dimensão da sapata;

$\nu$  = coeficiente de Poisson;

$E$  = Módulo de Young;

$I_s$  = fator de forma da sapata e de sua rigidez

$I_d$  = fator de profundidade/embutimento;

$I_h$  = fator de espessura de camada compressível;

Valores de  $I_s$  para carregamentos na superfície, com  $I_d = 1,0$ , e espessura finita, com  $I_h = 1,0$ , são apresentados na Tabela 1.

Harr (1966) apresenta os valores do produto  $I_s \cdot I_h$  para carregamentos na superfície ( $I_d = 1,0$ ) com consideração de placa rígida, apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 - Fatores de forma  $I_s$

Forma	Flexível			Rígido
	Centro	Borda	Média	
<b>Círculo</b>	1	0,64	0,85	0,79
<b>Quadrado</b>	1,12	0,56	0,95	0,99
<b>Retângulo</b>				
<b>(L/B)</b>				
1,5	1,36	0,67	1,15	
2	1,52	0,76	1,30	
3	1,78	0,88	1,52	
5	2,10	1,05	1,83	
10	2,53	1,26	2,25	
100	4,00	2,00	3,70	
1000	5,47	3,50	6,60	
10000	6,90	3,50	6,60	

Fonte: PERLOFF, 1975.

Tabela 2 - Fatores de Islh para carregamento na superfície (Id=1) de um meio de espessura finita–  
Placa Rígida

<b>h/a</b>	<b>m=1</b>	<b>m=2</b>	<b>m=3</b>	<b>m=5</b>	<b>m=7</b>	<b>m=10</b>	<b>m=∞</b>
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2	0,096	0,098	0,098	0,099	0,099	0,099	0,100
0,5	0,226	0,231	0,233	0,236	0,237	0,238	0,239
1	0,403	0,427	0,435	0,441	0,444	0,446	0,452
2	0,609	0,698	0,727	0,748	0,757	0,764	0,784
3	0,711	0,856	0,910	0,952	0,965	0,982	1,018
5	0,800	1,010	1,119	1,201	1,238	1,256	1,323
7	0,842	1,094	1,223	1,346	1,402	1,442	1,532
10	0,873	1,155	1,309	1,475	1,556	1,619	1,758
∞	0,946	1,300	1,527	1,826	2,028	2,246	∞

Fonte: HARR, 1966.

## 2.2 Projeto de Radier

Neste subitem são apresentados conceitos e aplicações da solução em radier, abordagem sobre capacidade de carga e recalques e métodos de cálculos estrutural.

### 2.2.1 Conceitos e aplicações

A NBR 6122 (2010) define radier como o elemento de fundação superficial que abrange parte ou todos os pilares de uma estrutura, distribuindo os carregamentos.

Esse tipo de estrutura é executado em concreto armado ou protendido e pode receber cargas, não só de pilares como definido pela NBR 6122 (2010), mas também das alvenarias entre outros elementos construtivos (parede de concreto e blocos estruturais).

Na prática destaca-se algumas situações em que se permite a solução em radier, conforme apresentado por BUDHU (2015):

- As sapatas cobrem 50% acima da área de fundação por causa de cargas elevadas de pilares;
- O solo é mole, com baixa capacidade de suporte;

- Há ocorrência de solo e/ou bolsões de solos moles variáveis sob a projeção da estrutura;
- O ELS (recalque tolerável e diferencial) e/ou ELU da estrutura usando sapatas são excedidos;
- É necessário combater a sobre pressão hidrostática.

Pode-se classificar os radier, quanto a sua geometria, em liso, com pedestais, nervurados e caixão, conforme apresentado na Figura 3.

Os radier lisos são lajes de concreto apoiada sobre a superfície acabada dos solos. Esse tipo de radier é geralmente utilizada para cargas leves, tais como edifícios residenciais.

Nos radier com pedestais aumenta-se a espessura sob os pilares como forma de melhorar a resistência a flexão e ao esforço cortante. Os pedestais podem ser superiores ou inferiores, tendo este último a vantagem de ser feita na escavação e deixar a superfície do piso plana.

Os radier nervurados executa-se com nervuras secundarias e nervuras principais, colocadas sob os pilares, podendo ser superiores ou inferiores. Segundo Souza (2018) este tipo de radier deve ser utilizado quando a fundação exige rigidez para evitar distorções e controlar os recalques podendo ser executado em solos expansivos e até colapsível sendo necessário avaliar o risco da implantação do elemento por meio da porcentagem de colapso.

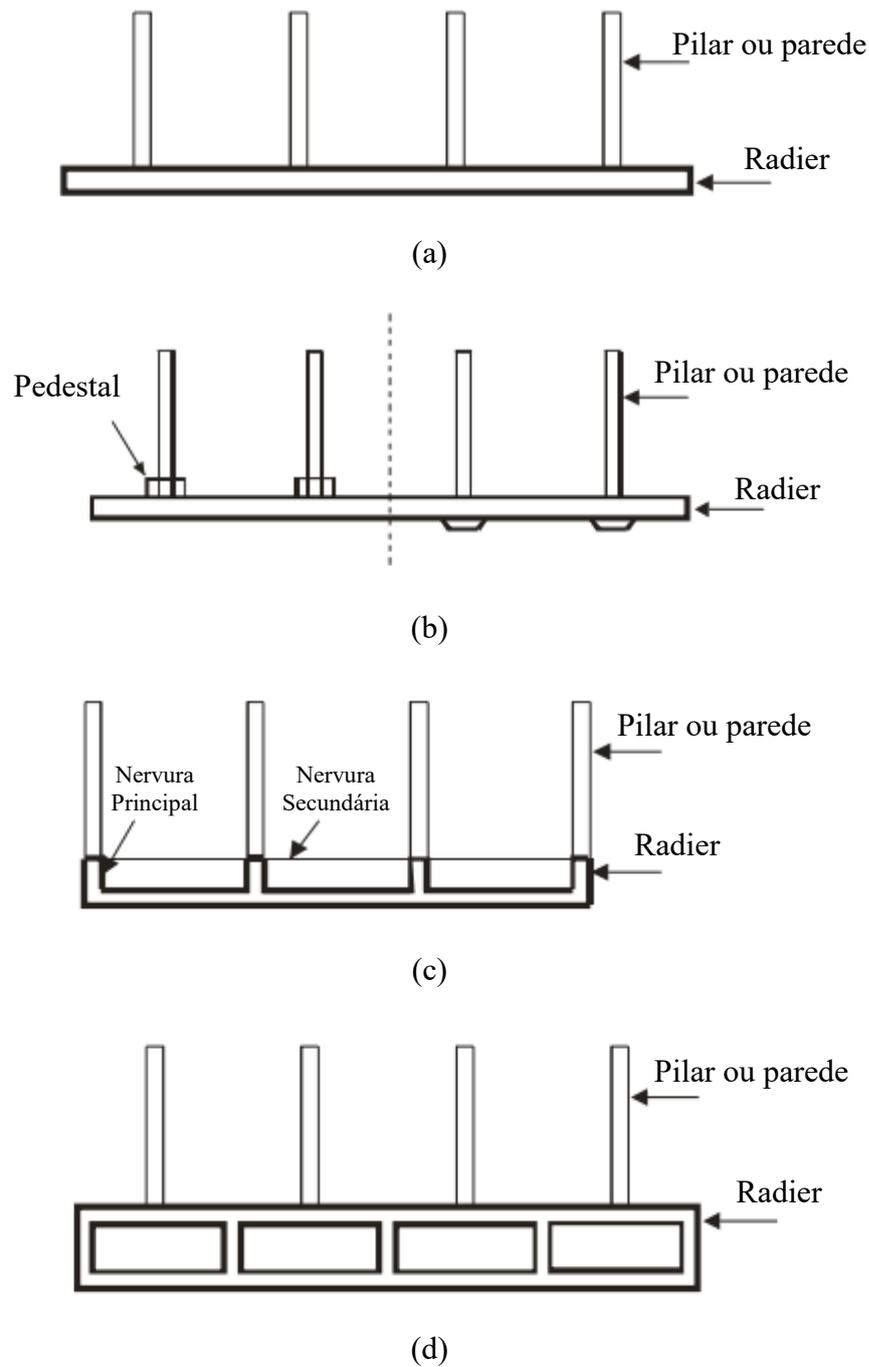
Os radier em caixão caracterizam-se por uma estrutura de concreto em caixão apoiada em uma escavação a uma profundidade tal que a tensão de sobrecarga removida compensa toda ou parte da tensão aplicada. Lajes enterradas celulares são utilizadas onde há cargas muito elevadas, em espaço subterrâneo, e como barreira de água quando apoiadas abaixo do nível de lençol freático.

Souza (2018) destaca ainda como tipo de radier, as soluções em radier estaqueado. Normalmente a solução é utilizada em obras residenciais e industriais onde apenas o radier não é capaz de suportar os carregamentos provenientes da superestrutura e apresenta níveis de recalques inaceitáveis. Um aspecto importante destacado pelo autor é a possibilidade do surgimento de atrito negativo quando executados em seções de aterro onde normalmente a técnica é utilizada.

Segundo Almeida (2001) *apud* Dória (2007), em geral, pode ser dito que o radier, recebe

pouca atenção tanto durante a fase de projeto quanto durante a fase de construção. Como consequência, as recomendações que poderiam evitar muitos problemas são simplesmente ignoradas. Destaca-se que não existe uma norma brasileira específica para projeto e execução de fundações em radiers.

Figura 3 – Tipos de radiers: (a) liso; (b) com pedestais; (c) nervurados; (d) caixão



Fonte: DORIA, 2007.

### 2.2.2 Capacidade de Carga e Recalque

As fundações em radier, como outros tipos de fundações diretas, devem satisfazer os mesmos requisitos básicos: possuir fator de segurança contra a ruptura (capacidade de carga) e não apresentar recalques excessivos.

Em solos granulares, a capacidade última de suporte para radiers de grandes dimensões, é em regra, muito alta (Winterkorn and Fang, 1975). Isto faz com que os coeficientes de segurança calculados sejam muito maiores que 3, que é o valor mínimo proposta pela NBR 6122 (2010) para fundações diretas calculados por métodos analíticos.

Para radiers executados sob solos coesivos, parâmetros de tensão de cisalhamento em altas profundidades devem ser determinados para que o fator de segurança nestas profundidades possa ser analisado. Caso o fator de segurança encontrado não seja satisfatório, a redução da tensão transmitida por meio do aumento das dimensões do radier é usualmente ineficiente e encarece a solução de fundação (WINTERKORN AND FANG, 1975).

Segundo Budhu (2015), a problemática de capacidade de carga está em saber como as tensões estão distribuídas abaixo do radier para estimar, com margem de segurança, a ruptura por cisalhamento. Se o radier for rígido, o recalque é provavelmente uniforme, mas as tensões não se distribuirão uniformemente. Se flexível, o radier não apresentará recalque uniformes embora, as tensões são suscetíveis de serem uniformemente distribuídas.

Ainda segundo o autor, a estimativa do recalque de um radier é muito mais complexa que a de capacidade de carga. O recalque depende da rigidez do radier e da estrutura que o suporta em relação ao solo, do tipo e homogeneidade de solo, das condições das águas subterrâneas, do tipo de radier e dos métodos construtivos utilizados

O acréscimo de tensão em um solo desde a fundação depende da rigidez relativa entre o solo e a fundação e da superestrutura. Pode-se determinar a rigidez relativa da fundação-solo para o caso de fundação circular conforme apresentado na Equação 6.

$$K_{SS} = \frac{E_{fund}(1 - \nu_{solo}^2)}{E_{solo}} \left(\frac{t}{r_o}\right)^3 \quad (6)$$

Onde:

$E_{fund}$  = módulo de elasticidade da fundação;

$E_{solo}$  = módulo de elasticidade do solo;

$\nu$  = coeficiente de Poisson do solo;

$t$  = espessura da fundação;

$r_o$  = raio da fundação.

No caso de fundações não circulares utiliza-se um raio equivalente  $r_o$  baseado em uma área equivalente. Por exemplo, em uma fundação quadrada de largura  $B$ , o valor de  $r_o$  é apresentado na Equação 7.

$$r_o = \sqrt{\frac{B \times B}{\pi}} = 0,56B \quad (7)$$

Em geral, limita-se a rigidez relativa do sistema solo-fundação em: rígida ( $K_{ss} > 10$ ) e flexível ( $K_{ss} < 0,1$ ). Fundações com  $0,1 < K_{ss} < 10$ , tais como lajes de concreto muito grandes e relativamente finas, podem não se apoiar completamente no solo (BUDHU, 2015).

### 2.2.3 Cálculo Estrutural

Doria (2007) apresentou de forma sintética os métodos de cálculo de fundação do tipo radier indicadas por Velloso e Lopes (2010), conforme apresentado a seguir. Os métodos de cálculo de fundação do tipo radier são: Método Estático, Sistema de Vigas Sobre Base Elástica, Método da Placa Sobre Solo de Winkler, Método do American Concrete Institute, Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos

- **Método Estático**

No método estático pode-se considerar duas hipóteses: a distribuição da pressão de contato varia linearmente sob o radier (radiers rígidos), denominado cálculo com variação linear de tensões; ou que as tensões são uniformes nas áreas de influência dos pilares (radiers flexíveis), conhecido como cálculo pela área de influência dos pilares.

Na primeira hipótese as tensões de contato são determinadas por meio da resultante do carregamento onde utiliza-se este método para o cálculo de radiers nervurados e em caixão, visto que apresentam rigidez relativa significantes.

Para a segunda hipótese as tensões de contato são determinadas a partir da resultante do carregamento, podendo ser utilizado o seguinte procedimento:

- determinar a área de influência de cada pilar,  $A_f$ ;

- calcular a pressão média nesta área ( $q=Q_i/A_f$ );
- determinar uma pressão média atuando nos painéis;
- calcular os esforços nas lajes e vigas e as reações nos apoios, se estas reações forem muito diferentes das cargas nos pilares, deve-se redefinir as pressões médias nos painéis.
- **Método da Placa Sobre Solo de Winkler**

Na hipótese de Winkler, as pressões de contato são proporcionais aos recalques. Sendo assim, o deslocamento de uma placa delgada, considerando uma região distante dos carregamentos e assente sobre um sistema de molas, é calculada pela Equação 8.

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2\partial^4 w}{\partial x^2 \partial x^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + k.w = 0 \quad (8)$$

Onde D é a rigidez à flexão da placa, é determinada pela Equação 9.

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1-\nu^2)} \quad (9)$$

Onde t é a espessura da placa, E é o módulo de elasticidade do material da placa e  $\nu$  é o Coeficiente de Poisson do material da placa.

- **Método do American Concrete Institute (ACI)**

Este método se baseia na hipótese de Winkler e é aplicado em radiers lisos e flexíveis. Calculam-se os momentos fletores e os esforços cortantes em cada ponto da placa gerados por cada pilar. Em seguida somam-se as ações de cada pilar nos pontos em estudo.

Sequência de procedimentos do método:

1. Cálculo da rigidez à flexão da placa D (Equação 9);
2. Escolhe-se um número de pontos na placa para o cálculo dos esforços;
3. Calculam-se os momentos fletores radial ( $M_r$ ) e tangencial ( $M_\theta$ );
4. Convertem-se os momentos fletores radial e tangencial para momentos segundo coordenada retangulares,  $M_x$  e  $M_y$  por meio das Equações 10 e 11, respectivamente.

$$M_x = M_r \cos^2 \theta + M_\theta \sin^2 \theta \quad (10)$$

$$M_y = M_r \sin^2 \theta + M_\theta \cos^2 \theta \quad (11)$$

5. Calcula-se o esforço cortante em coordenadas retangulares.

Os passos 3 a 5 são repetidos para cada pilar e os resultados são somados algebricamente.

- **Sistemas de Vigas Sobre Base Elástica**

Nesse desse sistema, separa-se o radier em dois sistemas de faixas ortogonais, de acordo com a geometria do radier e a distribuição dos pilares, onde cada faixa é tratada como uma viga de fundação isolada sobre base elástica, utilizando a hipótese de Winkler. Em cada direção de estudo, deve-se tomar a totalidade da carga nos pilares.

- **Método de Diferenças Finitas**

No Método de Diferença Finitas a equação diferencial da deformada da placa de radier é substituída por um sistema de equações algébricas que relacionam o deslocamento de um ponto aos deslocamentos dos pontos vizinhos.

A equação diferencial de flexão da placa, incluindo uma sobrecarga uniforme  $p$  e uma carga concentrada  $P$ , em termos de diferenças finitas é definida pela Equação 12.

$$\frac{\Delta^4 w_k}{\Delta x^4} + \frac{2\Delta^4 w_k}{\Delta x^2 \Delta y^2} + \frac{\Delta^4 w_k}{\Delta y^4} = \frac{p_k}{D} + \frac{k_v w_k}{D} + \frac{P}{D\Delta x \Delta y} \quad (12)$$

- **Método de Elementos Finitos**

Este método consiste no emprego de funções aproximadas para representar o campo de deslocamentos em cada elemento. A continuidade do meio é garantida impondo-se condições de compatibilidade de deslocamentos e rotações nos nós dos elementos adjacentes.

O radier é discretizado em elementos de placa sobre apoios elásticos que representam a rigidez do solo. O método permite a análise de placas com geometrias mais complicadas e uma variação do solo num plano horizontal. No caso em estudo, faixas do radier são substituídas por elementos retilíneos unidimensionais, conduzindo a um modelo de grelha.

Os radiers possuem geometrias variadas, assim como formas diferentes de carregamentos, dessa forma, não é possível definir uma malha ideal. No entanto é possível adotar alguns critérios para radiers retangulares, que devem ser adequados a cada

Critérios que devem ser levados em consideração na discretização da malha da grelha para obtenção dos esforços no radier (HAMBLY, 1976)

- Quanto mais discretizada for a malha, melhores serão os resultados obtidos. Estes resultados deixam de ser satisfatórios quando a largura das barras for menor que 2 ou 3 vezes a espessura do radier.
- Nas regiões aonde há grande concentração de esforços, como cargas concentradas, recomenda-se adotar uma malha cuja largura das barras não seja maior que 3 ou 4 vezes a espessura da laje.
- Os espaçamentos das barras da grelha, em cada direção não devem ser muito diferentes, para que haja uma uniformidade na distribuição dos carregamentos.
- É necessário colocar uma linha de barras no contorno do radier, diminuindo a largura para o cálculo do momento de inércia a torção de  $0,3h$ , por se tratar do ponto onde passa a resultante das tensões de cisalhamento devidas à torção.

### **2.3 Geologia e Prática de Fundações na Cidade do Recife**

Neste subitem são apresentados a geologia, morfologia e ocupação do solo de Recife. Também são apresentados perfis geotécnicos típicos e práticas de soluções da região metropolitana do Recife.

#### **2.3.1 Geologia, morfologia e ocupação do solo do Recife**

A cidade de Recife está situada na planície fluvio-marinha formada pela junção dos Rios Capibaribe e Beberibe, e se desenvolve entre a praia e os morros na sua periferia. Tem limites ao norte com o município de Olinda, ao sul com o de Jaboatão dos Guararapes e a oeste com os de Camaragibe e São Lourenço da Mata.

A cidade tem um subsolo reconhecidamente complexo, do ponto de vista geotécnico (Costa, 1960; Gusmão Filho, 1998). O embasamento Cristalino sofreu falhamento de gravidade na direção NNE (norte-nordeste), com afundamento na direção da atual linha de costa, formando assim, uma bacia de sedimentação que passa a ser depositária dos sedimento cretáceos.

Gusmão Filho (1998) descreve quatro pacotes sedimentares presentes na cidade do Recife:

- Formação Cabo: constituída de sedimentos mais grosseiros e variegados em

granulometria, devido ao próprio tectonismo. Apresentam-se com arenitos feldspáticos conglomeráticos como arcósios, com até 3 m de espessura, intercalados a camadas argilosas menos espessas;

- Formação Beberibe: Arenitos e areia quartzosas, siltitos e outros sedimentos mais finos armazenam importante reserva de água. Apresentam-se em profundidade e só afloram ao norte da cidade;
- Formação Gramame: foi depositada durante o período de avanço ou transgressão marinha que afogou os sedimentos continentais de origem fluvial da Formação Beberibe. É constituída de sedimentos finos, calcáreas dolomíticos de coloração creme;
- Formação Barreiras: Na grande maioria de suas ocorrências, em toda faixa continental, estes sedimentos são caracterizados por uma mistura de areias e argilas com horizontes de pedregulhos, onde foram identificadas as facies de leque aluvial, fluvial e fluvio-lagunar, em razão dos sucessivos avanços e recuos do mar durante o Quaternário.

A Tabela 3 resume as informações referentes aos depósitos encontrados na cidade do Recife.

Devido aos sucessivos ciclos de avanços e regressões do mar, durante o período Quaternário completam a lista da coluna estratigráfica os sedimentos recentes conhecidos como Terraços Marinhos, Terraços Fluviais, Mangues, entre outros. A Figura 4 ilustra o corte geológico da cidade do Recife. Já a Figura 5 apresenta a carta geológica da cidade.

Tabela 3 - Resumo dos Depósitos Sedimentares no Recife

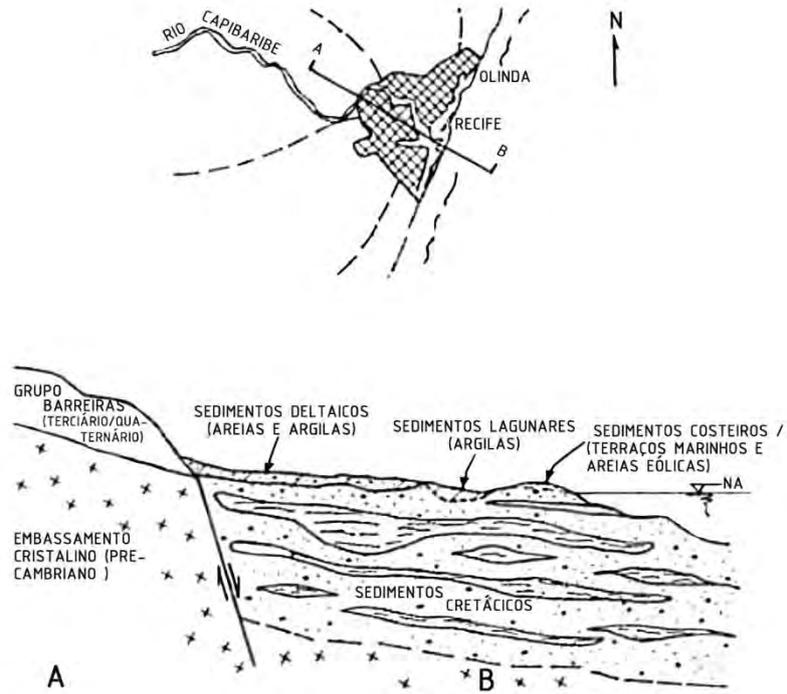
<b>Formação</b>	<b>Período*</b>	<b>Características</b>	<b>Idade estimada** (Milhões de anos)</b>
Cabo	Cretáceo Inferior (Era Mesozoica)	Sedimentos Grosseiros	142
Beberibe	Cretáceo Superior (Era Mesozoica)	Arenitos e Areias Quartzosas (reserva de água subterrânea)	65
Gramame	Cretáceo Superior (Era Mesozoica)	Sedimentos finos, calcáreos de coloração creme	65
Barreiras	Terciário/quaternário (Era Cenozoica)	Areias e argilas com horizontes de pedregulhos	5,3 a 0,01

\*Gusmão Filho (1998).

\*\*Gradstein & Org, 1996 modificado por Soares (2015).

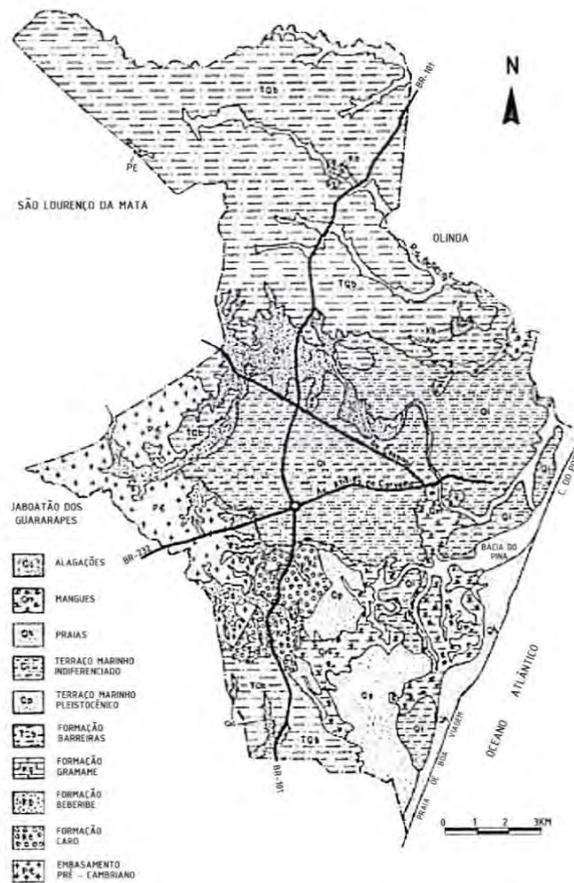
Fonte: OLIVEIRA, 2013.

Figura 4 – Corte geológico do Recife



Fonte: ALHEIROS *et al.*, 1990.

Figura 5 – Carta geológica do Recife



Fonte: ALHEIROS *et al.*, 1990.

Geomorfologicamente, pode-se dividir o Recife em duas paisagens: morros e planície. Estas planícies são de origem flúvio-marinha, com dois níveis de terraços marinhos arenosos, além de depósitos de mangues e sedimentos flúvio-lagunares e aluviões recentes, ou seja, o subsolo é muito variado. É na planície que se concentram as obras de grande porte urbano. Já os morros circundam a cidade e apresentam solos de boa resistência, geralmente pertencentes a Formação Barreiras, que são ocupados de maneira geral por população de baixa renda, onde praticamente não existe construções de grande porte (GUSMÃO,2005).

### 2.3.2 Perfis Geotécnicos Típicos

Oliveira (2004) apresentou 5 perfis típicos encontrados na região da grande Recife, onde neles, foram construídos edifícios em que houve monitoramento de recalques em seus elementos de fundações. Segundo o autor observa-se:

- Perfil de argila mole

Na região do bairro de Boa Viagem - Recife, observou-se perfis geotécnicos com base em ensaios de SPT, onde há camadas de areia mediamente compacta na superfície que chegam a profundidade de 10 m, seguido de camada espessa de argila mole com profundidade que chega a 25 m. Tal argila, apresenta Índice de Plasticidade (IP) que varia entre 20% e 25%.

Gusmão Filho *et al.* (1999) e Gusmão *et al.* (2000), avaliaram medições de recalques em edifício durante e após conclusão do mesmo, encontrando valores entre 84 e 105 mm. Tal edifício possuía estrutura em concreto armado de 16 pavimentos.

- Perfil com fragmentos de conchas

Situado na praia do Janga no Município de Paulista, observa-se perfil com fragmentos de conchas, ou seja, materiais carbonáticos de origem orgânica. Em prospecção realizada na região observa-se camada desta natureza entre 8 e 15 m de profundidade, possuindo baixa resistência a penetração com  $N_{SPT}$  médio de 2 e resistência de ponta em ensaio com CPT de 1 MPa.

Neste local foram construídos 8 blocos residenciais em estrutura aporcada de concreto, com 13 pavimentos, ligados entre si por caixa de circulação, apresentando recalques variando entre 243 e 500 mm (PACHECO *ET AL.*,2000).

- Perfil com fragmento de coral

No município de Jaboatão dos Guararapes, sondagens mostram um subsolo inicialmente com camada de areia fina, fofa, com espessura média de 3 m, seguindo de camada de areia fina, compacta a medianamente compacta, com espessura de 3m. Seguindo, observa-se camada de fragmentos de coral e conchas, com areia fina.

Neste terreno foi erguido edifício em estrutura apertada de concreto armada com 20 pavimentos, com fundações em sapatas apoiadas diretamente na camada de areia compacta (3 m de profundidade). As medições de recalques durante e após conclusão da obra, observou valores entre 43,5 a 75,5 mm.

- Perfil com Arenito

No bairro de Parnamirim em Recife, observa-se em perfil geotécnico camada de arenito entre 10 e 14 metros de profundidade. Segundo Gusmão Filho (1998), estes arenitos em terraços marinhos que começam em profundidade de 3 a 5 m na Zona Sul, nos bairros da Torre a 6 m e bairro de Parnamirim a 12 m.

Tais arenitos dificultam a cravação de estacas pré-moldadas, tendo que ser executado pré-furo com sonda rotativa ou trado hélice. Em caso de fundações diretas apoiadas no arenito ou nas camadas subjacentes, deve-se estimar os recalques.

- Perfil extremamente estratificado

Também no bairro de Boa Viagem, Recife, observa-se perfil do subsolo com camadas de diversos materiais como areias finas, turfa, silte argiloso mole, areia compacta e argila siltosa rija.

Segundo Oliveira (2004), do ponto de vista de capacidade de suporte, este perfil geotécnico só apresenta resistência razoável por volta de 34 m, o que encarece as soluções de fundação para edifícios altos.

Oliveira *et al* (2016) ao analisarem 188 perfis de solos localizados em Recife, elaboraram perfis típicos agrupando-os de acordo com granulometria e espessura das camadas. A Figura 6 resume as divisões dos perfis elaborados pelos autores. As frequências observadas para os perfis estabelecidos estão apresentadas na Tabela 4.

Figura 6 – Perfis Típicos observados e suas faixas de espessuras das camadas

PERFIL I A	ESPESSURA (m)	PERFIL II A	ESPESSURA (m)	PERFIL III	ESPESSURA (m)
ATERRO	0,00 - 2,00	ATERRO	0,00 - 2,30	ATERRO	0,00 - 1,00
AREIA	0,95 - 22,25	SILTE	0,00 - 5,85	AREIA	17,68 - 44,62
TURFA	0,00 - 2,96	ARGILA	0,50 - 8,35	SILTE	0,00 - 3,90
ARGILA	0,40 - 9,00	TURFA	0,00 - 10,30	AREIA	0,00 - 6,50
AREIA	0,30 - 20,50	AREIA	0,15 - 33,10		
SILTE	0,00 - 4,50	ARGILA	0,00 - 9,95		
ARGILA	0,00 - 8,81	AREIA	0,00 - 28,75		
				PERFIL IV A	ESPESSURA (m)
				AREIA	0,00 - 3,30
				ARGILA	1,90 - 6,20
				AREIA	3,40 - 7,90
				TURFA	11,85 - 24,40
				AREIA	0,90 - 9,18
				TURFA	0,00 - 10,10
				PERFIL IV B	ESPESSURA (m)
				ATERRO	0,00 - 2,70
				ARGILA	2,00 - 6,13
				TURFA	2,17 - 4,30
				ARGILA	1,90 - 8,33
				TURFA	0,00 - 3,10

PERFIL I B 1	ESPESSURA (m)	PERFIL II B 1	ESPESSURA (m)
ATERRO	0,00 - 2,00	ATERRO	0,00 - 2,70
AREIA	4,73 - 15,80	ARGILA	11,60 - 20,60
ARGILA	11,00 - 28,00	AREIA	0,00 - 10,55
AREIA	0,00 - 15,00	ARGILA	0,00 - 9,95
		AREIA	0,00 - 11,44

PERFIL I B 2	ESPESSURA (m)	PERFIL II B 2	ESPESSURA (m)
ATERRO	0,00 - 2,30	ATERRO	0,00 - 2,78
AREIA	1,10 - 7,90	ARGILA	0,75 - 7,93
ARGILA	1,03 - 9,48	TURFA	0,00 - 8,00
AREIA	1,70 - 7,88	AREIA	1,60 - 13,20
ARGILA	11,00 - 28,88	ARGILA	10,03 - 31,12
		AREIA	0,00 - 16,67

Fonte: OLIVEIRA *et al*, 2016.

Tabela 4 - Quantidade e porcentagem dos perfis típicos

Perfis Típico	IA	IB-1	IB-2	IIA	IIB-1	IIB-2	III	IVA	IVB
<b>Quantidade</b>	30	6	12	62	7	58	6	3	4
<b>Porcentagem (%)</b>	16	3	6	33	4	31	3	2	2

Fonte: OLIVEIRA *et al*, 2016.

### 2.3.3 Prática de Fundações

Santos (2011) fez levantamento nas principais empresas atuantes do Recife sobre a ocorrência percentual das diversas soluções de fundações observadas na cidade, entre os anos de 2000 a 2010. A Tabela 5 resume os resultados observados.

Destaca-se que no ano de 2009 a solução em radier apresentou a maior frequência em obras entre as soluções de fundações. Em 2010, a solução foi a mais utilizada entre as técnicas de solução diretas e destacou-se em segundo entre todos os tipos de fundação neste ano.

Tabela 5 - Frequência de tipos de fundações em Recife, 2000-2010

Tipo de Solução		Frequência em Obras (%)											
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Total
Profundas	Hélice Continua	-	4	19	19	12	12	5	30	27	26	22	19
	Pré-Moldada de Concreto	45	30	31	10	36	15	24	14	28	6	35	27
	Franki	19	11	15	10	5	6	3	-	3	3	2	5
	Metálica	5	9	12	13	12	24	11	12	5	10	5	9
	Raiz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Diretas	Sapatas	10	2	-	-	2	6	22	4	1	1	3	4
	Sapatas+Colunas de Argamassa	12	28	12	23	26	18	22	26	13	18	7	16
	Sapatas+Colunas de Areia+Brita	10	15	4	19	7	12	14	14	11	5	2	8
	Radier	-	-	-	6	-	9	-	-	12	30	24	13

Fonte: SANTOS, 2011.

## 2.4 Interação Solo-Estrutura

O desempenho da edificação é governado pela interação entre as partes da edificação, num mecanismo denominado interação solo-estrutura (ISE) (Gusmão,1990). Neste subitem são abordados aspectos importantes sobre o tema.

### 2.4.1 Aspectos Gerais

Pode-se dizer que as edificações são constituídas de três partes: terreno de fundação, infraestrutura e superestrutura. A superestrutura é composta por lajes, vigas, pilares, paredes, e demais elementos que serão utilizados na edificação. Já a infra-estrutura é responsável por transmitir os carregamentos provindos da superestrutura ao terreno de fundação, garantindo compatibilização entre as cargas da superestrutura e a resistência do terreno.

Segundo Gusmão (1990), comumente a ISE é desprezada, tanto em projetos de fundações como estruturais. No projeto estrutural, o dimensionamento dos elementos estruturais é realizado na hipótese que os apoios não sofrem recalques diferenciais. Já o projeto de fundações é realizado considerando apenas as cargas dos apoios obtidas por meio do projeto estrutural e os dados obtidos pelas investigações geotécnicas.

Diversos modelos para análise da ISE vêm sendo desenvolvidos. Como trabalhos pioneiros, destacam-se os de Meyerhof (1953) e Chamecki (1956). Poucos são os modelos que podem ser usados na prática rotineira.

Mayerhof (1953) propôs, tanto para o caso de fundações isoladas como combinadas, que a contribuição da superestrutura fosse considerada como a de uma viga de rigidez equivalente, visto que a rigidez relativa estrutura-solo influencia a grandeza dos recalques, conforme posteriormente Poulos (1975) e Lopes e Gusmão (1991) analisaram. Segundo Meyerhof (1953), no caso de um edifício com estrutura em pórtico de concreto e painéis de fechamento em alvenaria, a rigidez da viga equivalente pode ser determinada pela Equação 13.

$$E_c I = \sum E_v I_v + \sum E_a I_a \quad (13)$$

Onde:

$E_c I$  : rigidez da viga equivalente

$\sum E_v I_v$  : somatório da rigidez das vigas da estrutura

$\sum E_a I_a$  : somatório da rigidez dos painéis de alvenaria

Chamecki (1956) publicou uma das primeiras tentativas de modelagem do mecanismo de ISE em edificações por meio de análise iterativa até que haja convergência das reações dos apoios e recalques. Iwamoto (2000) apresenta a simplificação realizada por Chamecki (1956) em quatro processos:

1. Calcula-se reações  $R_0$  nos apoios da estrutura, considerando-os indeslocáveis
2. Determina-se os recalques  $\Delta w$ , devido as reações  $R_0$ , sem a consideração da rigidez da estrutura
3. Determina-se a rigidez  $Q$  do apoio (ou coeficiente de transferência de carregamento), impondo deslocamentos unitários nas coordenadas dos apoios da estrutura;

Assim, pode-se obter reações em uma determinada coordenada  $i$  do apoio em função dos recalques da mesma coordenada  $i$  e das outras coordenadas  $j$  por meio da Equação 2.14.

$$R_{ir} = R_0 - Q_{ii} \Delta i + \sum Q_{ji} \Delta j (i \neq j) \quad (14)$$

4. O processo iterativo será realizado até que todos os recalques e reações atinjam convergência desejada.

Reis (2000) avaliou a ISE de um grupo de edifícios com fundações superficiais em argila mole pelo método de Chamecki (1956). A partir das reações de apoios autor calculou os recalques pelo modelo de Aoki e Lopes (1975) e os mesmo foram impostos na superestrutura obtendo-se uma nova configuração dos esforços e conseqüentemente reações de apoios. Para estas reações são recalculados os recalques e novamente impostos na superestrutura. O processo repete-se até que haja convergência nos valores das reações de apoio e recalque.

Gusmão (1994) afirma que uma análise considerando a ISE mostra que, tanto o recalque absoluto máximo, quanto o diferencial máximo diminuem de grandeza com o aumento da rigidez relativa da estrutura-solo, enquanto que em uma análise convencional, sem a consideração da superestrutura, a grandeza de recalques independe desta rigidez relativa.

Na análise de Velloso e Lopes (2010), existem dois modelos principais para representar o solo, numa análise de ISE. A primeira seria baseada na hipótese de Winkler e a outra num meio contínuo elástico.

Na hipótese de Winkler, as tensões transmitidas ( $q$ ) são proporcionais aos recalques ( $w$ ), definido pela Equação 15. Esse modelo também conhecido como modelo de molas, a constante de proporcionalidade,  $k_v$ , é usualmente chamada de coeficiente de reação vertical, módulo de reação ou coeficiente de mola.

$$q = k_v w \quad (15)$$

Terzaghi (1955) a partir de ensaios de placa indicou valores de referência de coeficientes de reação vertical. Os valores foram obtidos com base em ensaios de placa quadradas com 0,3m de lado, para argilas e areias. Os valores determinados por Terzaghi (1955) estão apresentados na Tabela 6.

Moraes (1976) propôs valores de referência possíveis de adoção como coeficiente de reação vertical na falta de ensaios apropriados, apresentados na Tabela 7.

Tabela 6 – Valores de  $k_v$  apresentados por Terzaghi (1955)

<b>Argilas</b>	<b>Rija</b>	<b>Muito Rija</b>	<b>Dura</b>
$q_u^*$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1-2	2-4	>4
Faixa de valores $k_v$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.000 a 32.000	32.000 a 64.000	>64.000
Valor proposto $k_v$ (kN/m <sup>3</sup> )	24.000	48.000	96.000
<b>Areias</b>	<b>Fofas</b>	<b>Mediamente Compacta</b>	<b>Compacta</b>
Faixa de valores $k_v$ (kN/m <sup>3</sup> )	6.000 a 19.000	19.000 a 96.000	96.000 a 320.000
Areias acima do NA** $k_v$	13.000	42.000	160.000
Areia submersa $k_v$	8.000	26.000	96.000

\* - resistência à compressão não drenada

\*\*- nível d'água

Fonte: VELLOSO E LOPES, 2010.

Tabela 7 - Valores de  $k_v$  apresentados por Moraes (1976)

<b>Tipo de Solo</b>	$k_v$ (kN/m <sup>3</sup> )
Turfa leve- solo pantanoso	5.000 a 10.000
Turfa pesada – solo pantanoso	10.000 a 15.000
Areia fina da praia	10.000 a 15.000
Aterro de silte, de areia e cascalho	10.000 a 20.000
Argila molhada	20.000 a 30.000
Argila úmida	40.000 a 50.000
Argila Seca	60.000 a 80.000
Argila seca endurecida	100.000
Silte compactado com areia e pedra	80.000 a 100.000
Silte compactado com areia e muita pedra	100.000 a 120.000
Cascalho miúdo com areia fina	80.000 a 120.000
Cascalho médio com areia fina	100.000 a 120.000
Cascalho grosso com areia grossa	120.000 a 150.000
Cascalho grosso com pouca areia	150.000 a 200.000
Cascalho grosso com pouca areia compactada	200.000 a 250.000

Fonte: MORAES, 1976.

Segundo Velloso e Lopes (2010) aos valores de coeficientes de reação obtidos por meio do ensaio de placa e indicados pela literatura deve-se fazer as correções de forma e dimensões. O que é importante ser destacado é que o coeficiente de reação não é propriedade puramente do solo e sim, do conjunto placa ou elemento de fundação, envolvendo a forma e dimensões.

Antoniazzi (2011) indica a utilização de duas expressões, apresentadas nas Equações 16 e 17 para correção do coeficiente de reação vertical obtido no ensaio de placa para a dimensão da fundação real em solos arenosos e argilosos, respectivamente.

Para solos arenosos:

$$(K_v)_{fund} = (K_v)_{placa} \cdot \left( \frac{B_{fund} + B_{placa}}{2 \cdot B_{fund}} \right)^2 \quad (16)$$

Para solos argilosos rijos a muito rijos:

$$(K_v)_{fund} = (K_v)_{placa} \cdot \frac{A_{placa}}{A_{fund}} \quad (17)$$

Onde:

$(K_v)_{fund}$ : coeficiente de reação vertical do aplicável ao elemento de fundação real;

$(K_v)_{placa}$ : coeficiente de reação vertical indicados na literatura e obtidos por meio do ensaio de placa;

$B_{fund}$  : menor dimensão do elemento de fundação;

$B_{placa}$ : menor dimensão da placa;

$A_{placa}$ : área da placa;

$A_{fund}$ : área do elemento de fundação.

Na hipótese de um meio contínuo, pode-se considera-lo idealmente um meio elástico ou elastoplástico. No primeiro caso, há algumas soluções para vigas e placas pela Teoria da Elasticidade. No segundo caso, dificilmente aplicável em projetos correntes, requer solução numérica por métodos matemáticos como por exemplo do Método de Elementos Finitos.

Poulos (1975) desenvolveu um modelo matricial para determinação de recalques em fundações superficiais considerando a influência da superestrutura. Tal modelo foi deduzido a partir da equação do deslocamento induzido pela ISE e das cargas em função dos deslocamentos, conforme Equações 18 e 19, respectivamente.

$$\{V\} = \{V_0\} + [SM]\{\delta\} \quad (18)$$

$$\{\delta\} = [FM]\{V\} \quad (19)$$

$\{\delta\}$  - Vetor deslocamento dos pontos nodais do contato solo-estrutura;

$\{V\}$  - vetor das reações de apoio, considerando a ISE;

$\{V_0\}$  - vetor das reações de apoio, desconsiderando a ISE;

$[FM]$  - matriz de flexibilidade das reações das fundações;

$[SM]$  - matriz de rigidez da superestrutura dos deslocamentos nos apoios.

A  $[FM]$  é a matriz de mesma dimensão da  $[SM]$ , e é determinada de acordo com o tipo de fundação adotada. Como no modelo real, o recalque de um elemento de fundação não depende apenas da carga aplicada diretamente nele, mas também das cargas aplicadas por outros elementos de fundações vizinhas, a modelagem para determinar a matriz  $[FM]$  pode ser obtida pela teoria da elasticidade, onde é considerado a continuidade do solo (Iwamoto,2010)

Combinando as Equações 16 e 17, o vetor das reações de apoio é definido pela Equação 20.

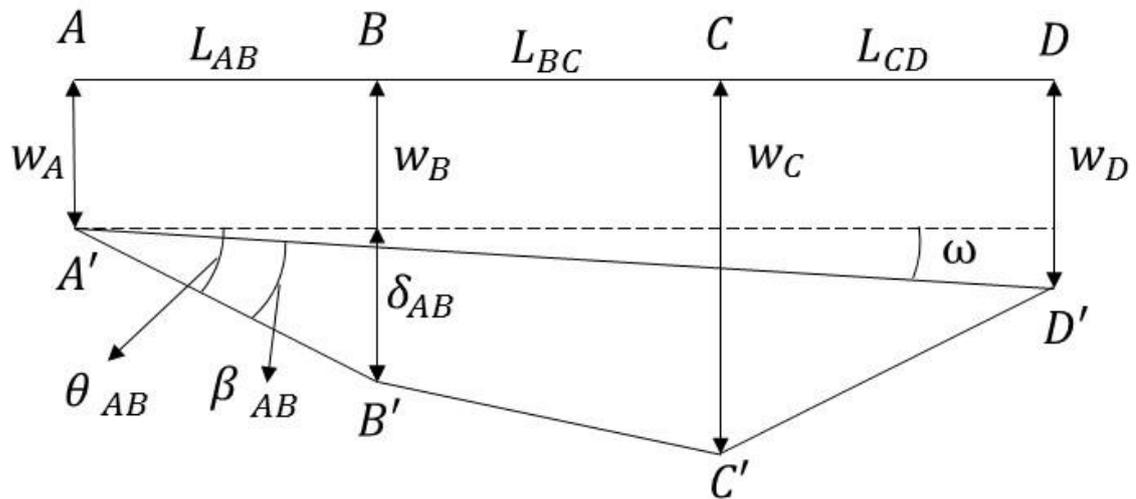
$$\{V_0\} = (I + [SM][FM])\{V\} \quad (20)$$

Gusmão (1990), Gusmão Filho (1995) e Moura (1995) aplicaram o método de Poulos (1975) em suas análises.

#### 2.4.2 Recalques: Estados Limites e Danos Associados

Em muitos casos, o subsolo não é homogêneo e as cargas aplicadas pelas fundações diretas de uma estrutura podem variar amplamente. Como resultado, espera-se uma variação nas deformações em diferentes partes de uma construção. Dessa forma, certos parâmetros são definidos com a finalidade de quantificar movimentos e estabelecer valores limite ao bom desempenho das estruturas. A Figura 7 apresenta esquema de representação desses parâmetros.

Figura 7 – Tipos de movimentos dos elementos de fundação



$$\delta_{AB} = w_B - w_A \quad \theta_{AB} = \frac{\delta_{AB}}{L_{AB}} \quad \omega = \frac{\delta_{AD}}{L_{AD}} \quad \beta_{AB} = \theta_{AB} - \omega$$

Fonte: adaptado de TEIXEIRA E GODOY, 1998.

Define-se:

$w$ : recalque - deslocamento total sofrido por qualquer ponto da fundação;

$\omega$ : desaprumo – descreve a rotação em corpo rígido da estrutura;

$\delta$ : recalque diferencial – diferença de recalques entre dois pontos;

$\theta$ : rotação – é a relação entre o recalque diferencial e a distância entre os dois pontos;

$\beta$ : distorção angular – é a rotação da linha ligando dois pontos, depois de descontado o desaprumo;

Na Figura 8 são apresentados os valores de distorção angular e os danos associados sugerido por Bjerrum (1963) e por Vargas e Silva (1973), apresentados por Velloso e Lopes (2010).

Figura 8 – Distorções angulares e danos associados



Fonte: VELLOSO E LOPES, 2010.

Segundo Ng (2005), diferentes tipos de estruturas possuem diferentes limites aceitáveis de recalques e distorções angulares. A determinação de um valor limite de distorção angular e recalque que ocasione patologias na estrutura é um problema complexo, principalmente quando analisado de forma analítica. Segundo o autor, os valores especificados como toleráveis nas principais instruções normativas são baseados na experiência de engenharia, onde na realidade as estimativas de deslocamentos toleráveis possuem uma grande quantidade de incertezas. Dessa forma, o autor avaliou por meio de abordagem probabilística limites toleráveis de distorções angulares levando em consideração: o tipo de fundação (rasa ou profunda); tipo de estrutura (aporticada ou de paredes estruturais); o tipo de solo (areia ou argila) e o tipo de uso (residencial ou comercial). Alguns dos valores propostos por Ng (2005) estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites toleráveis de distorções angulares

<b>Consideração</b>	<b>Tipo</b>	<b>Número de Casos</b>	<b>Média limite de Distorção angular</b>	<b>Desvio Padrão</b>
	Todas	127	1/333	0,003
<b>Fundação</b>	Fundação Direta	65	1/166	0,006
	Fundação Profunda	57	1/500	0,002
	Todas	191	1/250	0,005
<b>Estrutura</b>	Estrutura aporticada	152	1/200	0,004
	Estrutura de paredes estruturais	39	1/250	0,003
<b>Solos</b>	Todos	126	1/166	0,014
	Argila	103	1/250	0,006
	Areia	23	1/125	0,010

Fonte: adaptado de NG, 2005.

#### 2.4.3 Parâmetros de análise da ISE

Gusmão (1994) apresenta dois parâmetros com fins comparativos para efeitos de análise da interação solo-estrutura: Fator de recalque absoluto (AR) e Fator de recalque Diferencial (DR)

O fator de recalque absoluto é dado pela Equação 21.

$$AR = \frac{w_i}{\bar{w}} \quad (21)$$

O fator AR avalia o recalque em cada pilar separadamente por meio da relação entre o recalque no pilar ( $w_i$ ) e o recalque médio da estrutura ( $\bar{w}$ ). Este parâmetro pode ser utilizado para avaliar a redistribuição de esforços nos pilares. Nos pilares que ao considerar a ISE sofrem alívio de carga, o parâmetro AR tende a diminuir em comparação com valores obtidos

por uma análise convencional. Nos pilares que tendem a receber maior carga, o fator AR tende a aumentar comparando uma análise considerando a ISE e outra convencional.

O fator de recalque diferencial é dado pela Equação 22.

$$DR = \frac{w_i - \bar{w}}{\bar{w}} \quad (22)$$

O fator DR é usado para avaliar a uniformização dos recalques e assim a redução dos movimentos diferenciais da fundação em uma análise considerando a rigidez da estrutura em comparação com uma análise convencional, isso porque o recalque absoluto ( $w_i$ ) observando no pilar  $i$  tende a se aproximar da média em uma análise considerando a ISE.

O desempenho estrutural de uma edificação dependerá fundamentalmente da relação entre a rigidez da estrutura e do solo. A mesma estrutura pode apresentar comportamentos distintos dependendo do solo ao qual foi assentado. Em casos nos quais a estrutura possuir uma rigidez relativa elevada, os recalques diferenciais serão governados principalmente pela capacidade da estrutura em absorver os esforços e os recalques tenderão a ser uniforme. Em caso de rigidez relativa baixa, a rigidez do solo governa os recalques na estrutura.

Outro parâmetro importante para análise de ISE é a razão de uniformidade de recalque (RU), dado pela Equação 23.

$$RU = \frac{\Delta w_{ise}}{\Delta w_{conv}} \quad (23)$$

Sendo  $\Delta w_{ise}$  o maior recalque observado na estrutura considerando a ISE e  $\Delta w_{conv}$  o maior recalque obtido em análise convencional.

O Quadro 1 apresenta o desempenho de edificações nos casos extremos de rigidez relativa: estrutura flexível ( $K_{ss} \approx 0$ ) e estrutura rígida ( $K_{ss}$  elevado) assentes em solos com baixa e alta rigidez.

Quadro 1 - Desempenho de edificação conforme variação de rigidez da estrutura e do terreno

Estrutura	Parâmetro	Terreno de Fundação	
		Argila Mole	Areia Muito Compacta
Rígida	$K_{ss}$	Muito elevado	Elevado
	$\bar{w}$	Elevado	Muito baixo
	$\Delta w_{max}$	$F(K_{ss}, \bar{w})$	Muito baixo
	RU	Praticamente nulo	$F(K_{ss})$
Flexível	$K_{ss}$	Baixo	Muito Baixo
	$\bar{w}$	Elevado	Muito baixo
	$\Delta w_{max}$	$F(K_{ss}, \bar{w})$	Muito baixo
	RU	$F(K_{ss})$	Próximo da unidade

Fonte: GUSMÃO, 1990.

## 2.5 Modelagem dos Elementos de Fundação

Atualmente existem vários programas computacionais para modelagem de problemáticas na engenharia de fundações. Destacam-se: o Plaxis; o ELPLA e os diversos produtos da Rocscience, que no caso de análise de comportamento em radier, objeto desta tese, o Settle 3D. Neste subitem são apresentadas abordagens teóricas dos softwares ELPLA e o SAP2000. Também são destacadas pesquisas sobre os tema de modelagem numérica de edifícios com soluções em de fundações em radier utilizando o sistema construtivo de paredes de concreto.

### 2.5.1 ELPLA

O ELPLA (Elastic Plate) é um programa comercial de análise de comportamento de sapatas, estacas, grupos de estacas, radier estaqueados e de radiers de formas arbitrárias, permitindo a criação de diversos modelos de terrenos. A solução matemática deste programa é descrita em MEF e o programa permite diferentes tipos de modelos do subsolo

O ELPLA pertence ao pacote de softwares GEOTEC Office desenvolvido pela empresa GEOTEC na Alemanha. Como vantagem, o programa permite modelar problemas de fundações rígidas, flexíveis e elásticas. Além disso, a malha das fundações rígidas e flexíveis pode ser construída para ser análoga à malha de elementos finitos da fundação elástica.

O programa é o resultado de diversas pesquisas de vários autores: El Arabi & El Gandy,(2001.a; 2001.b); El Gandy (1994;1998.a;1998.b; 1999; 2003); Kany (1974); Kany & El Gandy (1993; 1995, 1996.a; 1996.b; 1997; 1999; 2000;2002))

O ELPLA está no mercado desde 1994. Primeiramente foi desenvolvido para usuários alemães e depois passou a ser um programa que permite a utilização em diversos idiomas. O pacote do programa ELPLA consiste em 7 programas que funcionam independentemente. Os programas e suas funções estão descritas no Quadro 2.

Quadro 2- Programa do Pacote ELPLA

<b>Programa</b>	<b>Descrição</b>
ELPLA – Data	Editor de dados de projeto
ELPLA – Solver	Analisa o problema descrito
ELPLA Graphic	Gerador de gráficos
ELPLA –List	Lista os dados de projeto e calcula os resultados
ELPLA – Section	Apresenta os resultados gráficos de seções específicas
ELPLA – Boring	Edita e apresenta dados de perfis de subsolo graficamente
GEOTEC – Text	Programa de edição de texto

Fonte: adaptado do Manual do Usuário ELPLA.

No ELPLA existem três modelos padrão para consideração nas análises de radiers, sapatas, radier estaqueados, entre outros elementos de fundação. São eles: o Modelo de Winkler, Modelo Continuo e Modelos Simples. Ainda, o software permite a utilização de 9 modelos para análises de sistemas flexíveis, elástico ou rígidos. O Quadro 3 descreve os modelos utilizados para análise.

De forma geral, o ELPLA permite diversas aplicações na mecânica dos solo e engenharia geotécnica. São aplicações do programa, entre outras:

- análises e projeto de radier, sapatas e radier estaqueados;
- análise de fundações rígidas, flexíveis e elásticas;
- determinação de recalques (consolidação);
- determinação de relação carga x recalque de estaca;
- análise de cortina de estaca;
- determinação de tensão e deformações no solo;
- efeito de temperatura;
- efeito de esforços externos ou de elementos de fundações vizinhas;
- determinação de capacidade de carga de fundações.

Quadro 3 - Modelos de Cálculo do ELPLA

<b>Nº do Método</b>	<b>Método</b>
1	Pressão de Contato Linear (Modelo Simples)
2	Módulo de reação constante (Modelo de Winkler)
3	Módulo de reação variável (Modelo de Winkler)
4	Modificação do módulo de reação por interação (Modelo de Winkler/Modelo Contínuo)
5	Módulo de Compressibilidade para fundações no maciço elástico semi-infinito (Modelo Contínuo)
6	Módulo de Compressibilidade para radier elástico (Solução por interação de equação linear)
7	Módulo de Compressibilidade para radier elástico sobre camadas estratificadas (Solução por eliminação de equação linear)
8	Módulo de Compressibilidade para radier rígido (Modelo Contínuo)
9	Módulo de Compressibilidade para elemento de radier flexível (Modelo Contínuo)

Fonte: adaptado do Manual do Usuário ELPLA..

### 2.5.2 SAP2000

O SAP2000 é um dos programas da Computers and Structures, Inc. (CSI) fundada em Berkeley, California em 1975. Trata-se de um programa estrutural baseado em elementos

finitos para análise e desenvolvimento de projetos estruturais. Destacam-se algumas análises possíveis e recursos disponíveis de serem realizados no SAP2000 (CSI,2017):

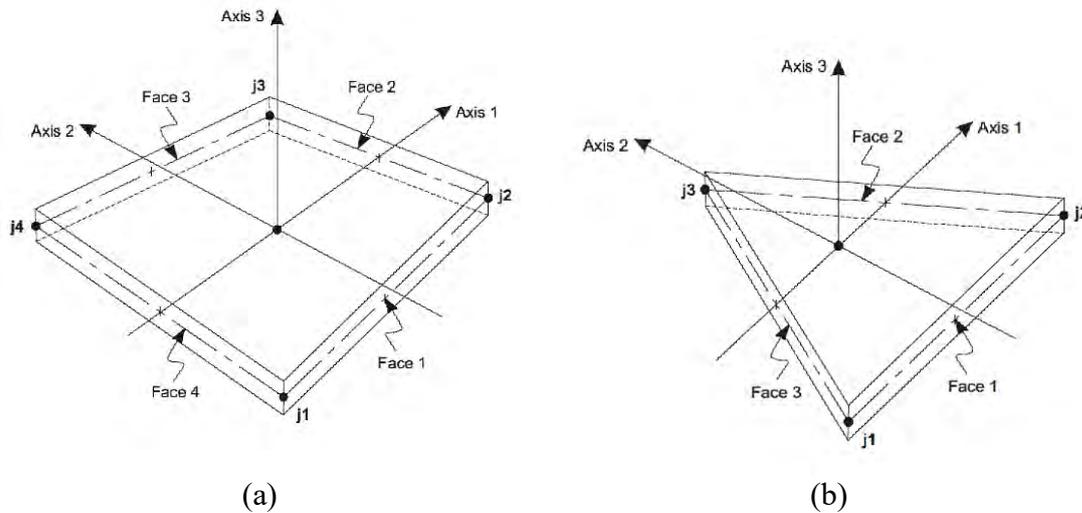
- análises estáticas e dinâmicas de estruturas;
- análises lineares e não lineares de estruturas;
- análise de carga dinâmicas de veículos sobre pontes;
- não linearidade geométrica, incluído análise de P-delta;
- estágio construtivos (Staged Construction);
- fluência, retração e efeitos de envelhecimento dos materiais;
- análises de flambagem.

Basicamente, as modelagens utilizando o SAP2000 são realizadas utilizando elementos de barra (frame elements) ou elementos de área (shell elements). Os elementos de barra são normalmente utilizados para análises de estruturas reticulada, como estruturas de concreto armado ou metálicas, por exemplo, com pilares, vigas e treliças. Já os elementos de área são normalmente utilizados em análises de sistemas de paredes, deques de pontes, placas, entre outras.

Um elemento de área tem seu próprio sistema de coordenada, propriedade de material e carregamento. Cada elemento pode ser carregado com seu peso próprio, carga externa em qualquer direção e tensão distribuída nos seus lados. Uma fórmula numérica de integração de quatro pontos é utilizada para determinar a rigidez do elemento. Tensões, forças internas e momentos são determinado por integração de Gauss 2 por 2 e extrapolados para os nós do elemento (CSI,2017)

Cada elemento de área deve ter formato quadrilátero ou triangular. Os elementos de formato quadrilátero são definidos por 4 nós ( $j_1, j_2, j_3$  e  $j_4$ ), enquanto os triangulares são formados por 3 nós ( $j_1, j_2$  e  $j_3$ ), conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Elementos de área (a) quadrilátero e (b) triangular



Fonte:CSI, 2017

No procedimento de modelagem, deve ser atribuído como uma propriedade do elemento de área os seguintes comportamentos:

- Membrana: suporta apenas forças no plano e o momento normal ao elemento;
- Placa: suporta apenas momentos e forças transversais ao elemento;
- Casca: suporta todas as forças e momentos;

Nas propriedades dos elementos também deve ser definida a formulação de espessura do elemento de área, podendo ser espesso (thick), onde este inclui os efeitos de deformações de cisalhamento transversal, baseados na Teoria de Mindlin–Reissner e fino (thin) que desconsidera o efeito baseado na Teoria de Kirchhoff (CSI,2017).

Dentre as diversas ferramentas disponíveis no programa, as análises estáticas não lineares ganham importância no problema proposto deste trabalho. As análises de não linearidade dos materiais e geometrias e as análises de estágios (incrementos) construtivos com comportamento de materiais dependentes do tempo.

Na análise construtiva não linear a estrutura é modulada (estágios), onde é permitido definir a sequência em que estes módulos são adicionados ou removidos. Segundo CSI (2017), a análise de estágios construtivos é considerada não linear pois a estrutura pode mudar de comportamento durante a análise. Associados aos incrementos dos estágios construtivos é permitida a consideração da não linearidade das propriedades dos materiais dependentes do

tempo como fluência (creep) e retração (shrinkage). Nesse tipo de análise a definição adequada dos estágios que simulem a execução da estrutura real é de suma importância. Para cada estágio deve ser definido quais elementos devem ser adicionados ou removidos, bem como a duração de cada estágio, e é nesta duração que as variações das propriedades dos materiais dependentes do tempo irão atuar

### 2.5.3 Pesquisas sobre o tema

Neste subitem são abordadas algumas pesquisas que tratam de modelagens de edifícios em paredes de concreto. É dado destaque à pesquisa de Farias (2018) visto que o autor realizou estudo com enfoque estrutural por meio modelagem numérica do mesmo projeto do empreendimento estudado nesta pesquisa.

Testoni (2013) propôs a utilização de simplificação para a análise estrutural linear de edifícios de paredes de concreto com a utilização de elementos finitos de barra. O desempenho do modelo numérico proposto foi avaliado por meio da comparação com modelo de referência em elementos finitos de casca realizados no SAP 2000. A simplificação proposta se mostrou adequado para a análise estrutural dos edifícios de paredes de concreto estudadas no trabalho. Os modelos de referência apresentados por Testoni (2013) foram discretizados com paredes em elementos finitos de casca fina (shell-thin) quadrados e as lajes utilizando diafragmas rígidos, portanto, não sendo discretizadas.

Santos (2016.a) também utilizou o programa SAP 2000 para realizar modelo de referência com a superestrutura discretizada por meio de elementos finitos de casca. O autor realizou estudo paramétrico indicando a influência do tipo de fundação (profunda ou superficial), número de pavimentos (cinco, dez e quinze) e a forma da edificação (quadrada e alongada). Foi proposto um modelo simplificado de análise estrutural, em que a interação solo-estrutura é considerada e as paredes de concreto são discretizadas por elementos de barra.

Santos (2016.b) realizou análise estrutural de edifícios de paredes de concreto e alvenaria estrutural com consideração da ISE e da sequência construtiva. As paredes de concreto foram modeladas em elementos finitos de casca e o maciço de solos em elementos finitos sólidos isoparamétricos utilizando o software DIANA®.

Farias (2018) também avaliou a sequência construtiva e a ISE utilizando o DIANA®. O autor utilizou dados de monitoramento de recalque para aferição das propriedades constitutivas do solo. O maciço de solo foi discretizado com elementos finitos sólidos gerados de forma não

estruturada por meio de algoritmo do software DIANA. A Figura 10.a apresenta o modelo numérico final utilizado para avaliação da ISE. O modelo final apresenta 262465 nós e 125779 elementos.

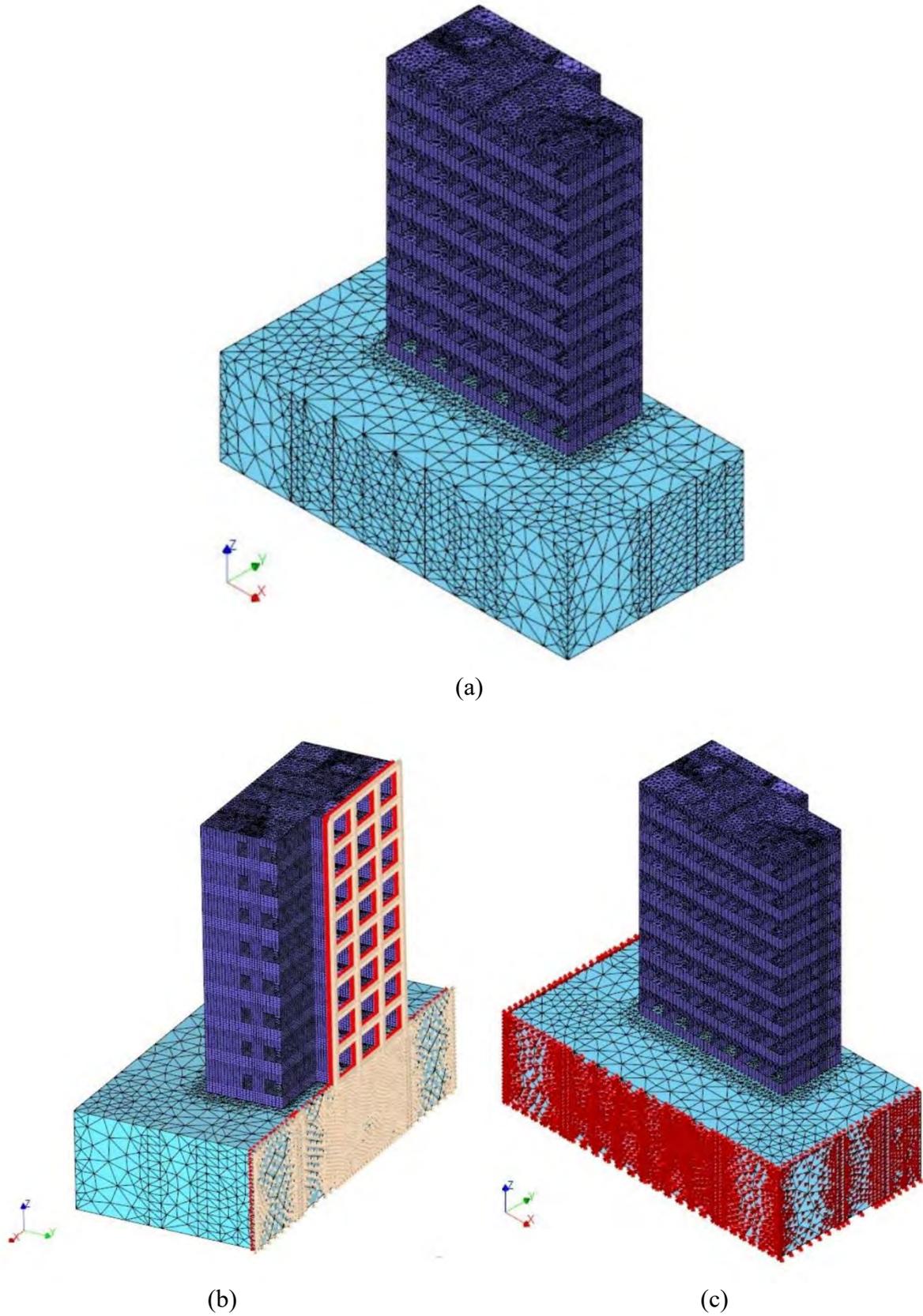
O modelo numérico apresentado por Farias (2018) foi realizado seguindo o eixo de simetria perpendicular à Y. Dessa forma foi restringido os deslocamentos nodais na direção Y e a rotação nas direções X e Z em toda a face externa do plano perpendicular ao eixo X-Z.. Também foi utilizada como condição de contorno a restrição dos deslocamentos nodais na face inferior do maciço do solo e nas extremidades laterais. A Figura 10.b e c apresenta as condições de contorno utilizadas pelo autor.

Farias (2018) simulou as paredes da superestrutura com elementos de membrana. Segundo o autor, o emprego de elementos de casca na representação das paredes da superestrutura é possível, e até recomendável para o caso da aplicação de ações horizontais. Optou-se por utilizar elementos de membrana, com o objetivo de reduzir o custo computacional. Na modelagem das lajes e do radier foi utilizado elementos de placa com base na teoria de “Mindlin–Reissner” (elementos de placa de grande espessura).

Em relação ao efeito do avanço construtivo, Farias (2018) analisou 9 fases sequenciais da estrutura, onde a primeira corresponde à execução do radier, considerando o peso próprio e as ações permanentes do pavimento térreo. Da segunda à nona fase, correspondeu a construção do 1º pavimento ao 8º pavimento, considerando também o peso próprio e ações permanentes. Em cada fase foram obtidas as configurações de deslocamentos, tensões e deformações do radier e do maciço do solo.

Em suas conclusões Farias (2018) apresentou sugestões para revisão da NBR 16055 (2012). Destaca-se: fundamentar a obrigatoriedade do uso da ISE por critério baseado na rigidez relativa estrutura-solo e quando considerada a utilização da ISE, deve ser realizada por modelos que considerem o solo com um meio contínuo. No caso de utilização de modelos com molas, deve-se incluir a interação entre elas por meio de molas de rigidez atualizáveis em processo de cálculo iterativo.

Figura 10 – Modelo numérico utilizando o DIANA. (a) representação completa e condições de contorno: (b) simetria do eixo Y e (c) restrição de deslocamento do maciço



Fonte: FARIAS, 2018.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Os estudos conduzidos neste trabalho foram realizados com base em dados fornecidos de um empreendimento localizado na Região Metropolitana do Recife. São apresentados os seguintes dados: projeto arquitetônico, perfis geotécnicos, topografia, detalhes construtivos, monitoramento dos recalques, solução de fundações adotada para os blocos, entre outros. Posteriormente é mostrada a metodologia utilizada para realização da retroanálise dos parâmetros de módulo de elasticidade. São apresentados os modelos numéricos fundamentados em Elementos Finitos, realizados nos softwares ELPLA e SAP2000. Por fim é indicado a metodologia para realização das Análises de Componentes Principais-ACP.

#### **3.1 Descrição do empreendimento**

Neste subitem são descritos os dados disponibilizados do empreendimento em estudo: descrição geral (localização, arquitetura do empreendimento e planta baixa dos blocos); investigação geotécnica; soluções de fundações utilizadas e sequência construtiva; movimentos de terra realizados antes da execução das fundações; e metodologia construtiva de execução das paredes de concreto.

##### **3.1.1 Descrição Geral**

O empreendimento em estudo (Figura 11) localiza-se nas margens da BR – 408, no município de São Lourenço da Mata no Estado de Pernambuco, a aproximadamente 25 km de Recife. Trata-se de um condomínio residencial com um total de 2.048 apartamentos distribuídos em 64 blocos, com 8 pavimentos (térreo + 7 pavimentos tipo) cada bloco e, portanto, 32 unidades habitacionais por torre. A área total do terreno do empreendimento é de aproximadamente 32 hectares. Todos os apartamentos possuem garagens localizadas no térreo, nas proximidades de cada bloco.

Os apartamentos têm área de aproximadamente 49 m<sup>2</sup>, cada, conforme projeto arquitetônico apresentado na Figura 12. Cada pavimento possui área de uso comum, considerando elevador, escada e hall de entrada com aproximadamente 25,5 m<sup>2</sup>. Sendo assim, cada pavimento possui área de aproximadamente 225 m<sup>2</sup>.

O empreendimento foi dividido arquitetonicamente em 14 quadras com os 64 blocos distribuídos de maneira variada em cada quadra. As nomeações das quadras e dos blocos que constituem o empreendimento em estudo estão apresentadas na Tabela 9 e suas locações estão

apresentados na Figura 13.

Figura 11- Empreendimento estudado



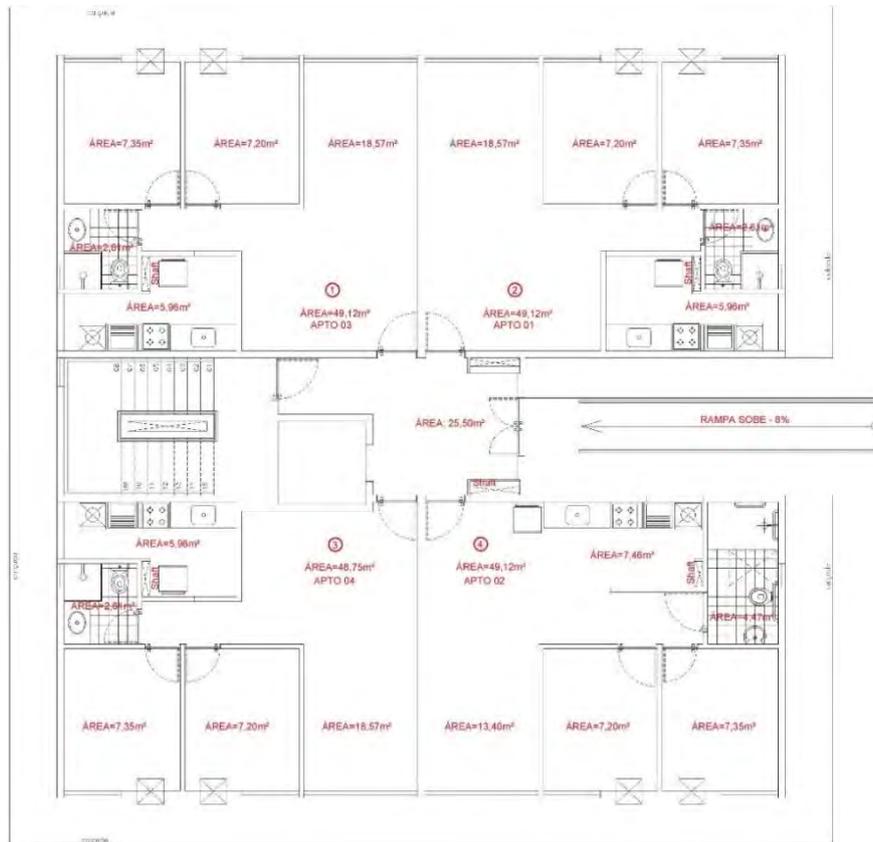
(a)



(b)

Fonte: (a)Google Earth; (b) Construtora Pernambuco.

Figura 12 – Projeto arquitetônico do pavimento térreo



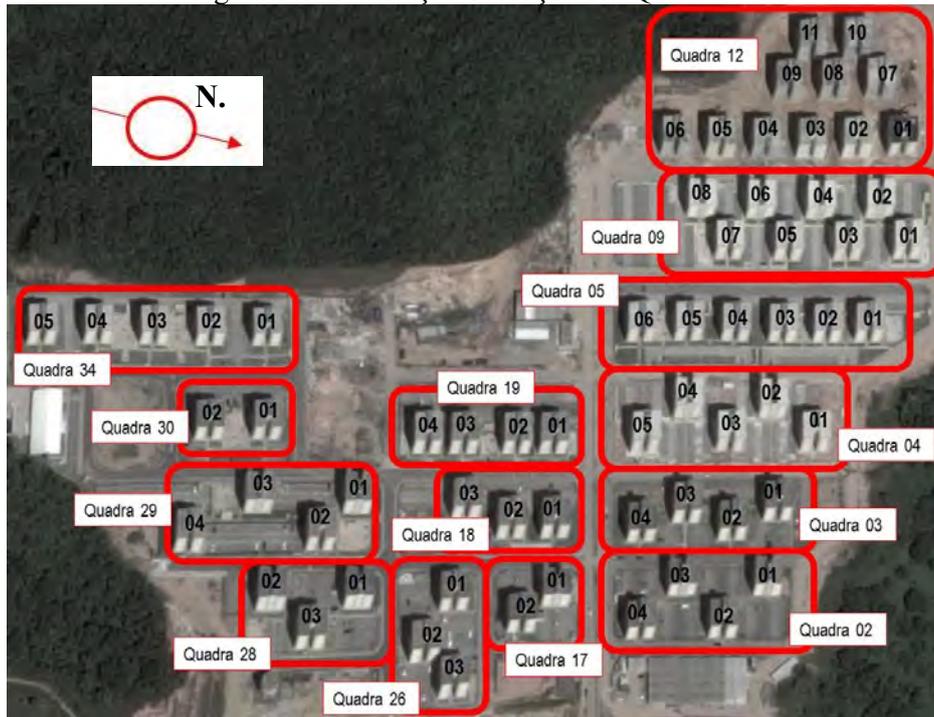
Fonte: Construtora Pernambuco.

Tabela 9- Nomenclatura dos Quadras e Blocos do Empreendimento

<b>Quadras</b>	<b>Blocos</b>
Quadra 2	01,02,03 e 04
Quadra 3	01,02,03 e 04
Quadra 4	01,02,03, 04 e 05
Quadra 5	01,02,03, 04,05 e 06
Quadra 9	01,02,03,04,05,06,07 e 08
Quadra 12	01,02,03,04,05,06,07,08,09,10 e 11
Quadra 17	01 e 02
Quadra 18	01,02,03 e 04
Quadra 19	01,02,03 e 04
Quadra 26	01,02 e 03
Quadra 28	01,02 e 03
Quadra 29	01,02,03 e 04
Quadra 30	01 e 02
Quadra 34	01,02,03, 04 e 05

Fonte: Construtora Pernambuco.

Figura 13 – Nomeação e localização das Quadras e Blocos



Fonte: O Autor, 2019.

### 3.1.2 Investigação Geotécnica

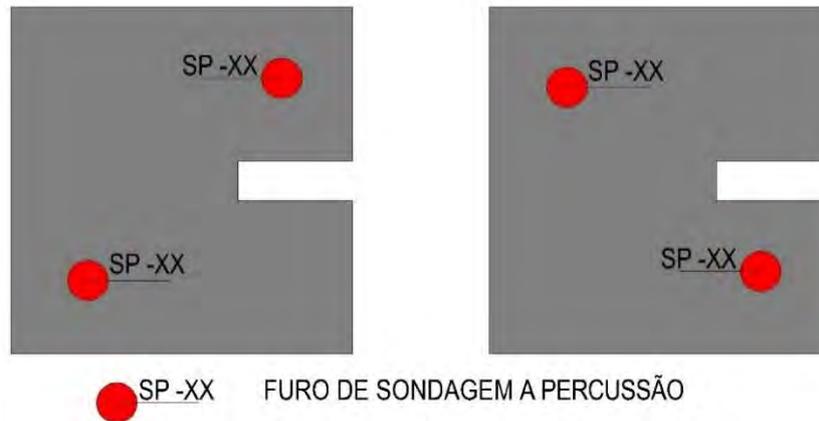
Para análise do subsolo do empreendimento foram realizadas duas sondagens de simples reconhecimento à percussão com medida de SPT (Standard Penetration Test) de acordo com os procedimentos da NBR-6484 (2001) – *Execução de sondagens de simples reconhecimentos dos solos – métodos de ensaio*. Ao total foram realizados em toda extensão da obra, 166 sondagens à percussão.

Em sua primeira etapa foram contratadas duas empresas para realização de sondagens de reconhecimento em toda extensão do terreno, antes da etapa de terraplanagem para implantação dos radiers na cota de projeto. Cada empresa de investigação geotécnica realizou 17 sondagens em pontos mais próximos possíveis uma da outra, totalizando 34 sondagens.

Na segunda etapa foi solicitada a realização de dois furos de sondagem em cada bloco, localizadas em bordos opostos, conforme apresentado na Figura 14. As sondagens foram realizadas para detalhamento do perfil geotécnico para cada bloco e por meio destes foi possível avaliar os recalques da estrutura. Nesta etapa ainda foram realizadas mais 4 sondagens, para construções complementares ao empreendimento. Ao total, foram realizadas 132 sondagens.

Cabe destacar que as sondagens foram realizadas com circulação de água mesmo acima do nível d'água, procedimento esse não indicado pela NBR-6484 (2001). A circulação de água foi utilizada como forma de diminuir o tempo de execução das sondagens de simples reconhecimento.

Figura 14 – Localização dos furos de sondagens



Fonte: O Autor, 2019.

Os perfis de sondagens obtidos no empreendimento apresentaram heterogeneidade. Na sua grande maioria, os perfis são constituídos por camadas de siltes argilosos, argilas siltosas e siltes arenosos com espessuras variáveis, mas, observa-se em alguns dos perfis, camadas de areias médias a finas, camadas de pouco espessas de argilas moles, entre outros tipos de solos. Em relação ao impenetrável, foram determinadas profundidades de menos de 1 m a 13 m. Em relação ao nível d'água, não foi observado nas sondagens, proximidade a superfície e consequentemente a cota de implantação dos radiers.

Estão dispostos nas Figuras 15, 16 e 17, as sondagens que representam de maneira generalizada os perfis encontrados em toda extensão do terreno.

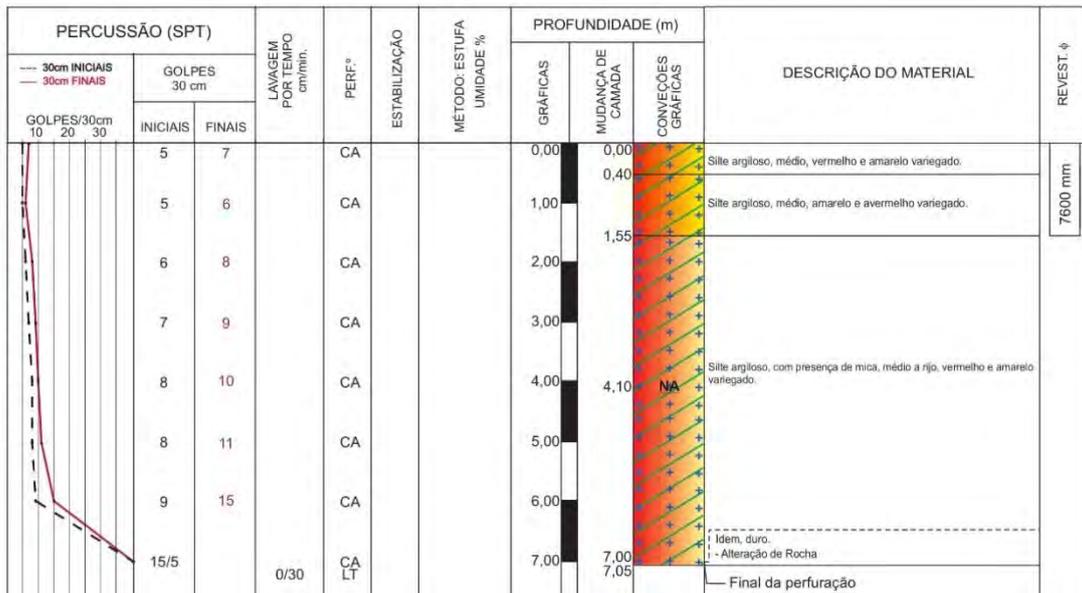
Na Figura 15 observa-se perfil composto de silte argiloso vermelho em profundidade de 1,55 com  $N_{SPT}$  médio de 7 golpes/0,3 m, seguido de silte argiloso com presença de mica, médio a rijo, vermelho e amarelo com  $N_{SPT}$  que em sua profundidade final, próximo a alteração da rocha, chega 15 golpes/0,3 m. O impenetrável foi observado a 7 m de profundidade neste perfil e o nível d'água a aproximadamente 4 m de profundidade.

Na Figura 16, pode-se observar a presença de argila siltosa, média amarelada até profundidade de aproximadamente 2 m. Continuando o perfil, observa-se ainda a presença de argila siltosa, média, com cor vermelho vertegado, com  $N_{SPT}$  variando de 6 golpes/0,3m a 10

golpes/0,3m, em profundidade de 4,6 m. Não foi observado presença de nível d'água neste perfil de sondagem.

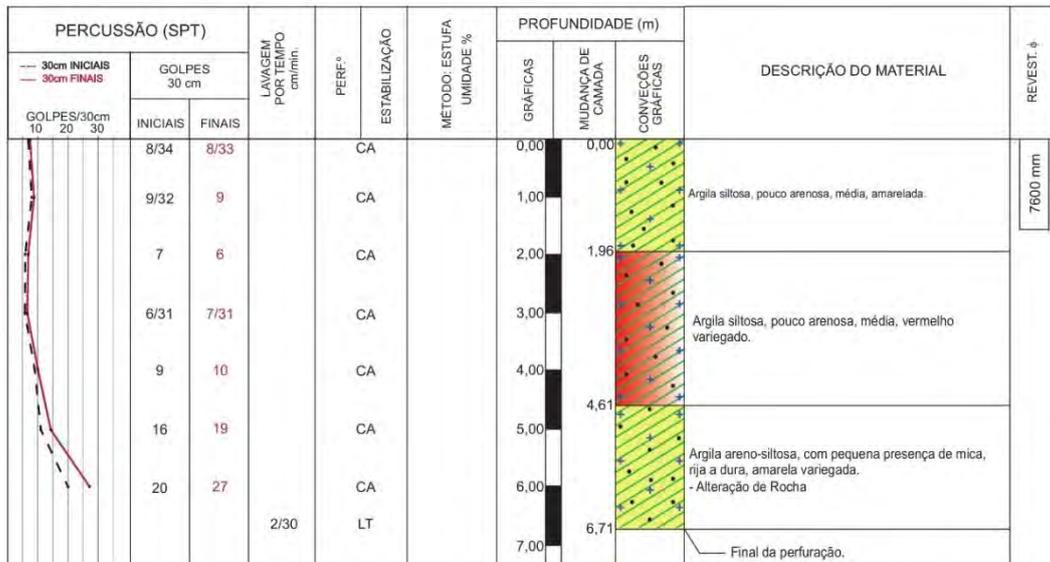
Já na Figura 17 observa-se um perfil de sondagem com camada de menos de 1 m de profundidade de silte argiloso seguido de silte arenoso com  $N_{SPT}$  variável indo de 11 a 41 golpes/0,3 m conforme aproximação do impenetrável. Neste perfil foi observado nível d'água a 2,25 m de profundidade.

Figura 15 – Sondagem SP 01 - Quadra 4 – Bloco 4



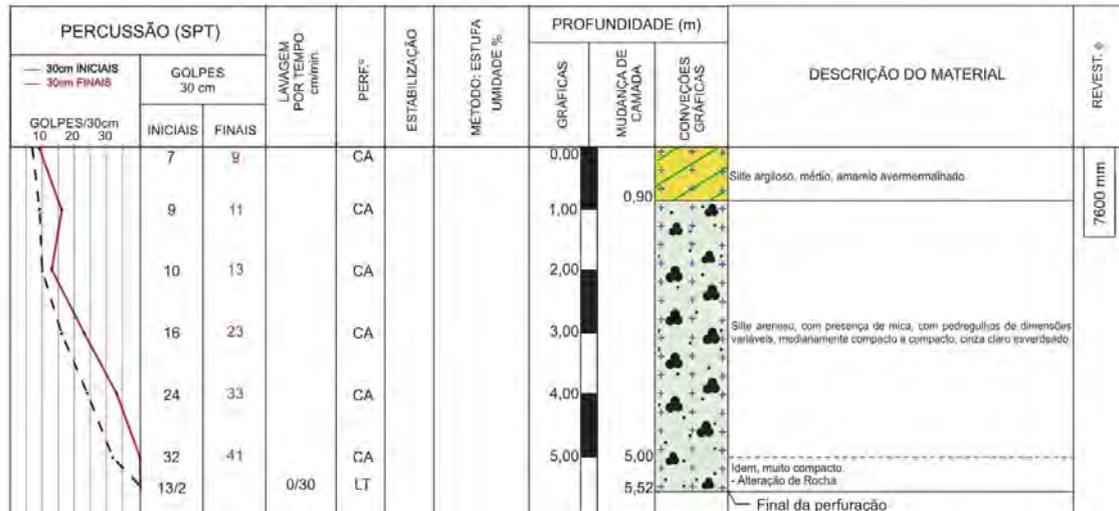
Fonte: Construtora Pernambuco.

Figura 16 – Sondagem SP 58 Quadra 3 – Bloco 1



Fonte: Construtora Pernambuco.

Figura 17– Sondagem SP 02 - Quadra 9 – Bloco 3



Fonte: Construtora Pernambuco.

### 3.1.3 Soluções de Fundações do Empreendimento e Sequência Construtiva

No empreendimento foram adotadas três soluções de fundações. Em radier liso em concreto armado, soluções em radier liso em concreto protendido e solução em radier em concreto protendido em solos com melhoramento com colunas de argamassas.

A Figura 18 apresenta as soluções adotadas em cada bloco bem como indicação da sequência construtiva das quadras. As sete primeiras quadras executadas foram construídas em concreto armado totalizando 23 blocos. As outras sete quadras seguintes foram executadas em radier com concreto protendido sendo que em um dos blocos (Q05-BL06) houve tratamento com colunas de argamassas. Dessa forma, 40 blocos foram executados em radier de concreto protendido. A Tabela 10 resume as soluções adotadas em cada quadra do empreendimento. Nesta pesquisa o bloco que foi adotado a solução com melhoramento com colunas de argamassa foi desconsiderado nas análises.

As placas de radier em concreto armado foram executadas com espessura de 0,35 m e  $f_{ck} > 35$  MPa. Já as em concreto protendido foram executadas com espessura de 0,30 m e  $f_{ck} > 35$  MPa. A Figura 19 apresenta as demais dimensões das placas de radier, onde a área média do radier executado foi de 262 m<sup>2</sup>. A Figura 20.a e b apresentam registros fotográficos das placas em concreto armado e protendido, respectivamente.

Figura 18 – Soluções de radier e sequencia construtiva



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 19 – Planta baixa do radier

Cotas em Metros      ■ Radier      ▨ Parede de Concreto



Fonte: Construtora Pernambuco.

Tabela 10 - Solução de radier dos blocos em estudo

<b>Quadras</b>	<b>Blocos</b>	<b>Solução em radier</b>
Quadra 2	01,02,03 e 04	Concreto armado
Quadra 3	01,02,03 e 04	Concreto armado
Quadra 4	01,02,03, 04 e 05	Concreto protendido
Quadra 5	01,02,03, 04,05 e 06	Concreto protendido (Q05-BL06 – Melhoramentos com colunas de argamassa)
Quadra 9	01,02,03,04,05,06,07 e 08	Concreto protendido
Quadra 12	01,02,03,04,05,06,07,08,09,10 e 11	Concreto protendido
Quadra 17	01 e 02	Concreto armado
Quadra 18	01,02,03 e 04	Concreto armado
Quadra 19	01,02,03 e 04	Concreto armado
Quadra 26	01,02 e 03	Concreto armado
Quadra 28	01,02 e 03	Concreto armado
Quadra 29	01,02,03 e 04	Concreto protendido
Quadra 30	01 e 02	Concreto protendido
Quadra 34	01,02,03, 04 e 05	Concreto protendido

Fonte: Construtora Pernambuco.

Figura 20 – Registro fotográfico da execução do radier em (a) concreto armado e (b) concreto protendido



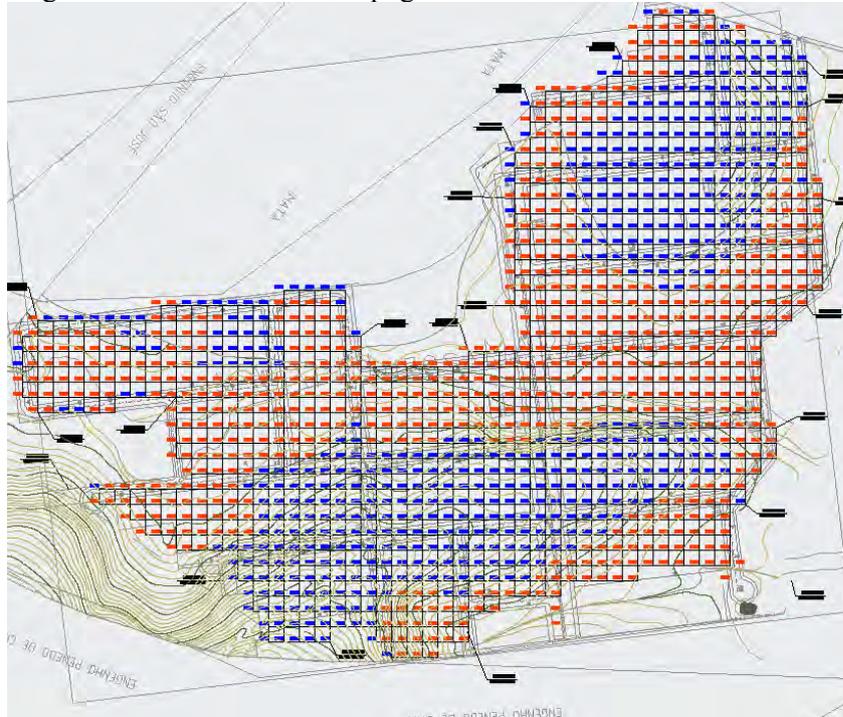
Fonte: Construtora Pernambuco.

### 3.1.4 Movimentos de Terra

A Figura 21 apresenta o resultado do levantamento topográfico do terreno com as curvas de nível bem como a indicação das áreas de cortes e aterro, sendo as destacadas em azul, áreas de corte e as destacadas em vermelho, áreas de aterro. Para melhor identificação das áreas de corte a aterro, a Figura 22, apresenta um esquema simplificado com destaque para as áreas de corte.

Observa-se que dentre os 63 blocos estudados, 33 estão em seções que foram realizados serviços de corte e 30 blocos estão em seção de aterro.

Figura 21 – Levantamento Topográfico do Terreno – Curvas de Nível



Fonte: Construtora Pernambuco.

Figura 22 -Indicação de áreas de corte

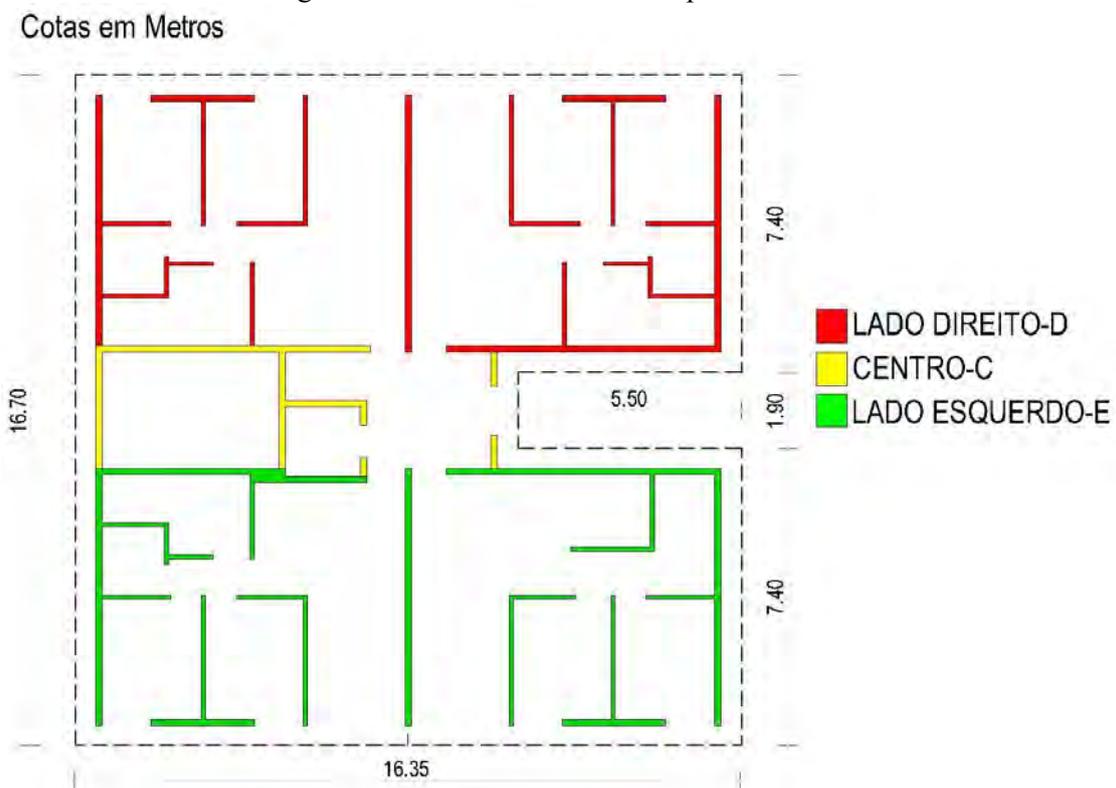


Fonte: O Autor, 2019.

### 3.1.5 Metodologia Construtiva das Edificações

A execução das paredes de concreto dos blocos em estudo, em cada pavimento, foi realizada em duas etapas, sendo a primeira etapa composta pelas fôrmas das paredes do lado esquerdo - E e pelas formas centrais - C e segunda etapa pelas fôrmas do lado direito - D. Dessa maneira foi indicado uma metodologia padrão para execução dos blocos visto que as formas da primeira parte (E+C) eram de maneira geral montados em um dia e concretados no final do mesmo. No dia seguinte, eram montadas as formas da segunda parte (D) e concretados no final do mesmo dia. A Figura 23 apresenta os conjuntos de divisão das fôrmas.

Figura 23 – Divisão das fôrmas de paredes de concreto



Fonte: O Autor, 2019.

Dessa forma, montou-se uma metodologia representativa de execução que foi utilizada no modelo numérico com hipótese de carga de estágio construtivo no SAP2000. O Quadro 3.1 apresenta as etapas de execução e as descrições dos serviços realizados. Ao total, a execução dos blocos foi realizada em 19 etapas, sendo a primeira etapa de execução do radier, da segunda à décima sétima de execuções dos pavimentos e as duas últimas de execução da platibanda e da caixa d'água.

Quadro 4 - Descrição dos serviços realizados em etapas

<b>Etapa</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição do Serviço</b>
1	Radier	Execução do Radier
2	1E+1C	Montagem da forma esquerda do térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
3	1D	Montagem da forma direita do térreo e concretagem no final do dia;
4	2E+2C	Montagem da forma esquerda do 1º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
5	2D	Montagem da forma direita do 1º pav. e concretagem no final do dia;
6	3E+3C	Montagem da forma esquerda do 2º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
7	3D	Montagem da forma direita do 2º pav. e concretagem no final do dia;
8	4E+4C	Montagem da forma esquerda do 3º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
9	4D	Montagem da forma direita do 3º pav. e concretagem no final do dia;
10	5E+5C	Montagem da forma esquerda do 4º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
11	5D	Montagem da forma direita do 4º pav. e concretagem no final do dia;
12	6E+6C	Montagem da forma esquerda do 5º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
13	6D	Montagem da forma direita do 5º pav. e concretagem no final do dia;
14	7E+7C	Montagem da forma esquerda do 6º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
15	7D	Montagem da forma direita do 6º pav. e concretagem no final do dia;
16	8E+8C	Montagem da forma esquerda do 7º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
17	8D	Montagem da forma direita do 7º pav. e concretagem no final do dia;
18	PLATIBANDA	Montagem e concretagem da estrutura da Platibanda;
19	CAIXA	Montagem e concretagem da estrutura da Caixa d'água;

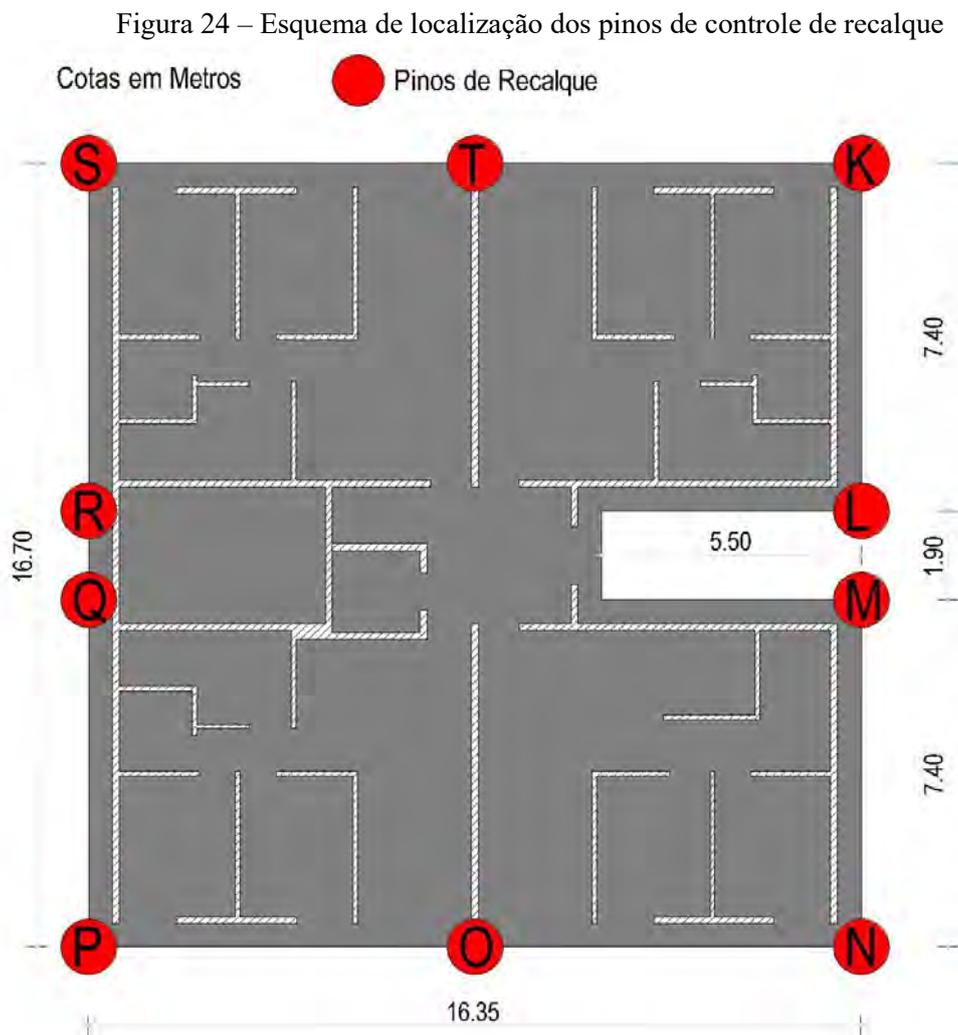
Fonte: Construtora Pernambuco.

### 3.1.6 Medições de Recalque e Estimativa de Carregamento

Para controle de recalque dos radiers, foram instalados após a execução de cada elemento de fundação dos blocos, localizados nos bordos (Figura 24), 10 pinos para monitoramento dos recalques. A partir da instalação dos mesmos, as medidas de recalque foram realizadas em várias etapas da construção dos blocos. As leituras dos recalques não seguiram uma sequência temporal ou ordem lógica de avanço da construção e conseqüentemente do aumento de carregamento. Desta forma as leituras de recalque foram determinadas em diferentes intervalos de tempos e com diferentes variações de carregamentos.

Durante as medições de recalque foram registradas a etapa construtiva em que se encontrava a execução dos blocos o que permitiu a estimativa do carregamento para cada leitura. As previsões de carregamento foram realizadas com auxílio do SAP2000 onde se determinou o carregamento atuante na estrutura para cada etapa construtiva, para os blocos em radier em concreto armado e em concreto protendido.

Os carregamentos totais de cada etapa construtiva estão apresentados no Tabela 11 para as duas soluções de fundações estudadas.



Fonte: O Autor, 2019.

A partir do registro da etapa em que se encontrava a construção do bloco no momento da medição de recalque, foi estimado o carregamento de peso próprio da estrutura, não considerando nenhuma sobrecarga, visto que as medições de recalque foram realizadas durante a fase construtiva dos blocos.

A área da lâmina da construção é de aproximadamente 225 m<sup>2</sup>, estimou-se o peso próprio da construção sem ação de sobrecargas em 8,65 kN/m<sup>2</sup> (865 kgf/m<sup>2</sup>).

Tabela 11 - Previsão do carregamento do peso próprio dos blocos

<b>Etapa</b>	<b>Executado</b>	<b>Carregamento estimado acumulado (Final da Atividade) - kN- Concreto Armado</b>	<b>Carregamento estimado acumulado (Final da Atividade) - kN- Concreto Protendido</b>
1	Radier	2295	1967
2	1E+1C	3365	3037
3	1D	4243	3915
4	2E+2C	5317	4989
5	2D	6194	5866
6	3E+3C	7268	6940
7	3D	8146	7818
8	4E+4C	9220	8892
9	4D	10097	9769
10	5E+5C	11171	10843
11	5D	12049	11721
12	6E+6C	13123	12795
13	6D	14000	13672
14	7E+7C	15074	14746
15	7D	15952	15624
16	8E+8C	17024	16696
17	8D	17902	17574
18	PLATIBANDA	18315	17987
19	CAIXA	18619	18291

Fonte: O Autor, 2019.

Algumas medições foram realizadas com execução do contra piso, onde foram indicados a quantidade de m<sup>2</sup> aplicados no momento da medição de recalque, considerando a espessura de 0,03 m. Dessa forma estimou-se o carregamento devido ao sobre piso, utilizando peso específico de 21 kN/m<sup>3</sup>. Sendo assim, o carregamento distribuído considerado foi de 0,65 kN/m<sup>2</sup>. É estimado na execução total do contra piso da edificação o carregamento devido à execução do contra piso de 1135 kN, o que corresponde a aproximadamente 6,1% do carregamento total do peso próprio da estrutura.

A Tabela 12 apresenta o carregamento total das estruturas com os elementos considerados.

Tabela 12 - Peso total da estrutura

<b>Estrutura considerada</b>	<b>Carregamento Total (Fundação em concreto armado+paredes de concreto +contra piso)</b>	<b>Carregamento Total (Fundação em concreto protendido+paredes de concreto +contra piso)</b>
Peso total (kN)	19754	19426

Fonte: O Autor, 2019.

### 3.2 Retroanálise dos Módulos de Elasticidades

A partir das medições de recalque realizadas nos radiers, determinou-se por retroanálise os módulos de elasticidade para cada estágio de carregamento de todos os radiers do empreendimento. Para isto, utilizou-se Equação 2.5, apresentada na fundamentação teórica deste trabalho.

Observa-se que no caso em estudo, os radier foram executados na cota de terrapleno, onde o fator de profundidade/embutimento ( $I_d$ ) foi considerado 1, resumindo a Equação 24 para retroanálise em:

$$E = \Delta q \cdot B \frac{1 - \nu^2}{\Delta w} I_s I_h \quad (24)$$

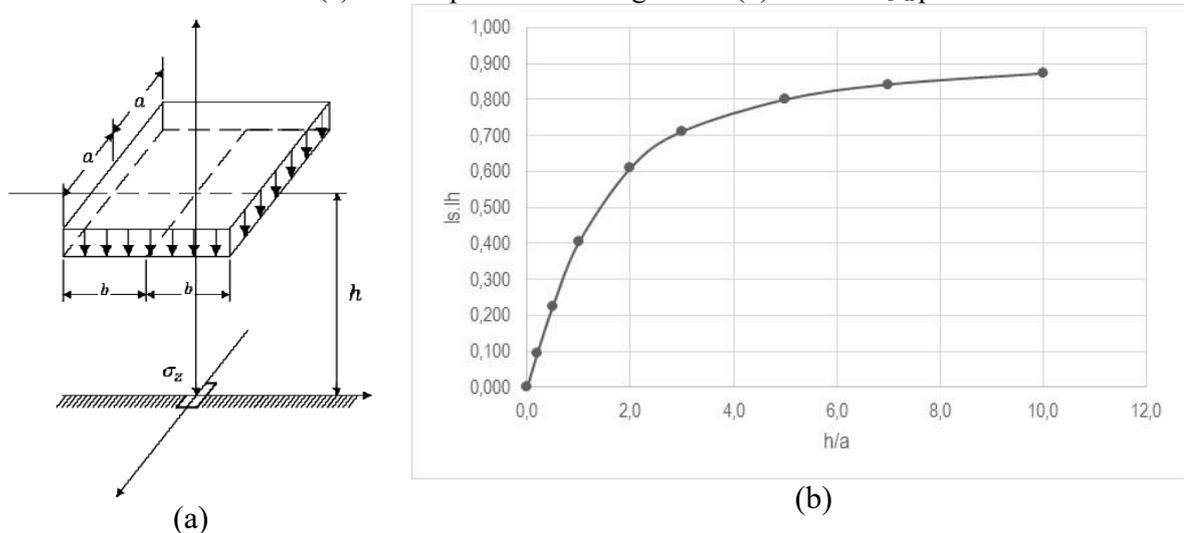
Nota-se que os valores utilizados foram de variações de tensão e recalques, isto é, foram utilizados na retroanálise a diferença entre as tensões estimadas e médias de recalques entre duas leituras consecutivas como forma de determinar o módulo de elasticidade por meio da secante da curva tensão x recalque.

O fator  $m$  é determinado pela relação entre as dimensões do radier  $a$  e  $b$  ( $m = b/a$ ), ambos indicados Figura 25.a. Como a forma do radier executado não é perfeitamente quadrada, o fator  $m$  determinado com as dimensões da placa é de 1,02. Foi considerado a aproximação do fator  $m = 1$ .

Para os fatores  $I_s I_h$ , foi necessário a determinação da cota de profundidade rígida ( $h$ ), conforme Figura 25.a. Considerou-se como cota da base rígida valores de  $N_{SP1} > 30$  golpes/0,30 obtidos na sondagem de simples reconhecimento. Determinada a cota da base rígida, foi possível por meio da curva apresentada na Figura 25.b, obter os fatores corretivo  $I_s I_h$  para cada radier de cada bloco. Os fatores  $I_s I_h$  indicados por Harr (1966) são apresentados na Figura 25.b (para  $m=1$ ) e na Tabela 13. Cabe destacar que os fatores adotados são para consideração de placa rígida, e, portanto, sem consideração de fator de correção para bordos da placa.

Em relação ao coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), considerou-se valor constante de 0,3. Bowles (1982) indica para solos siltosos, estes predominantes nos perfis de sondagens observados, coeficientes variando entre 0,3 a 0,35.

Figura 25- Parâmetros para obtenção de fatores corretivos para retroanálise do Módulo de Elasticidade: (a) cota de profundidade rígida-h e (b) Produto  $I_s I_h$  para  $m=1$



Fonte: HARR, 1966.

Tabela 13 - Fatores de  $I_s I_h$  para carregamento na superfície ( $I_d=1$ ) de um meio de espessura finita- Placa Rígida para  $m=1$

$h/a$	$m=1$
0	0,000
0,2	0,096
0,5	0,226
1	0,403
2	0,609
3	0,711
5	0,800
7	0,842
10	0,873
$\infty$	0,946

Fonte: HARR, 1966.

### 3.3 Modelos Numéricos em Elementos Finitos

Nestes subitem são apresentados os parâmetros utilizados para realização dos modelos numéricos utilizando o ELPLA e o SAP2000.

### 3.3.1 ELPLA

Para estimar os recalques dos radiers, foi utilizado o programa computacional ELPLA Professional, versão 10.1 da GEOTEC Software. O radier foi dimensionado considerando a hipótese de placa sobre base elástica. Para melhor entendimento desta etapa, ela foi dividida em subitens.

#### 3.3.1.1 Parâmetros Geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos foram estimados por meio de correlações dos ensaios de SPT para cada bloco de forma individual. As correlações utilizadas estão apresentadas a seguir (Equação 15; Tabelas 14, 15 e 16).

- **Ângulo de Atrito (Teixeira, 1996 *apud* Cintra *et al*,2011)**

$$\phi = \sqrt{20N} + 15 \quad (25)$$

- **Peso Específico solos argilosos e arenosos (Godoy, 1972 *apud* Cintra *et al*,2011)**

Tabela 14 - Correlações entre  $N_{SPT}$  e peso específico de solos argilosos

N (golpes)	Consistência	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )
≤2	Muito mole	13
3-5	Mole	15
6-10	Média	17
11-19	Rija	19
≥20	Dura	21

Fonte: Godoy, 1972 *apud* CINTRA *et al*, 2003.

Tabela 15 - Correlações entre  $N_{SPT}$  e peso específico de solos arenosos

N (golpes)	Consistência	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )		
		Seca	Úmida	Saturada
≤5	Fofa	16	18	19
5-8	Pouco compacta	16	18	19
9-18	Medianamente compacta	17	19	20
19-40	Compacta	18	20	21
≥40	Muito compacta	18	20	21

Fonte: Godoy, 1972 *apud* CINTRA *et al*, 2003.

- **Coesão das argilas (Alonso,1983)**

Tabela 16 - Correlação entre  $N_{SPT}$  e coesão das argilas

N (golpes)	Consistência	Coesão (kPa)
<2	Muito mole	<10
2-4	Mole	10-25
4-8	Média	25-50
8-15	Rija	50-100
15-30	Muito Rija	100-200
>30	Dura	>200

Fonte: ALONSO,1983.

- **Módulo de Elasticidades**

Com base nos dois perfis de sondagens obtidos para cada bloco, foi determinado o  $N_{SPT}$  médio de cada camada que compõe cada um dos furos de sondagens.

Após determinado os perfis geotécnicos que representam o subsolo para o qual serão apurados os recalques impostos pelo bloco, estimou-se o módulo de elasticidade. Para isto, foi utilizada a metodologia apresentada por Teixeira & Godoy (1998), onde o módulo de elasticidade é representado pela Equação 26.

$$E = K \cdot \alpha \cdot N_{spt} \quad (26)$$

Onde K e  $\alpha$  são coeficientes que dependem do tipo de solo. Nesta pesquisa foram utilizados os coeficientes ( $\alpha$ ) propostos por Trofimenkof (1974) apresentados na Tabela 17. Valores de K foram determinados por Teixeira (1993) apresentados na Tabela 18.

Tabela 17 - Valores de  $\alpha$ 

Solo	$\alpha$
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: Trofimenkof (1974) *apud* TEXEIRA, 1993.

Tabela 18 - Valores do coeficiente K

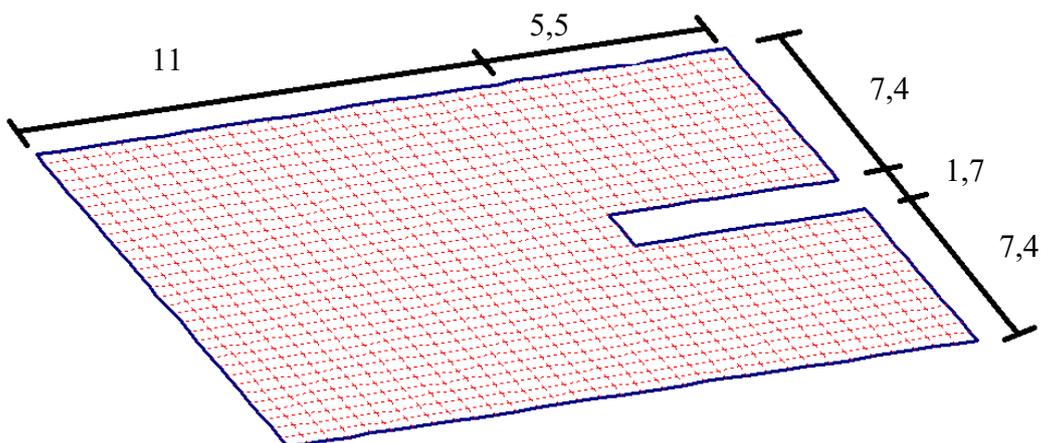
Solo	K (MPa)
Areia com pedregulho	1,1
Areia	0,9
Areia siltosa	0,7
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,3
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,2

Fonte: Texeira,1993.

### 3.3.1.2 Malha representativa do Radier e Propriedade do Elemento de Fundação

Foi criada a malha de elementos finitos que define o radier, medindo 16,50 m nos eixos X e Y. Utilizou-se intervalos constantes nos dois eixos X e Y de 0,5 m formando assim uma malha de elementos finitos com 1134 nós (Figura 26).

Figura 26 - Malha de Elementos Finitos do Radier para cálculo da deformada



Fonte: O Autor, 2019.

Como parâmetro das propriedades do elemento de fundação define-se o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do concreto, bem como a espessura da placa.

Segundo a NBR 6118 (2014) pode-se estimar o valor de módulo de elasticidade usando a

Equação 27, por meio do valor da resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ).

$$E_c = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (27)$$

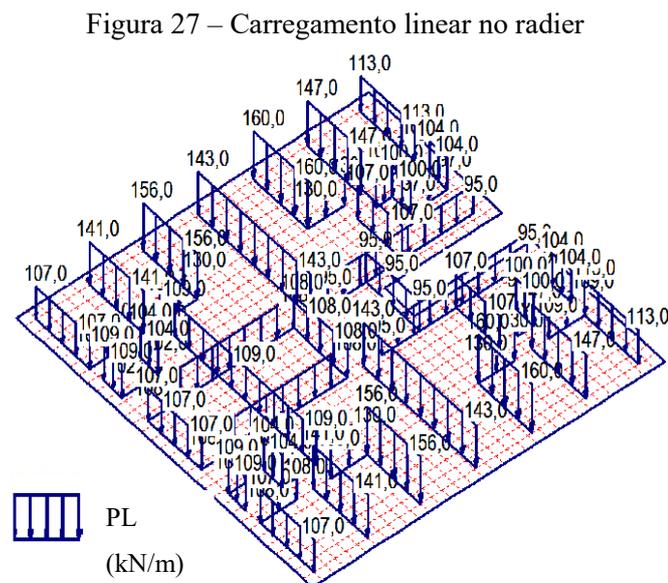
Devido à ausência dos dados de  $f_{ck}$  do concreto (controle tecnológico) utilizado no radier adotou-se o módulo de elasticidade do radier utilizado por Brandi (2004), ao qual em sua previsão utilizando o ELPLA, estimou-se  $E_c = 20000\text{MPa}$ .

Em relação ao coeficiente de Poisson, a NBR 6118 (2014) indica para tensões de compressão menores que  $0,5 f_{ck}$  e tensões de tração menores que a resistência característica à tração ( $f_{ct}$ ), o coeficiente de Poisson pode ser tomado como igual a 0,2. Segundo Almeida (2002) a experiência tem demonstrado que o coeficiente de Poisson do concreto varia entre 0,11 a 0,21. Adotou-se o valor de 0,15.

A espessura da placa definida para a previsão variou entre 0,35 m (concreto armado) e 0,30 m (concreto protendido), conforme projeto de fundações.

### 3.3.1.3 Carregamento do Radier

Após determinada a malha representativa do radier, foram postas as cargas lineares oriundas das paredes de concreto. Os carregamentos lineares finais variaram de 60 a 160kN/m. A Figura 27 representa o elemento de fundação com a imposição dos carregamentos lineares, dados estes obtidos com os carregamentos apresentados para a estrutura na seção 3.1.



Fonte: O Autor, 2019.

### 3.3.2 SAP 2000

Foi utilizado neste trabalho modelo numérico baseado em Método de Elementos Finitos utilizando o SAP 2000 na versão 20.0. Para organizar a análise dividiu-se em subitens.

#### 3.3.2.1 Definição dos Materiais

A primeira etapa da modelagem numérica foi definir as propriedades dos materiais. Dessa forma foram criados 4 materiais e as suas propriedades estão definidas na Tabela 19. Para estimativa dos módulos de elasticidade dos materiais utilizou-se a Equação 27.

Tabela 19 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo numérico no SAP2000

Material	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	f <sub>ck</sub> (MPa)	Coefficiente de Poisson	Modulo de Elasticidade (MPa)	Tipo de Elemento de Área	Espessura de Membrana
Radier	25	35	0,2	33130	Placa Grossa	30/35
Laje	25	25	0,2	28000	Placa Fina	10
Parede 15	25	25	0,2	28000	Casca Fina	15
Parede 10	25	25	0,2	28000	Casca Fina	10

Fonte: O Autor, 2019.

Considerou-se nos modelos numéricos as propriedades não lineares de tensão x deformação dos materiais especificados. Para isto, utilizaram-se os digramas de tensão no concreto conforme prescrito na NBR 6118 (2014). Os diagramas para o concreto com f<sub>ck</sub>=25 MPa e f<sub>ck</sub>=35 MPa, ambos apresentados na Figura 28.a e b, respectivamente.

Também foi considerada no modelo numérico a variação das propriedades do concreto dependentes do tempo: variação de módulo de elasticidade; fluência e retração. Os fatores utilizados foram os indicados pelo Comitê Euro –Internacional Du Beton - CEB-FIP 90.

Segundo a CEB-FIP 90, a resistência à compressão do concreto em uma idade  $t$  depende do tipo de cimento utilizado, temperatura e condições de cura, podendo ser determinado o valor de resistência à compressão simples em uma idade  $t$ ,  $f_{cm(t)}$ , por meio da Equações 28 e 29.

$$f_{cm(t)} = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (28)$$

Para:

$$\beta_{cc}(t) = e^{s[1-\sqrt{\frac{28}{t}}]} \quad (29)$$

Onde:

$f_{cm}(t)$ : resistência média à compressão do concreto na idade  $t$

$\beta_{cc}(t)$ : coeficiente dependente da idade do concreto

$f_{cm}$ : resistência média à compressão do concreto aos 28 dias

$s$ : coeficiente que depende do tipo de cimento

$t$ : Idade do concreto

As análises de retração envolvem como variáveis a umidade relativa do ar e tipo de cimento. Dessa forma a CEB-FIP 90 indica a determinação do coeficiente de retração por meio das Equação 30.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (30)$$

Onde:

$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ :retração total

$\varepsilon_{cso}$ : Coeficiente de retração determinado pela Equação 31

$\beta_s(t - t_s)$ : coeficiente que indica o desenvolvimento da retração com o tempo, onde  $t$  é a idade do concreto e  $t_s$  é idade de início da retração, determinados pela Equação 34.

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \quad (31)$$

Onde  $\varepsilon_s(f_c)$  e  $\beta_{RH}$  podem ser determinados por meio das Equações 32 e 33

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[ 160 + 10 \cdot \beta_{SC} \left( 9 + \frac{f_{cm}}{10} \right) \right] \cdot 10^{-6} \quad (32)$$

$$\beta_{RH} = -1,55 \cdot \left( \frac{RH}{100} \right)^3 \quad (40\% \leq RH < 99\%) \quad (33)$$

$$\beta_s(t - t_s) = \left[ \frac{\frac{t-t_s}{t_1}}{350 \left( \frac{h}{h_0} \right)^2 + \frac{t-t_s}{t_1}} \right]^{0,5} \quad (34)$$

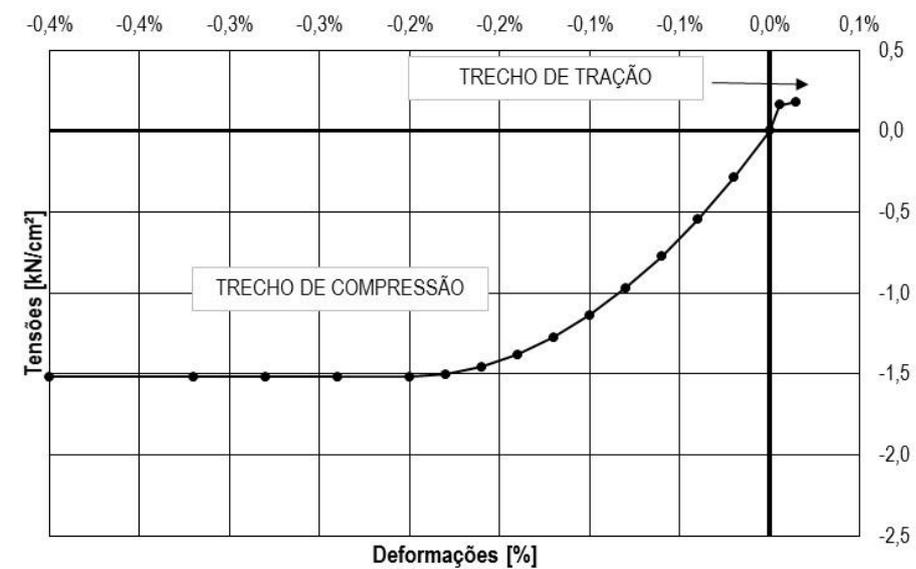
Onde:

$\beta_{SC}$ : Fator dependente do tipo de cimento utilizado;

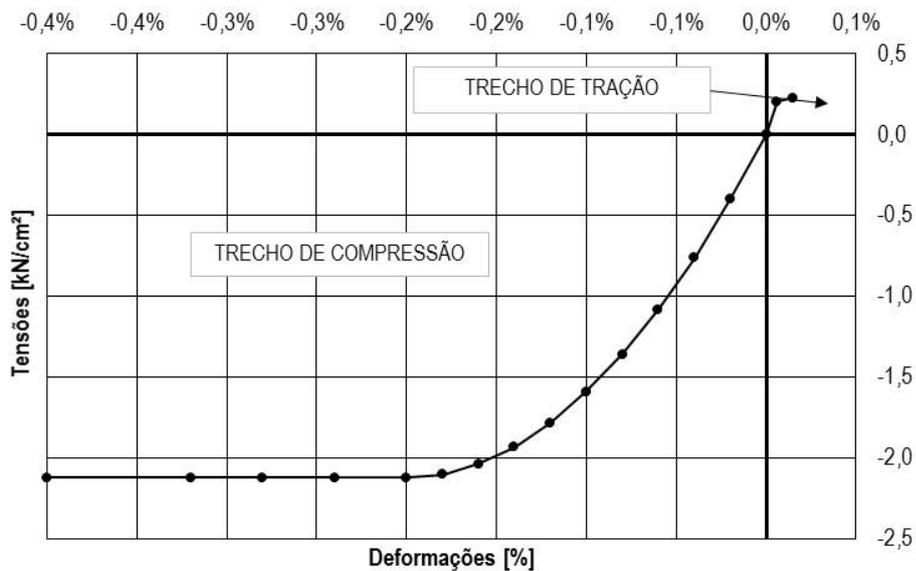
$RH$ : Umidade relativa do ar

A Tabela 20 apresenta os fatores  $s$  e  $\beta_{sc}$  para os tipos de cimentos indicados pela CEB-FIP-90. Utilizou no modelo numérico o fator  $s$  de 0,25 e  $\beta_{sc}$  de 5, considerando para determinação da fluência e retração, fatores para cimento com endurecimento normal. A umidade relativa do ar considerada foi de 50%.

Figura 28 – Diagramas de tensão para (a)  $f_{ck}= 25$  MPa e (b)  $f_{ck}= 35$  MPa



(a)



(b)

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 20 - Fatores indicados pela CEB-FIP-90 para determinação dos parâmetros dependentes do tempo

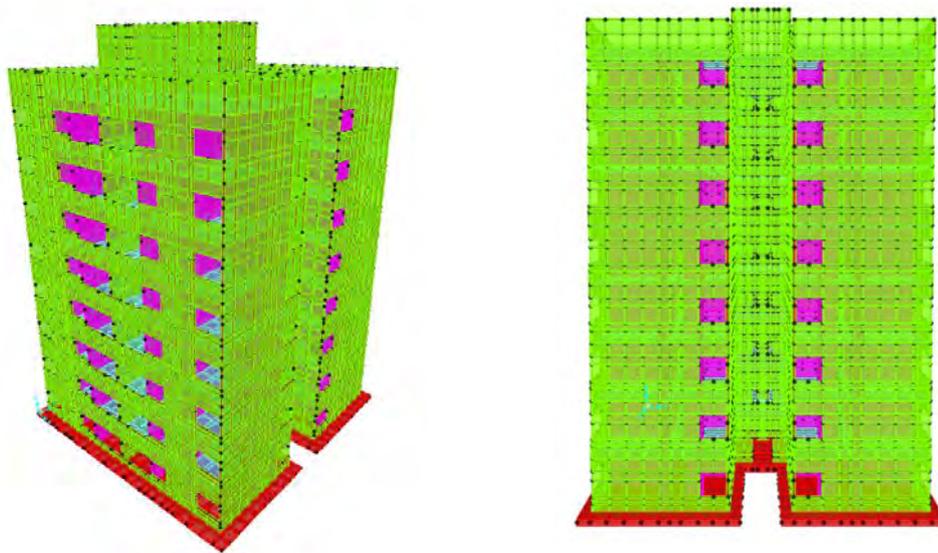
Tipo de Cimento	Fator $s$	Fator $\beta_{sc}$
Cimento de endurecimento lento	0,38	4
Cimento de endurecimento normal	0,25	5
Cimento de endurecimento rápido	0,20	8

Fonte: CEB-FIP-90.

### 3.3.2.2 Representação do Edifício no modelo numérico

Após definidos os parâmetros para os elementos de área, o bloco foi modelado em elementos finitos seguindo o projeto arquitetônico da edificação, onde as dimensões dos elementos foram variáveis de forma retangular. Totalizaram-se para realização do modelo numérico em elementos finitos, 16189 nós com 17576 elementos de área. A Figura 29 representa a visão geral do modelo numérico final criado no SAP2000.

Figura 29 - Representação do modelo numérico do SAP2000



Fonte: O Autor, 2019.

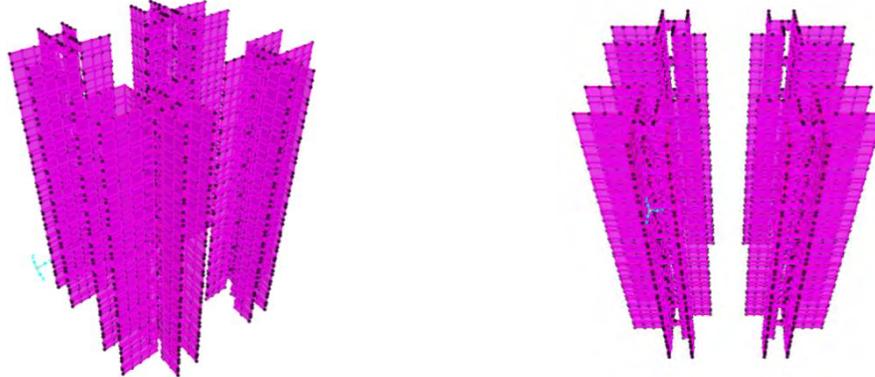
A Figura 30 apresenta a malha de elementos finitos representativa das paredes executadas com 0,15m, formando assim as paredes externas, hall de entrada, as divisões entre os apartamentos e a caixa d'água. A Figura 31 apresenta os elementos que compõem as paredes internas (0,1m) dos apartamentos e por fim, a Figura 32 apresenta os elementos que compõem as lajes do modelo numérico.

Figura 30 – Malha de elementos finitos das paredes de concreto executadas com 0,15 m



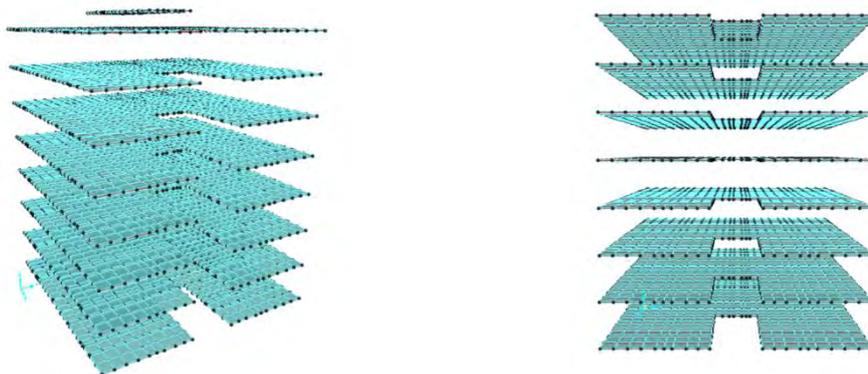
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 31 - Malha de elementos finitos das paredes de concreto executadas com 0,1 m



Fonte: O Autor, 2019.

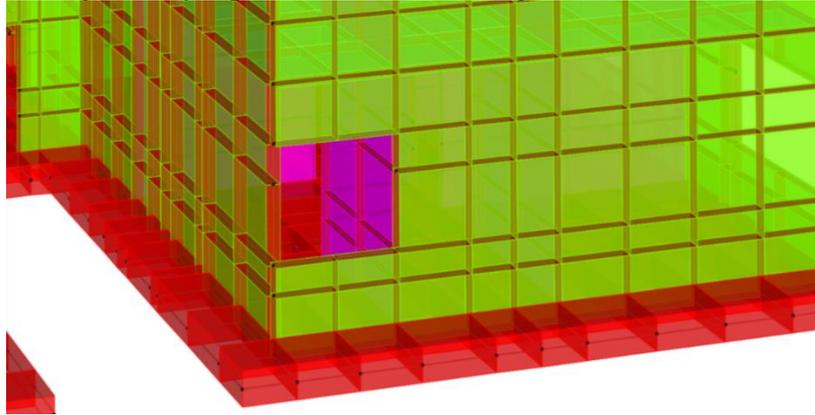
Figura 32 - Malha de elementos finitos das lajes



Fonte: O Autor, 2019.

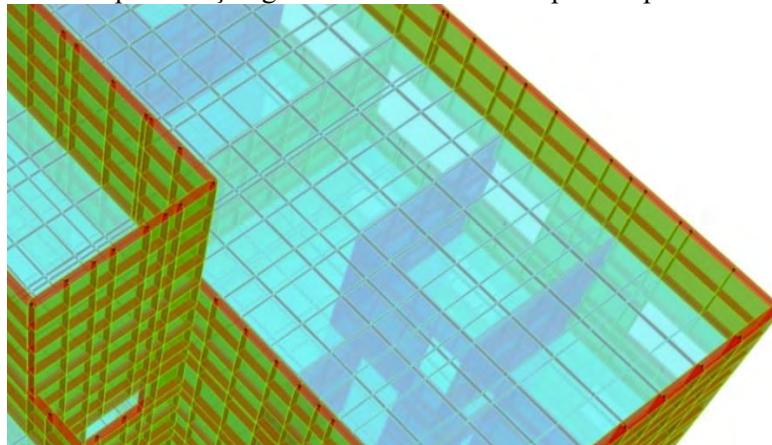
A Figura 33 e 34 apresenta reproduções do SAP2000 com seções na parte inferior e superior, respectivamente, do modelo numérico elaborado. Na parte inferior é possível verificar detalhes dos elementos finitos do radier e das paredes externas próximos a entrada do bloco e no detalhe superior é possível visualizar detalhes da platibanda, parte da caixa d'água.

Figura 33 – Representação gráfica do SAP 2000 na parte inferior do modelo numérico



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 34 - Representação gráfica do SAP 2000 na parte superior do modelo numérico



Fonte: O Autor, 2019.

### 3.3.2.3 Recurso de Estágio Construtivo

Na modelagem numérica utilizou-se o caso de carga de estágio construtivo não linear (*nonlinear staged construction*). Para utilização da hipótese de carregamento foi necessário atribuir a cada etapa construtiva um grupo e definir a duração de cada evento. A metodologia construtiva e duração dos eventos estão apresentadas no Tabela 21..

Entende-se que a adoção de uma metodologia construtiva representativa para todos os blocos é uma aproximação, visto que as velocidades de execução variaram no decorrer da obra como um todo. Os primeiros blocos construídos apresentaram de maneira geral maiores tempos de execução devido à fase inicial de treinamento e adaptação da montagem e desmontagem das fôrmas das paredes de concreto.

Outra aproximação realizada foi a indicação de um tempo de execução do radier. Na obra em questão, os raders começaram a serem executados com antecedência bem maior do que a execução e montagem das fôrmas. Isto porque, as execuções dos elementos de fundações se iniciaram antes da preparação das ruas de acessos e as montagens das fôrmas e concretagem

das mesmas foram realizadas após a execução destes acessos para facilitar o transporte e a passagem dos caminhões com concreto.

Tabela 21 - Parâmetros utilizados no modelo de carregamento em estágio construtivo

Step	Etapa	Grupo	Descrição do Serviço	Duração (Dias)	Contagem acumulada (Dias)
1	Radier	Grupo 1	Execução do Radier	60	60
2	1E+1C	Grupo 2	Montagem da forma esquerda do térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;	1	61
3	1D	Grupo 3	Montagem da forma direita do térreo e concretagem no final do dia;	1	62
4	2E+2C	Grupo 4	Montagem da forma esquerda do 1º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;	1	63
5	2D	Grupo 5	Montagem da forma direita do 1º pav. e concretagem no final do dia;	1	64
6	3E+3C	Grupo 6	Montagem da forma esquerda do 2º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;	1	65
7	3D	Grupo 7	Montagem da forma direita do 2º pav. e concretagem no final do dia;	1	66
8	4E+4C	Grupo 8	Montagem da forma esquerda do 3º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;	1	67
9	4D	Grupo 9	Montagem da forma direita do 3º pav. e concretagem no final do dia;	1	68
10	5E+5C	Grupo 10	Montagem da forma esquerda do 4º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;	1	69
11	5D	Grupo 11	Montagem da forma direita do 4º pav. e concretagem no final do dia;	1	70
12	6E+6C	Grupo 12	Montagem da forma esquerda do 5º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;	1	71
13	6D	Grupo 13	Montagem da forma direita do 5º pav. e concretagem no final do dia;	1	72
14	7E+7C	Grupo 14	Montagem da forma esquerda do 6º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;	1	73
15	7D	Grupo 15	Montagem da forma direita do 6º pav. e concretagem no final do dia;	1	74
16	8E+8C	Grupo 16	Montagem da forma esquerda do 7º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;	1	75
17	8D	Grupo 17	Montagem da forma direita do 7º pav. e concretagem no final do dia;	1	76
18	PLATIBANDA	Grupo 18	Montagem e concretagem da estrutura da Platibanda;	1	77
19	CAIXA	Grupo 19	Montagem e concretagem da estrutura da Caixa d'água;	1	78

Fonte: O Autor, 2019.

### 3.3.2.4 Determinação dos coeficientes de reação

Com base nos módulos de elasticidades retroanalizados foi obtido o coeficiente de reação volumétrico, apresentado por meio da Equação 35.

$$K = \frac{E}{B \cdot (1 - \nu^2) \cdot I_s \cdot I_h \cdot I_d} \quad (35)$$

Sendo:

$\nu$ : coeficiente de Poisson;

$E$ : módulo de elasticidade;

$K$ : coeficiente de reação;

$B$ : menor dimensão do elemento

$I_s$ : fator de forma do elemento de fundação;

$I_h$ : fator de espessura da camada compressível;

$I_d$ : fator de embutimento da camada

Dessa forma a expressão para a determinação do coeficiente de reação vertical, apresentado na Equação 35, pode ser utilizado com adoção dos fatores que dependem da geometria da placa e profundidade da camada compressível.

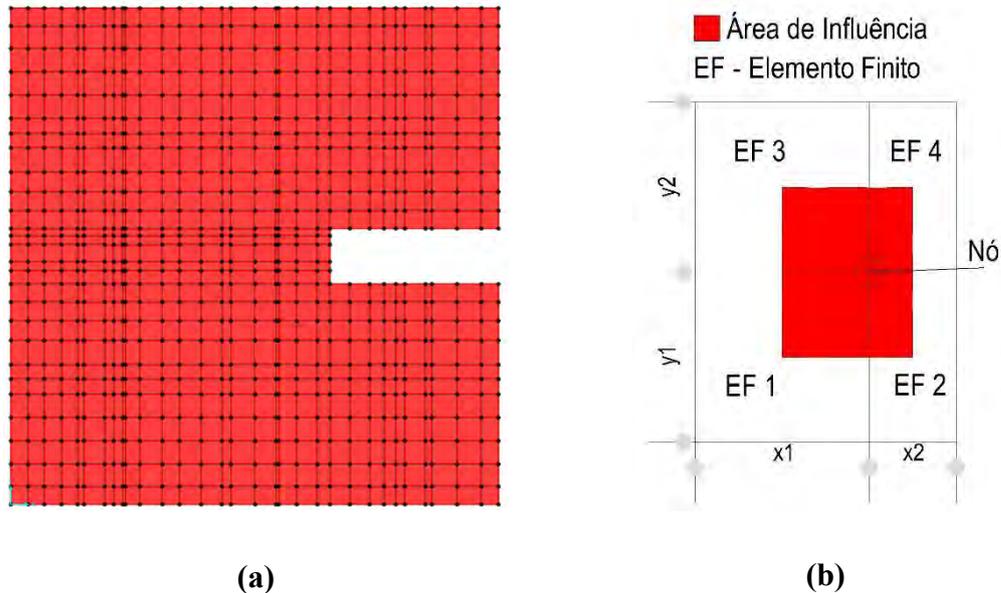
Depois de realizado a modelagem da malha de elementos finitos que define a placa de radier, determinou-se as áreas de influência dos nós e momentos de inércia nas direções X e Y de cada elemento da fundação. A Figura 35.a e b apresenta a malha de elementos finitos do radier e representação gráfica da determinação da área de influência de cada nó.

Determinadas as áreas de influência e os momentos de inércia dos nós e com a adoção de um coeficiente de reação volumétrico, que será estudado no Capítulo 5 deste trabalho, foram determinadas as molas lineares de translação U1, U2 e U3 e de rotação R1 e R2, denominados graus de liberdade, conforme indicado no Quadro 5.

Primeiramente foi calculado a mola linear de translação vertical (U3) multiplicando a área de influência de cada nó que forma a placa de radier pelo coeficiente de reação vertical. As molas de translação nos eixos U1 e U2 foram determinadas multiplicando a mola de translação U3 pelo coeficiente de Poisson adotado como representativo do solo, que foi

considerado o valor de 0,3. Por fim, foram determinadas as molas de rotação R1 e R2 multiplicando os momentos de inércia da área de influência dos nós nos eixos X e Y pela área de influência do mesmo.

Figura 35 – (a) Malha de elementos finitos do radier e (b) representação gráfica de área de influência do nó



Fonte: O Autor, 2019.

Quadro 5 - Determinação dos graus de Liberdade dos nós

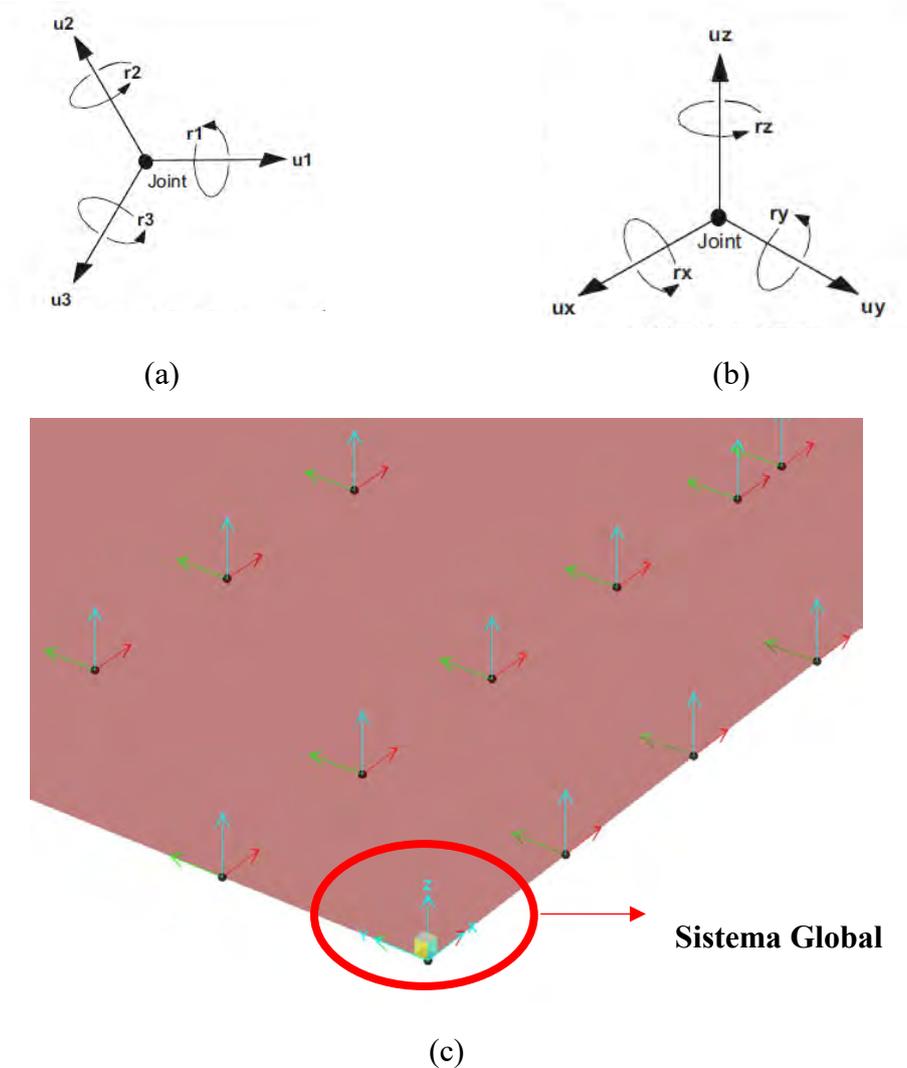
Graus de Liberdade	Método de cálculo
U1	U3 x Coeficiente de Poisson
U2	U3 x Coeficiente de Poisson
U3	Área de influência x coeficiente de reação volumétrico
R1	Momento de Inercia em "X" x coeficiente de reação volumétrico
R2	Momento de Inercia em "Y" x coeficiente de reação volumétrico

Fonte: O Autor, 2019.

Os graus de liberdades no SAP2000 são referidos em um sistema local de coordenada que pode ou não corresponder com o sistema de coordenada global utilizado no modelo numérico. No caso do modelo em estudo o sistema de coordenada utilizado nos graus de liberdade correspondeu ao sistema de coordenadas global de todo o modelo numérico. Sendo assim os graus de liberdade U1, U2 e U3, correspondem respectivamente aos eixos X, Y e Z, bem como os graus de liberdade R1 e R2, corresponde às rotações dos eixos X e Y, respectivamente. A Figura 36.a e b apresentam os graus de liberdade no sistema local e no sistema global, respectivamente. A Figura 36.c apresenta o sistema de coordenadas locais dos

nós utilizados no modelo numérico e a indicação do sistema global de coordenadas.

Figura 36 – Graus de Liberdade em Sistema de coordenada (a) Local e (b) Global e (c) sistema de coordenadas utilizadas no modelo numérico



Fonte: (a) e(b) SAP 2000; (c) O Autor, 2019.

### 3.4 Análise de Componentes Principais - ACP

Foram realizadas duas Análises de Componentes Principais – ACP utilizando o software Statistica desenvolvido pela StatSoft. Dentre as opções de Técnicas Exploratória Multivariada (*Multivariate Exploratory Techniques*), utilizou-se a ferramenta de Componentes Principais e Análises de Classificação (*Principal Components & Classification Analysis*).

As ACPs foram realizadas como forma de investigar, visto a quantidade de dados disponíveis, variáveis responsáveis pelo comportamento de uma variável específica. Dessa forma a primeira ACP realizada (apresentada no Capítulo 4) indicou quais variáveis foram mais

significantes para o desenvolvimento dos recalques médios medidos, considerando:

- tipos de Placa: Concreto armado ou protendido;
- tipo de Solo: Classificação geotécnica predominante do perfil;
- recalque: Leituras finais das medições de recalque;
- altura da camada compressível: Altura do perfil geotécnico considerando a camada rígida com  $N_{SPT} > 30$  golpes / 0,3 m;
- corte e aterro: Movimentos de terraplanagem indicados com cotas positivas os blocos que foram realizados serviços de aterro e em cotas negativas os movimentos de corte.

Na segunda ACP realizada (apresentada no Capítulo 5) foi indicada quais variáveis influenciaram mais nas deformações por fluência, considerando:

- velocidade de deformação de fluência;
- recalque Final Medido;
- dias entre as leituras;
- profundidade de Camada Compressível;
- tensão em que foram realizadas as leituras.

Os dados foram normalizados utilizando a expressão apresentada na Equação 36. O procedimento de normalização tem como finalidade indicar na ACP apenas dados com a mesma unidade. Quando os dados são adicionados na ACP após a normalização, pode-se avaliar a covariância entre as variáveis, visto que as mesmas estão na mesma unidade.

$$X'i = \frac{Xi - \bar{X}}{DP} \quad (36)$$

Onde:

$X'i$ : valor normalizado da variável;

$Xi$ : valor bruto da variável;

$\bar{X}$ : média da variável;

DP: Desvio padrão da variável.

Após normalizados os dados e utilizado a ferramenta de Componentes Principais e Análises de Classificação do Statistica, avaliou-se, por meio dos gráficos de *scores* e *pesos* gerados na ACP, a associação das variáveis em estudo.

#### 4 ESTUDO DE CASO - MEDIÇÃO DE RECALQUES

Com base nos dados das medições de recalque, estimativa de carregamento, parâmetros obtidos nas sondagens de simples reconhecimento, movimentos de terra, entre outros dados, é apresentado neste capítulo avaliação dos recalques dos elementos de fundações (placa em radier liso) executados com o sistema construtivo em paredes de concreto.

Inicialmente é apresentada a análise de componentes principais como forma de avaliar quais fatores têm maiores influência nos desenvolvimentos dos recalques do bloco em estudo. Em seguida é apresentada a evolução dos recalques medidos na obra, levando em considerações parâmetros de deformação como distorções angulares, velocidades de recalque, velocidades de carregamento, entre outros. Na terceira parte é apresentada os possíveis motivos do desenvolvimento de leituras negativas de recalque em alguns dos blocos em estudo. Em seguida, é apresentado com base na análise dos recalques medidos, o possível surgimento do efeito de superposição dos carregamentos dos blocos. Por fim, com base nos dados apresentados, é realizada avaliação de parâmetros de interação solo estrutura.

A análise realizada neste capítulo torna-se essencial para desenvolvimento da engenharia geotécnica e de fundações na Região Metropolitana do Recife e em demais projetos com a utilização de raders como elemento de fundação, e principalmente, quando estes elementos forem associados ao sistema construtivo de paredes de concreto.

##### 4.1 Análise de Componentes Principais - ACP

Como forma de avaliar quais variáveis foram mais significantes para o desenvolvimento dos recalques médios medidos, realizou-se Análise de Componentes Principais– ACP.

As duas componentes principais indicaram variância percentual explicada de 64,2%, conforme apresentado na Tabela 22. A ACP indicou porcentagem de variância explicada de 39,5% para a componente 01 e 24,7% para a componente 02.

Tabela 22 - Autovalores da Análise de Componentes Principais

<b>Componentes</b>	<b>Autovalores</b>	<b>Autovalores Acumulado</b>
Componente 01	39,5%	39,5%
Componente 02	24,7%	64,2%

Fonte: O Autor, 2019.

A Figura 37.a apresenta o gráfico de *pesos* indicadas na ACP. Destaca-se que entre as variáveis em estudo, a que apresentou maior covariância com os recalques foi a variável “corte e aterro”. Tal covariância indica que nos blocos que foram executados serviços de aterro, desenvolveram-se recalque de maior magnitude como indicado no gráfico de *escores* apresentado na Figura 37.b.

Se observado, por exemplo, o Bloco 01 da Quadra 19 e Bloco 02 da Quadra 30, blocos estes que obtiveram maiores recalques médios medidos, os *escores* mais próximos contribuindo para maiores pesos das variáveis, conforme destacado na Figura 37.b.

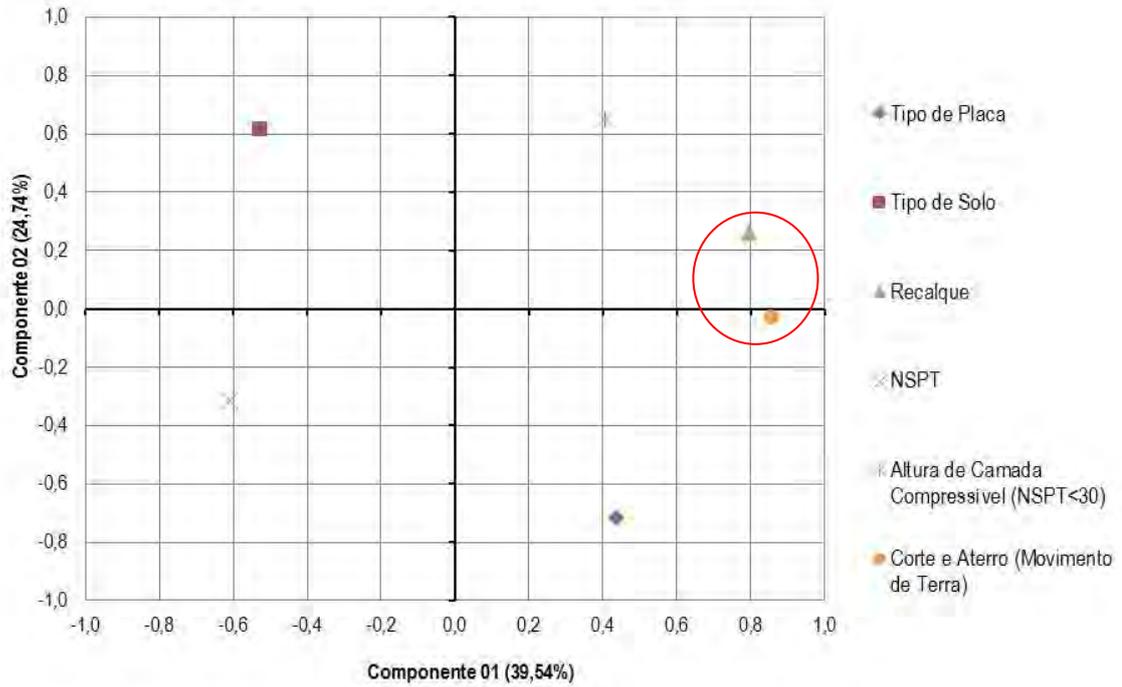
Também foi observado que a variável “ $N_{SPT}$ ” encontrou-se no lado oposto na análise de *pesos* da variável “recalque” e “corte e aterro”, o que indica que para os maiores valores de  $N_{SPT}$  médio determinados para os perfis de sondagens, os recalques médios medidos foram de menores magnitudes.

Analisando separadamente a componente principal 01, visto a difícil apresentação da grande quantidade de dados da ACP definida pelas duas componentes, observa-se que os *escores* da análise dos blocos construídos em seção de aterro são em geral opostas as seções de corte, o que contribuirá para padrão apresentado no gráfico de *pesos*, ambos apresentados na Figura 38.

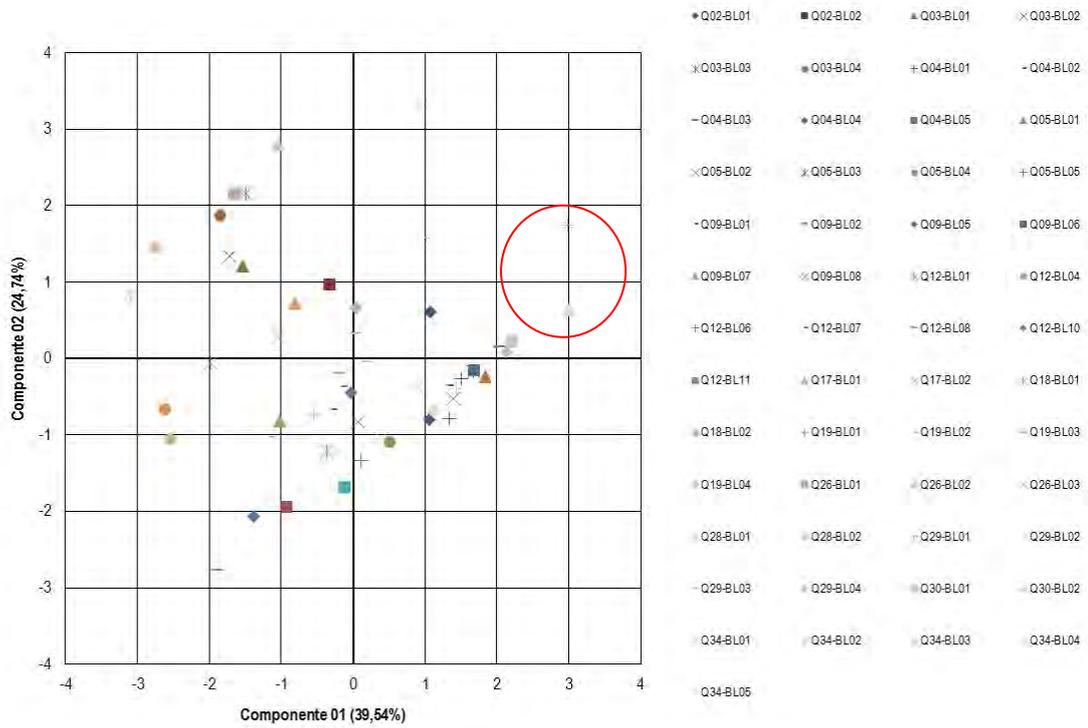
A ACP indicou a importância da variável “corte e aterro” para a avaliação do desenvolvimento dos recalques dos blocos do empreendimento em estudo. Como forma de avaliação geral inicial, foi apresentado na Figura 39.a e b, destacando-se as áreas que foram executados serviços de corte, denominada de áreas de corte e foi indicado os recalques finais médios obtidos até as últimas leituras de recalque.

Na totalidade 31 blocos estudados (aproximadamente 50%) foram construídos em áreas na sua totalidade corte. Todos estes blocos tiveram recalques finais médios menores que 9 mm, e em sua grande maioria (87%), menor que 5 mm, conforme apresentado na Figura 38.a. Já nas áreas de aterro, os recalques finais médios medidos foram em geral maiores que 10 mm, atingindo valores de até 35 mm, conforme apresentado na Figura 39.b. A análise da Figura 39 vem a confirmar o que foi observado na ACP.

Figura 37–ACP: (a) pesos e (b) escores



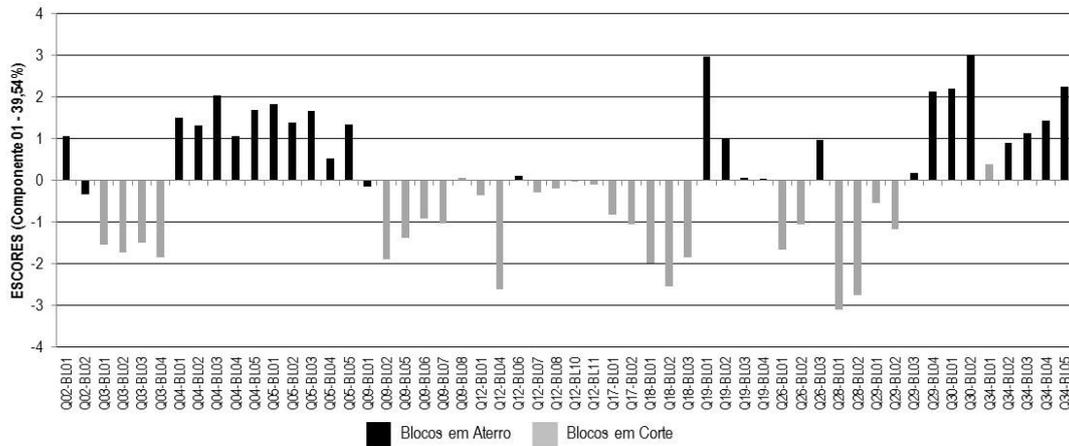
(a)



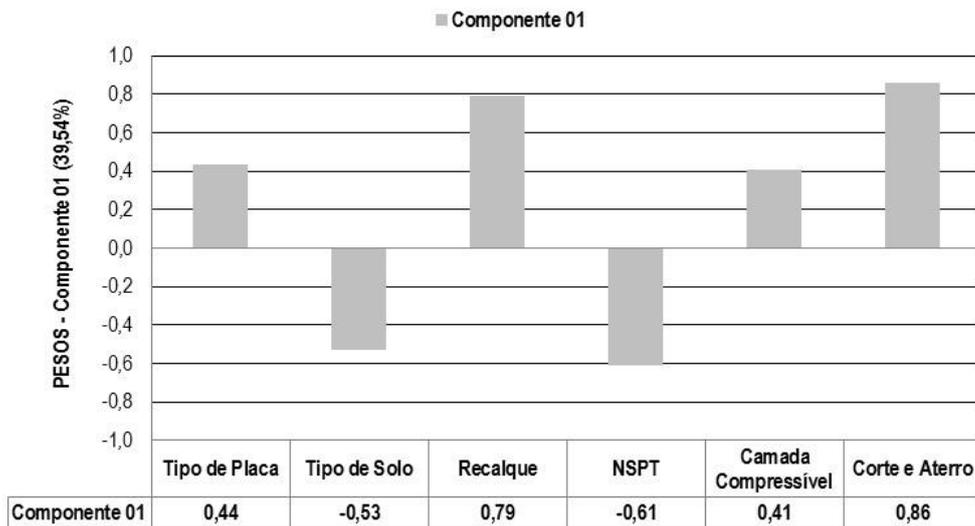
(b)

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 38 - ACP (Componente 01): (a) pesos e (b) escores



(a)



(b)

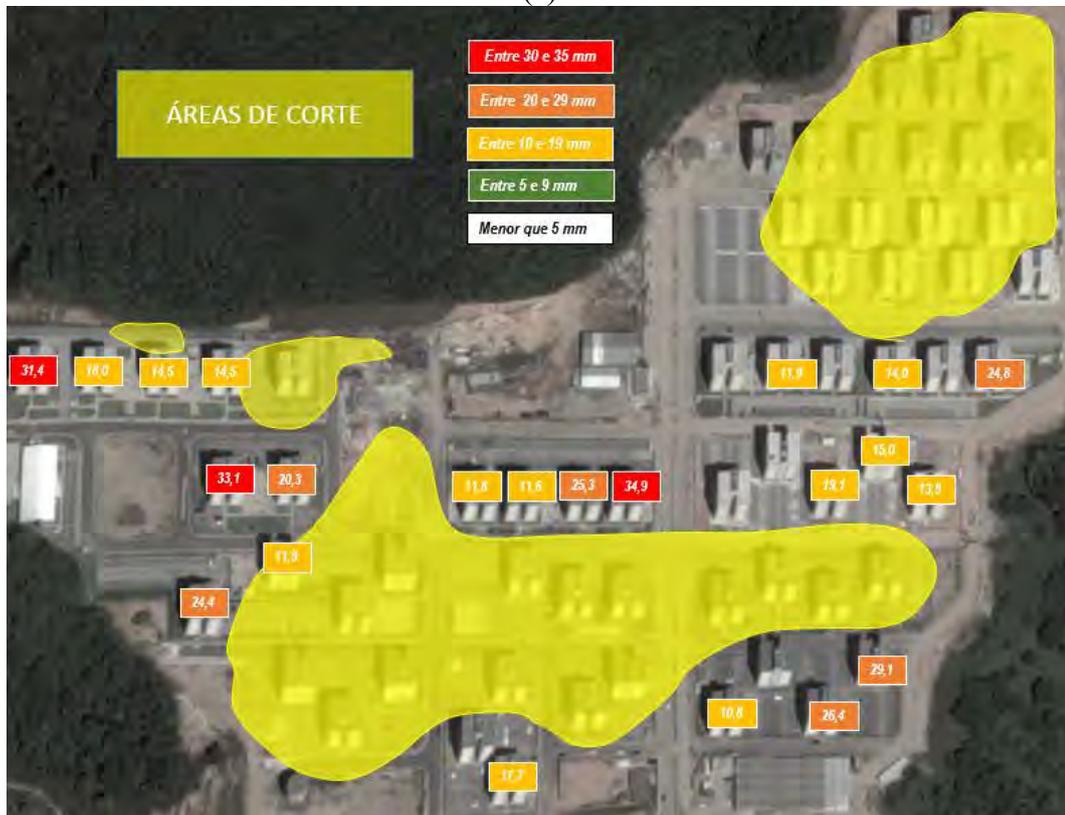
Fonte: O Autor, 2019.

Cabe destacar que não foi indicado neste trabalho o controle tecnológico de compactação das camadas de aterro para análise de grau de compactação, o qual poderia mostrar a influência desses parâmetros de execução dos serviços de aterro nos desenvolvimentos dos recalques. Não foi possível determinar como ocorreu o movimento de terra, que indicaria as regiões nas quais as massas de solos cortadas foram recompactadas. Também não foi indicado se houve déficit de material, isto é, se foi utilizado de áreas de empréstimo em jazidas da região.

Figura 39 – Indicação de recalques médios finais medidos (a) menores que 10mm; (b) maiores que 10mm



(a)

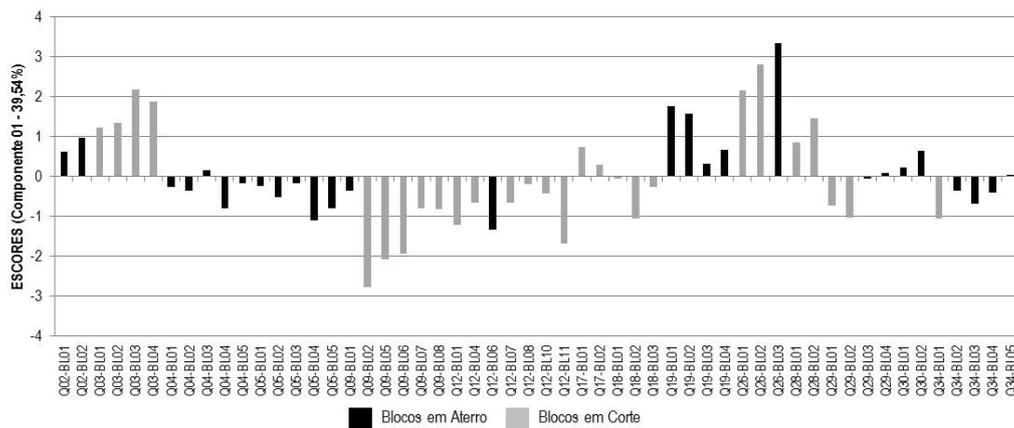


(b)

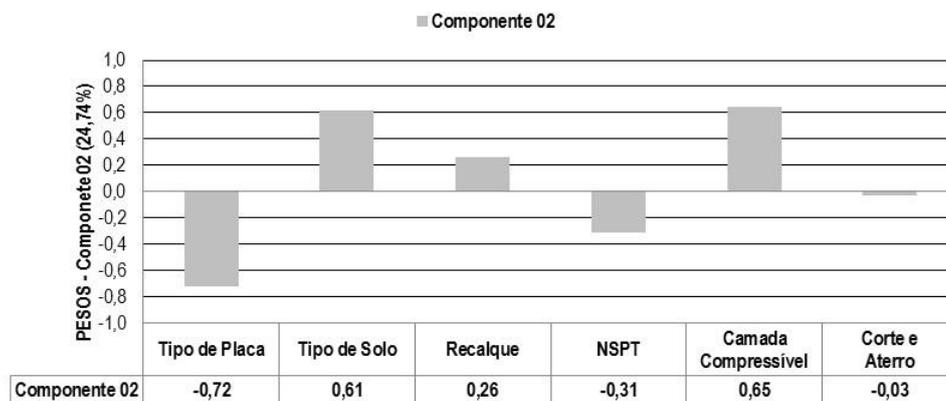
Fonte: O Autor, 2019.

Analisando separadamente a componente principal 02, observa-se que os *escores* da análise dos blocos construídos em seção de aterro não apresentaram correlações quando comparados com as seções de corte. A análise do gráfico de *pesos*, apresentado na Figura 40.b indica que as variáveis que se correlacionaram foram “tipo de solo” e “camada compressível”. Dessa forma, destacou-se no gráfico de *escores* os tipos de solos predominantes nas sondagens de simples de reconhecimento, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 40 - ACP (Componente 02): (a) pesos e (b) escores



(a)



(b)

Fonte: O Autor, 2019.

É possível observar que os perfis indicados como “argila siltosa” apresentaram de maneira geral escores opostos aos perfis indicados como “silte argiloso”, e nos perfis indicados como “argilas siltosa” foram definidas as maiores camadas compressíveis, como por exemplo os Blocos 02 e 03 da Quadra 26, que apresentaram altura de camada compressível de 10m e 12m, respectivamente.

Figura 41 – Destaque de escores por tipo de solo



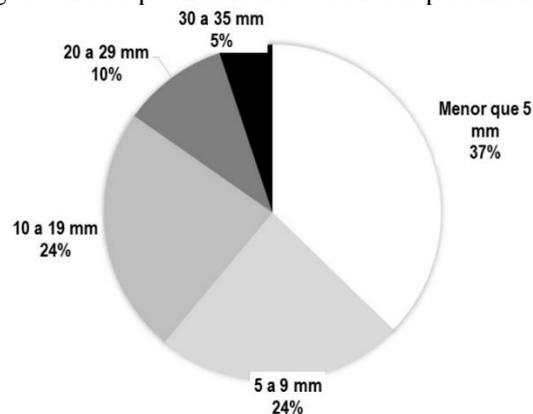
Fonte: O Autor, 2019.

#### 4.2 Evolução dos Recalques Medidos

Como forma de organizar a análise da evolução dos recalques medidos, dividiu-se os blocos em 5 intervalos com base no recalque médio medido na última leitura de cada bloco, onde a frequência relativa destes recalques foi apresentada na Figura 42. No Anexo A estão apresentados os recalques mínimos, médios e máximo na última leitura com destaque dos blocos em seções de aterros e cortes.

- Grupo 01: Blocos com leituras de recalque médio entre 30 mm e 35 mm (5%);
- Grupo 02: Blocos com leituras de recalque médio entre 20 mm e 29 mm (10%);
- Grupo 03: Blocos com leituras de recalque médio entre 10 mm e 19 mm (24%);
- Grupo 04: Blocos com leituras de recalque médio entre 5 mm e 9 mm (24%);
- Grupo 05: Blocos com leituras de recalque médio menor que 5 mm (37%);

Figura 42-Frequência relativa de recalques medidos

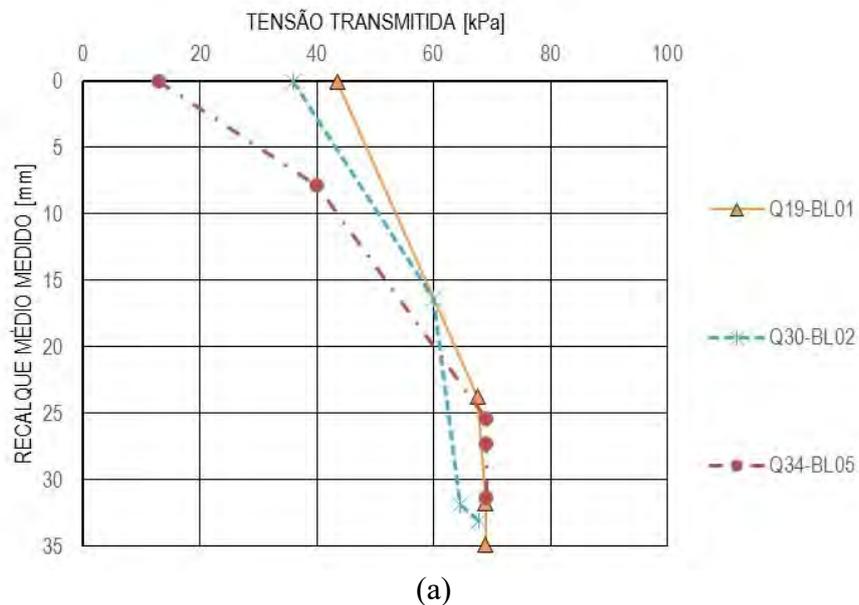


Fonte: O Autor, 2019.

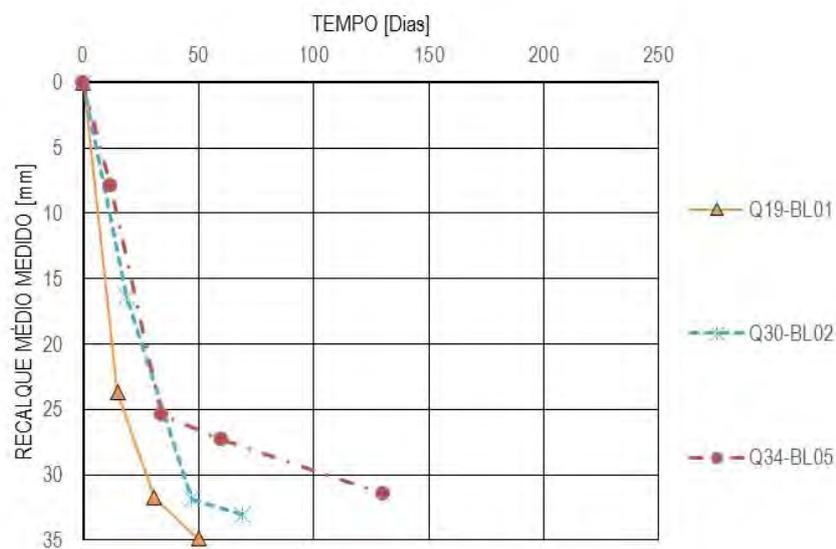
#### 4.2.1 Grupo 1

Para os blocos que em suas medições foram desenvolvidos recalques médios entre 30 mm e 35 mm, denominado Grupo 1, a evolução dos recalques medidos, com base no aumento da tensão transmitida e do tempo é apresentada nas Figuras 43.a e b, respectivamente. Os blocos pertencentes a esse grupo são: Quadra 19 – Bloco 01; Quadra 30 – Bloco 02; e Quadra 34 – Bloco 05. Houve erros de leitura no pino de recalque O e P do Bloco 02 da Quadra 30 e nos pinos K e N do bloco 05 da Quadra 34. Todos os blocos deste grupo foram executados sobre aterros.

Figura 43 – Desenvolvimento do recalque médio medido em função da (a) tensão transmitida e do (b) tempo (Grupo 01)



(a)



(b)

Fonte: O Autor, 2019.

A análise do comportamento do Bloco 01 da Quadra 19 indica desenvolvimento de recalque médio de 23,7 mm na primeira leitura realizada com tensão transmitida estimada de 67,5 kPa. Com aumento de pequena parcela de tensão transmitida estimada, totalizando 68,9 kPa, os recalques continuaram progredindo para leitura média de 31,8 mm e, em seguida, 34,9 mm. Sendo assim, constata-se que para tensões praticamente constantes (mesma etapa construtiva), houve o desenvolvimento de recalques consideráveis, que ocorreram com o tempo, indicando influência da camada compressível.

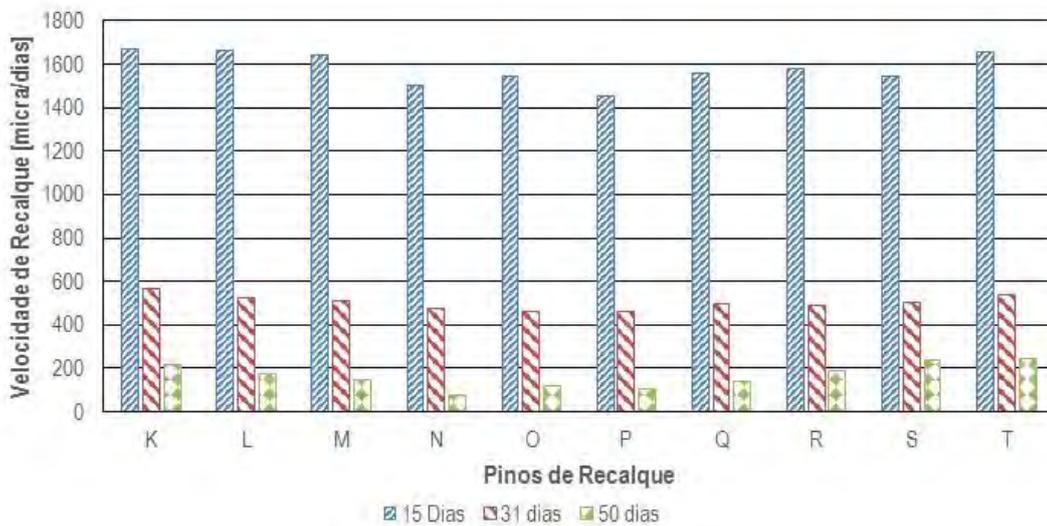
A leitura inicial de recalque deste bloco que indica o ponto “zero” da medição foi realizada quando o bloco estava com o quinto andar completo executado, o que corresponde a um carregamento estimado de 12040 kN (65% do carregamento total). Desse modo entende-se que grande parte dos recalques não foram observados nas leituras. Visto que neste bloco foram observados os maiores recalques e que ainda, grande parcela do desenvolvimento dos recalques não foi observada pelo tardio início das leituras, presume-se que entre todos os blocos estudados, este foi o que apresentou as maiores deformações. Como observado na ACP, o principal fator que explicou os maiores desenvolvimentos de recalque foi o movimento de terraplanagem, e no mesmo, foi executado um aterro de aproximadamente 5 m de altura.

Cabe destacar que as maiores velocidades de recalques aconteceram no Bloco 01 da Quadra 19 e foram as maiores observadas em todo o empreendimento. O maior valor de velocidade média medido dos pinos foi de 1580 micra/dia, que aconteceu entre as primeiras leituras de recalque. A Figura 44.a apresenta a velocidade média de recalque de cada pino deste bloco. É possível perceber que as velocidades de recalque diminuíram com a passar do tempo, conforme apresentado na Figura 44.a, e que, para este bloco, as velocidades de recalque dos pinos são próximas, indicando deformação uniforme do radier. Na Figura 44.b é indicado juntamente com a velocidade de recalque, as velocidades de carregamento. Entende-se que as altas velocidades de recalque são influenciadas pelas altas velocidades de carregamento do sistema em paredes de concreto.

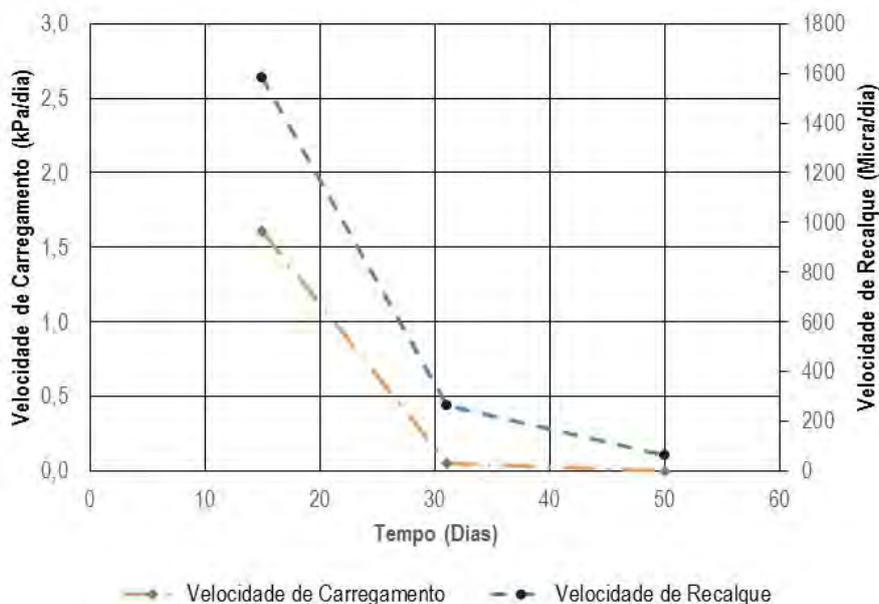
Alonso (2011) indica para prédios em fase de construção, velocidades de recalque normais de até 200 micra/dia, o que torna as velocidades de recalque encontradas fora dessas perspectivas. Entende-se que a alta velocidade de carregamento imposto pelo sistema construtivo em paredes de concreto gera maiores velocidades de recalque e que assim, há a necessidade de serem mais bem estudados parâmetros específicos para esse sistema

construtivo.

Figura 44–(a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de Velocidade de Carregamento do Bloco 01 da Quadra 19



(a)



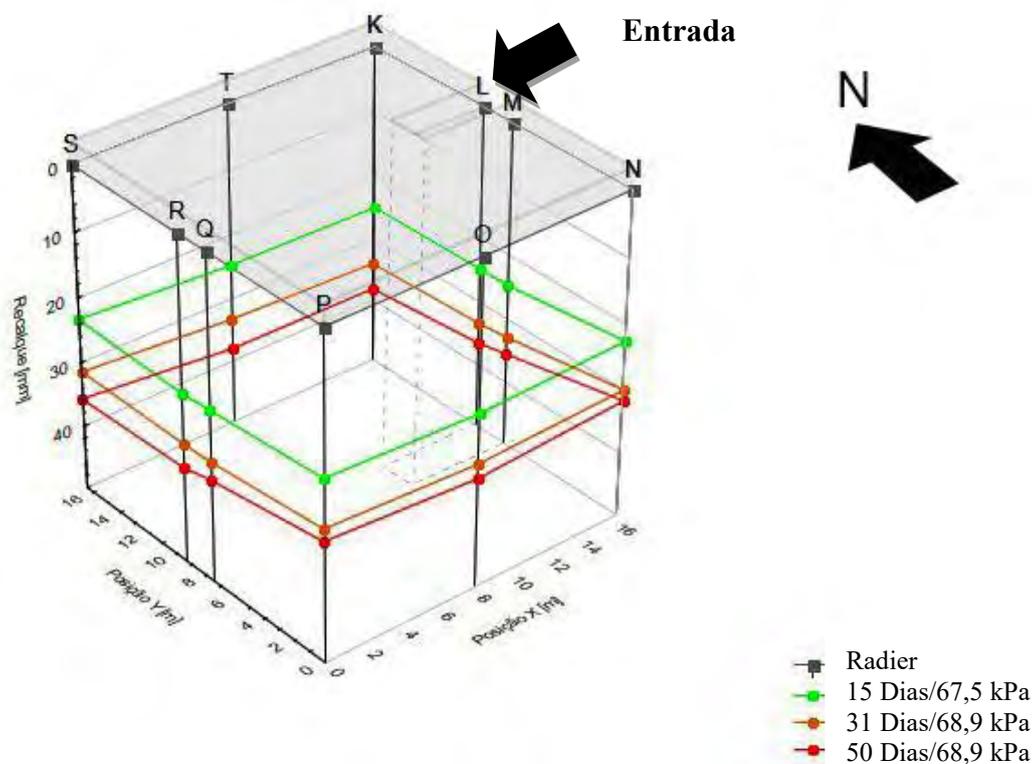
(b)

Fonte: O Autor, 2019.

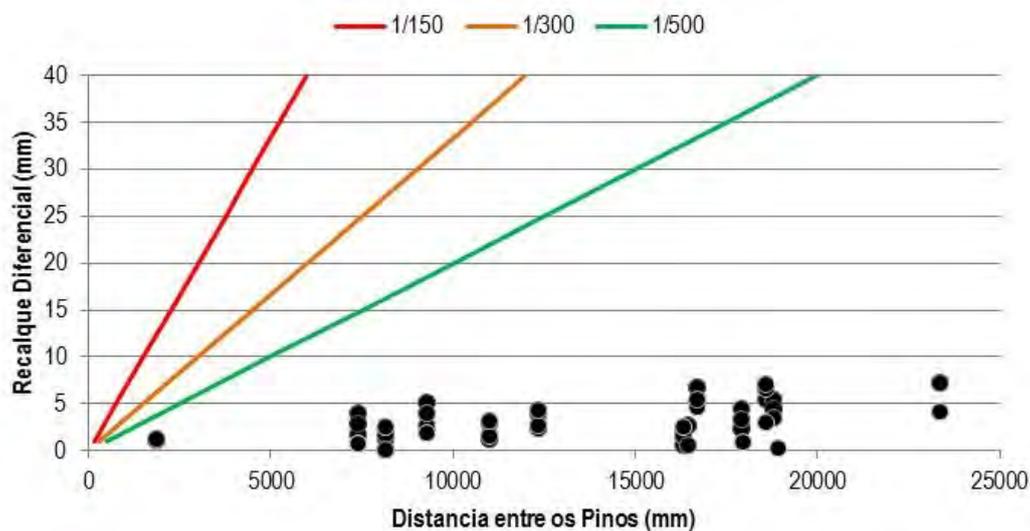
A Figura 45.a apresenta gráfico representativo das deformações do bloco, chamada daqui por diante de superfícies de recalque. A análise da superfície de recalque do bloco Q19-BL01 permite indicar a baixa rotação apresentada por este bloco. Não foi observado flexão da placa do radier suscitando comportamento essencialmente rígido. Na Figura 45.b estão apresentadas as rotações dos pinos de recalques obtidas na última leitura de recalque, com as indicações de faixas de distorções angulares visto o baixo desaprumo observado, como análise comparativa.

O valor máximo de rotação encontrado foi de 1/1680.

Figura 45 – (a) Superfície de recalque e (b) rotação dos pinos do Bloco 01 da Quadra 19 na última leitura



(a)



(b)

Fonte: O Autor, 2019.

Para o Bloco 02 da Quadra 30, verificou-se comportamento similar ao do bloco analisado anteriormente, em que parcela dos recalques desenvolveram para mesma etapa construtiva, sem maiores acréscimos de tensão transmitida.

A leitura inicial de recalque foi realizada após execução completa do quarto andar (54% do

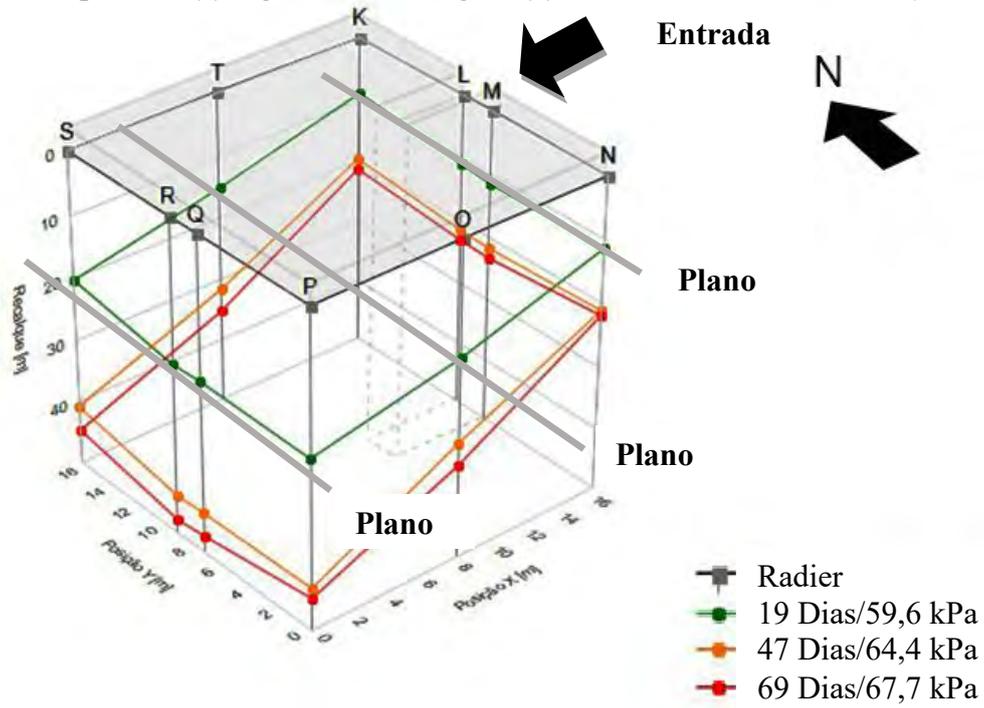
carregamento total). Já a segunda leitura foi realizada após execução parcial (lado esquerdo e hall de entrada) do oitavo andar conforme observado na Figura 46.a, que indica a superfície de recalque e a Figura 46.b que apresenta a deformada entre a leitura inicial e a segunda leitura dos Planos: A (Pinos K, L, Me N), B (Pinos T e O) e C (Pinos S, R, Q e P). Conforme observado na deformada apresentada, conseguiu-se observar pequena inclinação dos blocos devido a não distribuição do carregamento (maior carregamento na região dos pinos Q e R) no momento da leitura.

Embora na segunda leitura os carregamentos fossem maiores em um dos lados dos blocos, nas demais leituras os recalques foram medidos com sua estrutura finalizada. Entende-se que há uma tendência de os recalques serem maiores nos pinos do lado oposto da entrada devido ao maior carregamento que a estrutura (hall, escadas e caixa d'água) aplica no radier, conforme observado na superfície de recalque apresentada.

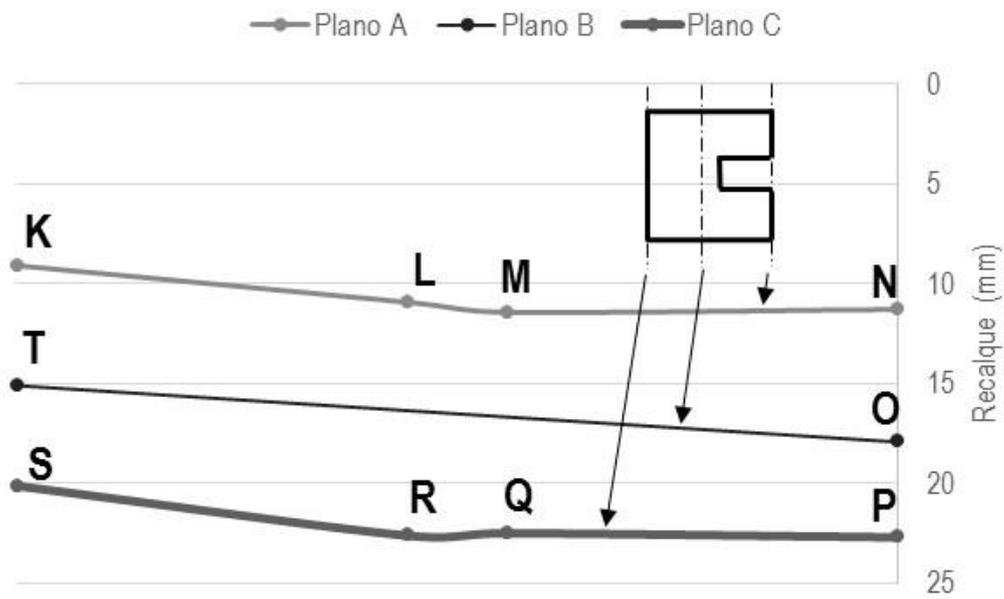
Em relação à velocidade de recalque dos pinos, a velocidade máxima aferida é de 1200 micra/dia, conforme apresentado na Figura 47.a. Destaca-se na avaliação do comportamento deste bloco que as velocidades de recalque tiveram variação expressiva entre pinos localizados em bordas opostas, como, por exemplo, os pinos K e P. A análise conjunta com as velocidades de carregamento, apresentadas na Figura 47.b, indica redução da velocidade de recalque para menores velocidades de carregamento.

O desenvolvimento de recalques em velocidades diferentes, apresentados pelos pinos do radier, indica que houve rotação na placa do radier, conforme apresentada na superfície de recalque. Cabe destacar que a superfície de recalque torna claro que houve baixa flexão do radier, indicando. As rotações máximas apresentadas foram na primeira leitura de 1/1155 entre os pinos N e O; de 1/646 na segunda leitura entre os pinos K e T; e de 1/620 entre os pinos L e S. A Figura 48.a, b e c, apresenta a evolução das rotações para as leituras de recalque realizadas. Observa-se que embora a análise de rotações tenha apresentado valores expressivos, as distorções angulares observadas foram baixas. Se analisado o plano com maior rotação, definido pelos pinos S, T, K na última leitura, observa-se que quando considerado o desaprumo, as distorções angulares são relativamente baixas, chegando ao valor máximo de 1/4000, conforme apresentado na Figura 49.

Figura 46 - (a) Superfície de recalque e (b) deformadas do Bloco 02 da Quadra 30



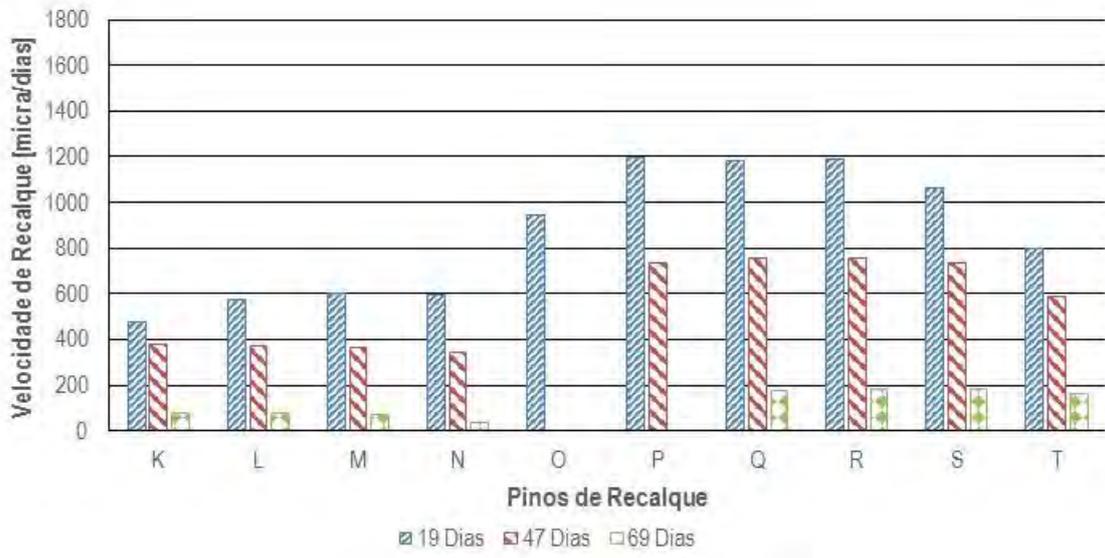
(a)



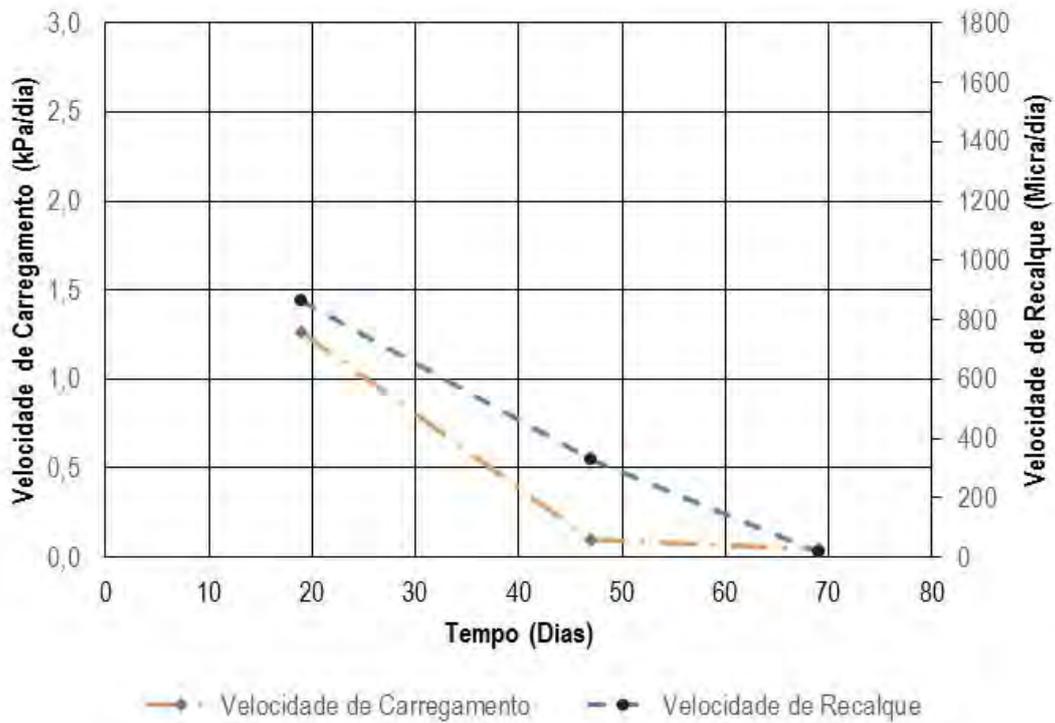
(b)

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 47 - (a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 02 da Quadra 30



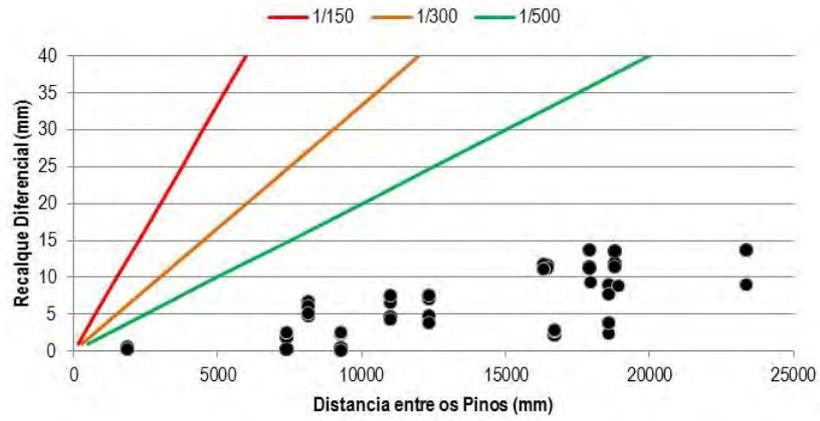
(a)



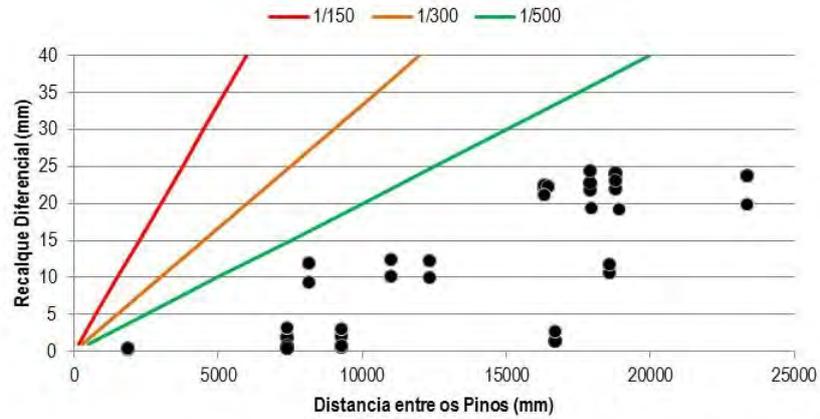
(b)

Fonte: O Autor, 2019.

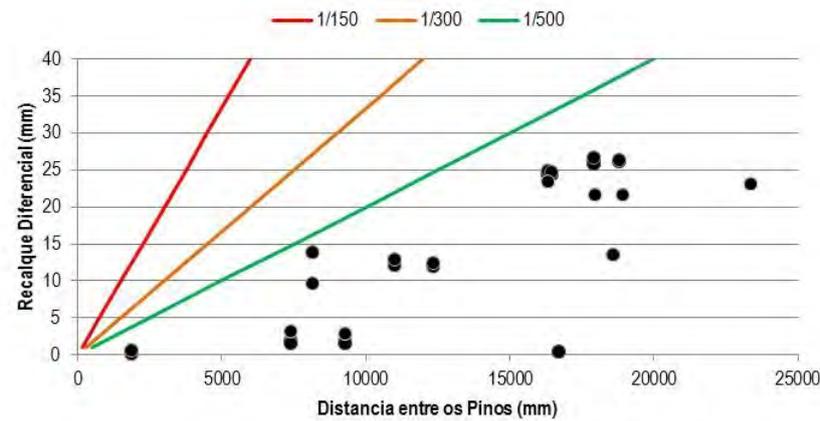
Figura 48 – Evolução das rotações do Q30-BL02: (a) L1-L2, (b) L1- L3 e (c) L1-L4



(a)



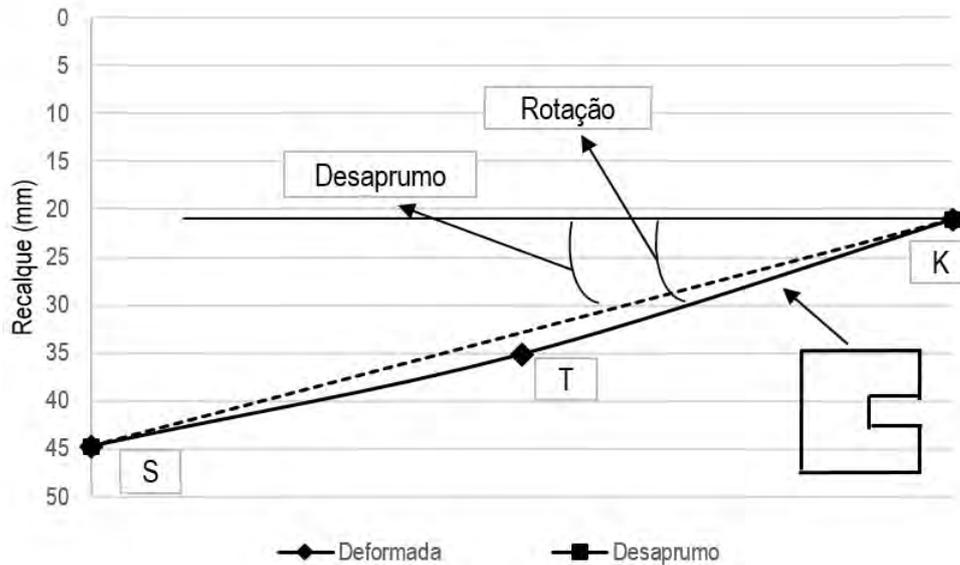
(b)



(c)

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 49 – Análise de distorção angular do Bloco 02 da Quadra 30

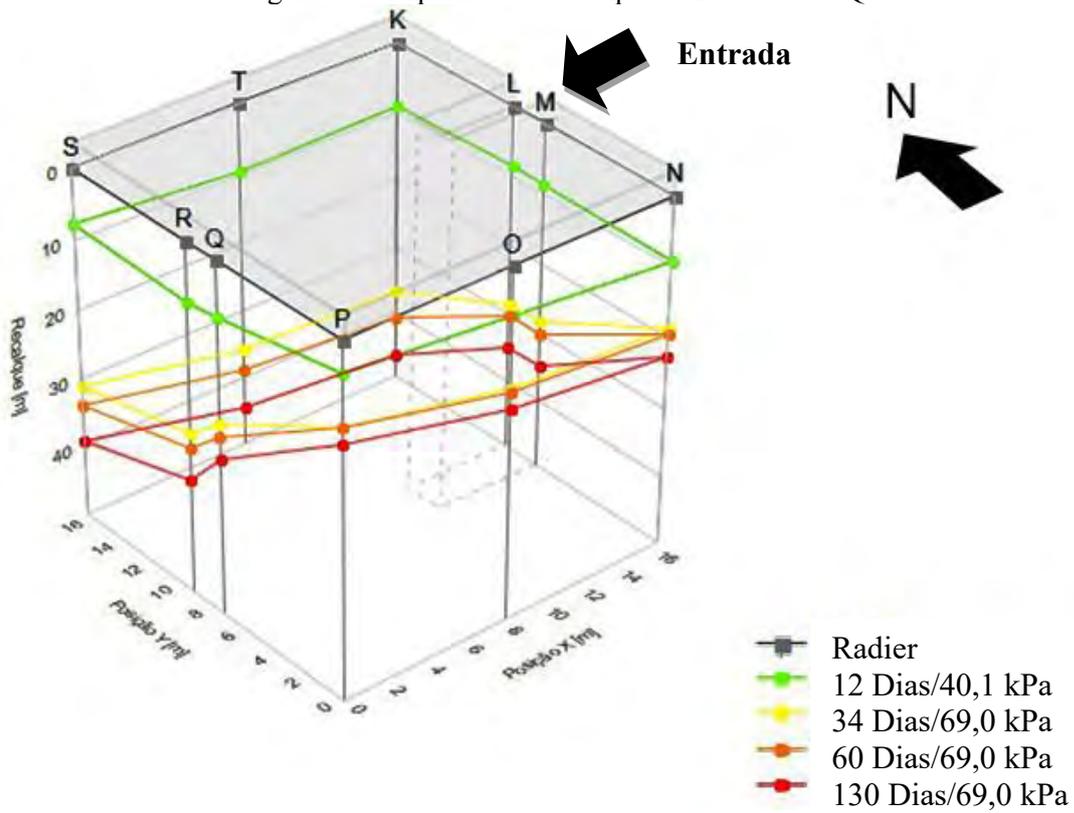


Fonte: O Autor, 2019.

No Bloco 05 da Quadra 34 foram realizadas 3 leituras de recalques para mesmas tensões transmitidas (mesma etapa construtiva). Destaca-se também que a primeira leitura de recalque foi realizada após execução parcial do primeiro andar e a segunda após execução parcial do quinto andar. Tal fato fez com que a primeira superfície de recalque apresentada na Figura 50 não apresentasse nenhuma rotação, mas que nas demais leituras, que foram realizadas para a estrutura completamente executada, a rotação fosse observada. Desse modo justifica-se a rotação da placa indicada nas medições de recalque pela diferença de distribuição de carga entre a leitura de recalque inicial e a terceira, quarta e quinta medições.

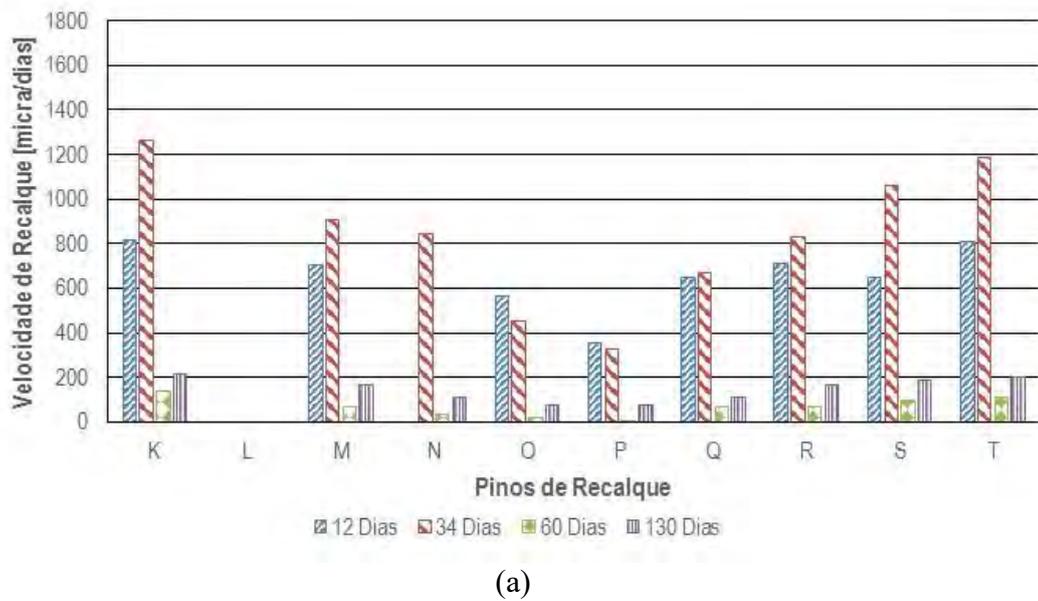
O maior desenvolvimento de recalque ocorreu entre a segunda e a terceira leituras onde foram desenvolvidos recalques médios de 17,5 mm para um acréscimo de 32,1 kPa no período 22 dias. A Figura 51.a apresenta as velocidades de recalque entre as leituras para os pinos do radier bem como a Figura 51.b apresenta a análise conjunta da velocidade de recalque e velocidade de carregamento. Observou-se que para velocidade de carregamentos menores entre a segunda e terceira leitura de recalque foi observado valores ligeiramente maiores de velocidade de recalque.

Figura 50 – Superfície de recalque do Bloco 05 da Quadra 34

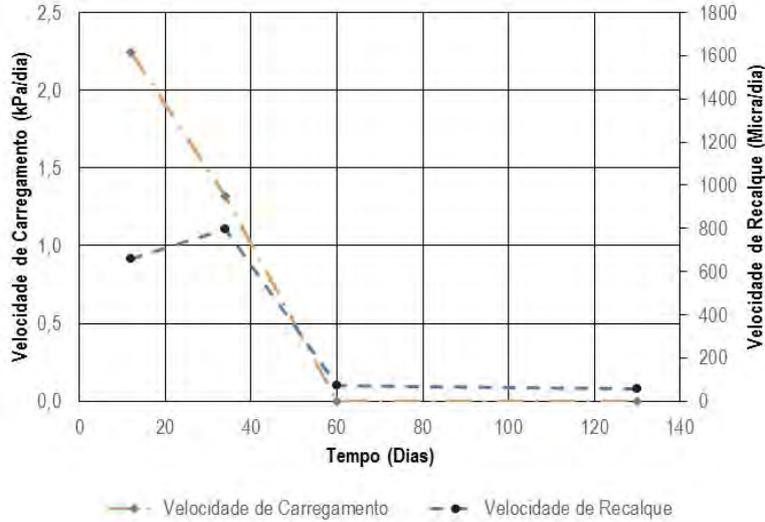


Fonte: O Autor, 2019.

Figura 51 - - (a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 05 da Quadra 34



Continuação – Figura 4.15 - (a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 05 da Quadra 34

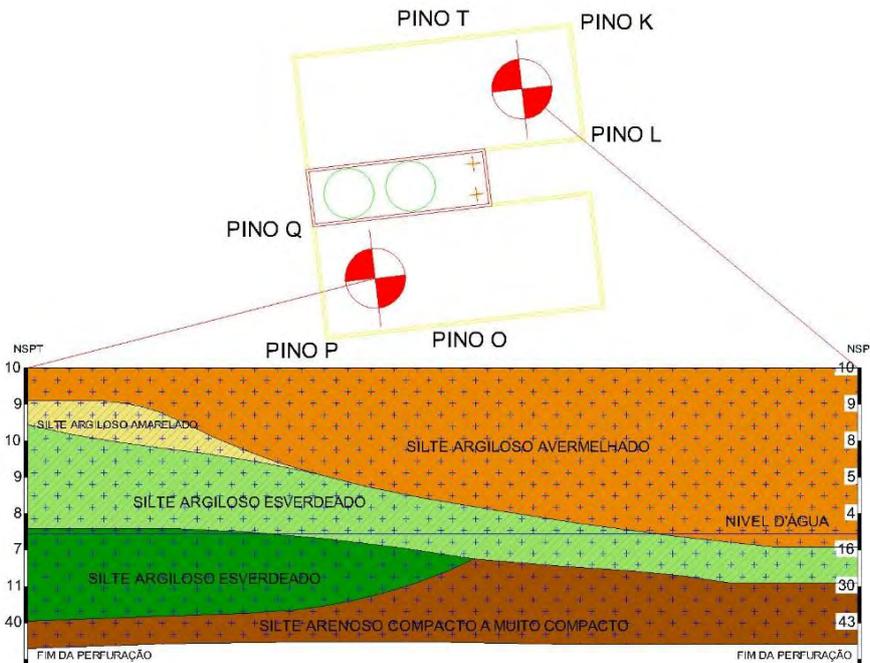


(b)

Fonte: O Autor, 2019.

No Bloco 05 da Quadra 34, o perfil que define a parte superior (Pinos S, T e K) do plano do radier possui camada mais compressível, com  $N_{SPT}$  médio de 7 golpes e 4,90 m de profundidade, enquanto o perfil de sondagem que define a parte inferior (Pinos N, O e P) é composto por camada com  $N_{SPT}$  médio de 9 golpes e 6 m de profundidade, conforme apresentado no perfil esquemático da Figura 52.

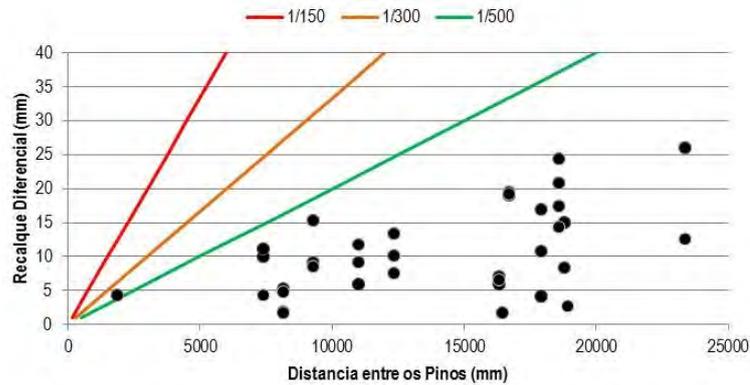
Figura 52 – Esquema de perfil de sondagem do Bloco 05 da Quadra 34



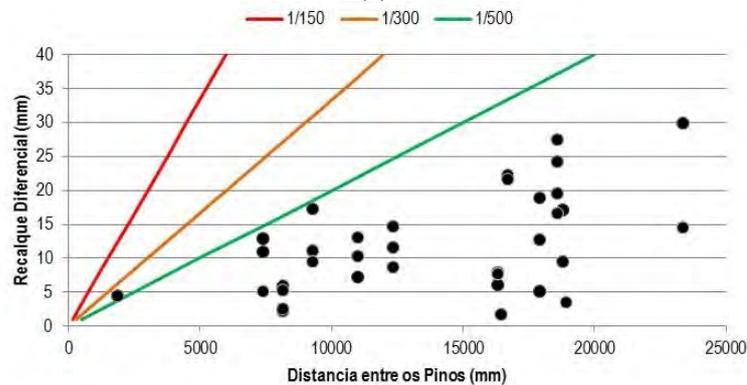
Fonte: O Autor, 2019.

A Figura 53 apresenta as rotações observadas nas leituras de recalque. Os maiores valores foram observados entre os pinos P e Q e entre os pinos R e Q. O maior valor de rotação observado foi de 1/325 entre os pinos R e Q entre as últimas leituras de recalque. Quando considerados os desaprumos, os valores de distorções angulares tornam-se mais baixos. O valor maior de distorção angular apresentado é de 1/640 entre os pinos R e Q, conforme apresentado na Figura 54. Cabe destacar que as leituras iniciais foram realizadas com um dos pavimentos parcialmente executados.

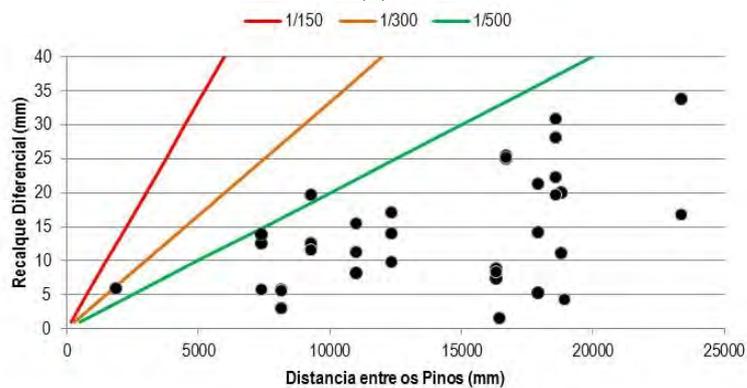
Figura 53 – Evolução das rotações do Q34-BL05: (a) L1-L3; (b) L1-L4 e (c) L1-L5



(a)



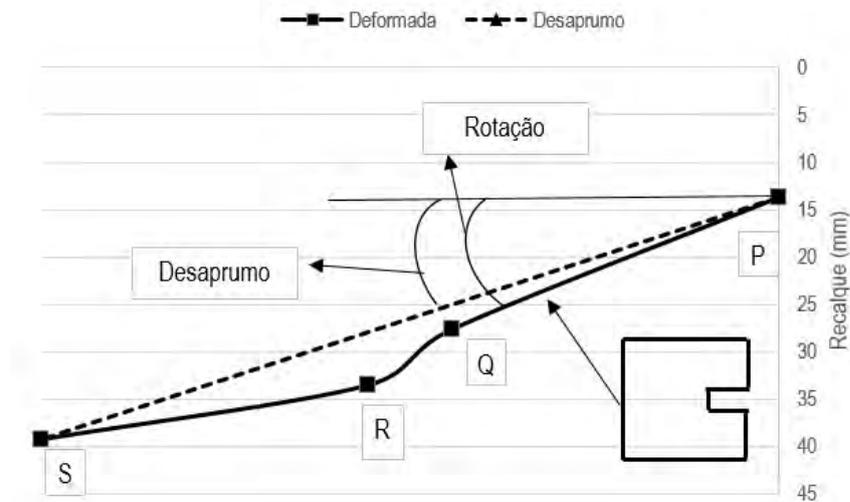
(b)



(c)

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 54 – Análise de distorção angular do Bloco 05 da Quadra 34



Fonte: O Autor, 2019.

#### 4.2.2 Grupo 2

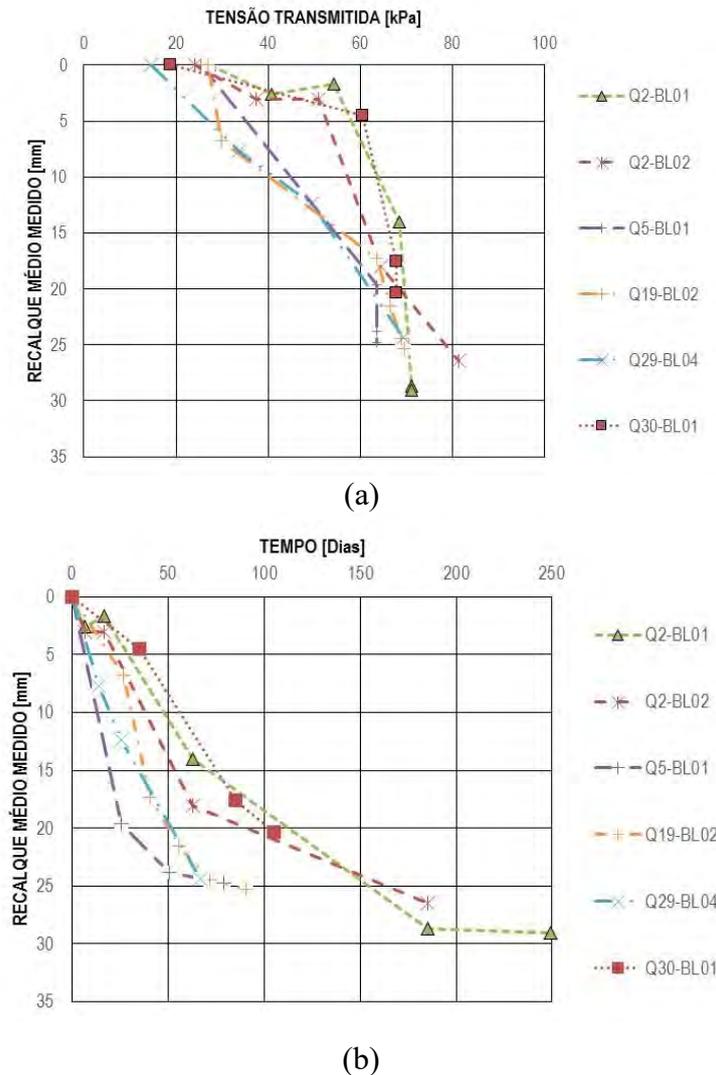
A evolução dos recalques medidos foi analisada separadamente, com base no aumento da tensão transmitida e do tempo, para os blocos que em suas medições foram desenvolvidos recalques médios entre 20 mm e 29 mm, denominado Grupo 2, totalizando a análise de 6 Blocos. São eles: Quadra 02 – Blocos 01, 02; Quadra 05- Bloco 01; Quadra 19 – Blocos 02; Quadra 29 – Bloco 04; e Quadra 30 - Bloco 01. Todos os blocos deste grupo foram executados sobre aterros.

As Figuras 55.a e b ilustram o comportamento dos radiers com base na evolução dos recalques em relação ao aumento da tensão transmitida e do tempo, respectivamente.

Nos Blocos 01 e 02 da Quadra 02, observa-se pouca variação de recalque médio para as tensões transmitidas até 55 kPa. Para tensões maiores que 65 kPa, os recalques se desenvolveram de forma mais significativa, observando para este acréscimo de 10 kPa variações de aproximadamente 12 mm. Isso indica o comportamento não linear entre tensão transmitida x recalque médio. Notou-se no Bloco 01 que, para mesma tensão transmitida (71,3 kPa) em leituras sequenciais, ocorreu desenvolvimento de acréscimo no recalque médio de 14 mm, no intervalo de 31 dias.

Destaca-se que o Bloco 01 da Quadra 02 possui maior altura de aterro quando comparado ao Bloco 02 da mesma quadra. No primeiro a altura média do aterro foi de 1,50 m e a no segundo foi de 1,10 m.

Figura 55 – Desenvolvimento do recalque médio medido em função da (a) tensão transmitida e do (b) tempo (Grupo 02)



Fonte: O Autor, 2019.

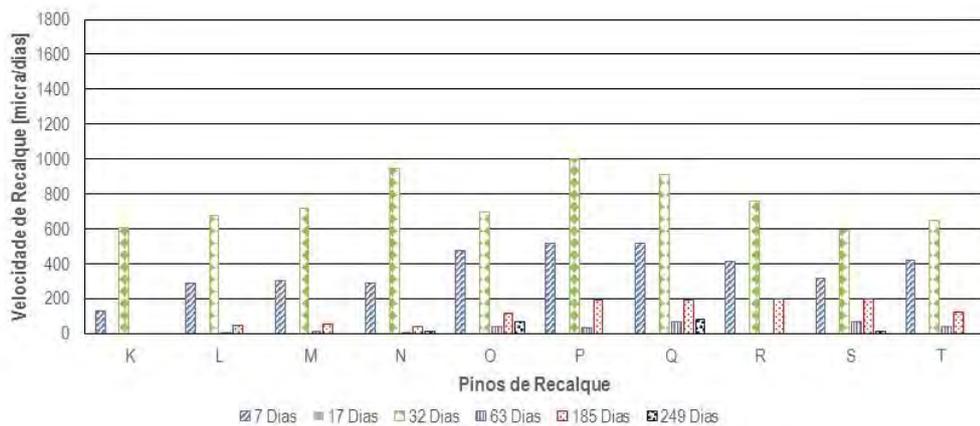
Nas Figuras 56.a e b apresenta as velocidades dos pinos de recalques do Bloco 01 da Quadra 02, bem como as velocidades de carregamento associadas as velocidades médias entre as leituras. É observado entre a segunda e terceira leitura de recalque, valores negativos indicando que entre uma leitura e outra houve redução do valor absoluto de recalque. A medição de recalque indicou redução nos valores de todos os pinos de recalque entre essas medições. Entende-se assim que houve problema associado à medição de recalque nessa leitura.

No Bloco 02 da Quadra 02 consta-se que as velocidades máximas de recalque aconteceram entre a terceira e quarta leitura, conforme apresentado nas Figuras 57.a e b. O mesmo comportamento é apresentado no Bloco 01 da Quadra 02, entre a segunda e terceira leitura foi

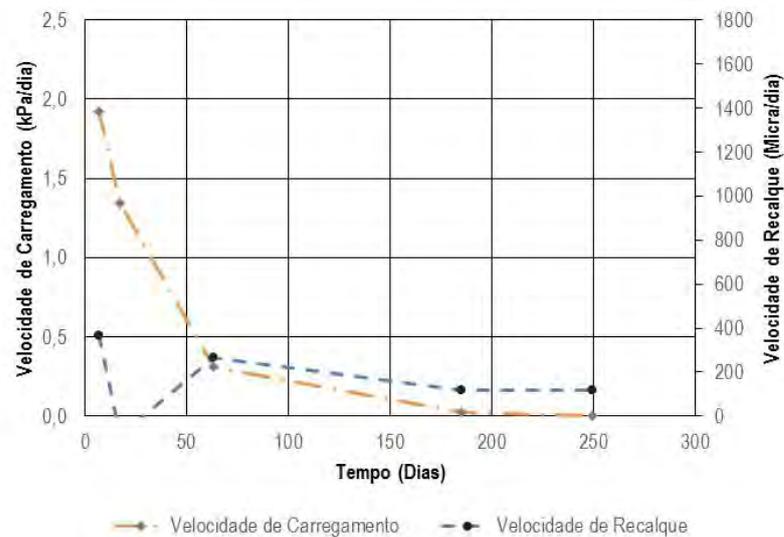
observado, onde houve redução na velocidade de recalque. Cabe destacar que as duas leituras foram realizadas no mesmo dia, o que reforça algum problema de operação na medição dos dois blocos.

Na Figura 58 e 59 é apresentado as superfícies de recalque dos Blocos 01 e 02 da Quadra 02. Para o Bloco 01, os recalques tenderam a desenvolver em maior magnitude nos pinos localizados na parte oposta à entrada, onde a área é mais carregada. Já para o Bloco 02, o mesmo comportamento não foi verificado, sendo os recalques maiores desenvolvidos no Pino K. Não foi realizado sondagens de recolhimento na região deste pino, mas, foi verificada a presença de camada silte argiloso de consistência mole na região formada pelos Pinos M, N e O, e entende-se que esta camada poderia se estender para região do Pino K, justificando os maiores recalques na região (Ver Figura 60)

Figura 56 – (a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 01 da Quadra 02



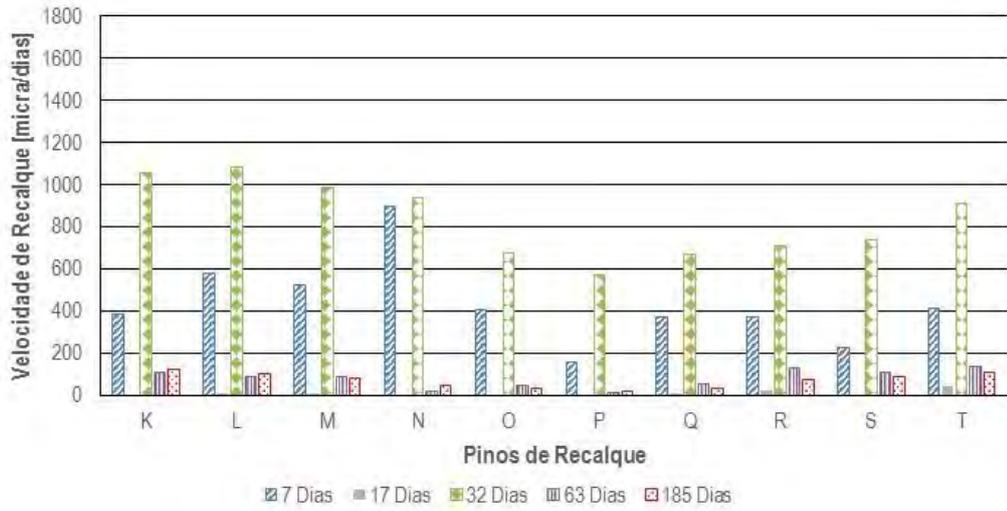
(a)



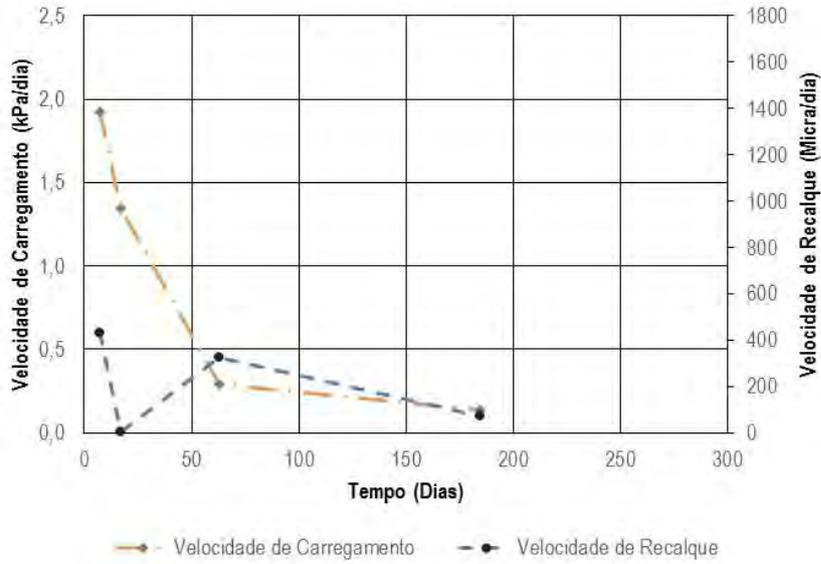
(b)

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 57 - (a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 02 da Quadra 02



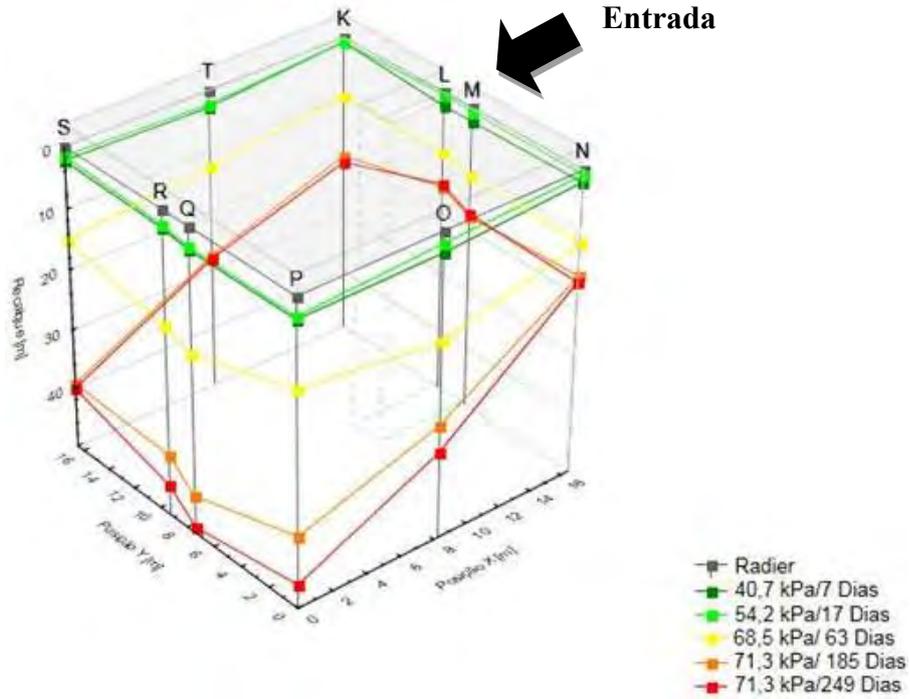
(a)



(b)

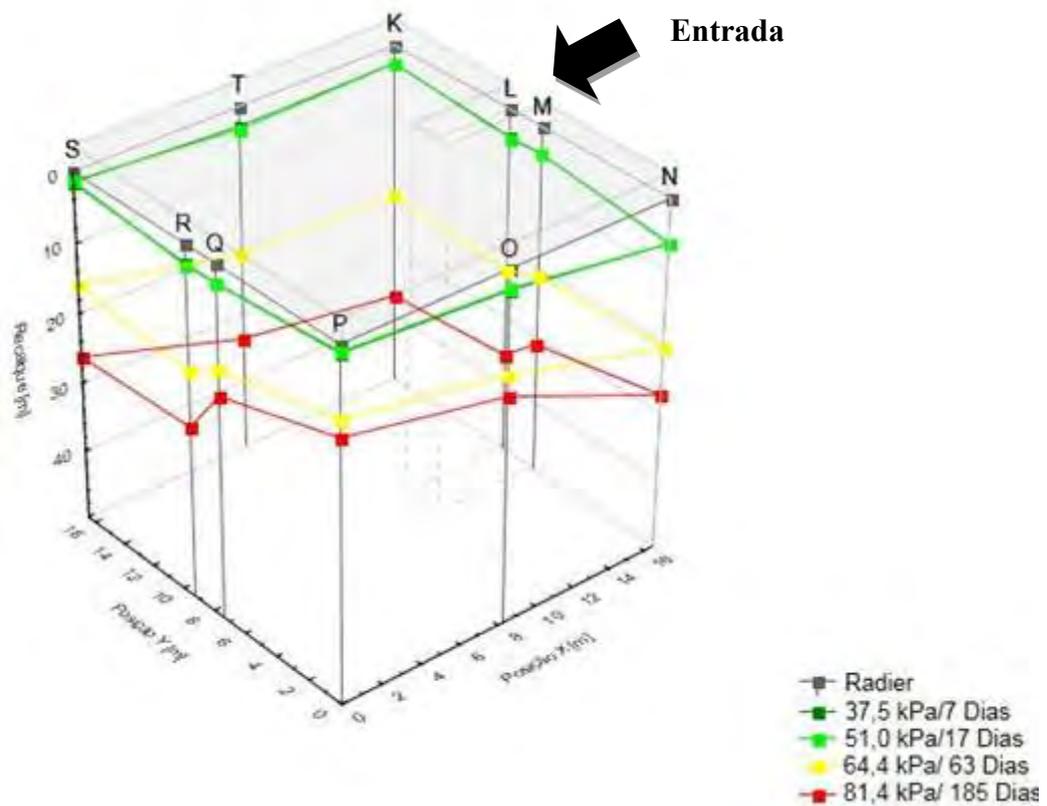
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 58 – Superfície de recalque do Bloco 01 da Quadra 02



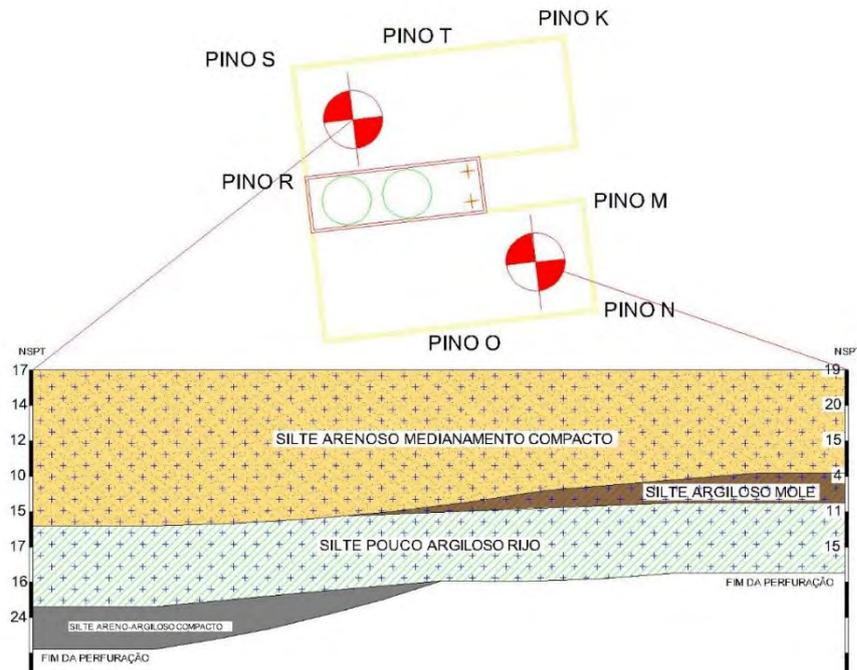
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 59 - Superfície de recalque do Bloco 02 da Quadra 02



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 60 - Esquema de perfil de sondagem do Bloco 02 da Quadra 02



Fonte: O Autor, 2019.

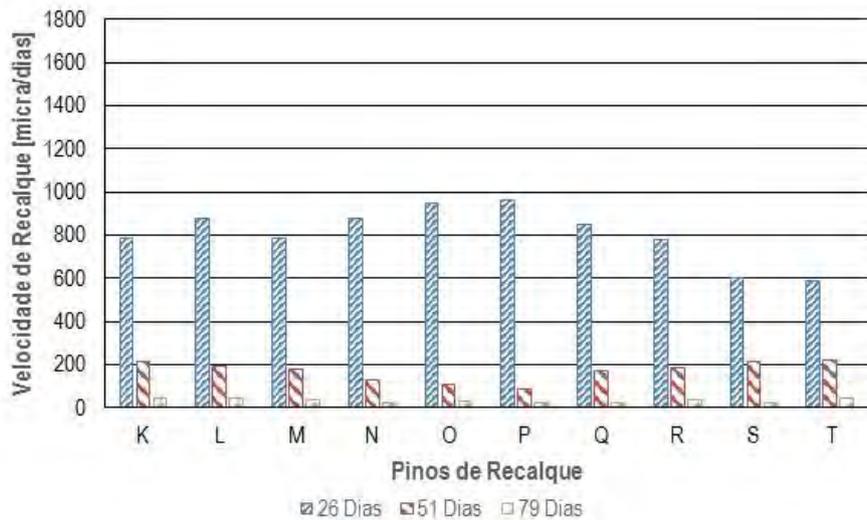
No Bloco 01 da Quadra 05, as 3 medições de recalque realizadas foram na mesma etapa construtiva, com tensão transmitida estimada de 63,6 KPa. Na primeira leitura, apresentou-se deformação média de 19,6 mm e no decorrer de 53 dias, entre a primeira e terceira leitura, houve acréscimo de 5,1 mm no recalque médio. A Figura 61 apresenta a velocidade de recalque média obtida em cada pino de deslocamento entre as leituras realizadas. Destaca-se que os pinos que tiveram maior velocidade de recalque na primeira leitura (Pinos O e P) foram os que apresentaram menores velocidades nas demais leituras. Tal comportamento indica a influência da rigidez da estrutura e a tendência de não haver flexão do radier com o avanço construtivo do bloco, conforme apresentado na Figura 62.

Neste bloco a leitura inicial de recalque foi realizada com execução parcial do terceiro pavimento e as demais leituras para o bloco completamente executado. A diferença de distribuição não explica a rotação do bloco em direção aos Pinos N, O e P, pois a diferença de distribuição resultou num carregamento adicional de distorção do lado oposto.

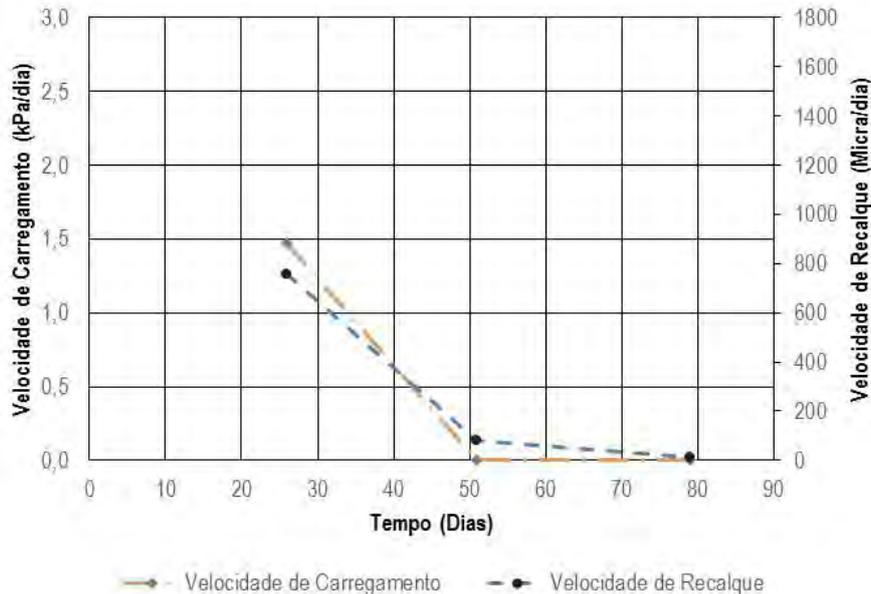
Se analisado o perfil de sondagem (Figura 63) determinado para o Bloco 01 da Quadra 05, nota-se camada de silte argiloso com 4,8 m de profundidade com  $N_{SPT}$  médio de 7 golpes. Este perfil foi observado na região próxima aos pinos T, K e L. A segunda sondagem realizada na região aposta apresentou  $N_{SPT}$  médio de 11 golpes em profundidade de 3,95 m,

indicando que o primeiro perfil apresentado tem maior potencial de deformação. Mesmo com essa observação os recalques medidos foram de maior grandeza na região de maior rigidez o que reforça a avaliação de diferença de distribuição de carregamento no momento das leituras.

Figura 61 - (a) Velocidade de recalque e (b) análise conjunta de velocidade de carregamento do Bloco 01 da Quadra 05



(a)

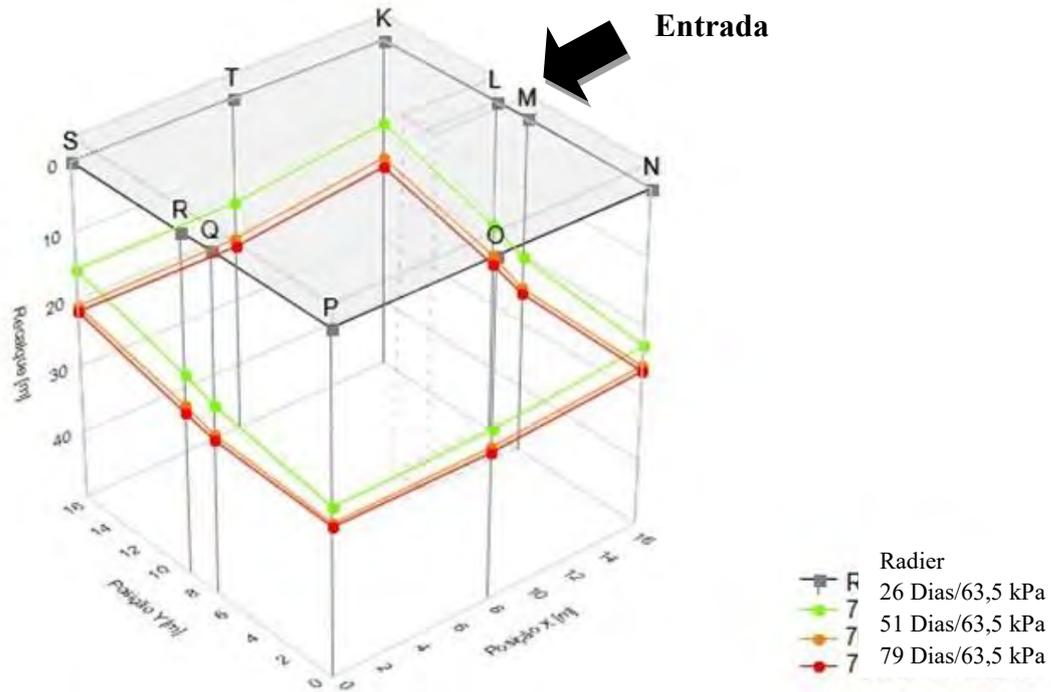


(b)

Fonte: O Autor, 2019.

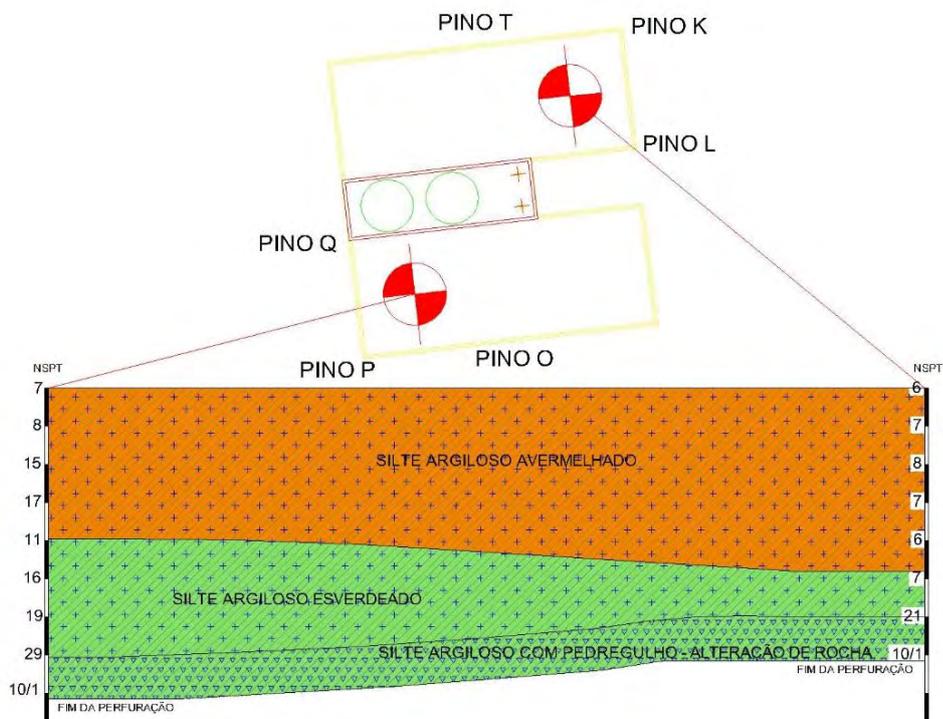
Embora os recalques maiores tenham ocorrido na parte oposta a entrada no Bloco 01 da Quadra 05, houve pouca flexão do radier, indicando comportamento de placa rígida. As distorções angulares máximas observadas foram entre as primeiras leituras, em que se observou entre os pinos R e S distorção de 1/1370.

Figura 62 - Superfície de recalque do Bloco 01 da Quadra 05



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 63 – Esquema de perfil de sondagem do Bloco 01 da Quadra 05



Fonte: O Autor, 2019..

Na primeira leitura de recalque do Bloco 02 da Quadra 19, com tensão transmitida estimada

de aproximadamente 26,9 kPa, foi constatado recalque médio de 6,8 mm. Com aumento de tensão transmitida para 63,6 kPa, na segunda leitura observou-se recalque médio de 17,3 mm e no acréscimo de tensão transmitida de aproximadamente 3 kPa, obteve-se recalque final médio de 25,3 mm no decorrer de 91 dias.

Neste bloco a leitura inicial de recalque foi realizada com execução parcial do terceiro pavimento. A segunda leitura foi realizada após executado o quinto pavimento, a terceira e quarta após a execução do oitavo pavimento e as demais para após executado o bloco todo. A diferença de distribuição de carregamento entre as leituras de recalque pode assim ser o motivador para a rotação do prédio na direção dos Pinos S, T e K.

A avaliação das velocidades de recalque, apresentada na Figura 64, indica o aumento na velocidade de recalque a partir da segunda leitura para média de 752 micra/dia e a tendência de estabilização dos recalques na última leitura, com média de 48 micra/dia.

A superfície de recalque do radier do Bloco 02 da Quadra 19 está presente na Figura 65. Destaca-se no comportamento do elemento de fundação a tendência de flexão do radier, quando analisado o pino de recalque T em relação aos pinos adjacentes.

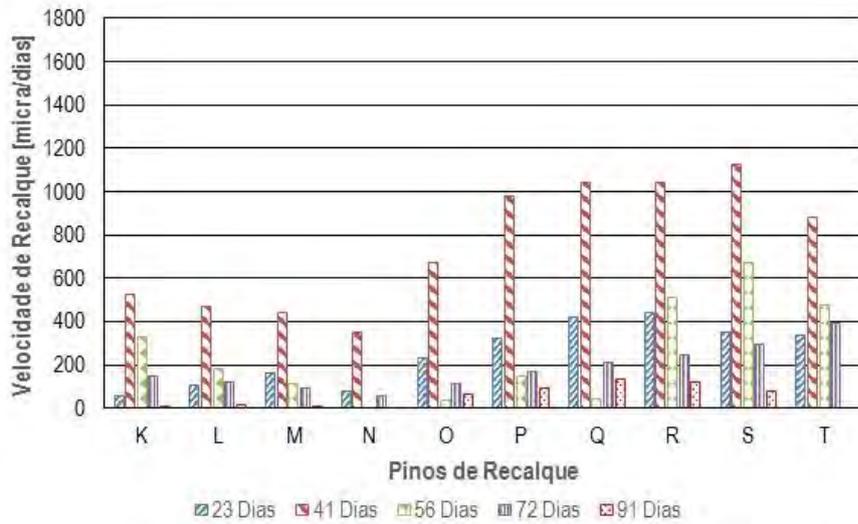
Nas últimas leituras de recalque, observaram-se maiores valores de rotação chegando a 1/450 entre Pinos T e K, conforme apresentado na Figura 66. Conforme apresentado anteriormente na análise do Bloco 05 da Quadra 34, a não distribuição dos carregamentos na placa no momento da medição de recalque influenciam de maneira direta para a indicação de rotações mais elevadas.

Quando analisado as distorções angulares, o valor máximo observado foi de 1/1450 entre os Pinos T e K. Avaliando as rotações e distorções angulares dos blocos apresentados, nota-se que, embora tenha sido obtido valores expressivos de rotação, as distorções angulares foram baixas, explicado pela alta rigidez da estrutura. Cabe destacar também que as maiores distorções angulares foram observadas para execuções parciais dos blocos, o que indica que essas, e conseqüentemente a possibilidade de patologias na estrutura poderiam ocorrer mais facilmente durante a execução dos blocos, tornando a etapa de execução, a fase crítica em termos de distorção angulares. A Figura 67 apresenta as distorções angular em duas seções do Bloco 02 da Quadra 19.

Desse modo, avalia-se que as rotações se tornam um parâmetro importante a ser estudado no

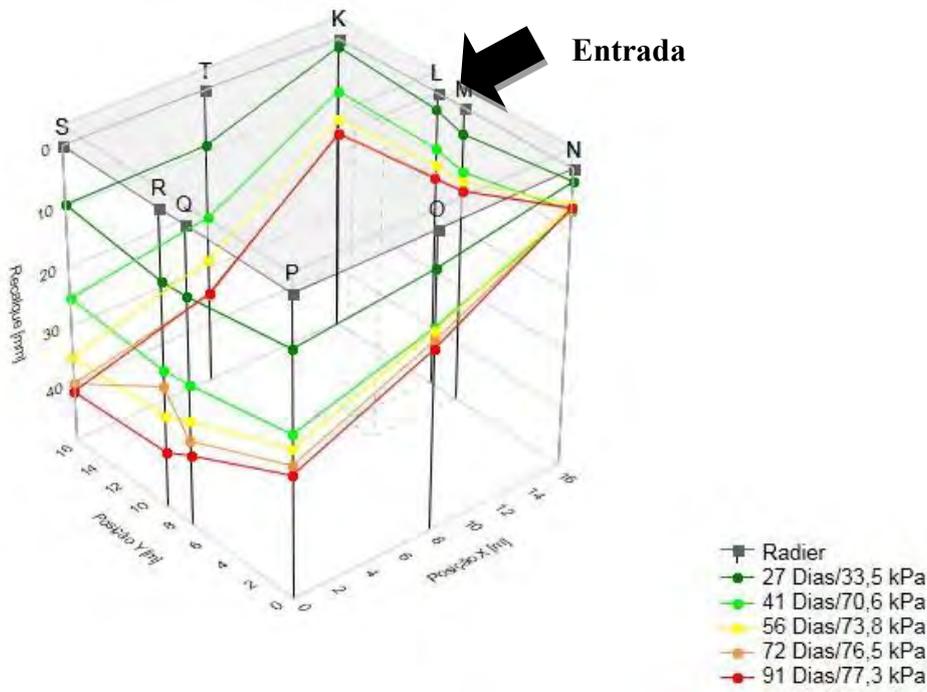
que diz respeito a serventia desse tipo de estrutura. Elevadas rotações podem causar riscos a funcionalidade e conforto dos usuários e limites específicos devem ser claramente estabelecidos. Com base nos valores observados não foi verificado danos ou patologias na estrutura.

Figura 64 - Velocidade de recalque do Bloco 02 da Quadra 19



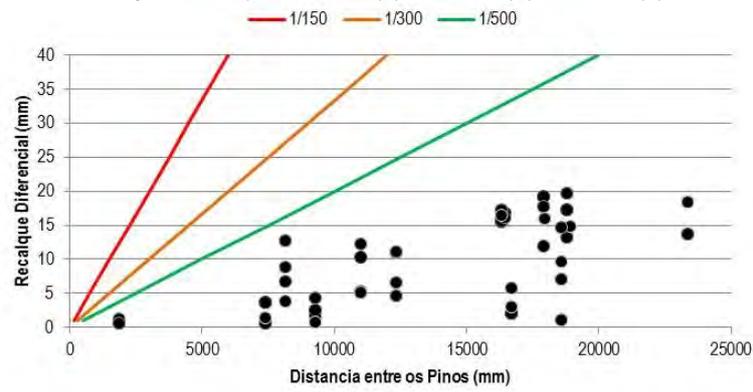
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 65 – Superfície de recalque do Bloco 02 da Quadra 19

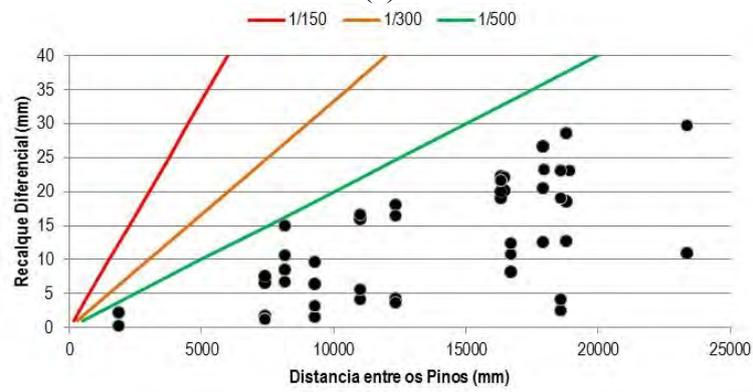


Fonte: O Autor, 2019.

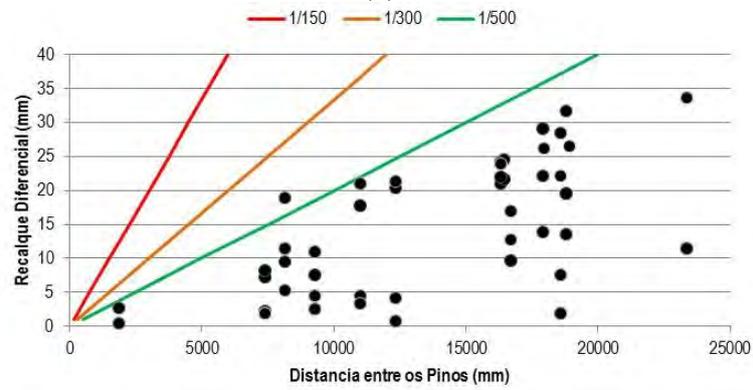
Figura 66 - Rotações do Q19-BL02: (a) L1-L2; (b) L1-L3, (c) L1- L4 e (c) L1- L5



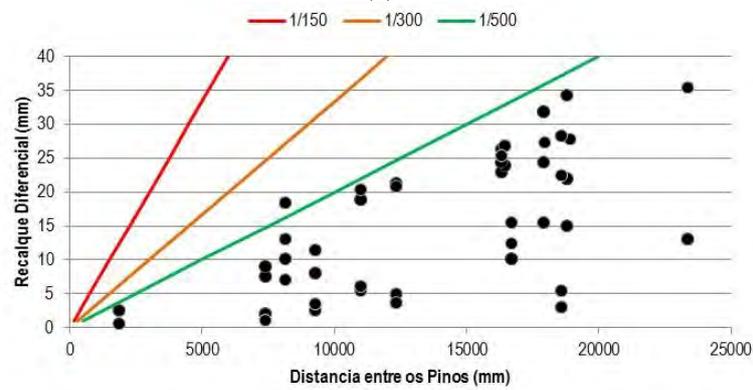
(a)



(b)



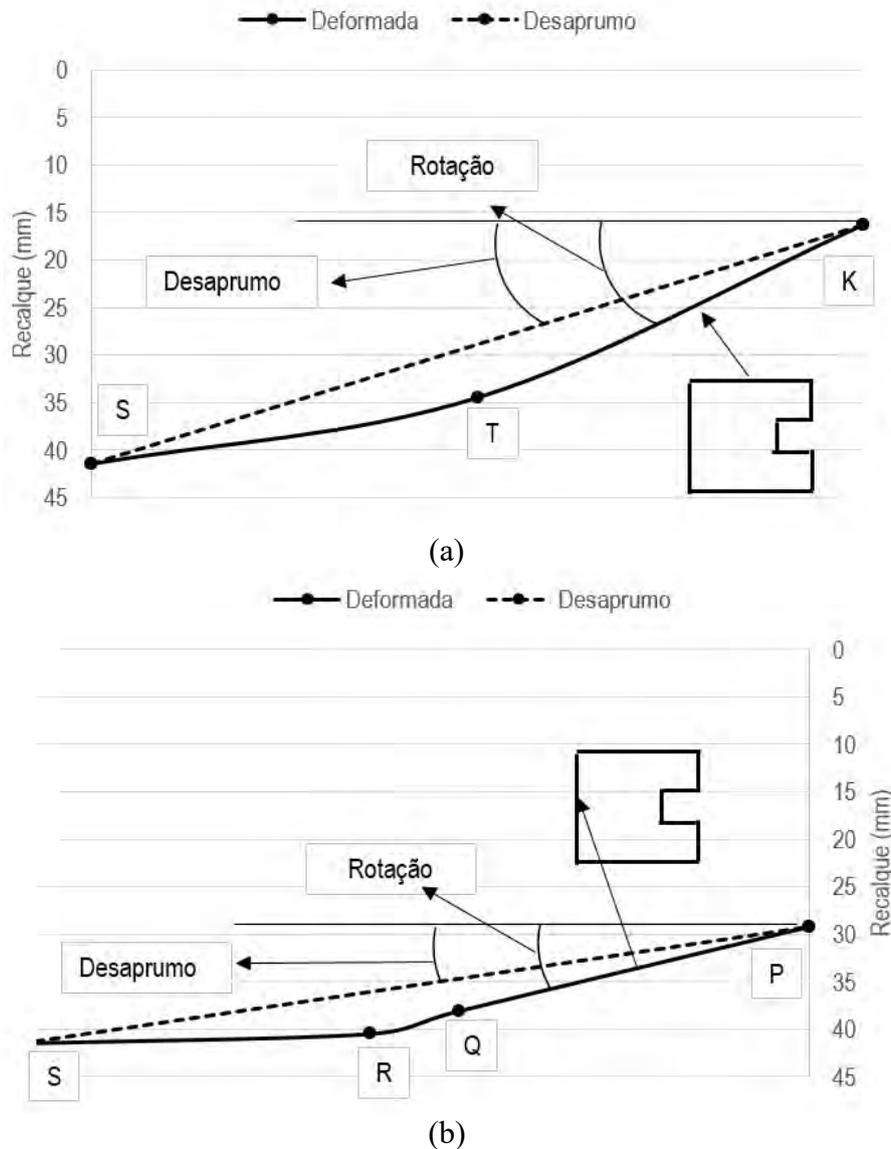
(c)



(d)

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 67 – Análise de distorção angular da seção formada pelos pinos: (a) S, T e K e (b) P,Q,R e S



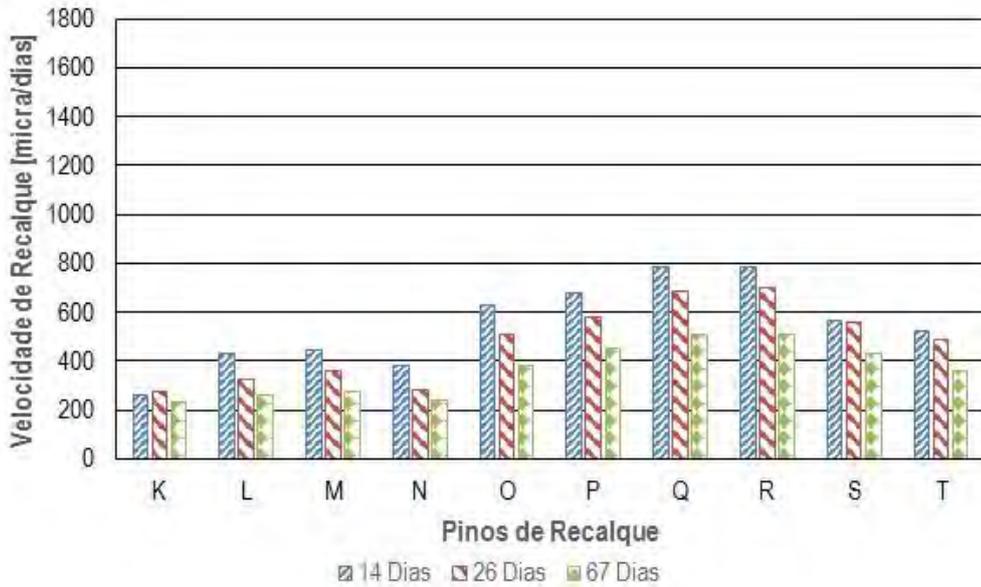
Fonte: O Autor, 2019.

No Bloco 04 da Quadra 29, nas duas primeiras medições de recalque não foram realizadas estimativas de carregamento. Nas outras duas leituras consecutivas, as medições de recalque acompanharam o progresso da construção, de forma que as tensões transmitidas estimadas foram de 49,4 kPa e 69,4 kPa. Aferiu-se que os maiores desenvolvimentos se deram entre a segunda e terceira leitura, em que se mediu variação média de 12 mm, no decorrer de 41 dias entre uma leitura e outra.

A Figura 68 apresenta as velocidades de recalque do Bloco 04 da Quadra 29. Observa-se que, embora as velocidades de recalque entre as últimas leituras tenham sido inferiores às demais, os recalques não tenderam a velocidades menores como os demais blocos estudados (menores que 200 micra/dia), chegando a valores de aproximadamente 400 micra/dia no Pino Q.

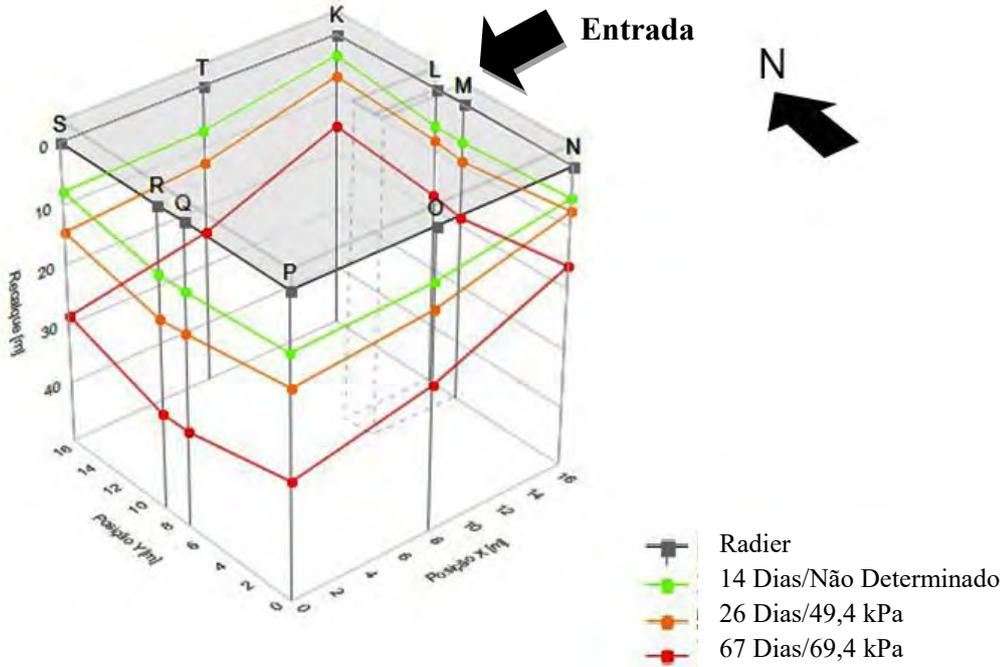
Em termos de distorções angulares, obteve-se, entre as últimas leituras de recalque, valor de 1/864 entre os pinos K e T. Os recalques tenderam a ser maiores nos pinos do lado oposto à entrada do bloco (Pinos P, Q, R e S), conforme apresentado na superfície de recalque da Figura 69.

Figura 68 - Velocidade de recalque do Bloco 04 da Quadra 29



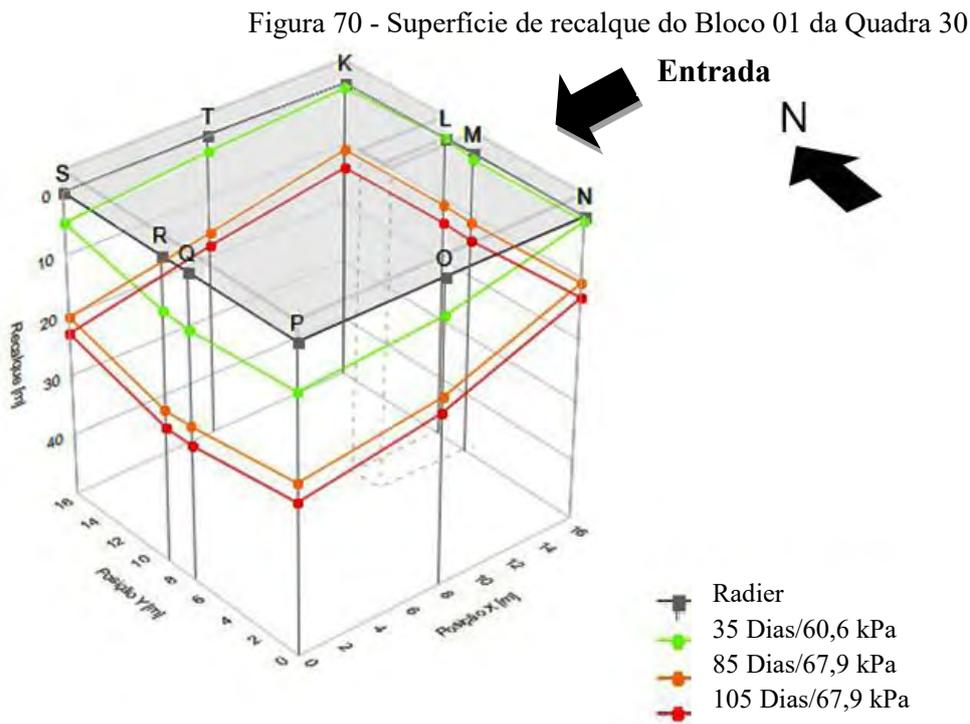
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 69 - Superfície de recalque do Bloco 04 da Quadra 29



Fonte: O Autor, 2019.

No Bloco 01 da Quadra 30, as 3 medições foram realizadas para tensões transmitidas estimadas próximas, 60,6 kPa, 69,9 kPa e 67,9 kPa. Entre a segunda e terceira leitura de recalque, ocorreu deformação média de 13,1 mm, no período de 22 dias, o que indicou a maior parcela para o desenvolvimento do recalque médio final de 20,3 mm. A Figura 70 apresenta a superfície de recalque deste bloco que apresenta comportamento similar ao Bloco 04 da Quadra 29, avaliado anteriormente.



Fonte: O Autor, 2019.

#### 4.2.3 Grupo 3

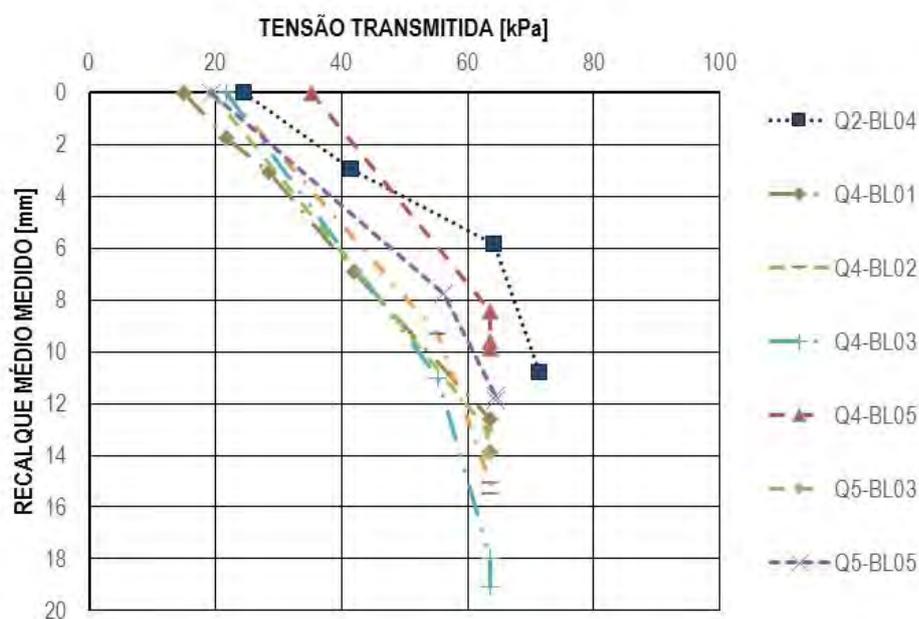
Com base na evolução dos recalques, as Figuras 71.a e b e 71.a e b ilustram, respectivamente, o comportamento dos radiers em função do aumento da tensão transmitida e do tempo, na devida ordem, para os blocos do Grupo 3 (recalques finais médios entre 10 mm e 19 mm). São eles: Bloco 04 da Quadra 02; Blocos 01, 02, 03 e 05 da Quadra 04; Blocos 03 e 05 da Quadra 05; Blocos 03 e 04 da Quadra 19; Bloco 03 da Quadra 26; Bloco 03 da Quadra 29 e Blocos 02, 03 e 04 da Quadra 34. Todos os blocos deste grupo foram executados em seção de aterro.

Analisando a Figura 71, os maiores recalques aconteceram entre as tensões transmitidas estimadas de 60 a 70 kPa. Os valores compõem o carregamento em torno de 65% e 83% do

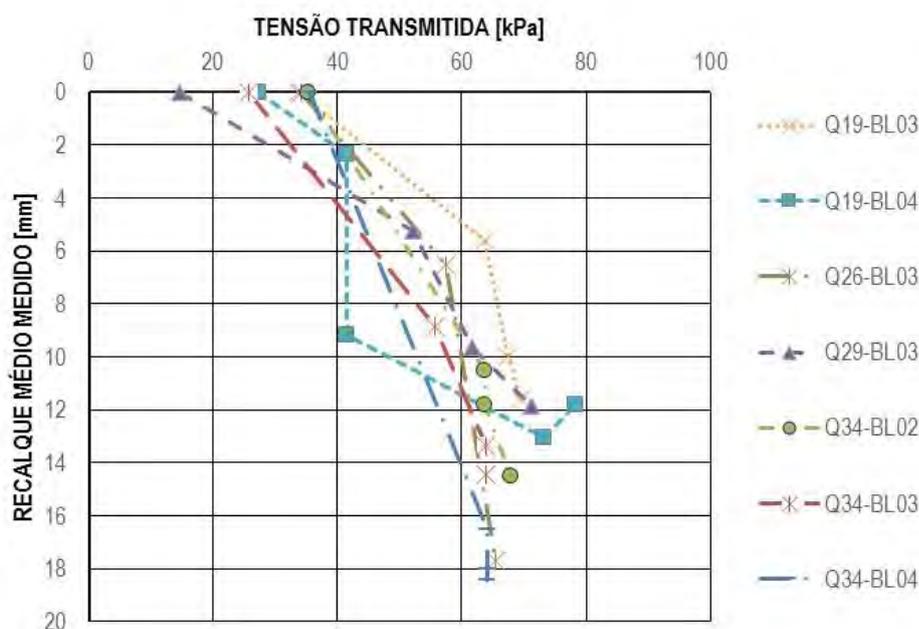
carregamento total da estrutura, respectivamente, se avaliado em termos de etapa construtiva.

A curva de recalque médio x tempo apresentada na Figura 72.a e b indica que em alguns dos blocos houve tendência de estabilização dos recalques, em termos de valores médios. Não foi observado estabilização de recalque nas últimas leituras dos seguintes blocos: Bloco 04 da Quadra 02; Bloco 01 da Quadra 04; Bloco 03 da Quadra 26; e Bloco 02 da Quadra 34.

Figura 71 - Desenvolvimento do recalque médio medido em função da tensão transmitida (Grupo 3)



(a)

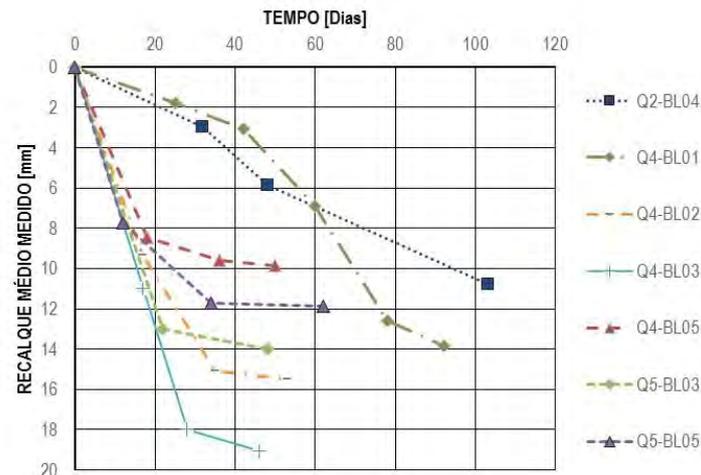


(b)

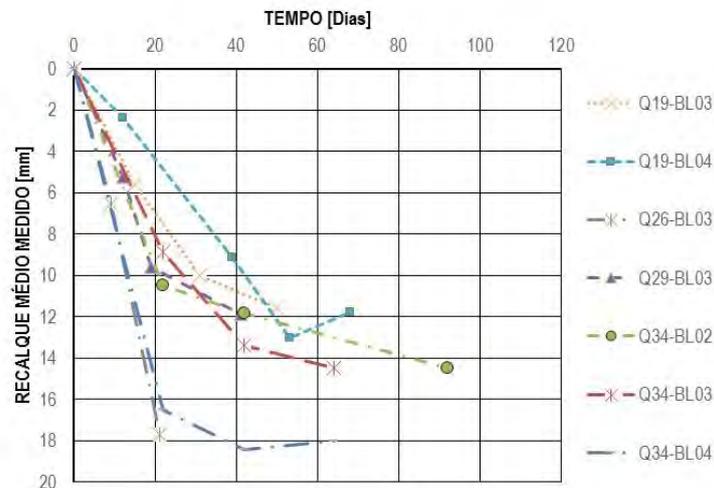
Fonte: O Autor, 2019.

Analisando a velocidade de recalque média dos pinos dos blocos aos quais não se observou tendência de estabilização dos recalques (Ver Tabela 23), o Bloco 03 da Quadra 26 foi o que apresentou maior velocidade de recalque entre a segunda e terceira leitura (última leitura para este bloco), em que foi medida uma velocidade média de 930 micra/dia. Nos demais blocos, percebeu-se recalques de menor intensidade, embora não indicando velocidades desprezíveis.

Figura 72 - Desenvolvimento do recalque médio medido em função do tempo (Grupo 3)



(a)



(b)

Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 23 - Velocidade média de recalque de blocos do Grupo 03

	<b>[micra/dia]</b>				
	1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	4ª Leitura	5ª Leitura
<b>Q02 - BL04</b>	87	175	85	-	-
<b>Q04 - BL01</b>	70	77	224	335	75
<b>Q26 - BL 03</b>	728	843	-	-	-
<b>Q34 - BL 02</b>	477	52	52	-	-

Fonte: O Autor, 2019.

#### 4.2.4 Grupo 4

A Tabela 24 apresenta os recalques médios medidos nas leituras realizadas nos 14 blocos pertencentes ao Grupo 4, nos quais os valores de recalque na última leitura foram entre 5 mm e 9 mm.

Observa-se que, em 5 dos blocos deste grupo, foram realizadas apenas 3 leituras de posição dos pinos, permitindo a realização de 2 leituras de recalque, visto que a primeira consistiu na instalação e obtenção da posição considerada inicial dos pinos de recalque. As últimas leituras foram realizadas próximas ao fim da etapa construtiva, com aproximadamente 64 kPa de tensão transmitida estimada e, portanto, visto a baixa velocidade de recalque quando comparado aos demais blocos do empreendimento, supõe-se que não foi solicitado a realização de novas leituras.

A análise geral desse grupo mostra que em grande parte dos blocos houve estabilização dos recalques ou foi observado recalque considerado baixo, quando comparado aos demais blocos estudados para tensões transmitidas próximas às estimadas para o final da etapa construtiva. Apenas no Bloco 02 da Quadra 28 essa análise não foi válida. O mesmo apresentou recalque médio de 5,4 mm, entre as últimas leituras, com velocidade média de 307 micra/dia e com tensão transmitida de 61,1 kPa aos 32 dias, o que indicaria a possibilidade de desenvolvimento de recalques no decorrer do tempo com novo acréscimo de tensão.

Como os recalques desenvolvidos foram de maneira geral baixos, as distorções angulares encontradas foram inferiores às encontradas nos grupos de blocos já estudados, com valores geralmente superiores a 1/3000.

As velocidades máximas apresentadas pelos blocos deste grupo, observadas entre a primeira e segunda leitura, variaram entre 322 micra/dia a 31 micra/dia.

Destaca-se que no Bloco 4 da Quadra 3 e no Bloco 02 da Quadra 17, onde as leituras iniciais (1ª leitura), que definem a cota inicial dos pinos, foram realizadas com tensões transmitidas estimadas maiores que 30 kPa, o que corresponderia o carregamento já próximos a 40% do carregamento total da etapa construtiva. Tal procedimento indica que grande parte dos recalques não foram lidos entre as duas primeiras leituras.

Tabela 24 - Recalque médios medidos para os blocos do Grupo 04

		1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	4ª Leitura	5ª Leitura	6ª Leitura
	Tensão Transmitida [kPa]	-	-	-	-		
<b>Q2-BL03</b>	Recalque Médio [mm]	-	1,1	2,6	6,2		
	Tempo [Dias]	-	32	48	103		
	Tensão Transmitida [kPa]	-	-	-			
<b>Q3-BL04</b>	Recalque Médio [mm]	-	2,7	4,9			
	Tempo [Dias]	-	10	31			
	Tensão Transmitida [kPa]	28,4	55,4	63,6	63,6	63,6	63,6
<b>Q4-BL04</b>	Recalque Médio [mm]	-	3,6	5,6	6,5	7,4	6,3
	Tempo [Dias]	-	18	32	46	62	95
	Tensão Transmitida [kPa]	19,3	63,2	63,5			
<b>Q5-BL02</b>	Recalque Médio [mm]	-	7,6	8,3			
	Tempo [Dias]	-	25	39			
	Tensão Transmitida [kPa]	41,9	63,6	63,6			
<b>Q5-BL04</b>	Recalque Médio [mm]	-	7,1	7,8			
	Tempo [Dias]	-	26	51			
	Tensão Transmitida [kPa]	-	55,4	63,6	63,3		
<b>Q9-BL01</b>	Recalque Médio [mm]	-	4,5	6,9	8,0		
	Tempo [Dias]	-	14	31	59		
	Tensão Transmitida [kPa]	-	-	-	63,6	63,6	
<b>Q12-BL03</b>	Recalque Médio [mm]	-	-	2,3	4,2	5,0	
	Tempo [Dias]	-	-	130,0	162,0	182	
	Tensão Transmitida [kPa]	21,7	55,4	63,6	63,3		
<b>Q12-BL06</b>	Recalque Médio [mm]		4,0	6,8	6,4		
	Tempo [Dias]	-	14	30	49		
	Tensão Transmitida [kPa]	35,2	48,7	63,6			
<b>Q12-BL07</b>	Recalque Médio [mm]		4,2	5,5			
	Tempo [Dias]	-	130	170			
	Tensão Transmitida [kPa]	15,0	35,2	48,7	55,4		
<b>Q12-BL10</b>	Recalque Médio [mm]		3,4	4,3	6,3		
	Tempo [Dias]	-	19	53	70		
	Tensão Transmitida [kPa]	31,1	44,5	61,8	65,7		
<b>Q17-BL02</b>	Recalque Médio [mm]		1,3	3,2	4,9		
	Tempo [Dias]	-	4	14	23		
	Tensão Transmitida [kPa]	16,9	34,2	47,6	61,1		
<b>Q28-BL02</b>	Recalque Médio [mm]		0,5	1,1	5,4		
	Tempo [Dias]	-	9	18	32		
	Tensão Transmitida [kPa]	24	41,2	64,4			
<b>Q28-BL03</b>	Recalque Médio [mm]		1,5	4,8			
	Tempo [Dias]	-	9	23			
	Tensão Transmitida [kPa]	25,7	55,7	63,9	63,9		
<b>Q34-BL01</b>	Recalque Médio [mm]		4,6	8,4	8,6		
	Tempo [Dias]	-	19	47	69		

Fonte: O Autor, 2019.

#### 4.2.5 Grupo 5

A Tabela 25 apresenta os recalques médios medidos nas leituras realizadas nos 22 blocos pertencentes ao Grupo 5 correspondentes aos blocos com valores de recalque médio medido na última leitura menores que 5 mm.

Observa-se que para a grande maioria dos blocos deste grupo as últimas leituras de recalques foram realizadas antes de 45 dias com tensões transmitidas na ordem de 65 kPa, o que indica a proximidade do fim da etapa construtiva. Supõe-se que o desenvolvimento de recalques de menor grandeza indicou a não necessidade de realização de novas leituras.

Os Blocos 01 e 02 da Quadra 17 apresentaram maiores velocidade média de recalque, pois o intervalo entre as duas primeiras leituras foi de apenas 4 dias, registrando-se velocidade média de 250 micra/dia e 318 micra/dia, nesta ordem. Nos demais blocos, a velocidade de recalque média foi menor que 180 micra/dia.

Tabela 25 - Recalques médios medidos para os blocos do Grupo 05

	1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	4ª Leitura	5ª Leitura
Tensão Transmitida [kPa]	28	44,4	57,9	64,7	
<b>Q3-BL01</b> Recalque Médio [mm]		0,6	1,3	2,6	
Tempo [Dias]		9	16	31	
Tensão Transmitida [kPa]	20,5	37,0	43,7	63,9	
<b>Q3-BL02</b> Recalque Médio [mm]		0,2	1,3	3,2	
Tempo [Dias]		9	16	31	
Tensão Transmitida [kPa]	21,2	41,5	64,7		
<b>Q3-BL03</b> Recalque Médio [mm]		1,8	3,9		
Tempo [Dias]		10	31		
Tensão Transmitida [kPa]	21,2	61,7	-	63,6	
<b>Q9-BL02</b> Recalque Médio [mm]		2,6	3,0	3,2	
Tempo [Dias]		25	70	123	
Tensão Transmitida [kPa]	-	63,6	-		
<b>Q9-BL03</b> Recalque Médio [mm]		1,3	1,4		
Tempo [Dias]		17	26		
Tensão Transmitida [kPa]	-	41,9	55,4	63,6	
<b>Q9-BL05</b> Recalque Médio [mm]		0,9	2,1	2,9	
Tempo [Dias]		17	26	45	
Tensão Transmitida [kPa]	28	61,7	63,2		
<b>Q9-BL06</b> Recalque Médio [mm]		2,2	3,5		
Tempo [Dias]		14	54		
Tensão Transmitida [kPa]	28,4	41,9	62,1	63,6	
<b>Q9-BL07</b> Recalque Médio [mm]		0,5	2,8	3,0	
Tempo [Dias]		19	44	61	

Continuação –Tabela 25– Recalques médios medidos para os blocos do Grupo 05

		1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	4ª Leitura	5ª Leitura
<b>Q9-BL08</b>	Tensão Transmitida [kPa]	32,2	41,9	63,6	-	63,6
	Recalque Médio [mm]		1,4	3,9	4,1	4,1
	Tempo [Dias]		19	44	61	89
<b>Q12-BL01</b>	Tensão Transmitida [kPa]	28,4	48,7	63,6	63,6	
	Recalque Médio [mm]		1,0	1,0	1,4	
	Tempo [Dias]		21	39	53	
<b>Q12-BL04</b>	Tensão Transmitida [kPa]	28,4	41,9			
	Recalque Médio [mm]		1,4			
	Tempo [Dias]		40			
<b>Q12-BL08</b>	Tensão Transmitida [kPa]	28,4	48,7	62,1		
	Recalque Médio [mm]		1,3	1,7		
	Tempo [Dias]		17	38		
<b>Q12-BL11</b>	Tensão Transmitida [kPa]	35,2	48,7			
	Recalque Médio [mm]		1,3			
	Tempo [Dias]		21			
<b>Q17-BL01</b>	Tensão Transmitida [kPa]	21	34,4	54,6	64,4	
	Recalque Médio [mm]		1,0	2,5	3,8	
	Tempo [Dias]		4	14	23	
<b>Q18-BL01</b>	Tensão Transmitida [kPa]	20,5	30,2	43,7	60,9	
	Recalque Médio [mm]		0,6	1,6	3,1	
	Tempo [Dias]		10	19	34	
<b>Q18-BL02</b>	Tensão Transmitida [kPa]	24	41,2	57,6	64,9	
	Recalque Médio [mm]		1,0	2,4	3,6	
	Tempo [Dias]		12	21	33	
<b>Q18-BL03</b>	Tensão Transmitida [kPa]	-	30,5	54,5	64,2	
	Recalque Médio [mm]		0,9	1,5	4,0	
	Tempo [Dias]		9	18	32	
<b>Q26-BL01</b>	Tensão Transmitida [kPa]	30,4	43,9	64,1		
	Recalque Médio [mm]		1,3	2,6		
	Tempo [Dias]		8	20		
<b>Q26-BL02</b>	Tensão Transmitida [kPa]	37,2	50,7	64,2		
	Recalque Médio [mm]		1,4	2,1		
	Tempo [Dias]		8	20		
<b>Q28-BL01</b>	Tensão Transmitida [kPa]	34,2	47,6	64,1		
	Recalque Médio [mm]		1,6	4,2		
	Tempo [Dias]		9	21		
<b>Q29-BL01</b>	Tensão Transmitida [kPa]	14,6	31,8	45,3	48,3	-
	Recalque Médio [mm]		0	1,0	2,0	2,3
	Tempo [Dias]		13	25	32	48
<b>Q29-BL02</b>	Tensão Transmitida [kPa]	-	39,7	49,4	-	
	Recalque Médio [mm]		1,9	3,0	3,8	
	Tempo [Dias]		12	19	35	

Fonte: O Autor, 2019.

### 4.3 Análise de Velocidade de Recalque

A NBR 6122 (2010) enfatiza em seu anexo A que uma das importâncias da instrumentação das fundações (medições de recalque) é ganhar experiência local quanto ao comportamento do solo para determinados tipos de fundações e carregamentos.

Conforme já indicado anteriormente, os valores de velocidade de recalque obtidos nas medições, em alguns blocos, foram altos, e segundo a literatura corrente indica-se para prédios em fase de construção, velocidades de recalque normais de até 200 micra/dia, o que torna as velocidades encontradas acima dessa perspectiva.

Entende-se que a alta velocidade de carregamento imposto pelo sistema construtivo em paredes de concreto gera maiores velocidades de recalque e que assim, há a necessidade de serem mais bem estudados parâmetros específicos para esse sistema construtivo. Assim, como forma de contribuir e atribuir uma experiência local conforme indicado pela NBR 6122 (2010), a Tabela 26 apresenta as velocidades de recalque máximas e mínimas apresentadas para as maiores velocidades de carregamento, seguindo a divisão de grupos estudados anteriormente.

Tabela 26 - Velocidade de recalque máximas e mínimas observadas para maiores velocidades de carregamento

Grupo	Faixa de recalque médio	Velocidade máxima (micra/dia)*	Velocidade mínima (micra/dia)*
1	Entre 30 mm e 35 mm	1580	840
2	Entre 20 mm e 29 mm	830	750
3	Entre 10 mm e 19 mm	840	175
4	Entre 5 mm e 9 mm	330	30
5	Menor que 5 mm	320	-

\*Valores obtidos com base nas médias de recalques para máxima velocidade de carregamento  
Fonte: O Autor, 2019.

Cabe destacar que não foi realizado um estudo aprofundado de patologias associadas às altas velocidades de recalque apresentadas. Os valores tornam-se referência para experiência local e para próximos estudos que envolvam a metodologia construtiva de paredes de concreto associadas a fundações em radier.

#### 4.4 Avaliação das Leituras de Deslocamento Negativas

Neste subitem procura-se explicar as leituras de deslocamento negativas que indicaram o levantamento da placa de radier em alguns dos blocos em estudo. Ao total foram avaliados 9 blocos com leituras parciais negativas (em alguns dos pinos) e 3 blocos com todas as leituras negativas. A Tabela 27 apresenta os blocos avaliados. Destaca-se que todos os blocos que apresentaram leituras de deslocamento negativas foram executados em perfis de corte.

Tabela 27 - Blocos com leituras de deslocamento negativas

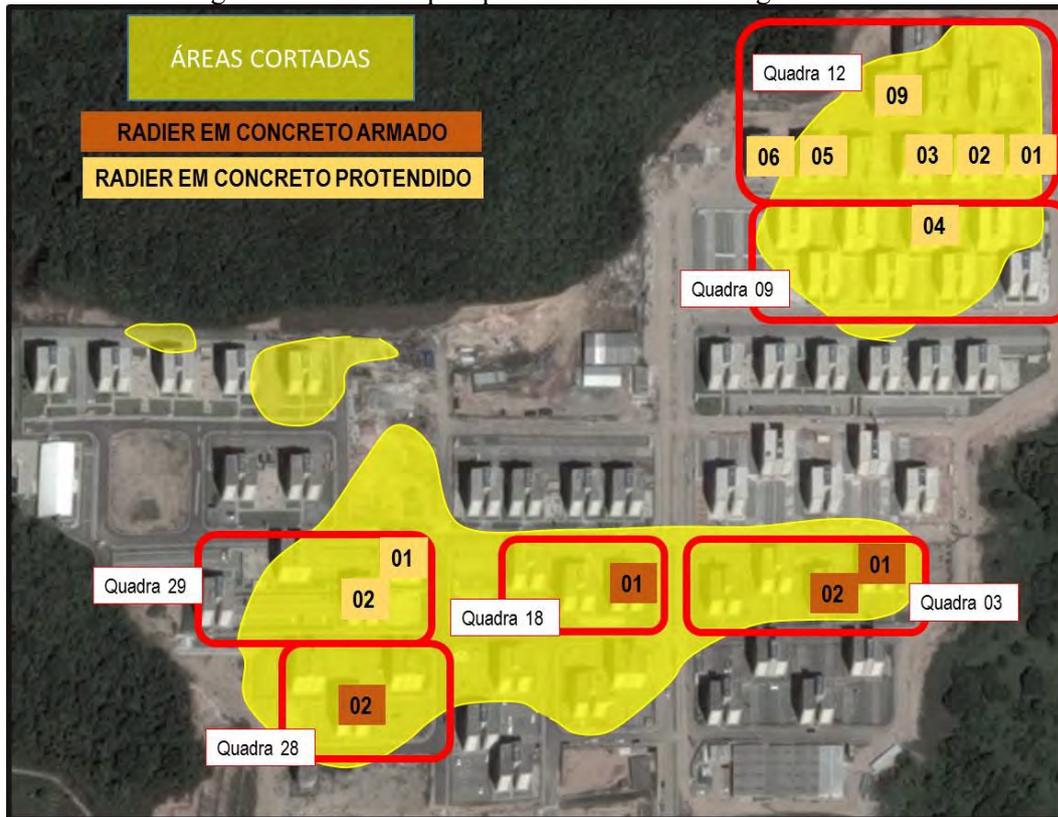
<b>Bloco</b>	<b>Movimento de Terra</b>	<b>Levantamento</b>
Q03-BL01	Corte	Parcial
Q03-BL02	Corte	Parcial
Q09-BL04	Corte	Parcial
Q12-BL01	Corte	Parcial
Q12-BL02	Corte	Total
Q12-BL05	Corte	Total
Q12-BL06	Corte Parcial	Parcial
Q12-BL09	Corte	Total
Q18-BL01	Corte	Parcial
Q28-BL02	Corte	Parcial
Q29-BL01	Corte	Parcial
Q29-BL02	Corte	Parcial

Fonte: O Autor, 2019.

A Figura 73 apresenta a indicação dos blocos estudados e suas localizações no empreendimento. Destacou-se o tipo de placa (protendida ou armada) e as áreas em que foram realizados serviços de corte.

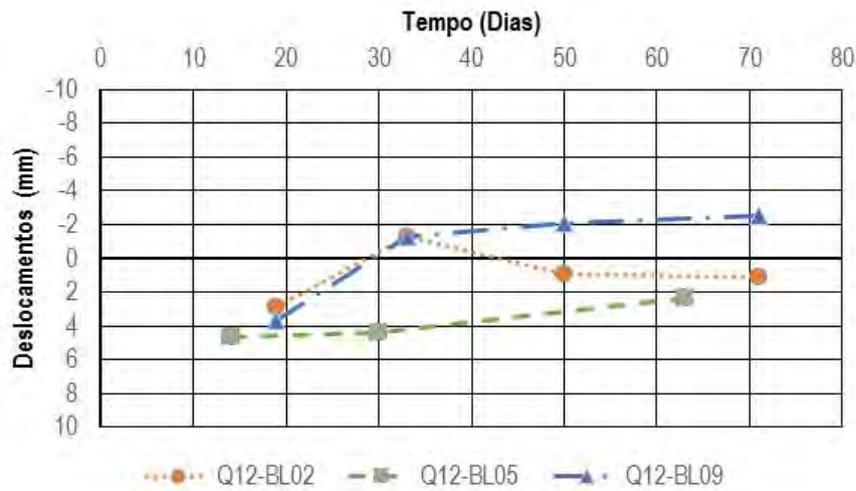
Avaliando primeiramente os blocos com medições de deslocamento que indicaram levantamento total da placa, as leituras de recalque foram realizadas para mesmas tensões transmitidas estimadas, o que impossibilitou a avaliação das deformações juntamente com essa variável. A Figura 74 apresenta o gráfico de deslocamento x tempo.

Figura 73 – Blocos que apresentaram leituras negativas de deslocamento



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 74 – Deslocamentos x tempo dos blocos que indicaram levantamento total



Fonte: O Autor, 2019.

A primeira hipótese levantada seria a existência de solo com potencial expansivo na região que encontram os blocos, visto que os 3 blocos estudados estão próximos um dos outros. Lopes (2016), que estudou o levantamento dos blocos e associou os mesmo com um suposto comportamento expansivo de camada de solo, coletou 3 amostras indeformadas em anéis com

diâmetro de 40mm como forma de avaliar o potencial de expansão por meio do ensaio de expansão livre. Duas amostras foram coletadas na região do bloco Q12-BL08 e uma na região do Bloco Q12-BL09. Os resultados do ensaio de expansão livre e a umidade antes e depois do ensaio realizado por Lopes (2016) estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Ensaio de expansão livre

<b>Amostras</b>	<b>Expansão Livre</b>	<b>Umidade Antes do Ensaio</b>	<b>Umidade após o ensaio</b>
Amostra 01 – Q12-BL08	2,15%	3,4%	49,9%
Amostra 02 – Q12-BL08	1,4%	1,5%	42,5%
Amostra 01 – Q12-BL09	1%	1,6%	31,5%

Fonte: LOPES, 2016.

Lopes (2016) por meio dos ensaios de expansão livre realizado estimou uma possível expansão de camada estudada em 57 mm indicando que realmente houve um levantamento da placa de radier.

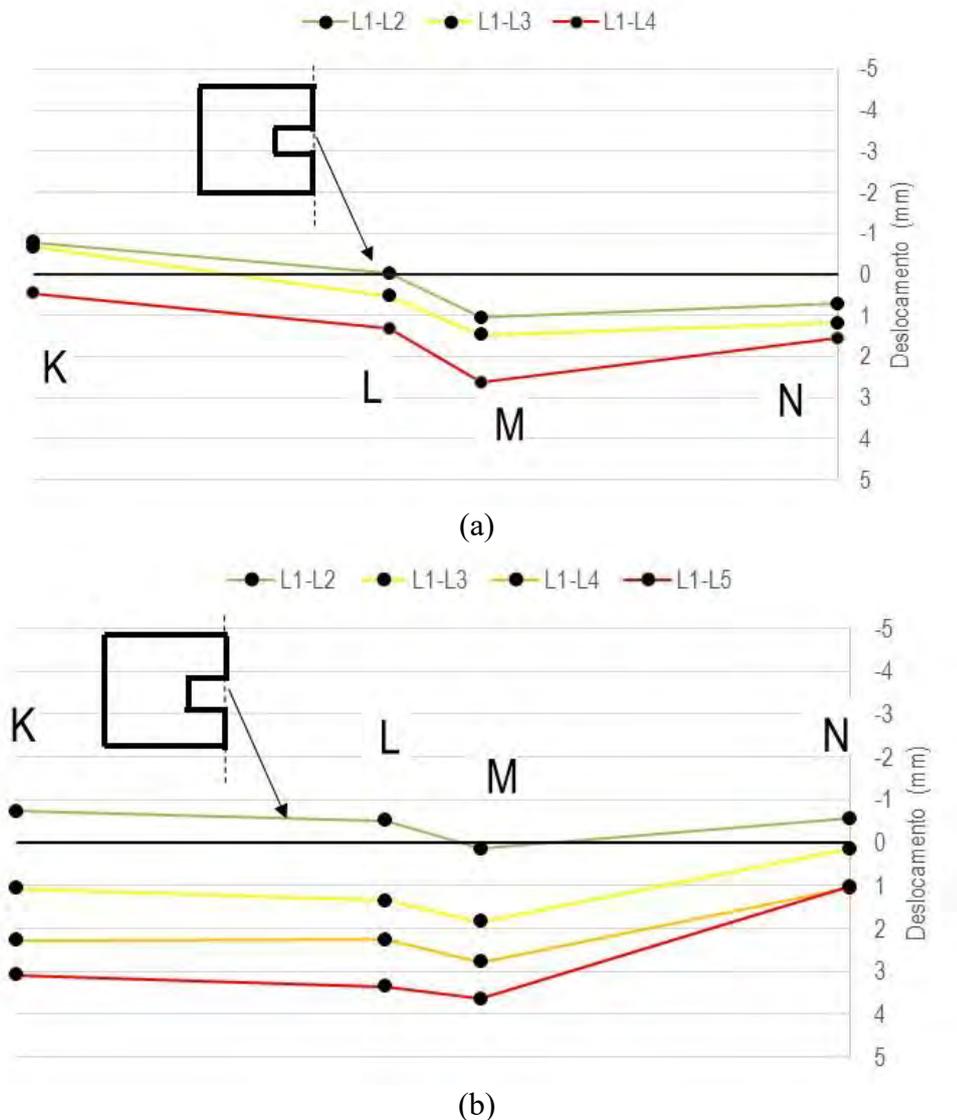
Analisando os dados apresentados pelo autor, observam-se expansões livres relativamente baixas, visto que a média obtida foi de aproximadamente 1,5%. Segundo o critério de Seed *et al* (1962), solos com expansão livre variando de 1 a 5% têm grau de expansividade média. Entende-se que a pouca expansão observada, indica uma baixa pressão de expansão e que o autor não considerou a pressão exercida do radier no desenvolvimento das deformações. Levando o exposto em consideração, não se entende que houve o levantamento da placa de radier devido à expansibilidade do solo.

A análise de recalque médio dos blocos não permite avaliar o comportamento das placas de radier com levantamento parcial, pois a média das deformações dos pinos não indica o comportamento de levantamento. Dessa forma, foram escolhidos dois blocos, um com placa em concreto armado e outra em concreto protendido e estudados as deformações do plano formado pelos Pinos de recalque K, L, M e N. A Figura 75.a e b apresenta a deformada dos pinos em estudo do Bloco 01 da Quadra 03 (concreto armado) e Bloco 01 da Quadra 29 (concreto protendido).

O que se observa nas deformadas apresentadas é que o levantamento se dá pela diferença

distribuição de carregamento devido à metodologia construtiva utilizada na execução dos blocos do empreendimento. As medições de recalque realizadas com execução parcial de um dos lados fazem com haja maiores deformações na região formada pelos pinos M e N. Devido à rigidez do radier e da estrutura há um levantamento da parte oposta à carregada, observada tanto nas placas de concreto armado como em concreto protendido. O levantamento indicado pelas leituras negativas foi avaliado nos perfis de corte visto que, como já avaliado anteriormente, os recalques desenvolvidos foram de menores grandezas. Desse modo entende-se também que nas placas executadas em seções de aterro podem ter apresentado redução do nível de recalque nos pinos da região oposta ao carregamento parcial da placa.

Figura 75 – Levantamento parcial do radier: (a) Q03-BL01 e Q29-BL01



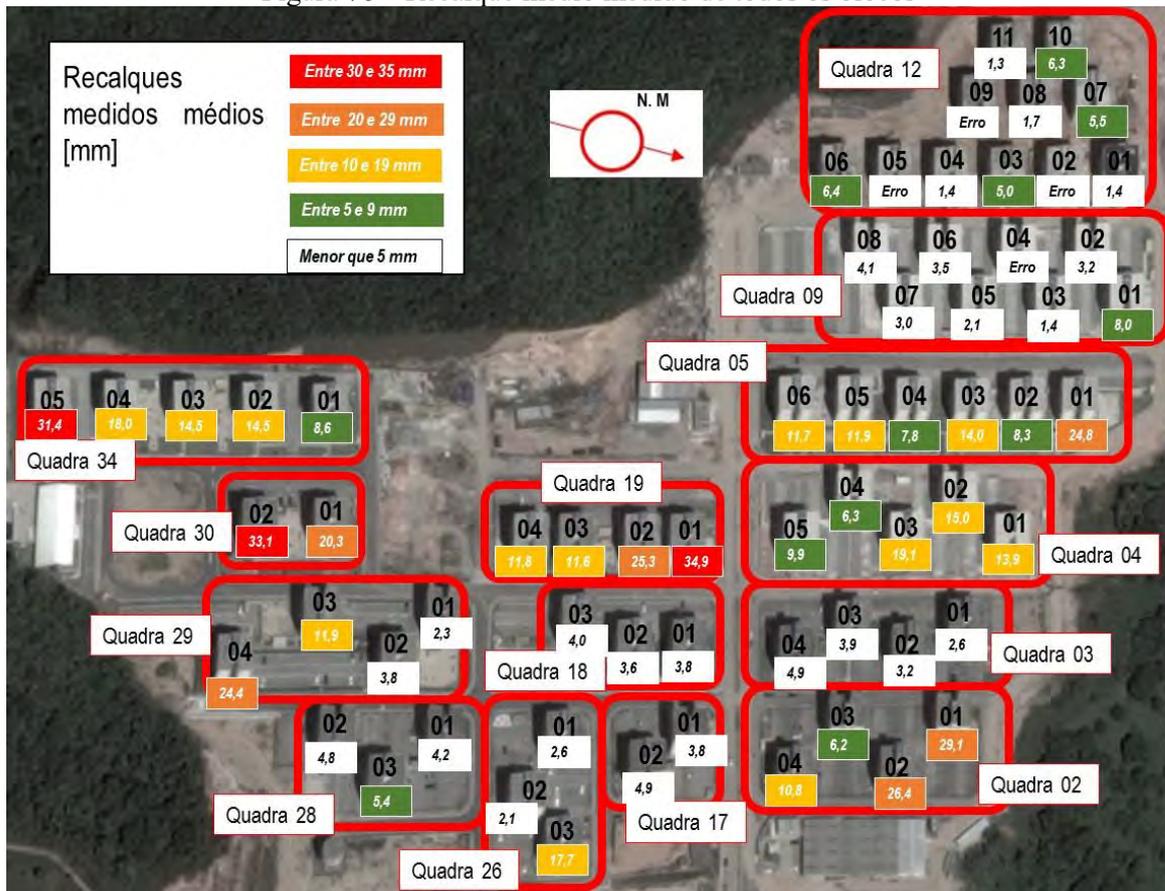
Fonte: O Autor, 2019.

### 4.5 Análise de Efeito de Superposição de Carregamento

A avaliação da Figura 76 indica a possível contribuição de efeito de superposição de carregamento por meio dos recalques médio desenvolvidos em cada bloco, quando analisados de maneira conjunta. Observou-se que os blocos que apresentaram maiores recalques, ou seja, pertencentes ao Grupo 1, estão localizados nas extremidades das quadras, o que em uma análise inicial já não indicaria a contribuição do carregamento do bloco vizinho.

A análise do fator grupo, que indicaria a contribuição do carregamento dos blocos adjacentes, pode ser avaliado nos blocos das Quadras 05, 19, 30 e 34 e nos blocos de 1 a 6 da Quadra 12, pois os mesmos se encontram alinhados e possuem menor distância entre si. Em análise dos blocos da Quadra 05, os quais têm distância entre os radiers que variam de aproximadamente 8 m a 11 m, foi possível observar que os blocos mais internos não apresentaram maiores recalques que os mais externos. Esse mesmo comportamento foi observado nas Quadras 12 e 34.

Figura 76 – Recalque médio medido de todos os blocos



Fonte: O Autor, 2019.

Os blocos da Quadra 19 são os que apresentam menores distâncias entre um e outro, onde o

Bloco 01 e 02 e os Blocos 03 e 04 estão distanciados em aproximadamente 4,5 m. A Figura 77 apresenta registro fotográfico que indica a proximidade dos blocos. Aqui cabe frisar que a análise por meio de recalque médio não indicaria uma avaliação do fator grupo, então se analisou por meio dos recalques finais de cada pino de recalque apresentado na Tabela 29, de modo que os recalques nos Pinos N, O, P para os Blocos 01 e 03 e nos Pinos K, T, S para os Blocos 02 e 04 deveriam ser maiores, caso a carregamento do bloco adjacente contribuisse, o que não foi observado.

Figura 77 – Registro de proximidade dos Blocos da Quadra 19



Fonte: O Autor, 2019.

A Tabela 29 indica que os recalques medidos são maiores nos pinos P, Q, R e S, que se encontram no lado apostado da entrada do radier, local onde há maior concentração de carga.

De maneira geral, observou-se, por meio da análise conjunta dos recalques medidos nos blocos do empreendimento em estudo, que o fator grupo de carregamento não foi preponderante na avaliação de desempenho dos radiers. Mesmo na análise dos radiers, os quais foram construídos mais próximos um do outro, não foi identificada a importância do fator grupo de carregamento na análise.

Tabela 29 - Recalque medido dos blocos da Quadra 19

Pinos	Recalque medido final dos pinos (mm)			
	Bloco 04	Bloco 03	Bloco 02	Bloco 01
K	<b>6,7</b>	4,1	<b>16,3</b>	38,2
L	7,2	4,6	14,2	36,6
M	6,8	4,9	13,8	35,6
N	3,9	<b>4,9</b>	6,2	<b>31,6</b>
O	9,8	<b>11,8</b>	19,2	<b>32,8</b>
P	14,1	<b>18,4</b>	29,2	<b>31,2</b>
Q	19,3	19,4	38,1	33,9
R	20,0	19,4	40,5	35,1
S	<b>19,2</b>	17,1	<b>41,5</b>	35,7
T	<b>14,1</b>	11,4	<b>34,5</b>	38,1

Fonte: O Autor, 2019.

#### 4.6 Parâmetros de Interação Solo Estrutura

Como visto no item 4.2 deste capítulo, que trata das medições de recalque realizadas no empreendimento, grande quantidade de leituras de recalque foi realizado em tensões transmitidas próximas ou iguais, o que dificulta o estudo dos parâmetros de interação Solo Estrutura. Dessa forma são avaliados 5 blocos levando como critério de escolha os blocos em que houvesse maior quantidade de leituras em estágios construtivos diferentes. Procurou-se também levar como critério de escolha, o tipo de placa de radier (concreto armada ou protendido) como forma de avaliar uma possível influência da solução adotada.

Levando como critério os parâmetros indicados, os blocos estudados foram:

- Quadra 02-Bloco 01: Placa em Concreto Armado com recalque médio medido final de 29 mm em seção de aterro
- Quadra 04-Bloco 01: Placa em Concreto Protendido com recalque médio medido final de 12,6 mm em seção de aterro;
- Quadra 09-Bloco 07: Placa em Concreto Protendido com recalque médio medido final de 3 mm em seção de corte;
- Quadra 18-Bloco 02: Placa em Concreto Armado com recalque médio medido final de 3,6 mm em seção de corte;
- Quadra 29-Bloco 01: Placa em Concreto Protendido com recalque médio medido final de 2,3 mm em seção de corte.

#### 4.6.1 Distribuição dos Carregamentos

Antes de serem avaliados os parâmetros de interação solo estrutura dos blocos em estudo, foi indicado no Quadro 6 o esquema representativo da etapa construtiva ao qual foi realizada cada leitura de recalque. Entende-se que a não distribuição dos carregamentos pode interferir em mudanças nos parâmetros que serão estudados adiante e o correto entendimento dos carregamentos deve ser avaliado.

Observa-se que apenas no Bloco 01 da Quadra 02 a leitura inicial foi realizada com apenas um dos lados executados do pavimento o que indica diferença de distribuição de carga quando avaliado a sua leitura subsequente. Entre a segunda e terceira leitura de recalque, também ocorreu uma diferença de distribuição visto que na segunda leitura o bloco estava com o 4º andar executado e na terceira leitura apenas o lado esquerdo e hall de entrada do 7º pavimento estava executado.

O Bloco 01 da Quadra 04 e o Bloco 07 da Quadra 9 não apresentaram entre nenhuma das medições diferença de distribuição de carregamento.

No Bloco 02 da Quadra 18, a segunda leitura de recalque foi realizada com o 5º pavimento parcialmente executado de modo que entre as leituras anteriores e posteriores, há diferença de distribuição no carregamento. Mesmo fato observado na avaliação do Bloco 01 da Quadra 29 onde a segunda e terceira foram realizadas após executados parcialmente (lado esquerdo e hall de entrada) do 4º e 6º pavimentos, respectivamente.

A diferença de distribuição dos carregamentos devida à metodologia construtiva do sistema de paredes em concreto, e mais especificamente desse empreendimento, onde foram executadas com duas formas separadas, mostram um novo panorama de avaliação do comportamento do sistema no que se refere aos parâmetros de interação solo estrutura. O maior carregamento em uma região da placa desenvolve maiores recalques quando comparadas com o recalque médio da placa. Consequentemente alterações nos parâmetros de interação solo estrutura, durante as etapas construtivas são esperadas. Como não foi possível obter leituras de recalque em todas as etapas construtivas neste empreendimento, uma melhor avaliação do comportamento dos parâmetros de ISE devido à distribuição de carregamento da metodologia será avaliada com auxílio de modelo numérico apresentado no Capítulo 6.

Quadro 6 - Descrição dos serviços realizados em etapas

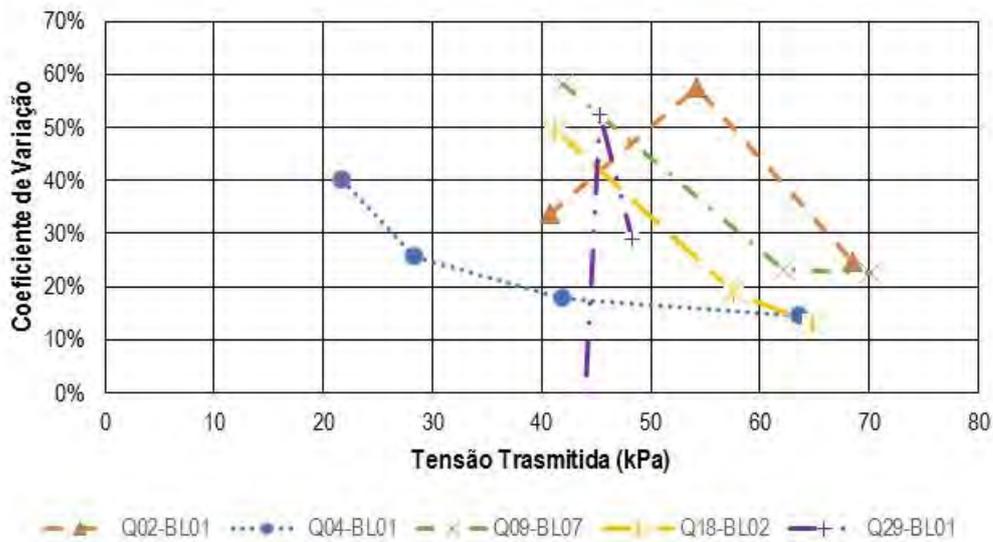
BLOCOS	LEITURA 01	LEITURA 02	LEITURA 03	LEITURA 04	LEITURA 05
Q02-BL01					
Q04-BL01					
Q09-BL07					
Q18-BL02					
Q29-BL01					
<b>Legenda</b>					
		Etapa anteriormente executada			
		Última etapa executada no momento da medição			

Fonte: O Autor, 2019.

#### 4.6.2 Coeficientes de Variação e Fatores de Recalque

Como forma inicial de avaliar os efeitos da ISE no comportamento dos blocos em estudo, são calculados os coeficientes de variação de recalque com o avanço construtivo, conforme apresentado na Figura 78.

Figura 78 – Evolução dos coeficientes de variação



Fonte: O Autor, 2019.

No Bloco 01 da Quadra 02 houve um aumento do coeficiente de variação definido pela segunda e terceira leitura de recalque quando comparado entre as duas primeiras leituras. Cabe destacar conforme observado no item anterior que há diferença de distribuição de carregamentos entre as leituras de recalque neste bloco, como também no Bloco 01 da Quadra 29 que também apresentou acréscimo na variação do coeficiente de variação.

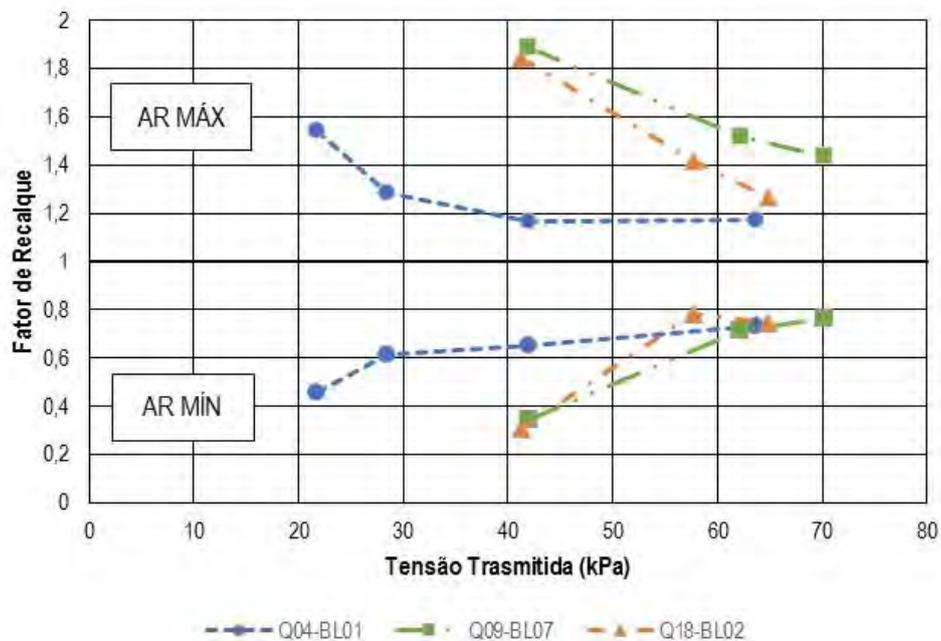
O Bloco 01 da Quadra 04 e Bloco 09 da Quadra 07, blocos estes que não apresentaram variação de distribuição de carregamento apresentaram redução no coeficiente de variação de recalque com o avanço construtivo. Entende-se que as maiores variações do coeficiente de variação devem ocorrer nas primeiras etapas construtivas. No Q04-BL01, houve influência no coeficiente de variação mais significativa até a execução do 5º pavimento, e pós essa medição houve tendência de valores constantes.

No Bloco 09 da Quadra 07, a leitura de recalque não foi possível determinar um ponto de tendência de estabilização do coeficiente de variação pois a penúltima leitura foi executada com 8ª pavimento completamente executado. Destaca-se que a execução da platibanda e caixa d'água após esta medição não indicou variações expressivas no coeficiente em estudo.

É importante destacar que no Bloco 02 da Quadra 18, a diferença de distribuição de carga observada na segunda leitura de recalque provavelmente elevou o coeficiente de variação determinado entre as duas primeiras leituras, indicando valores de aproximadamente 50%.

Avaliando os Fatores de Recalque Absoluto (AR) máximos e mínimos, ambos apresentados na Figura 79, é observado a tendência dos valores se aproximarem a um valor de  $AR=1$ , ou seja, os valores dos recalques absolutos se aproximarem dos valores médios com o avanço construtivo dos blocos, indicando que nessas medições de recalque, conseguiu-se observar o efeito da ISE com a tendência de uniformização dos recalques.

Figura 79 – Fatores de recalque máximos e mínimos



Fonte: O Autor, 2019.

#### 4.7 Conclusão do Capítulo

A partir das análises realizadas neste capítulo podem-se alcançar as seguintes conclusões.

- O fator que mais influenciou no desenvolvimento dos recalques dos blocos do empreendimento em estudo foram os movimentos de terraplanagem, visto que os blocos construídos sobre aterros exibiram maiores valores de recalques;
- A diferença de distribuição do carregamento devido à metodologia executiva dos blocos tornou-se uma importante informação para avaliação do comportamento dos radiers, principalmente no que diz respeito às distorções angulares e parâmetros de

ISE;

- O sistema construtivo impõe altas velocidade de carregamento e conseqüentemente maiores velocidades de recalque;
- Não é observado linearidade entre as velocidades de recalque e velocidades de carregamento;
- Não são observadas nas curvas de tensão x recalque tendência de comportamento linear, isto é, não há proporcionalidade entre as tensões e recalques;
- São observadas rotações de até 1/350;
- O levantamento de algumas placas de radier foi observado em perfis de corte devido à falta de distribuição de carga ocasionados pela metodologia construtiva;
- Não é observado efeito grupo de carregamento entre os blocos.

De maneira geral nos blocos construídos sobre aterros, os recalques médios variaram entre 10 mm a 35mm e nos blocos construídos sobre cortes, os recalques médios foram menores que 10 mm.

Como forma de contribuir para o avanço do entendimento das variáveis observadas nas medições de recalque, o Capítulo 5 apresenta retroanálise dos parâmetros geotécnicos como forma de avaliar a não linearidade entre tensão e deformação.

## **5 RETROANÁLISE DOS PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE**

Como visto no capítulo anterior, as medições de recalque apresentadas mostraram não linearidade entre tensões estimadas e recalques medidos, principalmente quando avaliados os blocos que foram executados em seções de aterro. O fato indica que a previsibilidade do comportamento no que diz respeito à estimativa de recalques, torna a simplificação de adoção de parâmetros de deformabilidade constantes em projetos, uma atribuição em alguns casos falha.

Dessa forma, o presente capítulo visa contribuir com o entendimento das variações desses parâmetros conforme avanço construtivo e consequente aumento das tensões que a placa de fundação transmite ao solo.

Para tanto, utilizaram-se os dados obtidos por meio do monitoramento dos recalques dos radiers dos 63 blocos do empreendimento, dos perfis de sondagem de simples reconhecimento e da estimativa de carregamento, para realizar retroanálise do módulo de elasticidade a fim de analisar a sua variação com o avanço construtivo.

Todas as análises foram realizadas com base na simplificação de comportamento elástico do solo e, portanto, utilizaram-se equação e procedimentos baseados na Teoria da Elasticidade, prática convencional na engenharia geotécnica e de fundações.

Também, foi indicada metodologia para simplificação da adoção de coeficientes de reação, as vezes denominados de coeficientes de mola, visto que, na grande maioria dos softwares de análise estrutural não é possível a adoção de meio elástico contínuo e consequente utilização do módulo de elasticidade da camada abaixo do elemento de fundação.

Por fim, visto que uma importante parcela dos recalques medidos foi determinada para tensões transmitidas constantes (mesmo estágio construtivo) em alguns dos blocos, foi avaliada as velocidades de recalques por fluência e por meio de ACP, procurou-se determinar as principais variáveis que influenciam neste tipo de recalque.

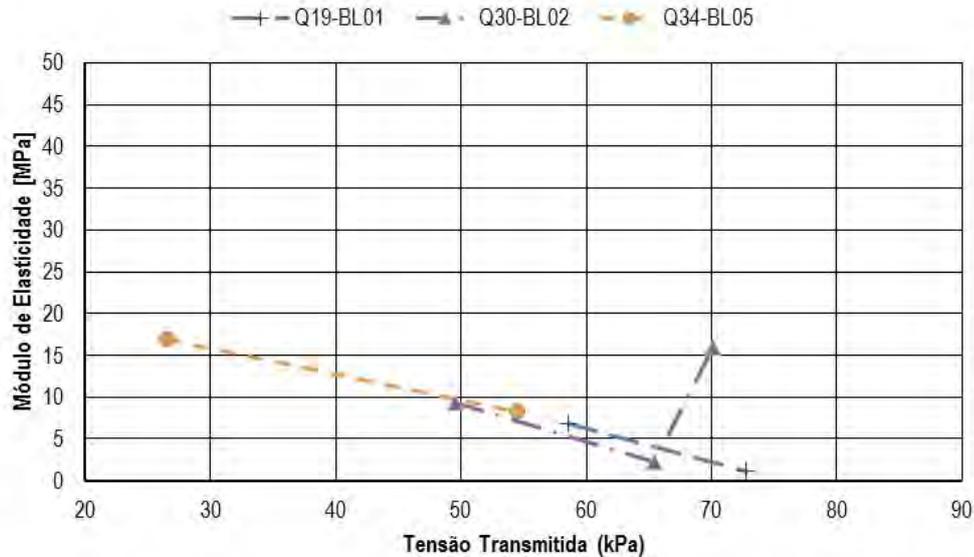
### **5.1 Módulo de Elasticidade - Seções de Aterro**

Como forma de organizar a avaliação da retroanálise dos módulos de elasticidade é realizado seguindo a divisão em grupos de intervalo de recalque, conforme apresentado no Capítulo 4, visto que todos os blocos do Grupo 01, 02 e 03 e apenas 3 blocos do Grupo 04 foram executados em seções de aterro.

- **Grupo 01**

A Figura 80 apresenta os módulos de elasticidade retroanalizados com base nos recalques médios e tensões transmitidas estimadas dos blocos do Grupo 01. São eles: Quadra 19 – Bloco 01; Quadra 30 – Bloco 02; e Quadra 34 – Bloco 05.

Figura 80 - Módulos de elasticidade retroanalizados dos blocos do Grupo 01



Fonte: O Autor, 2019.

Observam-se que os módulos de elasticidade encontrados para este grupo, onde foram determinados os maiores recalques médios, variaram entre 17 MPa e 1,1 MPa. Entende-se que a variação observada foi relevante e o baixo valor indicado na retroanálise pode ter sido ocasionada por recalques secundários (fluência) observados nas seções de aterro, justificando os valores baixos do módulo de elasticidade.

No Blocos 01 da Quadra 19 e Bloco 05 da Quadra 34, houve decréscimo do módulo de elasticidade retroanalizado com aumento da tensão transmitida estimada. No Bloco 02 da Quadra 30 é observada redução do parâmetro seguido de aumento na leitura consecutiva. Fato este explicado, pois, a segunda medição de recalque só foi realizada após a execução parcial do 8ª pavimento o que gera um carregamento não distribuído na placa de radier e conseqüentemente no desenvolvimento dos recalques, conforme já discutido no capítulo anterior. Entende-se que a equação que foi utilizada na retroanálise é aplicável a carregamentos distribuídos uniformemente, e a falta de distribuição origina erros nos parâmetros de retroanálise.

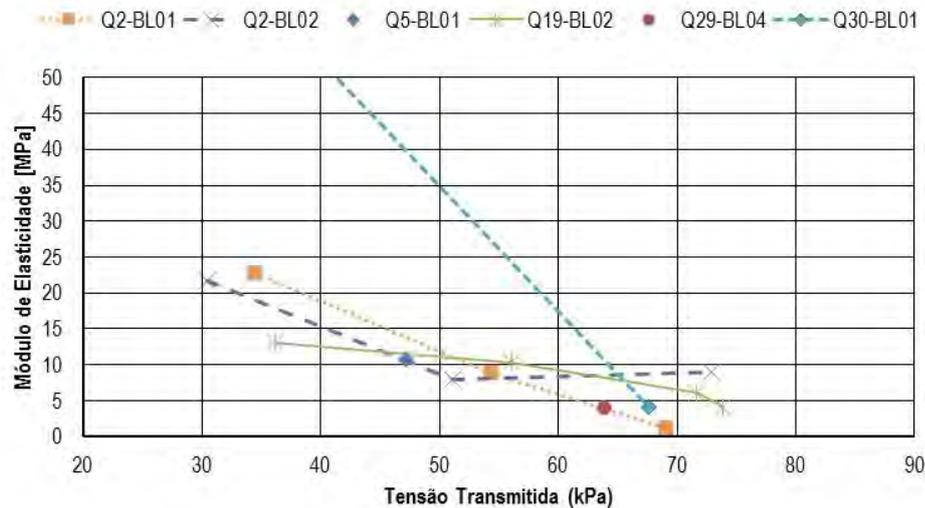
A redução nos valores de módulos elasticidade retroanalizados indicados, torna claro que

adoção de parâmetros de deformabilidade constantes em projetos deste tipo podem subestimar os valores de recalques. Se analisado, por exemplo, o comportamento da curva do Bloco 05 da Quadra 34, o valor de E reduziu de 16,9 MPa para 8,2 MPa, indicado queda da mais da metade do valor obtido nas primeiras leituras.

- **Grupo 02**

A Figura 81 apresenta os módulos de elasticidade retroanalizados com base nos recalques médios e tensões transmitidas estimadas dos blocos do Grupo 02. São eles: Quadra 02 – Blocos 01, 02; Quadra 05- Bloco 01; Quadra 19 – Blocos 02; Quadra 29 – Bloco 04; e Quadra 30 - Bloco 01.

Figura 81 - Módulos de elasticidade retroanalizados dos blocos do Grupo 02



Fonte: O Autor, 2019..

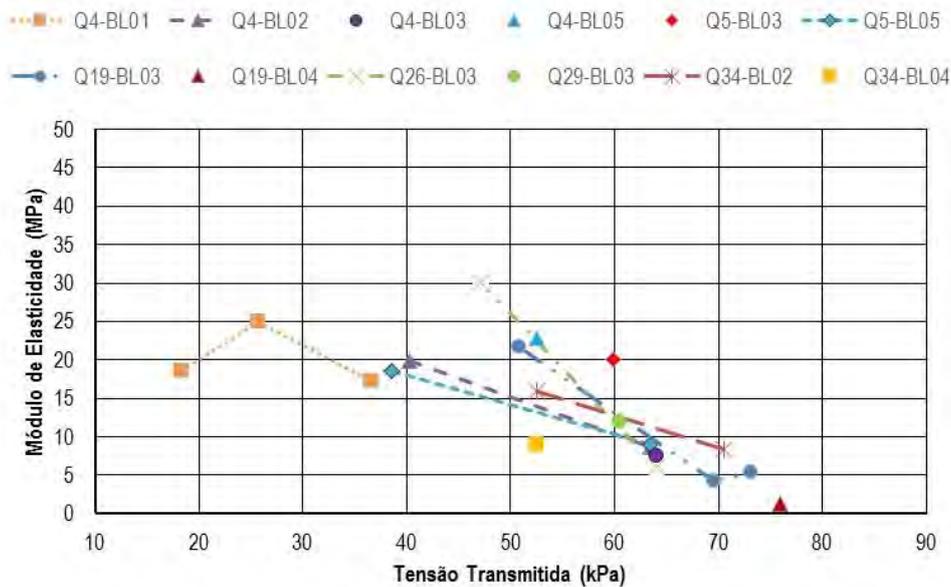
Conforme avaliado anteriormente, a não distribuição de carga no momento da leitura indica erros na retroanálise do parâmetro de módulo de elasticidade. No Bloco 01 da Quadra 30, a leitura inicial de recalque foi realizada com a execução parcial do 2ª andar, o que gerou uma distorção no valor de E retroanalizado. O mesmo aconteceu em leituras dos Blocos 01 e 02 da Quadra 02 e Bloco 01 da Quadra 05, mas a distorção dos valores retroanalizados foi menor.

O comportamento da curva apresentada é semelhante ao observado na análise do grupo anterior. Mostrou-se tendência de redução dos valores de E com o aumento da tensão transmitida devido ao avanço construtivo. Os valores encontrados variaram de 13,1 MPa a 4,2 MPa.

- **Grupo 03**

A Figura 82 apresenta os módulos de elasticidade retroanalizados com base nos recalques médios e tensões transmitidas estimadas dos blocos do Grupo 03: Blocos 01, 02, 03 e 05 da Quadra 04; Blocos 03 e 05 da Quadra 05; Blocos 03 e 04 da Quadra 19; Bloco 03 da Quadra 26; Bloco 03 da Quadra 29 e Blocos 02 e 04 da Quadra 34. No Bloco 01 da Quadra 04, Blocos 03 e 05 da Quadra 05, Bloco 03 da Quadra 19 e Bloco 03 da Quadra 26, foram realizadas leituras de recalque com execução parcial dos pavimentos o que indicam distorções nos dados retroanalizados.

Figura 82 - Módulos de elasticidade retroanalizados dos blocos do Grupo 03



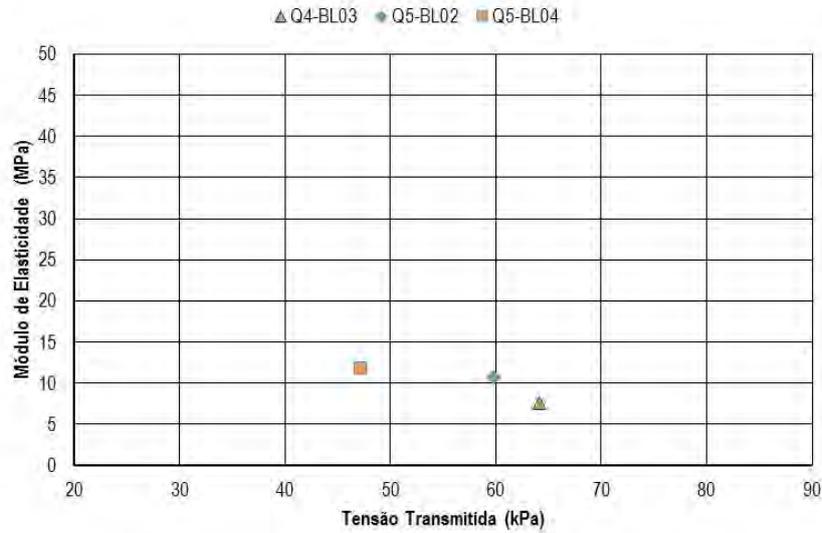
Fonte: O Autor, 2019

Os valores dos módulos de elasticidade retroanalizados para este grupo, desconsiderando os blocos com distorção de recalques variaram entre 22,8 MPa a 8,4 MPa.

- **Grupo 04**

A Figura 83 apresenta os módulos de elasticidade retroanalizados com base nos recalques médios e tensões transmitidas estimadas dos blocos do Grupo 04: Bloco 03 da Quadra 04; Bloco 05 e 04 da Quadra 02. Os blocos estudados nesse grupo apresentaram apenas uma leitura com tensões transmitidas estimadas diferentes. Dessa forma só foi possível obter um ponto de retroanálise em cada um dos blocos estudados. Os módulos variaram entre 11,7MPa a 8,7 MPa.

Figura 83 - Módulos de elasticidade retroanalizados dos blocos do Grupo 04

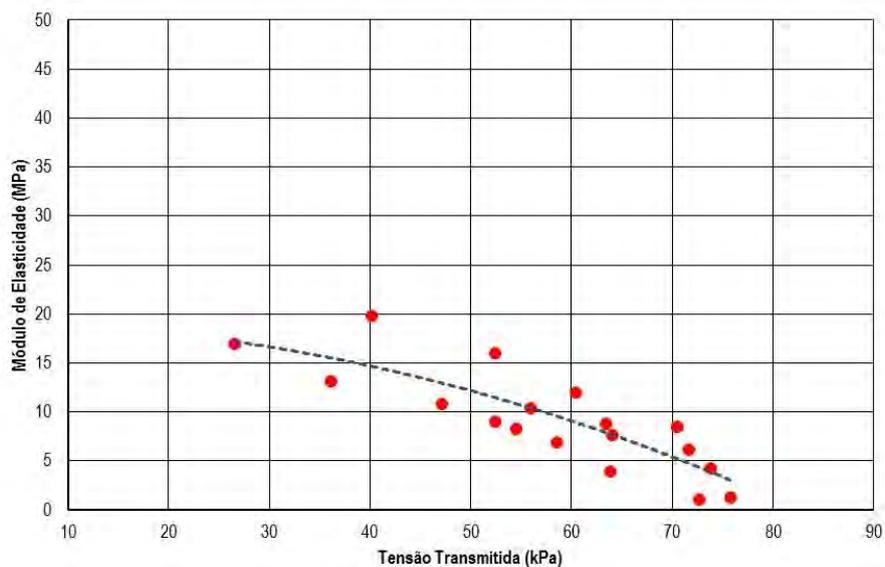


Fonte: O Autor, 2019..

### 5.1.1 Evolução do módulo de elasticidade retroanalizado em função da tensão transmitida (Seções de Aterro)

Como forma de avaliar o comportamento da variação do módulo de elasticidade em relação ao avanço construtivo e conforme apresentados anteriormente, redução do parâmetro de deformabilidade, agrupou-se os valores retroanalizado e determinou-se uma curva única denominada de curva de evolução do módulo de elasticidade retroanalizados para os perfis de aterro apresentado na Figura 84.

Figura 84 - Curva de evolução do módulo de elasticidade retroanalizado em função da tensão transmitida



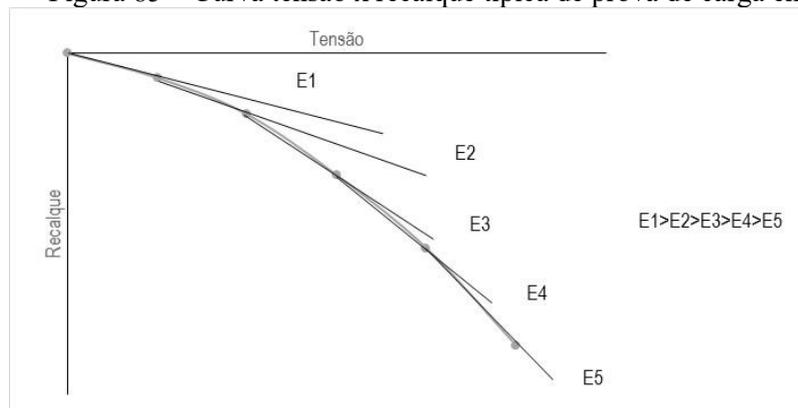
Fonte: O Autor, 2019.

A análise da curva de evolução mostra claramente a redução do módulo de elasticidade

conforme avanço construtivo. Tal fato indica que a adoção do módulo de elasticidade em projetos de fundação dessa natureza, indica recalques subestimados, visto que com aumento da tensão transmitida ocorre perda de rigidez da camada compressível e conseqüentemente maiores recalques são desenvolvidos. Os módulos de elasticidades indicados na curva variaram de 16,9 MPa para 1,2 MPa, para a menor (26,6 kPa) e a maior (75,9kPa) tensão transmitidas estimada, respectivamente. Isso indica uma redução de mais de 10 vezes no parâmetro de deformabilidade.

Se analisado uma curva típica de uma prova de carga em placa, conforme apresentado na Figura 85, é possível indicar que o módulo de elasticidade inicial é maior do que os módulos obtidos nas demais leituras. Visto isso, e entendendo que a medição de recalque juntamente com acompanhamento do carregamento que solicita a placa, os resultados apresentados tornam-se uma prova de carga em real grandeza, o que, justifica o comportamento apresentado pela curva característica apresentada na Figura 5.5.

Figura 85 – Curva tensão x recalque típica de prova de carga em placa



Fonte: O Autor, 2019.

Foram avaliados os parâmetros geotécnicos dos perfis dos blocos que compõem a curva apresentada na Figura 86 de maneira conjunta e considerou-se um perfil típico geotécnico, ambos apresentados na Tabela 30.

Observou-se que os perfis geotécnicos apresentados possuem predominância de siltes argilosos e arenosos com  $N_{SPT}$  médio variando de 8 a 11 golpes / 0,30 m. Considerou-se para determinação de um perfil típico que representasse os blocos em estudo, a aproximação de um perfil de silte com  $N_{SPT}$  de 10 golpes / 0,30 m.

Observa-se que o prolongamento da curva característica apresentada, coincide no eixo Y (módulo de elasticidade) ao valor de aproximadamente 17,5 MPa, conforme apresentado na

Figura 86. Se considerado a equação de Teixeira e Godoy (1998) no perfil típico analisado na Tabela 30, é obtido o mesmo valor do prolongamento, conforme apresentado na Equação 37.

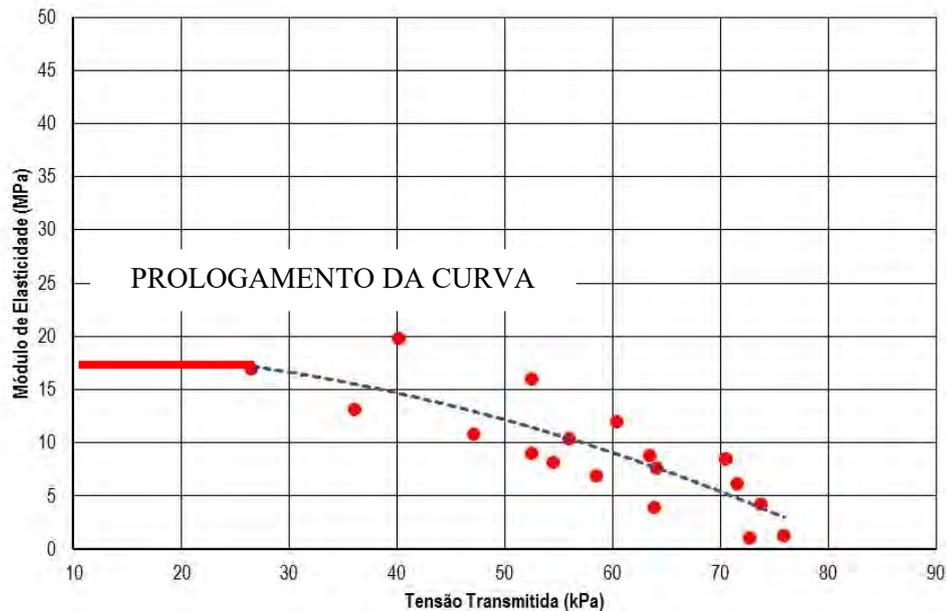
$$E = 5 * 0,35 * 10 = 17,5 \text{ MP} \quad (37)$$

Tabela 30 - Parâmetros Geotécnicos dos blocos em estudo

Bloco	Tipo de Solo	N <sub>SPT</sub>
Q04-BL02	Silte Argiloso	10
Q04-BL03	Silte Argiloso	9
Q05-BL01	Silte Argiloso	10
Q19-BL01	Silte Argiloso/Arenoso	8
Q19-BL02	Silte Arenoso	10
Q19-BL04	Silte Argiloso	12
Q29-BL03	Silte Arenoso	9
Q29-BL04	Silte Argiloso/Arenoso	9
Q34-BL02	Silte Argiloso	11
Q34-BL04	Silte Argiloso	9
Q34-BL05	Silte Argiloso	9
<b>Perfil Típico</b>	<b>SILTE</b>	<b>10</b>

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 86 – Prolongamento da linha tendência da curva característica



Fonte: O Autor, 2019.

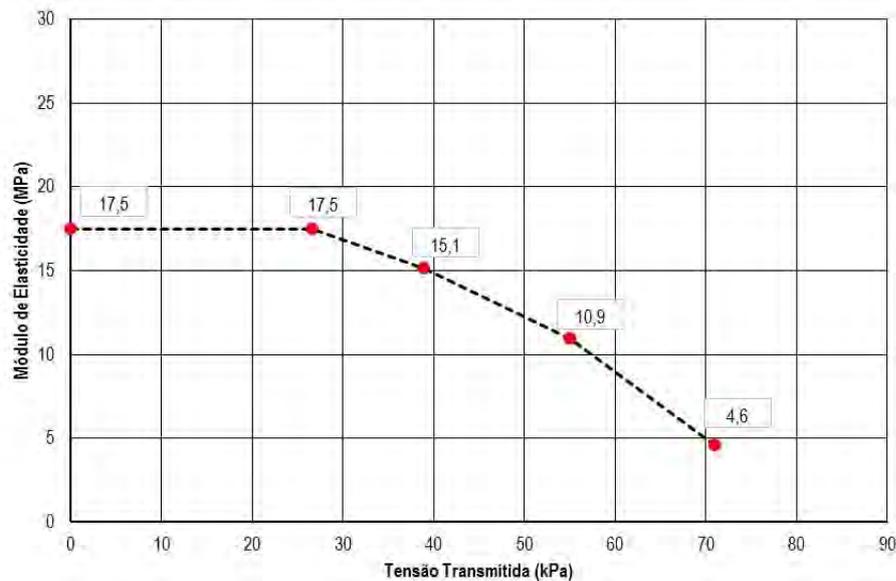
Visto a análise do prolongamento da curva de evolução de módulo de elasticidade, pode-se levantar a hipótese de que os valores de módulo de elasticidade partem de um determinado

valor inicial, próximo aos valores analisados pelas equações convencionais de determinação do módulo de elasticidade e com o aumento das tensões transmitidas, os valores diminuem, indicando uma perda de rigidez da camada compressível.

### 5.1.2 Estimativa de Recalque a partir da curva de evolução do módulo de elasticidade retroanalisado em função da tensão transmitida

Como forma de comparar e avaliar o comportamento da curva de evolução de módulo de elasticidade obtida anteriormente, utilizou-se o modelo numérico do programa ELPLA para estimativa de recalques utilizando os módulos de elasticidade obtido na curva em 4 tensões transmitidas, correspondente aos seguintes níveis de tensão transmitida: segundo pavimento (23,6 kPa); quarto pavimento (38,5 kPa); sexto pavimento (53,4 kPa) e oitavo pavimento (68,3,8 kPa). A Figura 87 representa a curva de módulo de elasticidade utilizada no modelo numérico.

Figura 87 – Módulos de elasticidade utilizados no modelo numérico no ELPLA



Fonte: O Autor, 2019.

Visto as limitações do programa ELPLA na adoção de um módulo de elasticidade variável, determinou-se separadamente as deformações para cada estágio construtivo, criando uma curva de recalque acumulado. A Tabela 31 apresenta esquema ilustrativo com as cargas correspondentes a cada estágio e os valores de recalque encontrados. Os recalques foram determinados em 4 profundidades de camada compressíveis distintas: 2 metros; 4 metros, 6 metros e 8 metros. Também se avalia a curva para a admissão do módulo de elasticidade constante inicial, resultados estes apresentados na Tabela 32.

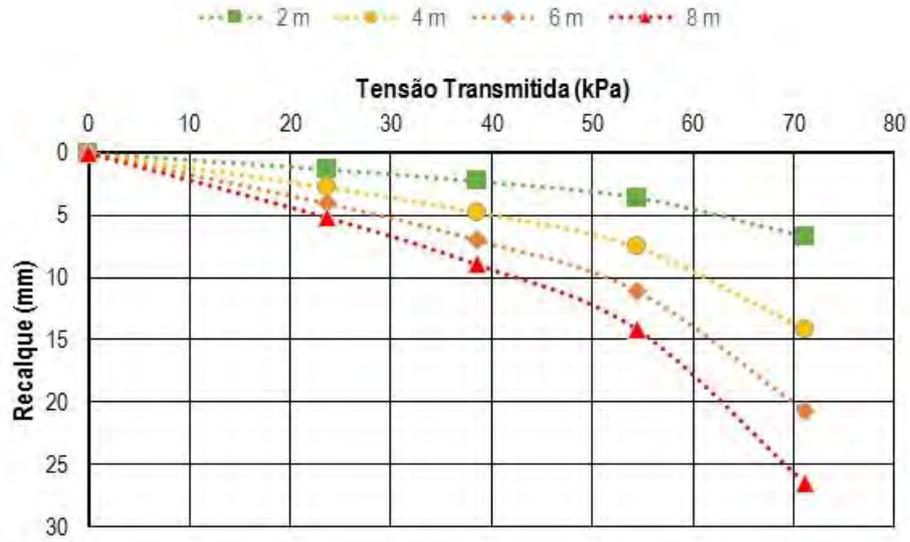
A Figura 88 apresenta as curvas de recalque para as profundidades em considerados com adoção do módulo de elasticidade variável e a Figura 89 apresenta os valores para hipótese do parâmetro constante. Analisando os resultados encontrados nos modelos numéricos observam-se maiores diferenças na determinação dos recalques para maiores tensões transmitidas, visto os menores valores de E indicados. A profundidade da camada compressível torna-se uma variável importante na análise, pois os recalques obtidos para os módulos de elasticidades variáveis tornam-se mais distantes dos obtidos com o modelo de módulo de elasticidade constante, embora a diferença percentual seja constante. A Tabela 33 mostra a diferença entre os recalques finais obtidos nas duas hipóteses.

Tabela 31 - Recalques obtidos no modelo numérico utilizando E variável

Estágio Simulado	Tensão Aplicada/ Tensão Simulada	E (MPa)	Recalques (mm) – Profundidades de Camada Compressível							
			2m		4m		6m		8m	
			Méd.	Acum	Méd.	Acum	Méd.	Acum	Méd.	Acum
	23,6 kPa	17,5	1,3	<b>1,3</b>	2,8	<b>2,8</b>	4,0	<b>4,0</b>	5,1	<b>5,1</b>
	14,9 kPa/ 38,5 kPa	15,1	1,0	<b>2,3</b>	2,0	<b>4,8</b>	3,0	<b>7,0</b>	3,8	<b>8,9</b>
	14,9 kPa/ 53,4/kPa	10,9	1,3	<b>3,6</b>	2,8	<b>7,6</b>	4,1	<b>11,1</b>	5,3	<b>14,2</b>
	14,9 kPa/ 68,3 kPa	4,6	3,1	<b>6,7</b>	6,6	<b>14,2</b>	9,7	<b>20,8</b>	12,2	<b>26,4</b>

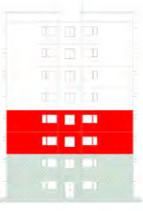
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 88 - Curvas de recalque para modelo numérico com E variável



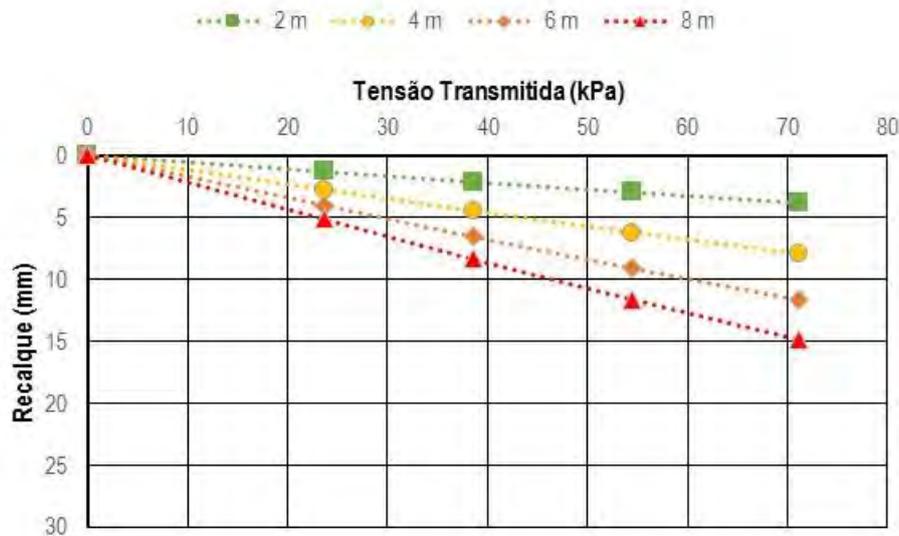
Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 32 - Recalques obtidos no modelo numérico utilizando E Constante

Estágio Simulado	Tensão Aplicada/ Tensão Simulada	E (MPa)	Recalques (mm) – Profundidades de Camada Compressível							
			2m		4m		6m		8m	
			Méd.	Acum.	Méd.	Acum.	Méd.	Acum.	Méd.	Acum.
	23,6 kPa	17,5	1,3	<b>1,3</b>	2,8	<b>2,8</b>	4,0	<b>4,0</b>	5,1	<b>5,1</b>
	14,9 kPa/ 38,5 kPa	17,5	0,8	<b>2,1</b>	1,7	<b>4,5</b>	2,5	<b>6,5</b>	3,2	<b>8,3</b>
	14,9 kPa/ 53,4/kPa	17,5	0,8	<b>2,9</b>	1,7	<b>6,2</b>	2,5	<b>9,0</b>	3,2	<b>11,5</b>
	14,9 kPa/ 68,3 kPa	17,5	0,8	<b>3,7</b>	1,7	<b>7,9</b>	2,5	<b>11,5</b>	3,2	<b>14,7</b>

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 89 - Curvas de recalque para modelo numérico E constante



Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 33 - Diferença dos recalques obtidos nas hipóteses

Recalques obtidos no modelo numérico (mm)				
Hipótese	2m	4m	6m	8m
Módulo de Elasticidade Constante	3,7	7,9	11,5	14,7
Módulo de Elasticidade Variável	6,7	14,2	20,8	26,4
<b>Diferença (mm/%)</b>	<b>-3,0 (78%)</b>	<b>-6,3(78%)</b>	<b>-9,3 (78%)</b>	<b>-11,7 (78%)</b>

Fonte: O Autor, 2019.

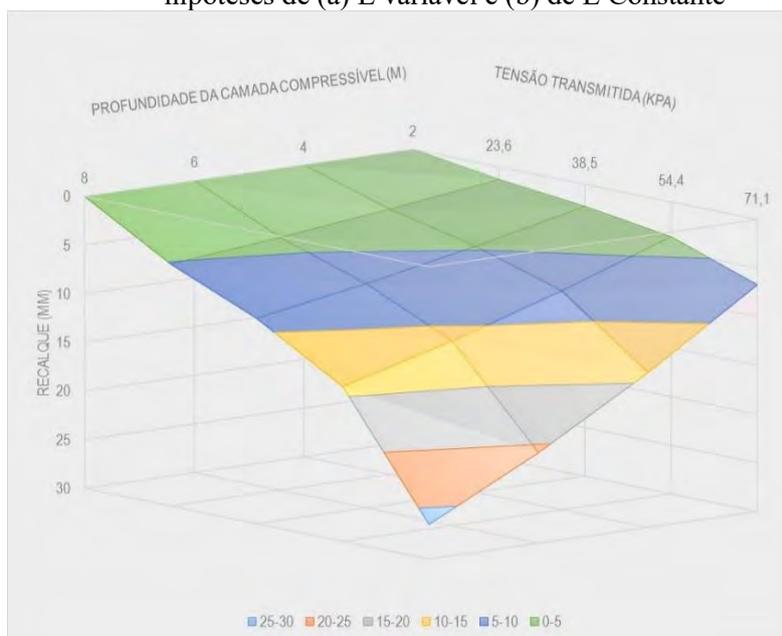
A Figura 90.a e b apresenta os gráficos de recalque médio obtido nos modelos numéricos utilizando a hipótese de módulo de elasticidade constante e variável, respectivamente, para as diferentes tensões e profundidades de camada compressível estudadas.

Mesmo com todas aproximações realizadas até esta análise, comparou-se os recalques médio medidos no monitoramento com os obtidos no modelo numérico para a curva característica com as duas hipóteses estudadas. Como critério de escolha dos blocos para essa análise, avaliou-se dois edifícios com profundidades de camada compressíveis diferentes e que, na leitura inicial de recalque tivessem em estágios de menores avanços construtivos, visto toda análise de que módulo de elasticidade diminui para maiores tensões transmitida. Ainda, foi realizada a aproximação para determinação do recalque obtido na leitura inicial prolongando a curva de recalque até a deformação 0, isto é, considerando-se o módulo de elasticidade inicial o mesmo obtido na retroanálise das duas primeiras leituras. Os resultados dessa análise estão apresentados na Figura 5.91.a e b, onde são apresentados na primeira a análise comparativa para o Bloco 02 da Quadra 04 com profundidade da camada compressível de 6 m e a segunda

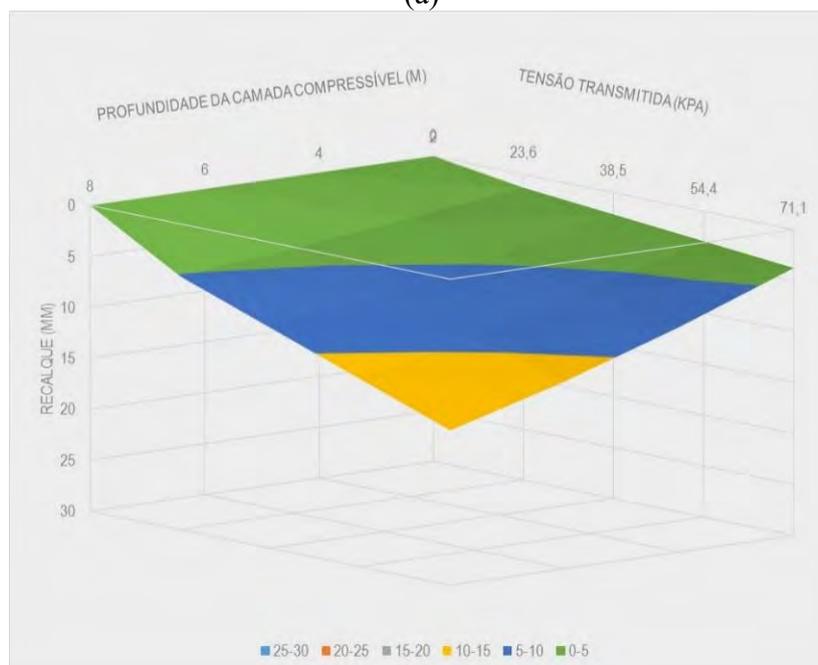
para o Bloco 03 da Quadra 04 com profundidade de camada compressível de 8m.

Observa-se que o comportamento da curva tensão x recalque tiveram comportamento semelhante ao obtido com a hipótese de módulo de elasticidade variável. Os recalques médios finais medidos quando comparados com os recalques obtidos com a hipótese de módulo constantes tenderam a se distanciar.

Figura 90– Recalque médio para as diferentes tensões e profundidades de camada compressível para hipóteses de (a) E variável e (b) de E Constante



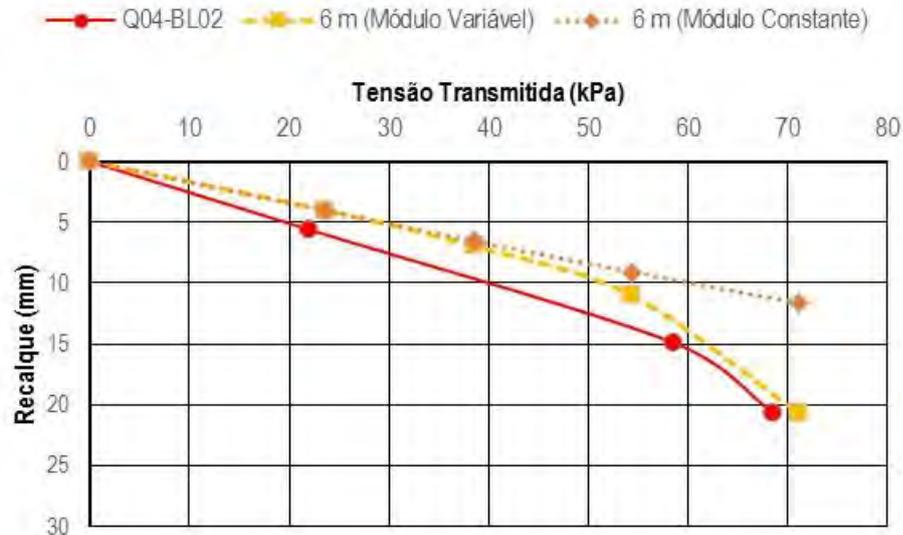
(a)



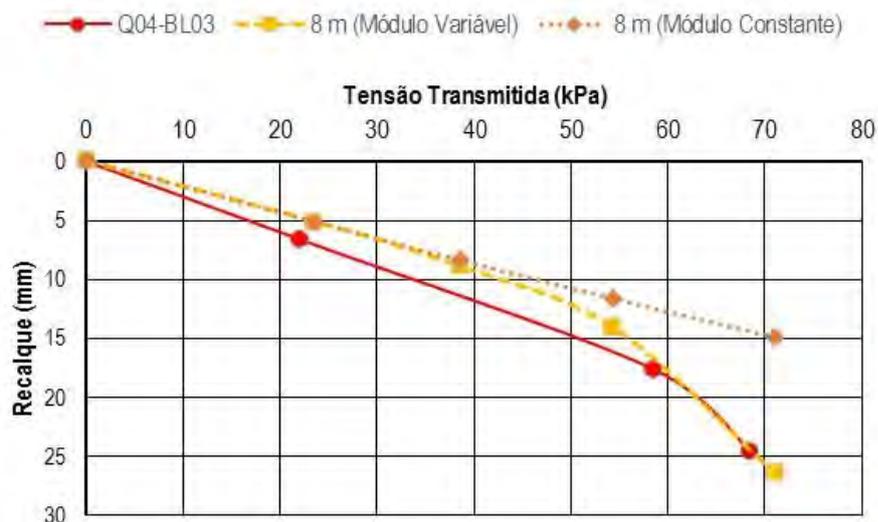
(b)

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 91 -Análise comparativa entre as hipóteses módulo de elasticidade constante e variável e os recalques medidos para o (a) Q04-BL02e (b) Q04-BL03



(a)



(b)

Fonte: O Autor,2019

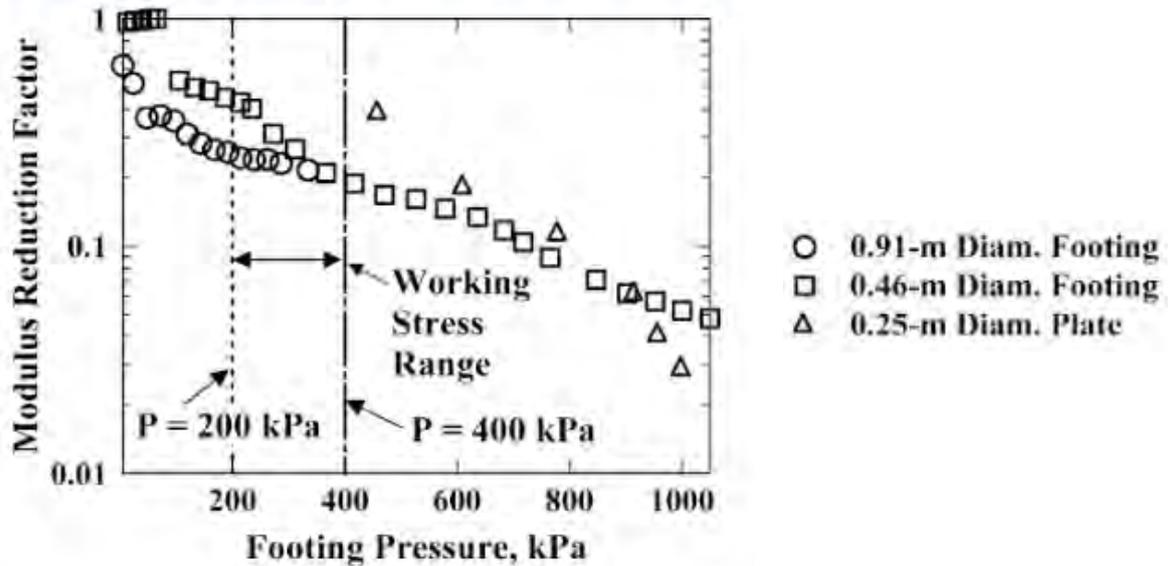
Dessa forma entende-se que a adoção da hipótese de um módulo de elasticidade variável indicou melhor aproximação para os blocos com seção em aterro no empreendimento em estudo.

Park *et al.* (2010) ao avaliarem resultados de provas de cargas em placa apresentam que a relação da curva tensão x deformação é não linear e que depende de fatores como densidade relativa e efeitos de cimentação. Segundo os autores a maneira mais fácil de determinar a curva tensão x deformação é decidir o módulo de elasticidade para deformação na ordem de 0,001% (para ensaios de placa), denominado pelos autores de módulo de elasticidade máximos ( $E_{máx}$ ) e multiplicar por um parâmetro empírico denominado de fator de redução de

módulo – FRM, como forma de obter os módulos secantes para uma determinada tensão da placa.

Park *et al.* (2010) observaram que para tensões entre 200 kPa e 400 kPa os valores de FRM apresentados estão na faixa de 0,2 a 0,5. A Figura 92 apresenta a curva FRM por tensão transmitida indicadas pelos autores.

Figura 92 – FRM x tensão transmitida pela placa



Fonte: PARK *et al.*, 2010

Como forma de contribuir para meio acadêmico e para futuros projetos com soluções em radiers na Região Metropolitana do Grande Recife, determinou-se fatores de redução para faixas de tensões transmitidas pela placa do radier, apresentados na Tabela 34. Entende-se que outros estudos para desenvolvimento de um fator de redução aplicável à outros tipos de solos, geometrias de placa, entre outras variáveis que envolvem a problemática devem ser conduzidos. Os fatores apresentados são apenas indicativos para análises posteriores e futuros entendimentos. Destaca-se que esses fatores foram determinados para seções executados sobre aterros.

Tabela 34 - Fatores de redução de módulo de elasticidade

Faixa de Tensão Transmitida	Fator de Redução
< 25 kPa	1,00
25 kPa <Tensão Transmitida < 40 kPa	0,85
40 kPa <Tensão Transmitida < 55 kPa	0,60
55 kPa <Tensão Transmitida < 75 kPa	0,25

Fonte: O Autor, 2019.

## 5.2 Modulo de Elasticidade - Seções de Corte

São apresentadas as retroanálises dos blocos construídos em seção de corte. Como avaliado anteriormente, a não distribuição do carregamento no momento da leitura origina uma distorção nos valores retroanalizados, portanto, nessa análise não foram considerados estes blocos. Observou-se uma grande quantidade de blocos com execução parcial de um dos pavimentos. O Quadro 7 apresenta os blocos com execução parcial dos pavimentos e outras variáveis indicadas que impossibilitaram a retroanálise.

Quadro 7 – Blocos em seção de corte com variáveis que impossibilitaram a retroanálise

<b>Bloco</b>	<b>Variável que impossibilitou a retroanálise</b>
Q03-BL01	L1 com execução parcial do 3º Pavimento
Q03-BL02	L1 com execução parcial do 2º Pavimento
Q03-BL03	L1 com execução parcial do 2º Pavimento
Q09-BL01	Sem registro de carregamento inicial (L1)
Q09-BL03	Sem registro de carregamento inicial (L1)
Q09-BL05	Sem registro de carregamento inicial (L1)
Q09-BL08	L1 com execução parcial do 4º Pavimento
Q12-BL02	Leituras negativas (apresentadas no Capítulo 4-item 4.3)
Q12-BL03	Sem registro de carregamento inicial (L1)
Q12-BL05	Leituras negativas (apresentadas no Capítulo 4-item 4.3)
Q12-BL06	Seção Mista (Parte em aterro)
Q12-BL07	Sem registro de carregamento inicial (L1)
Q12-BL09	Leituras negativas (apresentadas no Capítulo 4-item 4.3)
Q17-BL01	L1 com execução parcial do 2º Pavimento
Q18-BL01	L1 com execução parcial do 2º Pavimento
Q18-BL02	L2 com execução parcial do 5º Pavimento
Q18-BL03	Sem registro de carregamento inicial (L1)
Q28-BL01	L1 com execução parcial do 4º Pavimento
Q28-BL02	L1 com execução parcial do 4º Pavimento
Q28-BL03	L1 com execução parcial do 4º Pavimento
Q29-BL01	L2 e L3 com execução parcial dos 4º e 6º pavimento, respectivamente
Q29-BL02	Sem registro de carregamento inicial (L1)
Q34-BL01	L1 com execução parcial do 3º Pavimento

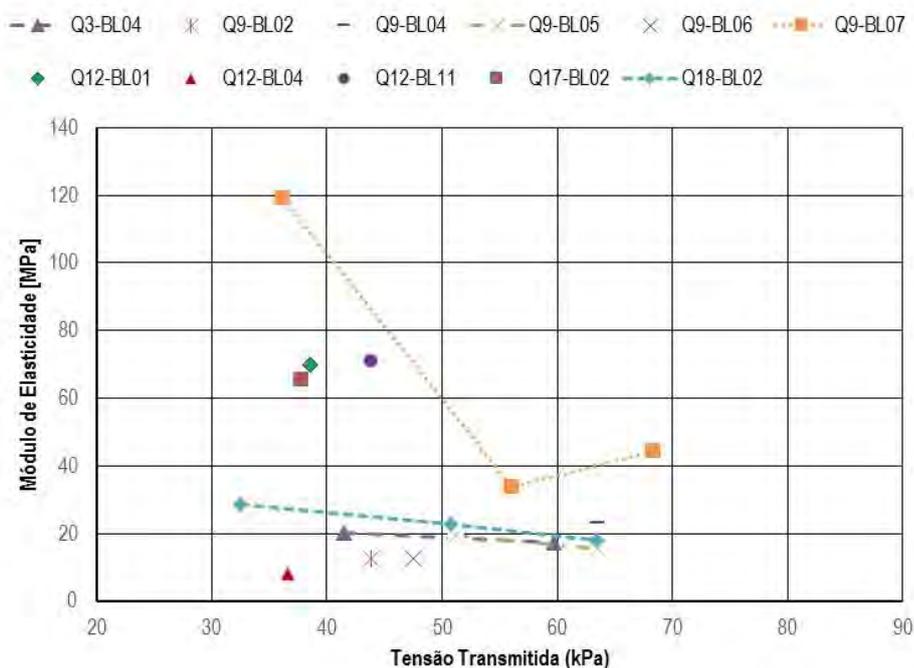
Fonte: O Autor, 2019.

Os módulos de elasticidade dos solos dos blocos que foram possíveis realizarem a retroanálise nas seções de cortes estão apresentados na Figura 93. Em 6 dos blocos estudados só foi possível determinar um ponto visto a realização de apenas 2 leituras de medição de recalque, sendo a primeira inicial (leitura 0) e uma segunda leitura.

O Bloco 07 da Quadra 09 apresenta um comportamento atípico, onde o valor de módulo de elasticidade inicial partiu de um valor elevado de aproximadamente 120 MPa e na leitura seguinte houve redução para o valor de 34 MPa para um acréscimo de 20 kPa de tensão transmitida. Na última leitura houve um aumento do valor retroanalísado para 44 MPa.

Se analisados separadamente os blocos Q03-BL04 e Q09-BL05, conforme apresentado na Figura 94, é possível indicar redução do parâmetro retroanalísado, embora quando comparado com os blocos em seção em aterro o nível de redução do parâmetro retroanalísado foi menor. No primeiro bloco indicado, o valor de E reduziu de 20,3 MPa para 17,4 MPa. Já no segundo o valor passou de 19,4 MPa a 15,4 MPa.

Figura 93 - Módulos de elasticidade retroanalísados dos blocos em seção de corte

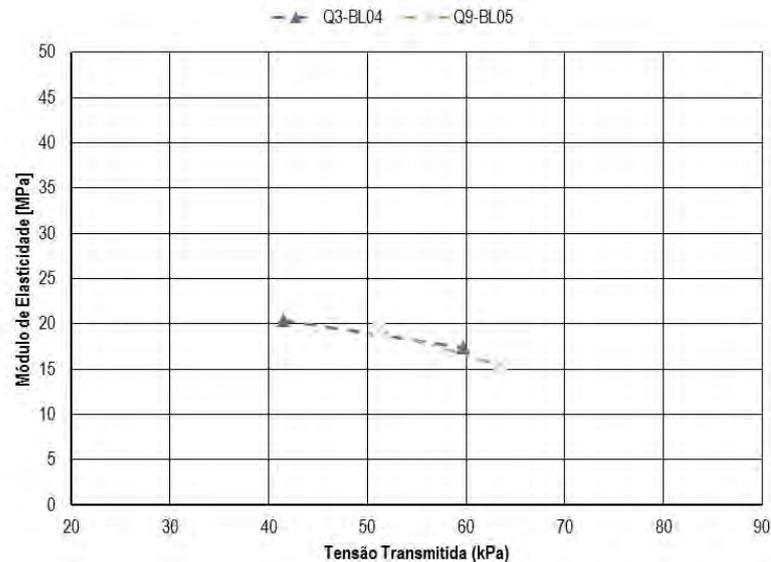


Fonte: O Autor, 2019.

É importante destacar que as alturas de corte nestes blocos variaram entre 4,6 a 4,8 m. Se estimado a tensão exercida pela camada retirada no corte, temos valores que se aproximam de 80 kPa o que torna a tensão exercida pela radier menor do que este valor estimado. Entende-se dessa forma que estas tensões originadas pela execução dos blocos estão em trechos de

recompressão da camada de solo abaixo do elemento de fundação, o que justifica a menor redução do parâmetro retroanalisado e as baixas deformações da grande maioria dos blocos em seções de corte.

Figura 94 – Módulo de elasticidade retroanalisado dos blocos: Q03-BL04 e Q09-BL05



Fonte: O Autor, 2019.

A Tabela 35 apresenta os dados geotécnicos resumidos dos blocos em estudo. Foi realizada uma análise comparativa entre os módulos observados e os obtidos por meio da expressão de Teixeira e Godoy (1998). Foi observado que os valores retroanalisado são maiores do que o obtido pela expressão para os blocos Q03-BL04 e Q09-BL05

Tabela 35 - Propriedades geotécnicas dos blocos em seção de corte

Bloco	Tipo de Solo	N <sub>SPT</sub> médio	E -Teixeira e Godoy (1998)	E Médio Retroanalisado
Q03-BL04	Argila Siltosa	10	14	18,8
Q09-BL05	Silte Argiloso	9	11,3	17,4

Fonte: O Autor, 2019.

Mesmo com todas as aproximações realizadas até esta análise, comparou-se os recalques médios medidos no monitoramento com os obtidos no modelo numérico para os módulos de elasticidade médios retroanalisados e os obtidos pela expressão de Teixeira e Godoy (1998). A Figura 95.a e b apresenta a análise comparativa para os blocos Q03-BL04, Q09-BL05, respectivamente.

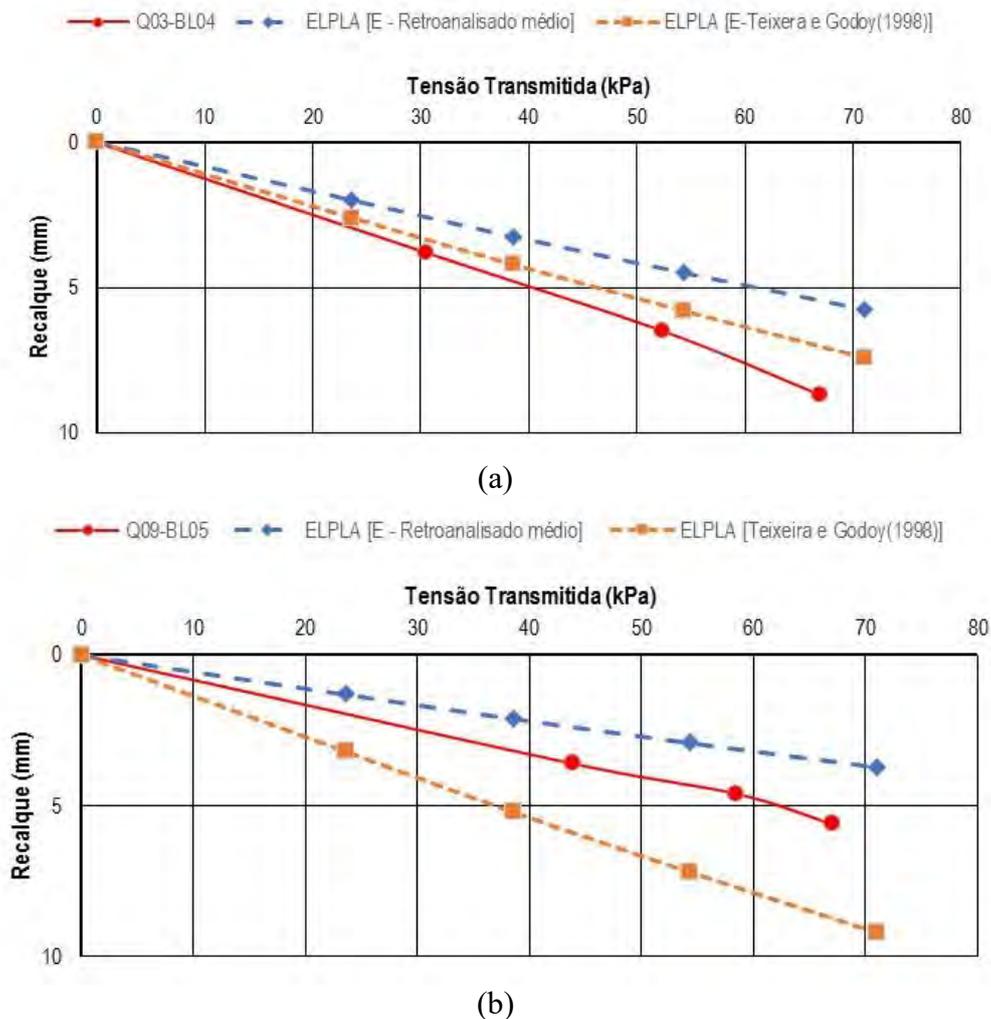
Primeiramente, pôde-se observar que a adoção de um modelo linear de módulo de elasticidade foi representativa para os blocos estudados em seção de corte. Os recalques

obtidos utilizando a formulação de Teixeira e Godoy (1998) apresentaram boa aproximação quando comparado com os recalques medidos nos Blocos Q03-BL04. Já os recalques obtidos por meio do módulo de elasticidade retroanalizado ficaram mais próximos no bloco Q09-BL05, embora ligeiramente subestimados.

Entende-se que adoção do modelo de módulo de elasticidade constante para estimativa nas seções de corte, comumente utilizado, é representativo para estimativa dos recalques dos blocos em estudo e as variações de recalque obtidas quando comparados se devem a todas as aproximações realizadas para determinação de um perfil geotécnico único.

Embora observado reduções no parâmetro de módulo de elasticidade retroanalizados, a utilização de um módulo de elasticidade constante é uma simplificação admissível quando analisados os resultados apresentados para os blocos em seções de corte.

Figura 95 – Análise comparativa de recalque médio dos blocos:(a)Q03-BL04 e (b)Q09-BL05



Fonte: O Autor, 2019.

### 5.3 Coeficiente de Reação

A utilização dos coeficientes de reações para determinação de recalques de radiers é uma prática corriqueira em projetos de fundações. As limitações dos softwares atualmente utilizados em projetos estruturais no que diz respeito à consideração de um meio elástico contínuo torna a análise da determinação de coeficientes de reações, as vezes chamado de coeficiente de mola, uma importante contribuição para o meio acadêmico e de projetos de fundações desse tipo.

A literatura atual, no que diz respeito da adoção de coeficientes de reação para estimativa de recalque de placas de radier em projeto de fundações não indica de maneira clara uma possível metodologia que possa ser adotada para tal simplificação. Muitas vezes, adotam coeficientes de reação correlacionados apenas com parâmetro de  $N_{SPT}$  sem ser considerado a profundidade da camada compressível, o que geram erros de maiores escalas.

#### 5.3.1 Coeficientes de Reações para Seções de Aterro

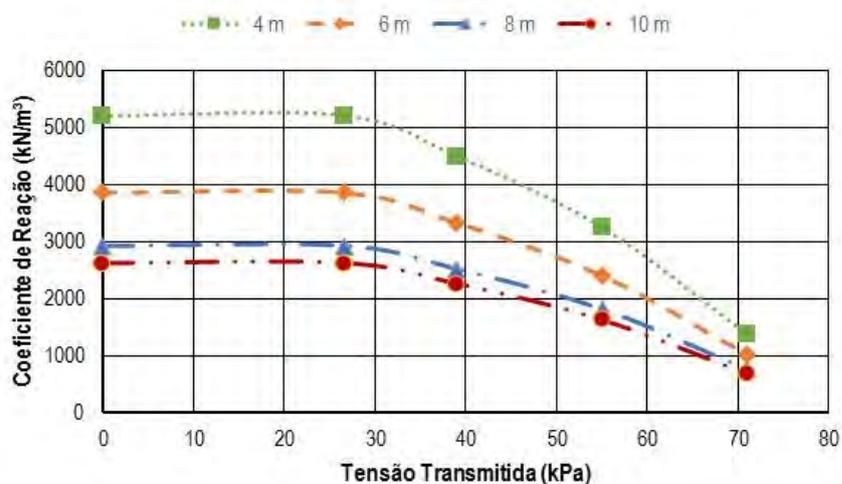
Com base na curva de evolução do módulo de elasticidade, determinou-se os coeficientes de reação para profundidades de 4, 6, 8 e 10 metros de camada compressível. Cabe destacar que a curva de evolução do módulo de elasticidade foi determinada para solos com predominância de siltes argilosos e arenosos, conforme apresentado anteriormente. A Figura 96 apresenta os coeficientes de reação determinados com base na curva de evolução do módulo de elasticidade.

Observa-se que os coeficientes de reação encontrados não apresentam proporcionalidade com aumento da camada compressível, explicado pelo fato de que o fator  $I_s I_s$  não ser linear. Como a variação do fator é menor para maiores valores de relação  $(h/a)$ , há menor alteração dos coeficientes de reação retroanalizados para maiores valores de  $h$  (altura de camada compressível).

Também pode-se avaliar que para maiores valores de tensão transmitida, os coeficientes de reação para maiores profundidades de camada compressíveis tendem a diminuir sua variação, conforme apresentados na Figura 97.

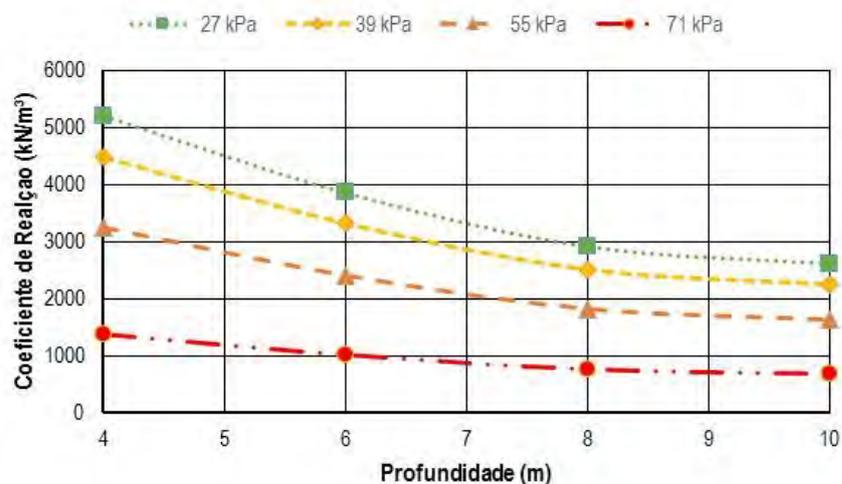
Como forma de avaliar os resultados dos dados retroanalizados com os apresentados pela literatura, determinou-se os coeficientes de reação para ensaios de placa, considerando uma placa quadrada de 0,3m, por meio da correção apresentada na Equação 16.

Figura 96 – Coeficientes de Reação obtidos com base na curva de evolução de módulo de elasticidade para variações de profundidade de camada compressível



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 97 - Coeficientes de Reação obtidos com base na curva de evolução de módulo de elasticidade para variações de tensão transmitidas



Fonte: O Autor, 2019.

Se analisado apenas o fator de correção indicado pela expressão temos para os elementos de fundação do empreendimento, um fator corretivo de 0,26, o que significa que os coeficientes estimados adotados devem ser aproximadamente 4 vezes menores do que os obtidos em uma prova de carga em placa. Os coeficientes de reação corrigidos para ensaios de placa estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Coeficientes de reação para ensaios de placa

<b>Profundidade (m)</b>	<b>Coefficiente de Reação (kN /m<sup>3</sup>)</b>
4	20070
6	14900
8	11260
10	10080

Fonte: O Autor, 2019.

Moraes (1976) propôs valores de coeficiente de reação vertical utilizáveis na falta de ensaios apropriados mesmo que de forma aproximada. As faixas de valores estimados pelo autor para aterros de silte, areias e cascalho é de 10000 a 20000 kN/m<sup>3</sup>, valores esses, próximos aos obtidos na retroanálise apresentada.

### 5.3.2 Coeficiente de Reações para Seções de Corte

Como visto no item 5.3, a aproximação de um modelo linear de módulo de elasticidade foi representativa para os blocos em seção de corte. Como forma de avaliar os resultados obtidos de retroanálise do módulo de elasticidade determinou-se os coeficientes de reação do elemento de fundações e para um elemento de placa, conforme apresentado na Tabela 37.

Tabela 37 - Coeficientes de reação para os blocos em seção de corte

<b>Bloco</b>	<b>Tipo de Solo</b>	<b>N<sub>SPT</sub> médio</b>	<b>Camada Compressível (mm)</b>	<b>E Médio Retroanalísado (MPa)</b>	<b>K Fundação (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>K Placa (kN/m<sup>3</sup>)</b>
Q03-BL04	Argila Siltosa	10	3	18,8	7897	30460
Q09-BL05	Silte Argiloso	9	2	17,4	12994	50120

Fonte: O Autor, 2019.

Terzaghi (1955) sugeriu, a partir de resultados obtidos de ensaios de placa quadrada com 0,3m, a adoção de coeficientes de reação com base nas características do solo (argilas e areias). Para solos argilosos com consistência rija, indica-se valores na faixa de 16000 a 32000 kN/m<sup>3</sup>. A análise do Bloco 04 da Quadra 03 indica valor de coeficiente de reação para placa de 30460, valor esse, dentro da faixa indicada pelo autor. Cabe destacar que a consistência do solo argiloso em análise variou entre media a rija.

Moraes (1976) não indica valores para siltes argilosos. O autor indica apenas valores para siltes compactados com presença de areia e pedra, valores estes entre 80000 e 10000 kN/m<sup>3</sup>. Os valores observados para siltes argilosos foram na faixa de 50000kN/m<sup>3</sup>

Como forma de avaliar a metodologia proposta para adoção do coeficiente de reação indicados para os elementos de fundação, utilizou-se modelagem numérica em elementos finitos com o SAP2000, e comparou-se os recalques médios obtidos no modelo com os recalques médios medidos dos dois blocos em seção de corte apresentados anteriormente.

A análise comparativa entre os recalques médios medidos e os obtidos no modelo numérico estão apresentados na Figura 98.a e b, para o Bloco 04 da Quadra 03 e Bloco 05 da Quadra 09, respectivamente.

Os resultados de recalque médio obtidos nos modelos numéricos obtiveram aproximações com os recalques medidos dos blocos em estudo. Cabe destacar que os coeficientes de reações utilizados foram determinados com base na retroanálise dos dados de medição de recalque e dos perfis geotécnicos, então, é de se esperar que os resultados numéricos se aproximem dos valores obtidos na medição de recalque.

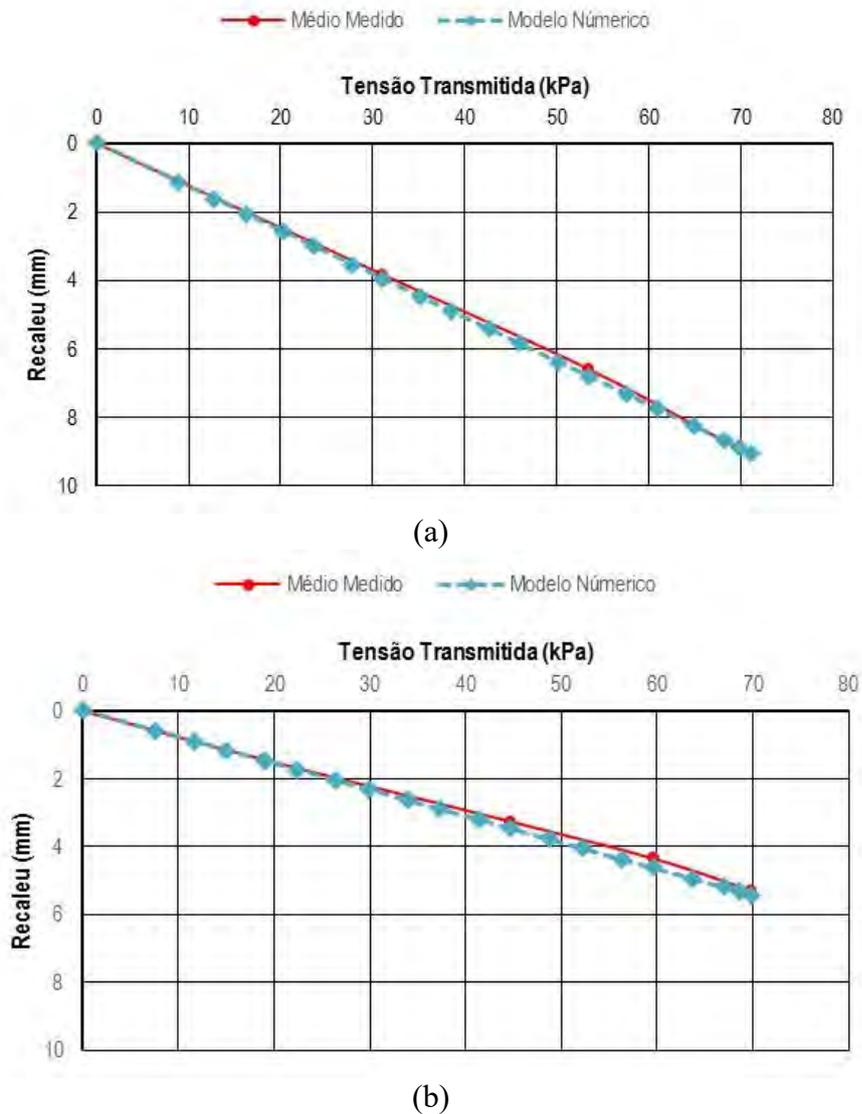
Dessa forma, entende-se que os resultados apresentados indicam a boa representatividade dos modelos numéricos realizados que serão abordados com mais detalhes no próximo capítulo. A Tabela 38 apresenta a análise comparativa dos recalques médios.

Tabela 38 - Análise comparativa entre os recalques médios medidos e estimados nos modelos numéricos

Bloco	Recalques Médios	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5
Q03-BL04	Medido (mm)	3,83	6,58	8,70	-
	Numérico (mm)	3,95	6,79	8,68	-
	Diferença (%)	3,1	3,2	-0,3	-
Q09-BL05	Medido (mm)	1,44	3,26	4,35	5,28
	Numérico (mm)	1,48	3,46	4,61	5,41
	Diferença (%)	2,8	6,1	6,1	2,5

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 98 – Análise comparativa entre os recalques médios medidos e os obtidos no modelo numérico dos blocos (a)Q3-BL04 e (b)Q09-BL05



Fonte: O Autor, 2019.

#### 5.4 Deformação de Fluência das camadas de Aterro

Visto que em alguns dos blocos foram possíveis determinar recalques para valores de tensão transmitidos constantes (mesmo estágios construtivos), avaliou-se por meio da relação entre os recalques médios e tempo entre as medições para a tensão transmitida constante, denominadas de velocidade de fluência.

A Tabela 39 apresenta as velocidades de fluência dos blocos em estudo. Em dois blocos (Q05-BL01 e Q34-BL05) foram possíveis determinar duas velocidades de fluência, visto que três medições de recalques foram realizadas para mesma tensão transmitida. Cabe destacar que todos os blocos desta análise foram executados em seção de aterro.

Tabela 39 - Velocidade de deformações de fluência

BLOCO	Tensão (kPa)	Leitura 1		Leitura 2	
		Velocidade (micra/dia)	Tempo (dias)	Velocidade (micra/dia)	Tempo (dias)
Q04-BL01	68,5	91,2	14		
Q04-BL03	68,5	60,9	18		
Q04-BL04	68,5	60,79	14		
Q04-BL05	68,5	19,6	14		
Q05-BL01	68,5	168,76	25	33,1	28
Q05-BL02	68,5	50,21	14		
Q05-BL03	68,5	37,2	26		
Q05-BL04	68,5	27,6	25		
Q05-BL05	68,5	5,6	28		
Q30-BL01	72,7	139,2	20		
Q34-BL03	68,5	49,3	22		
Q34-BL04	68,5	95,6	20		
Q34-BL05	69	73,1	26	58,7	70

Fonte: O Autor, 2019.

Observa-se que as velocidades de deformações variaram entre 5,6 a 168 micra/dia. Nos blocos que foram possíveis determinar mais de uma velocidade de deformação, observou-se que os segundos valores foram menores que os primeiros, indicando tendência de estabilização dos recalques.

Como forma de avaliar quais variáveis influenciaram mais nas deformações por fluência, foi realizado análise de componentes principais.

As duas componentes principais indicaram variância percentual de 67,3%, conforme apresentado na Tabela 40. A ACP indicou porcentagem de variância explicada de 40,2% para componente 01 e 27,1% para componente 02.

Tabela 40 - Análise de componentes principais

Componentes	Autovalores	Autovalores Acumulado
Componente 01	40,2%	40,2%
Componente 02	27,1%	67,3%

Fonte: O Autor, 2019.

A Figura 99.a apresenta o gráfico de pesos indicadas na ACP. Observa-se que as variáveis “tensão transmitidas” e “recalque final” apresentaram maior covariância com a variável “velocidade de fluência” em relação às demais variáveis, indicando que os blocos onde foram observados maiores recalques obtiveram maiores velocidades de fluência. Se analisados os gráficos de escores apresentando na Figura 99.b observa-se que os blocos que mais contribuíram para obtenção dos pesos indicados foram os Q05-BL01, Q30-BL01 e Q34-BL05.

A ACP realizada, indica que os recalques por fluência dos blocos tiveram dentro das variáveis estudadas, maior covariância com o “recalque final”. A Tabela 41 apresenta os blocos ordenados em ordem decrescente dos recalques observados para tensões transmitidas constantes, denominados de recalques de fluência. Observa-se que os blocos em que os recalques, foram maiores, há uma contribuição maior de fluência o que explica o resultado da ACP.

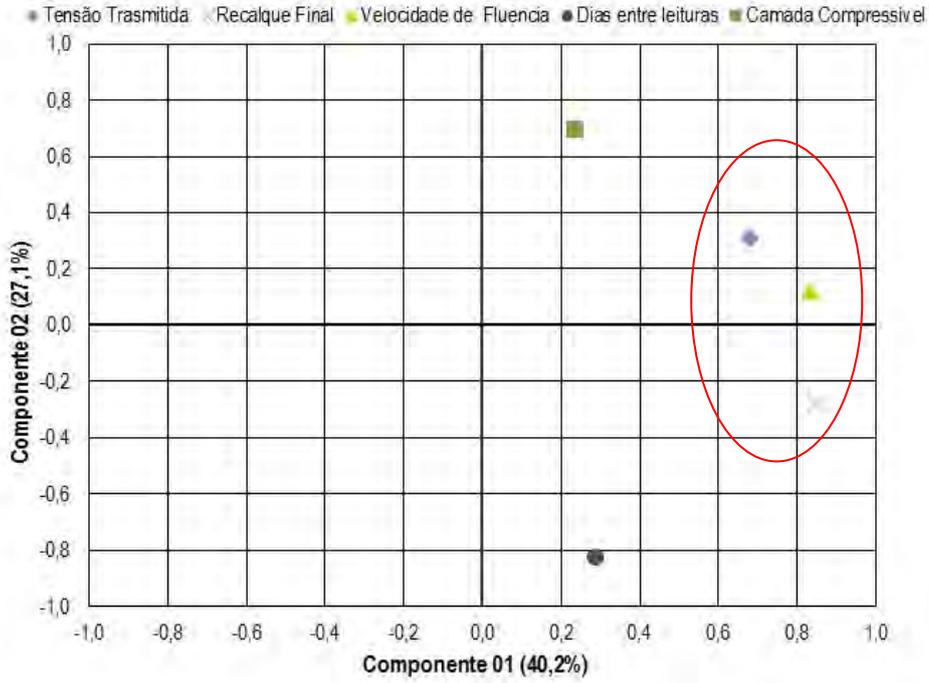
A ACP realizada no Capítulo 04 indica que a maiores recalques foram obtidos para seções de aterro, desse modo, entende-se que os recalques por fluência podem estar ligados a propriedades não indicadas na ACP em questão.

Nesse subitem tentou-se avaliar, dentre as variáveis que foram disponibilizadas para o estudo em questão, uma possível variável que influenciaria diretamente em maiores recalques por fluências. Entende-se que os recalques por fluência não são comumente avaliados, devido à complexidade de entendimento do fenômeno. O que é importante destacar, é que uma parcela significativa dos recalques observados nos blocos estudados foi medida para tensões constantes, contribuindo em até 24% no desenvolvimento total dos recalques.

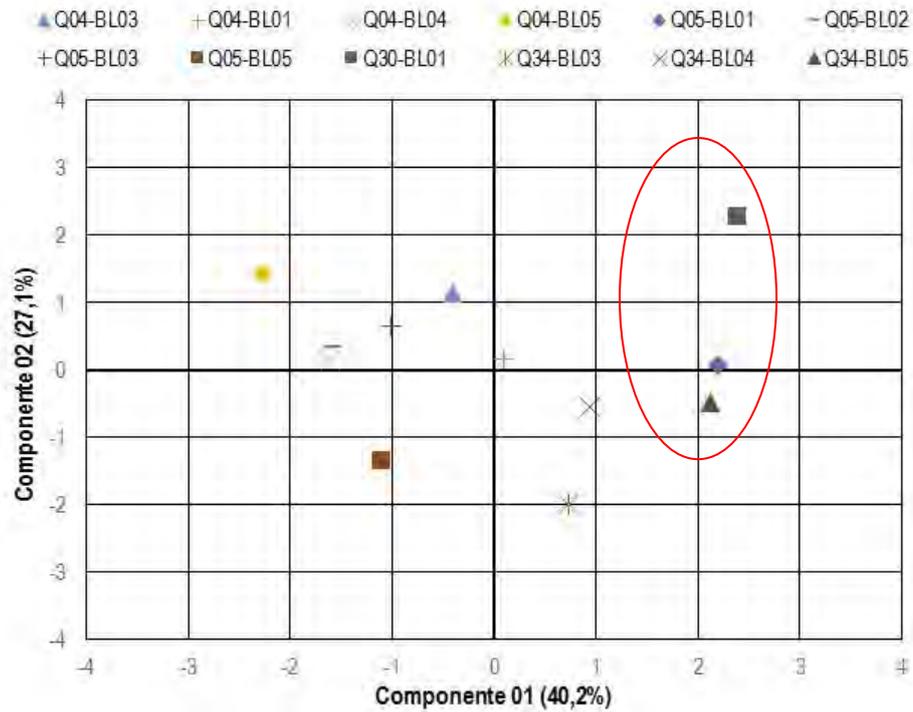
Dessa forma, observa-se que a maior parcela de recalque foi determinada no período construtivo, isto é., por meio de recalque imediatos, mas parte dos recalques se desenvolvem após o período construtivo (com o tempo) em perfis geotécnicos com predominância de siltes argilosos e arenosos que até então não se esperava contribuições na ordem de 20% do recalque final medido.

Outra questão que deve ser abordada é que não foram realizadas leituras após maiores períodos após construção, então, não se conseguiu indicar o tempo em que se observaria redução até valores nulos de velocidade de fluência, o que indicaria a estabilização completa dos recalques.

Figura 99–ACP para avaliação das velocidades de deformação de fluência: (a) pesos e (b) escores



(a)



(b)

Fonte: O Autor, 2019

Tabela 41 - Desenvolvimento de recalques por fluência

<b>Bloco</b>	<b>Recalque desenvolvido por Fluência (mm)</b>	<b>Recalque Final Medido (mm)</b>	<b>Contribuição da Fluência para o recalque final</b>	<b>Dias</b>
Q34-BL05	6,01	31,43	19,12%	96
Q05-BL01	5,14	25,76	19,95%	53
Q30-BL01	2,79	20,35	13,71%	20
Q34-BL04	1,91	18,01	10,61%	20
Q04-BL04	1,78	7,39	24,09%	30
Q04-BL01	1,28	13,89	9,22%	14
Q34-BL03	1,08	15,04	7,18%	22
Q04-BL03	1,08	19,06	5,67%	18
Q05-BL03	0,97	13,98	6,94%	26
Q05-BL02	0,71	8,26	8,60%	14
Q05-BL04	0,69	7,82	8,82%	25
Q04-BL05	0,27	9,86	2,74%	14
Q05-BL05	0,16	11,86	1,35%	28

Fonte: O Autor, 2019.

## 5.5 Conclusão do Capítulo

A partir das análises realizadas neste capítulo pode-se alcançar as seguintes conclusões:

- Os módulos de elasticidades tenderam a diminuir conforme aumento da tensão transmitida estimada, isto é, com avanço construtivo houve decréscimo de rigidez da camada compressível;
- Nas seções de aterro, a retroanálise do módulo de elasticidade indicou maior suscetibilidade à perda de rigidez quando comparados às seções de corte;
- A partir da retroanálise dos modelos de elasticidades, visto a não linearidade observada nas seções de aterro, foi indicado fator de redução de módulo de elasticidade para faixas de tensão transmitidas;
- As modelagens numéricas utilizando o modelo de módulo de elasticidade não linear

indicaram maiores aproximações nas seções de aterro. Já nas seções de cortes, o modelo numérico com adoção de módulos de elasticidade constante mostrou boa aproximação;

- Os recalques por fluência contribuíram em valores na ordem de 20% no desenvolvimento dos recalques totais medidos. As velocidades de recalque por fluência variaram de 6 a 168 micra/dia nos blocos sobre aterros no período variando de 14 a 28 dias para mesma tensão transmitida;

Como forma de avaliar o efeito da metodologia construtiva utilizada no empreendimento nos parâmetros de interação solo estrutura, no Capítulo 6 é apresentada análise de modelagem numérica com utilização de parâmetros obtidos neste capítulo.

## 6 MODELAGEM NÚMERICA

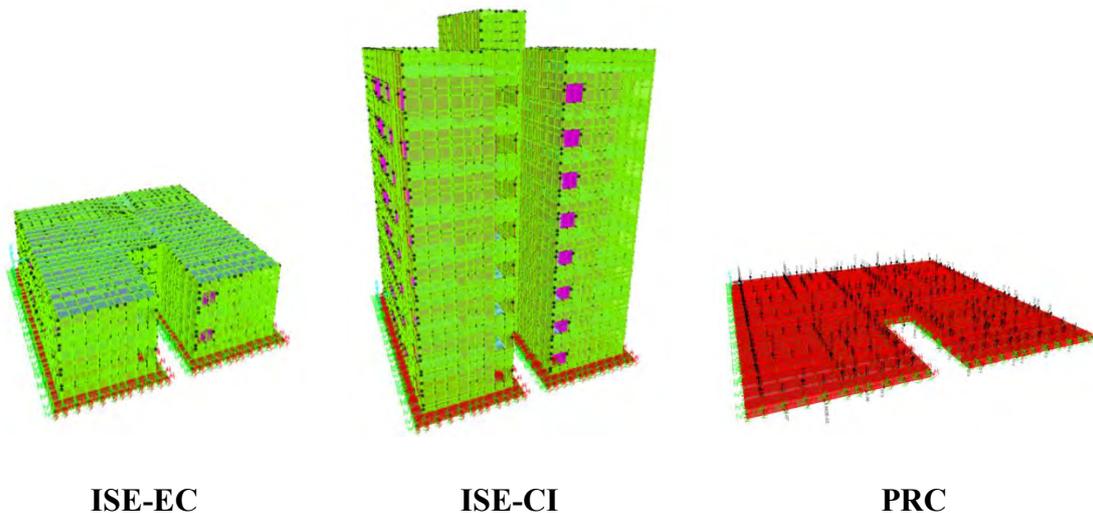
No presente capítulo avalia-se o comportamento dos recalques do solo, esforços da placa de radier e na superestrutura, por meio de modelagem numérica com o software SAP2000, utilizando coeficiente de reação como apoios da placa. Três hipóteses de modelo numéricas são utilizadas, estas apresentadas no Quadro 8. A Figura 100 ilustra representação gráfica dos modelos numéricos.

Quadro 8 - Hipóteses de modelos numéricos

Módulo Numérico	Hipótese de Carga	Consideração da ISE
ISE-EC	Estágio Construtivo	Sim
ISE--CI	Carregamento Instantâneo	Sim
PRC	Placa de radier carregada com a solicitação da Superestrutura	Não

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 100- Representação gráfica dos modelos numéricos



Fonte: O Autor, 2019.

Nos modelos numéricos ISE-EC e ISE-CI toda superestrutura foi modelada juntamente com o radier apoiado em molas determinadas por meio do coeficiente de reação retroanalizado. A diferença da hipótese de estágio construtivo e carregamento instantâneo é que na primeira, os deslocamentos e esforços dos nós são determinados estágio por estágio, como forma de simular a metodologia utilizada para construção do empreendimento. Já no carregamento instantâneo os deslocamentos são determinados com a hipótese que toda superestrutura seja

executada em estágio único, análise comum em projetos estruturais.

No modelo numérico PRC, foi modelado apenas o elemento de placa de radier com mesmo apoio utilizado nos modelos anteriores, onde os carregamentos da superestrutura em cada estágio foram aplicados a placa por meio de carregamento linear distribuído.

O coeficiente de reação utilizado nos modelos numéricos foram os obtidos por retroanálise para o Bloco 03 da Quadra 04 apresentado no item 5.4.2, que conforme análise, obteve boa aproximação com os recalques medidos do bloco.

### **6.1 Análise comparativa entre os recalques dos modelos numéricos**

Como forma de avaliação inicial dos modelos numéricos apresentados, foram comparados os recalques mínimos, médios e máximos, bem como os desvios padrão e coeficientes de variação dos modelos numéricos. Considerou-se nesse subitem os recalques obtidos da execução total dos pavimentos, desconsiderando os estágios de execuções parciais dos pavimentos.

A Tabela 42 apresenta os dados para os modelos ISE-EC, PRC e ISE-CI. Observou-se que o modelo ISE-EC apresentou menores variações entre os recalques mínimos e máximos quando comparados ao modelo PRC.

Os recalques médios observados nos modelos numéricos foram iguais visto que as cargas impostas ao radier são as mesmas. O que se destaca é o efeito da ISE na distribuição dos esforços e consequente uniformização dos recalques. No modelo ISE-EC os coeficientes de variação tenderam a valores constantes, mostrando que a execução do primeiro pavimento já impõe uma alta rigidez à estrutura (placa de radier + superestrutura). Já no modelo PRC os valores de coeficientes de variação tendem a aumentar conforme aumento das cargas (avanço construtivo).

Quando comparados os dados obtidos nos modelos ISE-EC e ISE-CI, observa-se que o coeficiente de variação para o carregamento instantâneo foi ligeiramente menor, o que significa que os recalques obtidos para o modelo foram mais uniformes. Farias (2018) ao comparar modelos utilizando os efeitos construtivos e de ações instantâneas observou comportamento semelhante, onde os coeficientes de variação para o modelo numérico com efeitos construtivos foram ligeiramente maiores que os obtidos no modelo de ação instantânea.

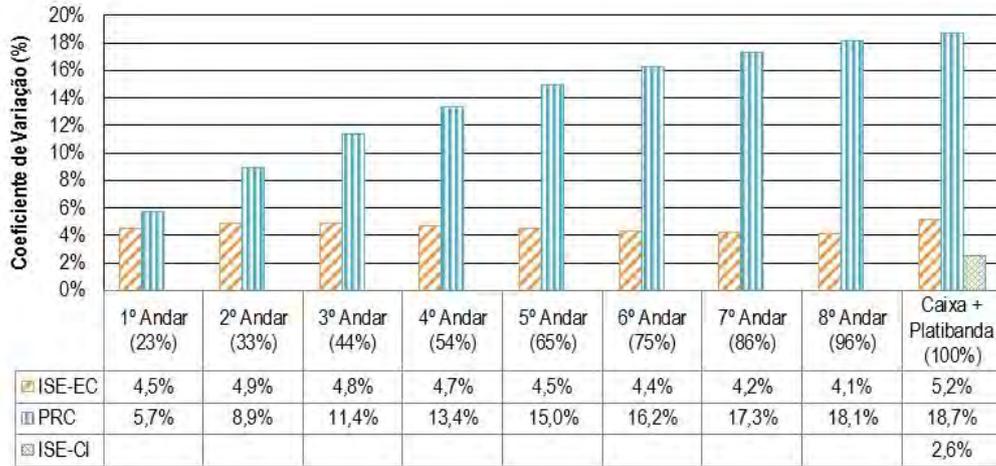
Tabela 42 - Recalques, desvio padrão e coeficiente de variação dos modelos numéricos

Etapa	ISE-EC	PCR	ISE-CI	
Completo	$\omega_{méd}$ (mm)	9,04	9,15	9,01
	Desvio Padrão (mm)	0,47	1,71	0,23
	$\omega_{máx}$ (mm)	9,83	13,08	9,46
	$\omega_{mín}$ (mm)	8,13	5,77	8,54
	CV	5,20%	18,70%	2,56%
8º Andar	$\omega_{méd}$ (mm)	8,68	8,79	
	Desvio Padrão (mm)	0,36	1,59	
	$\omega_{máx}$ (mm)	9,44	12,57	
	$\omega_{mín}$ (mm)	7,84	5,64	
	CV	4,10%	18,12%	
7º Andar	$\omega_{méd}$ (mm)	7,74	7,82	
	Desvio Padrão (mm)	0,33	1,35	
	$\omega_{máx}$ (mm)	8,46	11,02	
	$\omega_{mín}$ (mm)	6,97	5,16	
	CV	4,22%	17,29%	
6º Andar	$\omega_{méd}$ (mm)	6,79	6,86	
	Desvio Padrão (mm)	0,30	1,11	
	$\omega_{máx}$ (mm)	7,47	9,48	
	$\omega_{mín}$ (mm)	6,10	4,67	
	CV	4,36%	16,25%	
5º Andar	$\omega_{méd}$ (mm)	5,85	5,90	
	Desvio Padrão (mm)	0,26	0,88	
	$\omega_{máx}$ (mm)	6,48	7,96	
	$\omega_{mín}$ (mm)	5,23	4,18	
	CV	4,52%	14,96%	
4º Andar	$\omega_{méd}$ (mm)	4,90	4,94	
	Desvio Padrão (mm)	0,23	0,66	
	$\omega_{máx}$ (mm)	5,48	6,46	
	$\omega_{mín}$ (mm)	4,36	3,66	
	CV	4,69%	13,35%	
3º Andar	$\omega_{méd}$ (mm)	3,95	3,98	
	Desvio Padrão (mm)	0,19	0,45	
	$\omega_{máx}$ (mm)	4,45	5,03	
	$\omega_{mín}$ (mm)	3,51	3,12	
	CV	4,85%	11,36%	
2º Andar	$\omega_{méd}$ (mm)	3,01	3,02	
	Desvio Padrão (mm)	0,12	0,27	
	$\omega_{máx}$ (mm)	3,40	3,66	
	$\omega_{mín}$ (mm)	2,67	2,53	
	CV	4,07%	8,89%	
1º Andar	$\omega_{méd}$ (mm)	2,06	2,06	
	Desvio Padrão (mm)	0,09	0,12	
	$\omega_{máx}$ (mm)	2,31	2,35	
	$\omega_{mín}$ (mm)	1,86	1,87	
	CV	4,49%	5,72%	

Fonte: O Autor,2019

A Figura 101 apresenta a análise comparativa dos coeficientes de variação dos três modelos estudados em forma de gráfico.

Figura 101 - Análise comparativa entre os coeficientes de variação dos modelos numéricos



Fonte: O Autor, 2019.

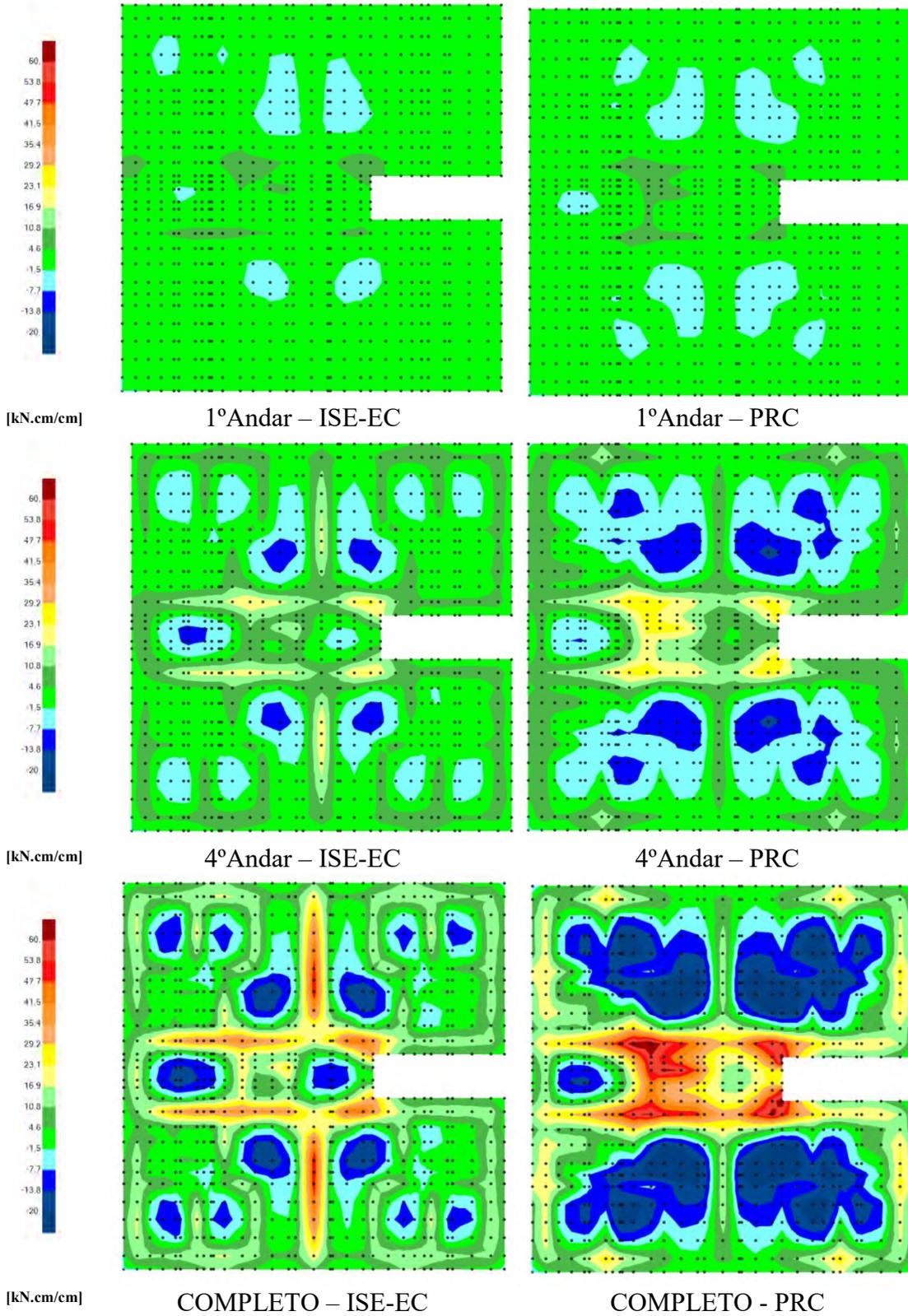
A Figura 102 apresenta os momentos fletores máximos indicados nos modelos numéricos ISE-EC e PCR para o carregamento do primeiro pavimento, quarto pavimento e para a execução completa do bloco. Observa-se que os momentos fletores para o modelo ISE-EC tende a ser mais uniforme enquanto no modelo PRC observa-se que os momentos fletores máximos são maiores na região central da placa, indicando maior flexão do radier visto que não há ISE.

A análise comparativa de momentos fletores máximos para execução completa do bloco, apresentada na Figura 103, para os três modelos realizados apresentam pequena diferença para os modelos ISE-EC e ISE-CI, onde os momentos fletores máximos do segundo modelo são menores. A Figura 104 apresenta análise comparativa das superfícies de recalque dos modelos ISE-EC e ISE-IC com os recalques medidos do Bloco 03 da Quadra 04.

Como forma de avaliar a uniformização dos recalques apresentados pelo modelo ISE-EC, visto que os coeficientes de variação observados foram menores para esse modelo, é realizada análise comparativa dos fatores de recalque (AR) como forma de mostrar a redistribuição dos recalques como efeito da ISE.

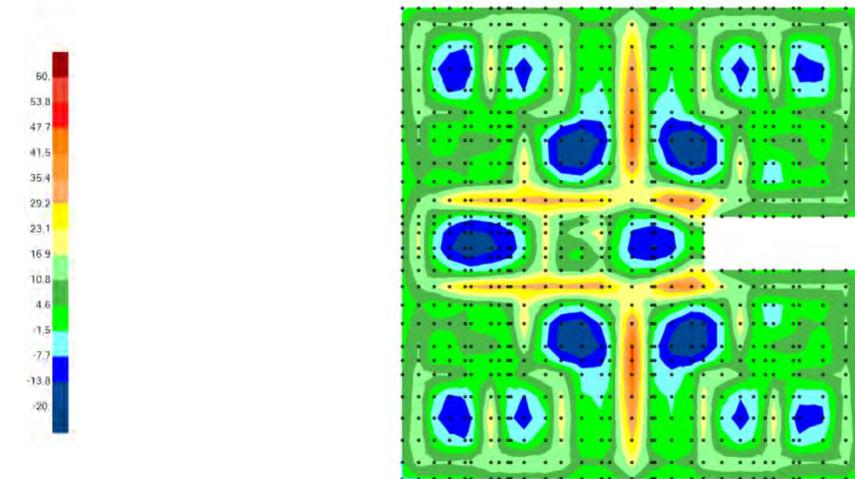
A Figura 105 apresenta as variações de fatores de recalque para os modelos ISE-EC e PRC. Observa-se que para o modelo ISE-EC os fatores de recalque tenderam a valores constantes de AR máximo e mínimo, enquanto o modelo PRC os fatores máximos tenderam ao aumento e os fatores mínimos diminuiram.

Figura 102 – Momentos fletores das placas de radier dos modelos numéricos em três estágios construtivos



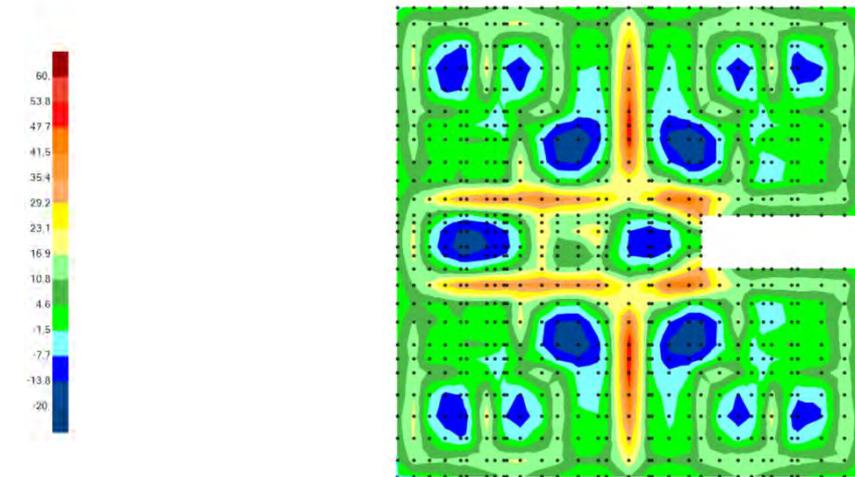
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 103 -Análise comparativa de momentos fletores para o fim da execução dos blocos



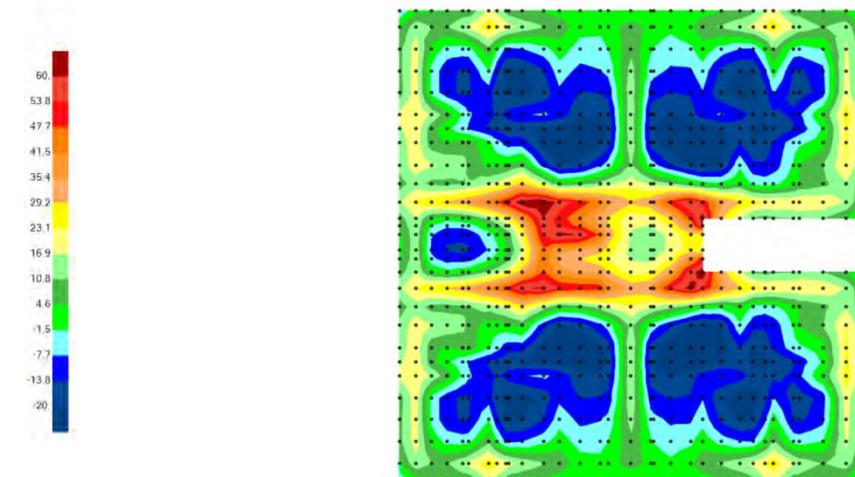
[kN.cm/cm]

**COMPLETETO – ISE-CI**



[kN.cm/cm]

**COMPLETETO – ISE-EC**

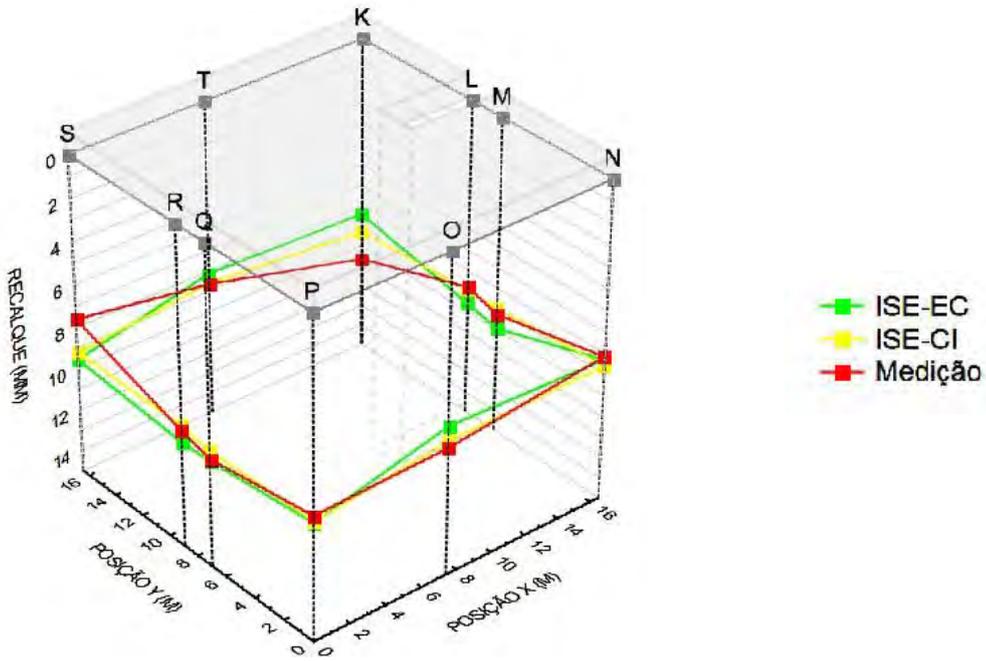


[kN.cm/cm]

**COMPLETETO – PRC**

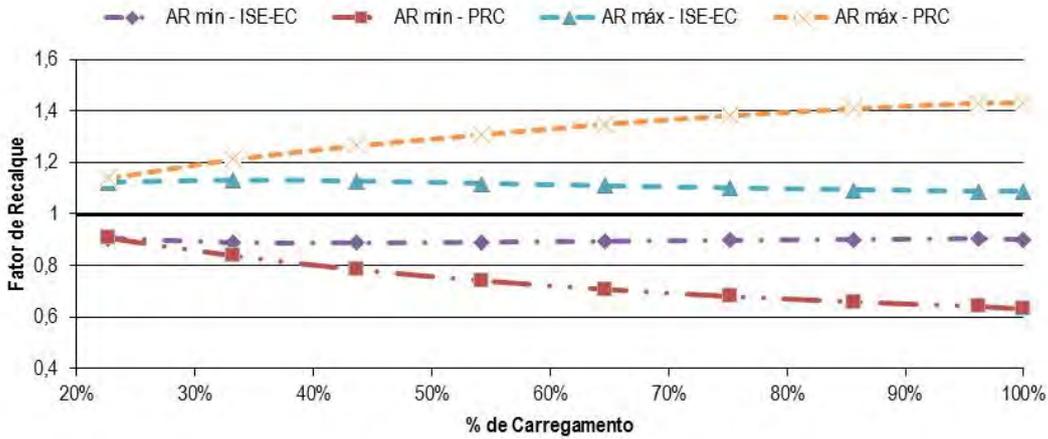
Fonte: O Autor, 2019.

Figura 104 – Análise comparativa de superfícies de recalque obtidas no modelo numérico ISE-EC e ISE-CI e dos recalques medidos



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 105 Fatores de recalque máximos e mínimos dos modelos numéricos ISE-EC e PRC



Fonte: O Autor, 2019.

## 6.2 Análise do Efeito Construtivo nos Recalques

No subitem anterior foi realizada análise comparativa entre os modelos utilizando com sem a consideração da ISE para a execução dos pavimentos como todo. Na metodologia utilizada para construção do empreendimento, os pavimentos eram executados em duas etapas. Como forma de avaliar o efeito construtivo da execução parcial dos pavimentos, é analisada o modelo ISE-EC considerando todas as etapas de execução para determinação dos recalques da

placa de radier. O Quadro 9 apresenta as descrições dos serviços e os 19 estágios construtivos realizados no modelo numérico ISE-EC.

Quadro 9 – Estágios construtivos do modelo numérico ISE-EC

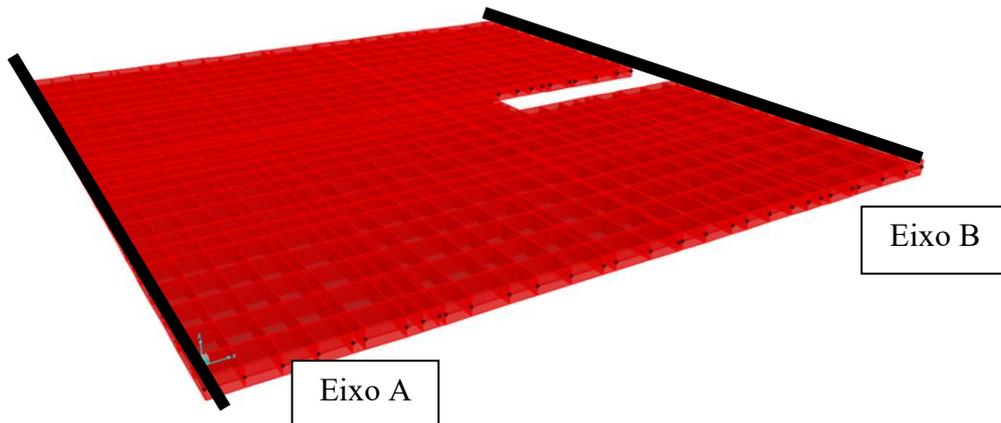
<b>Etapa</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição do Serviço</b>
1	Radier	Execução do Radier
2	1E+1C	Montagem da forma esquerda do térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
3	1D	Montagem da forma direita do térreo e concretagem no final do dia;
4	2E+2C	Montagem da forma esquerda do 1º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
5	2D	Montagem da forma direita do 1º pav. e concretagem no final do dia;
6	3E+3C	Montagem da forma esquerda do 2º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
7	3D	Montagem da forma direita do 2º pav. e concretagem no final do dia;
8	4E+4C	Montagem da forma esquerda do 3º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
9	4D	Montagem da forma direita do 3º pav. e concretagem no final do dia;
10	5E+5C	Montagem da forma esquerda do 4º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
11	5D	Montagem da forma direita do 4º pav. e concretagem no final do dia;
12	6E+6C	Montagem da forma esquerda do 5º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
13	6D	Montagem da forma direita do 5º pav. e concretagem no final do dia;
14	7E+7C	Montagem da forma esquerda do 6º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
15	7D	Montagem da forma direita do 6º pav. e concretagem no final do dia;
16	8E+8C	Montagem da forma esquerda do 7º pav. térreo com o hall, elevador e escada e concretagem no final do dia;
17	8D	Montagem da forma direita do 7º pav. e concretagem no final do dia;
18	PLATIBANDA	Montagem e concretagem da estrutura da Platibanda;
19	CAIXA	Montagem e concretagem da estrutura da Caixa d'água;

Fonte: Construtora Pernanbuco.

Primeiramente foi analisado as deformadas definidas pelos nós em dois eixos, denominados de Eixo A e Eixo B. O primeiro eixo é definido pelos nós de coordenada X=0 m e o segundo pelos nós de coordenada X=16,35 m. A escolha desses eixos visou identificar se no modelo

numérico realizado é possível reproduzir o levantamento da placa de radier conforme apresentado no Capítulo 4, onde para as etapas de execução parcial dos pavimentos foi possível identificar leituras negativas de deslocamentos. Figura 106 representa as definições dos eixos.

Figura 106 – Definição de eixos de deformadas



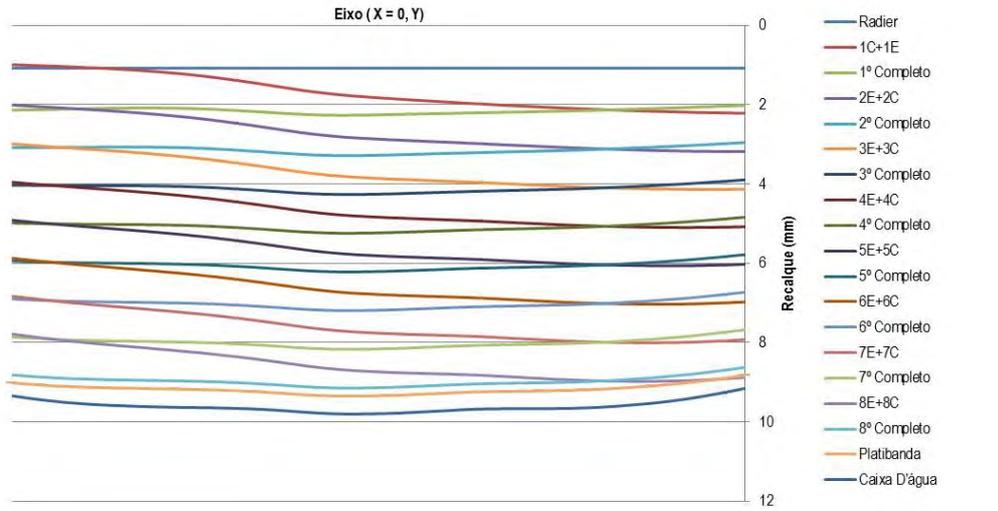
Fonte: O Autor, 2019.

A Figura 107.a e b apresenta as deformadas definidas em cada estágio construtivo para os Eixos A e B, respectivamente. A análise das deformadas permite mostrar o efeito da não uniformidade da distribuição das cargas quando a etapa analisada corresponde à execução parcial de um dos pavimentos, o que rotaciona a placa e depois de carregado o lado aposto tende a uniformizar os recalques. Também se observa que entre as leituras de execução parcial e total dos pavimentos à um pequeno levantamento da placa nas suas extremidades, o que explica as leituras negativas determinadas em alguns dos blocos e tratadas no Capítulo 4.

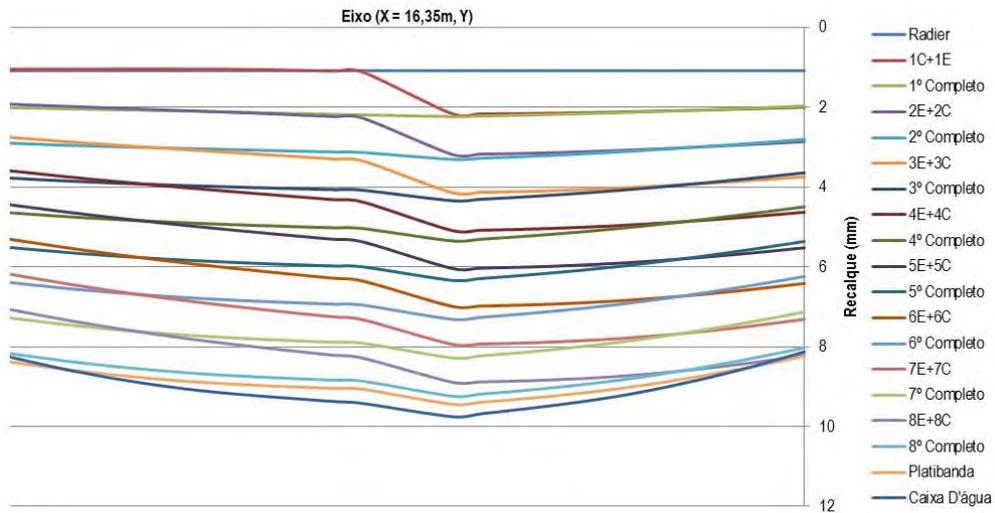
Também é possível observar que as deformadas do Eixo B apresentaram uma descontinuidade nas deformações devida à abertura da placa de radier na região da entrada do bloco. É importante destacar que com o avanço construtivo houve redução da descontinuidade.

Como forma de avaliar esta redução, determinou-se a rotação em cada estágio construtivo entre os nós que definem a descontinuidade, apresentado na Figura 108. Observa-se que as rotações entre os nós diminuem com avanço construtivo e que existe um valor denominado residual de rotação que tende a aumentar.

Figura 107 – Deformadas dos estágios construtivos (a) Eixo A e (b) Eixo B



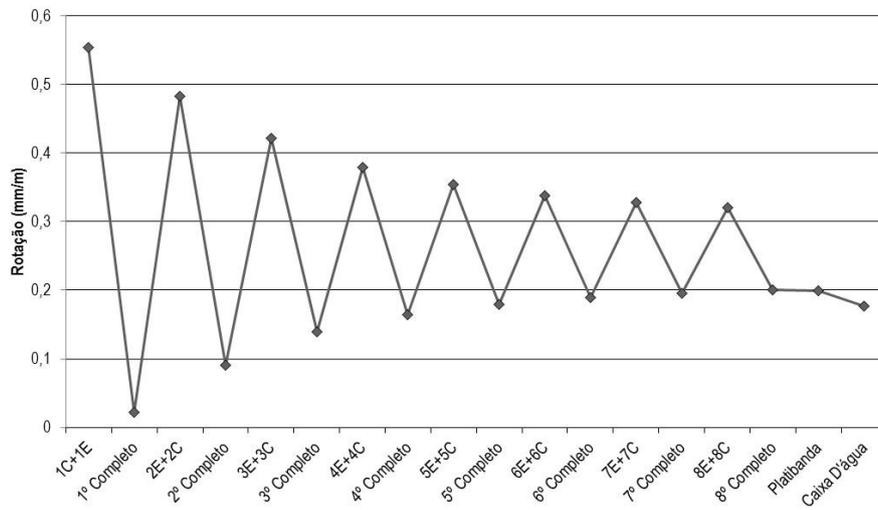
(a)



(b)

Fonte: O Autor, 2019.

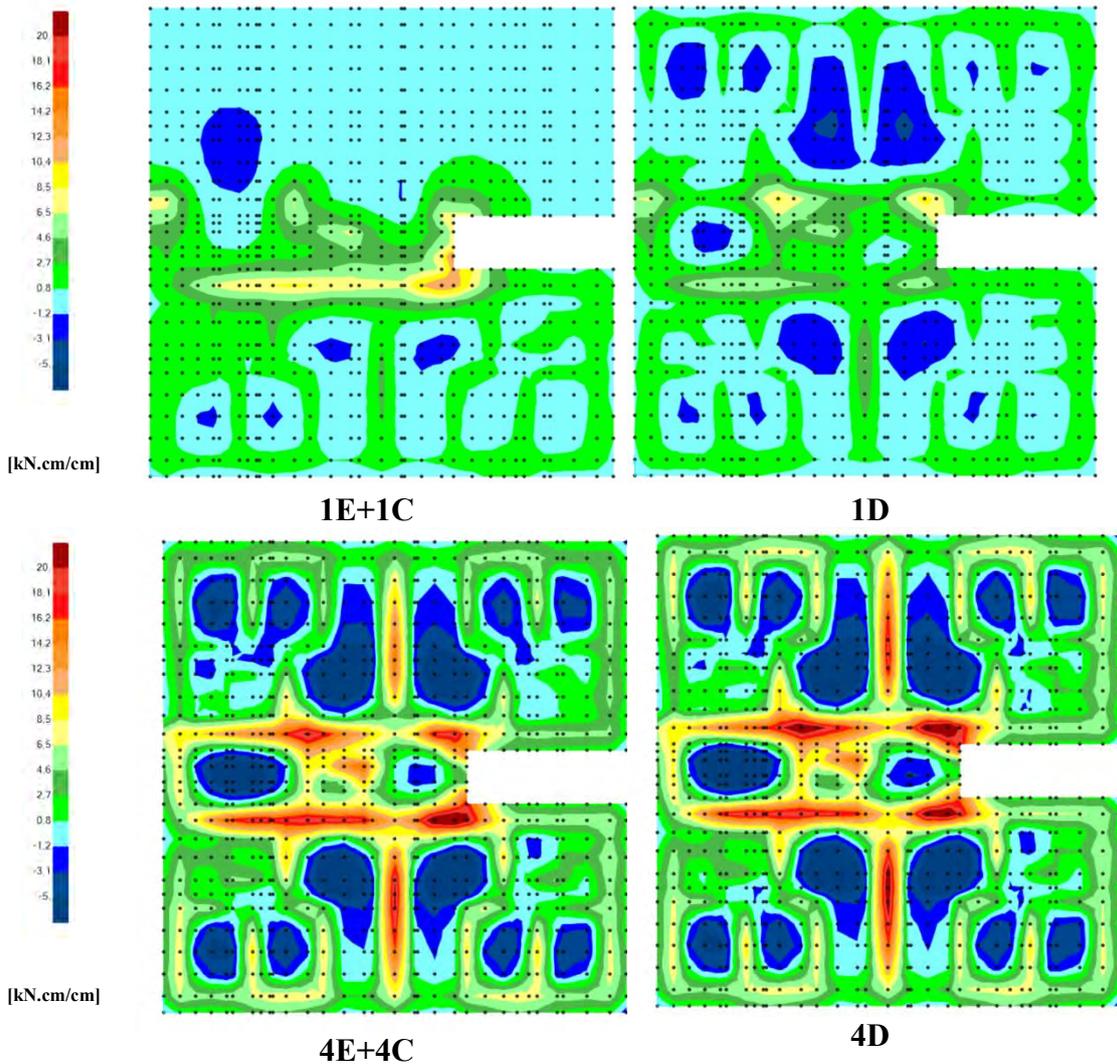
Figura 108 – Rotação entre as extremidades da placa que dividem a entrada



Fonte: O Autor, 2019.

Conforme apresentado até o momento, a metodologia construtiva adotada, em que foram executados os pavimentos em 2 etapas, indicou de maneira geral, o comportamento das placas com o avanço construtivo. A execução parcial de um dos pavimentos apresenta uma má distribuição do carregamento na placa. A Figura 109 apresenta o gráfico indicativo de momentos fletores máximos, como forma de avaliar a diferença de esforços para a execução parcial do 1º pavimento e a execução total do mesmo pavimento. Na primeira etapa construtiva, apresentada para execução parcial do primeiro pavimento a modelagem numérica indicou momento fletor máximo de 18,2 kN.cm/cm na placa de radier enquanto na segunda leitura, correspondente a construção total do primeiro pavimento, foi observado momento fletor máximo de 11,7 kN.cm/cm.

Figura 109 – Diagrama de momentos fletores máximos para execução parcial dos pavimentos  
execução completa pavimento



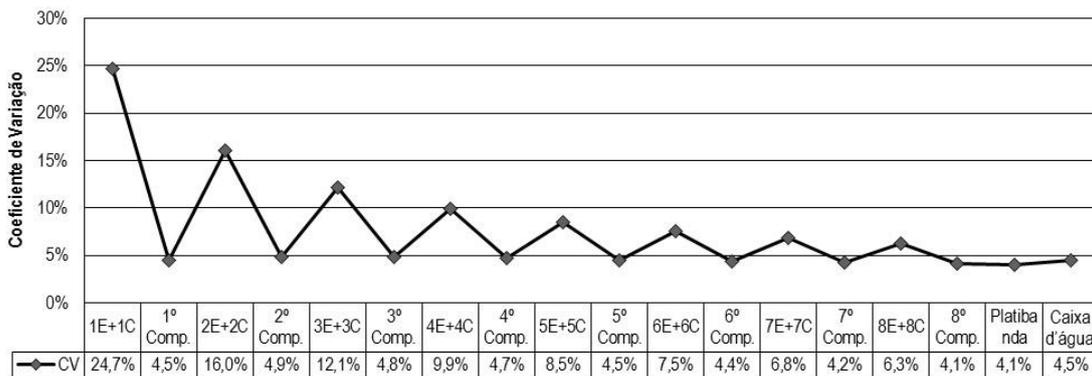
Fonte: O Autor, 2019.

### 6.3 Influência da metodologia construtiva na ISE

Como visto no subitem anterior, a execução parcial dos pavimentos tende a rotacionar a placa de radier e que o aumento da rigidez da estrutura conforme avanço construtivo diminui os efeitos dessa rotação. Nesse subitem avalia-se o efeito da ISE, com base nos parâmetros de coeficiente de variação – CV e fatores de recalque – AR, como forma de entender a contribuição do efeito construtivo nas deformações da placa de radier.

Na Figura 110 são apresentados os coeficientes de variação para cada estágio construtivo obtido na modelagem numérica. Observa-se que execução parcial dos pavimentos origina o aumento no coeficiente de variação obtido. É importante destacar é que com o avanço construtivo a redução nessa variação, indicado que o efeito da ISE reduz a variação dos recalques devido à rigidez da estrutura.

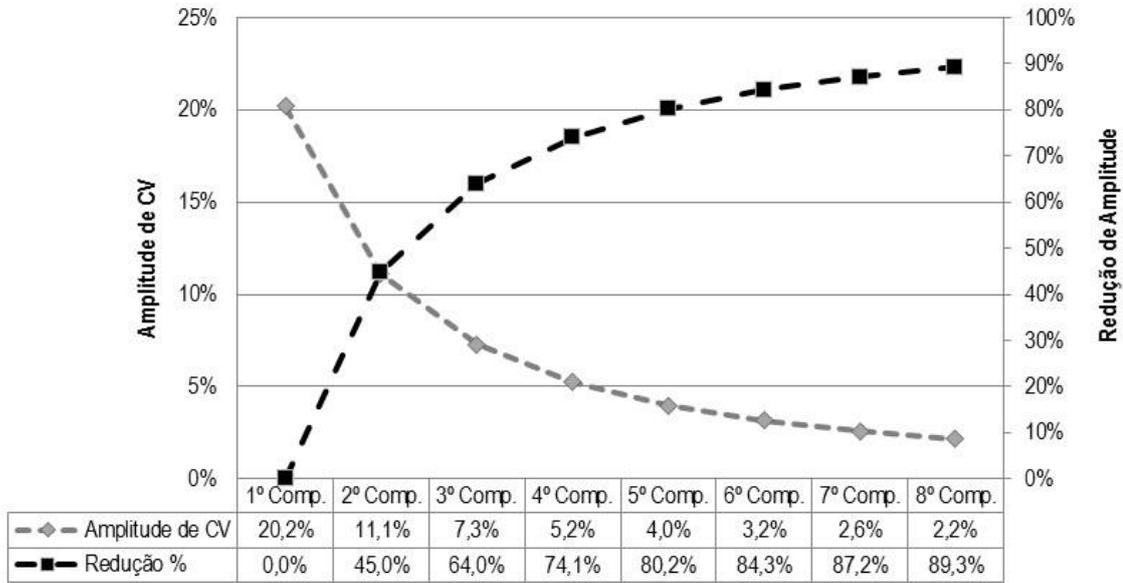
Figura 110 – Coeficiente de variação do modelo numérico



Fonte: O Autor, 2019.

Para melhor avaliar essa variação, determinou-se a amplitude de variação do coeficiente para cada pavimento e avaliou-se a redução do parâmetro para cada estágio, apresentado na Figura 111. Observa-se que as amplitudes de variação do coeficiente se reduzem com o avanço construtivo. As reduções são mais significantes até a execução do 4º pavimento, indicando que influência da ISE é maior nos primeiros andares. A execução completa do 2º pavimento indicou redução de 45% no coeficiente e até a execução do 4º pavimento os valores foram reduzidos em 74%. Após a execução desses pavimentos, houve tendência de as reduções diminuírem, chegando no último pavimento analisado à redução de 89%.

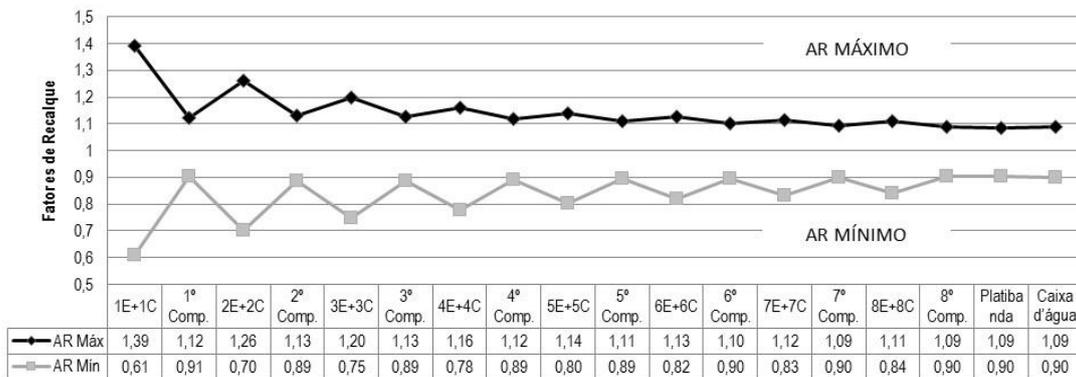
Figura 111 – Amplitude de variação do CV e redução %



Fonte: O Autor, 2019.

O mesmo comportamento foi possível avaliar por meio da análise de fatores de recalque. A Figura 112 apresenta os fatores de recalque máximos e mínimos obtidos no modelo numérico de estágio construtivo para cada etapa da construção. Observou-se que as execuções parciais dos pavimentos aumentam os fatores de recalques máximos e diminuem os mínimos, indicando a uniformização dos recalques com avanço construtivo.

Figura 112 – Fatores de recalques máximo e mínimos do modelo numérico

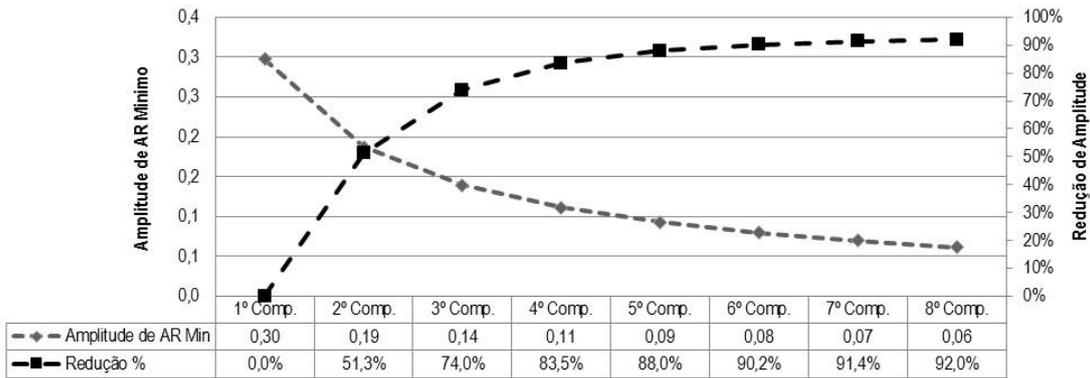


Fonte: O Autor, 2019.

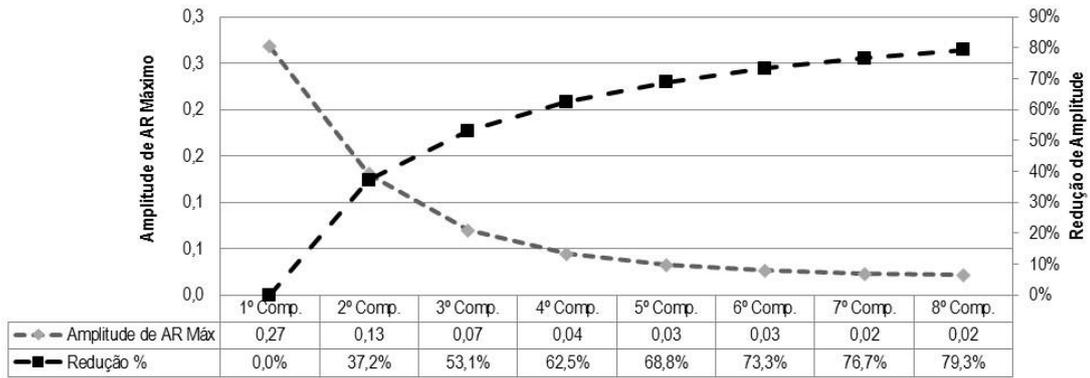
Foram determinados os valores de amplitude de variação dos fatores de recalques máximos e mínimos e duas respectivas reduções percentuais, ambos apresentados na Figura 113.a e b, respectivamente. Observa-se que as maiores variações de amplitude e reduções do fator AR são correspondentes as execuções dos primeiros pavimentos. É observado curva de AR mínimo, a porcentagem de redução até a execução do 4º pavimento foi de 83,4%, e após a execução do mesmo as variações foram menores.

Se analisado de maneira conjunta as reduções percentuais de amplitude das variáveis em estudo, observa-se que após a execução do 5º pavimento a uma tendência de redução linear das amplitudes, mostrando que o efeito da ISE é menos expressivos após a execução deste pavimento, conforme apresentado na Figura 114.

Figura 113 – Amplitude de variação e redução percentual dos fatores de recalque (a) mínimos e (b) máximos



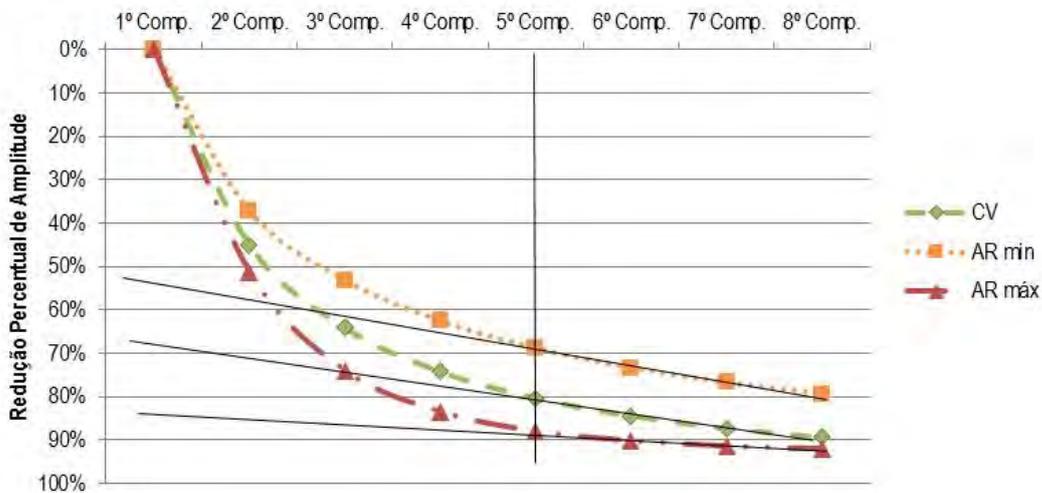
(a)



(b)

Fonte: O Autor, 2019.

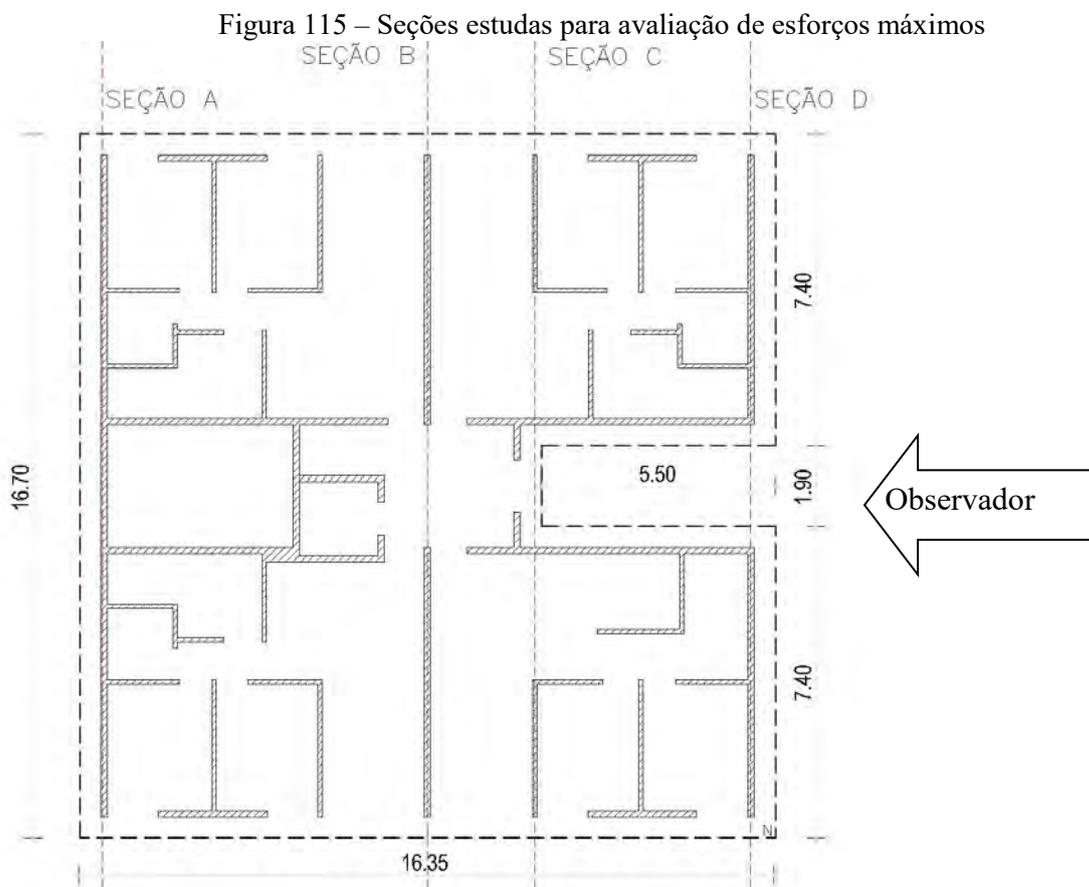
Figura 114 – Análise conjunta da redução de amplitudes



Fonte: O Autor, 2019.

#### 6.4 Influência da ISE na redistribuição dos esforços nas paredes

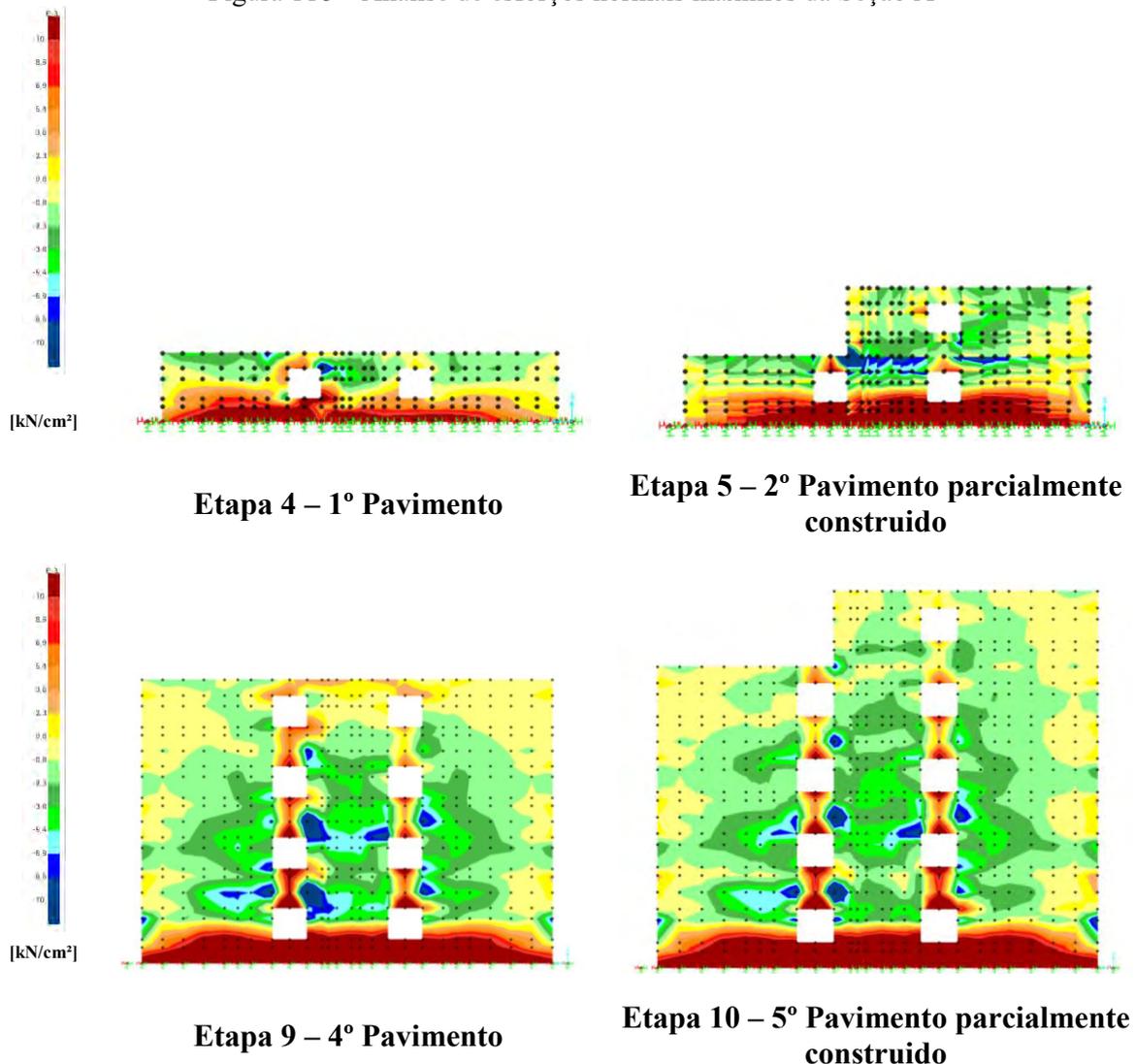
São escolhidas quatro seções como forma de verificar a redistribuição dos esforços normais máximos de maneira gráfica. As seções escolhidas estão apresentadas na Figura 115, sendo as seções A e D compostas por paredes externas as seções B e C por paredes internas. Foram avaliados 4 estágios construtivos: Estágio 4 (1º Pavimento completo) e Estágio 5 (2º Pavimento parcialmente executado); e Estágio 9 (4º Pavimento completo) e Estágio 10 (5º Pavimentos parcialmente executado). Destacou-se na Figura 115 o sentido do observador nas análises gráficas.



Fonte: O Autor, 2019.

A Figura 116 apresenta a análise de esforços máximos para a Seção A. Observa-se que no estágio 4 os esforços máximos estão mais concentrados na base das paredes do lado direito do observador e com execução parcial do pavimento superior, correspondente à etapa 5, os esforços máximos normais se concentram no lado oposto ao observado anteriormente. Analisando as etapas 9 e 10, observa-se que os esforços máximos normais na base das paredes não tendem a mudar de posição. O que é possível observar é que há um aumento de esforços normais nas paredes nos andares abaixo do executado e na região compreendida no lado oposto ao executado, mostrando a redistribuição dos esforços devida à rigidez da estrutura.

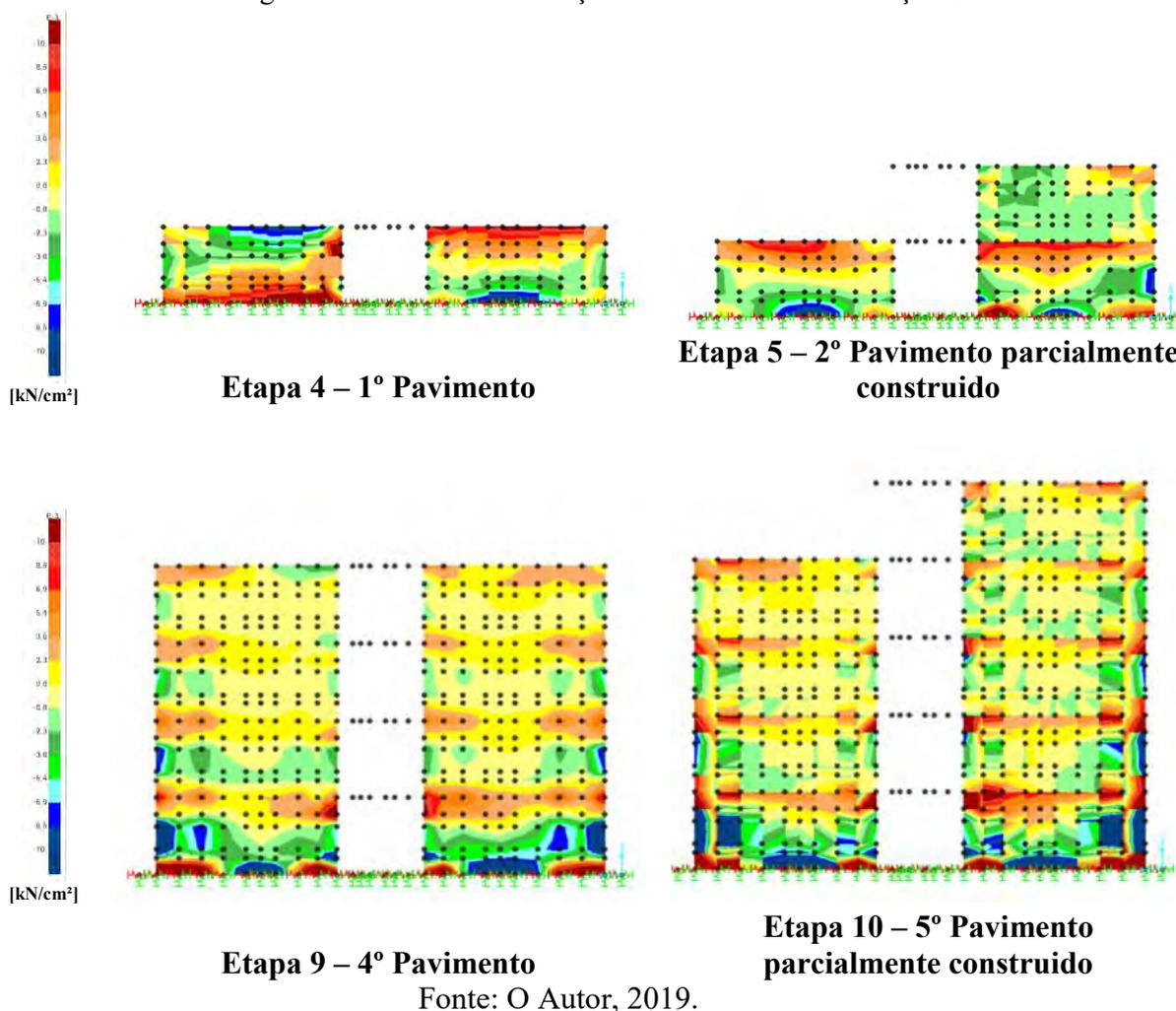
Figura 116 – Análise de esforços normais máximos da Seção A



Fonte: O Autor, 2019.

A Figura 117 apresenta a análise de esforços normais máximos para a Seção B. Observa-se que no estágio 4 os esforços normais de máximo de compressão estão concentrados na base das paredes do lado direito do observador e no lado esquerdo surgem esforços normais de tração na base da parede. Com execução parcial do pavimento superior, correspondente a etapa 5, os esforços máximos normais de tração aparecem do lado oposto indicando levantamento da placa do radier. Analisando as etapas 9 e 10, observa-se que os esforços máximos normais na base das paredes não tendem a mudar de posição nem de sentido (tração e compressão). O que é possível observar é que há um aumento de esforços normais nas paredes nos andares abaixo do executado e na região compreendida no lado oposto ao executado, mostrando a redistribuição dos esforços devido a rigidez da estrutura, conforme apresentado anteriormente.

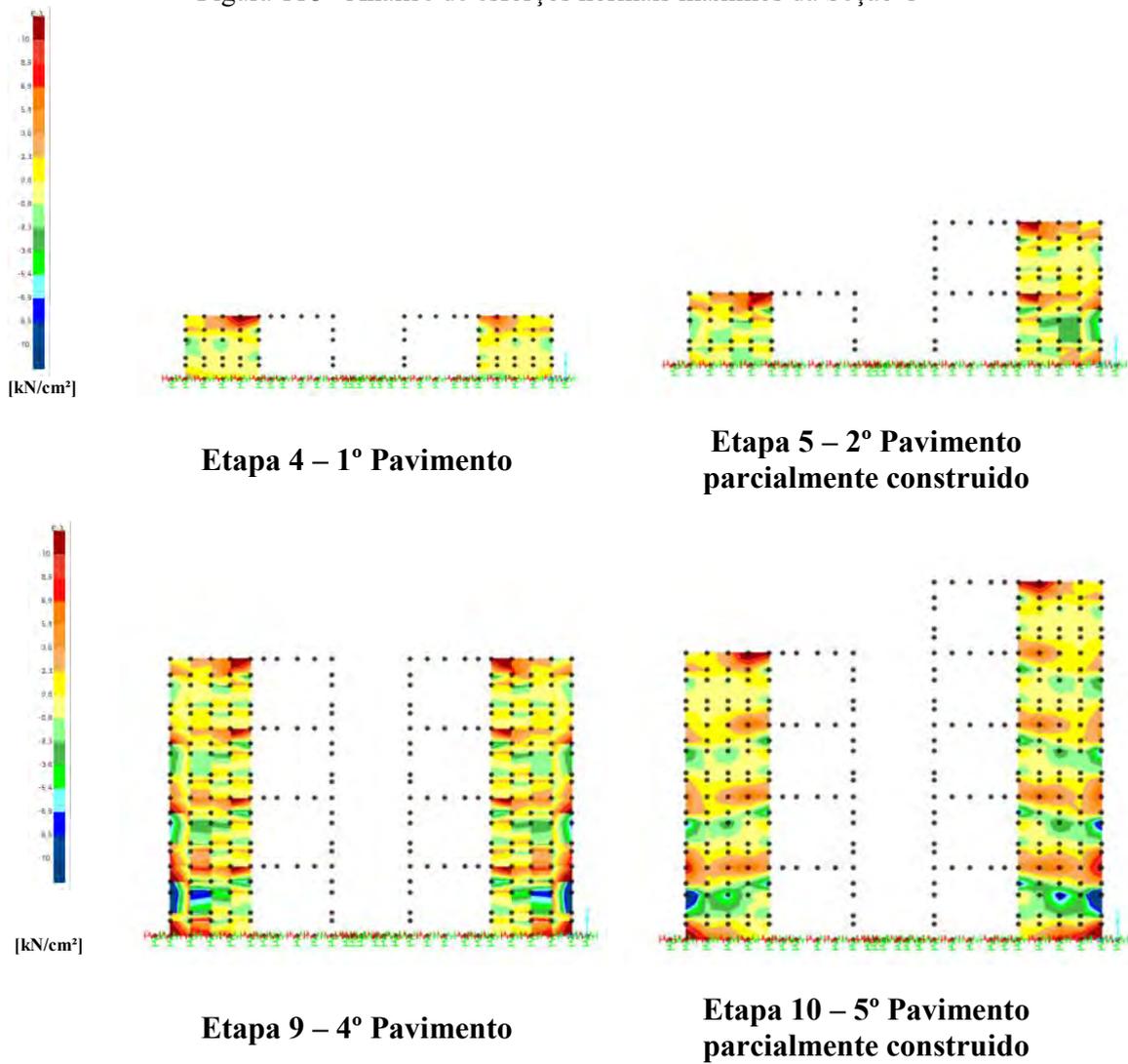
Figura 117 - Análise de esforços normais máximos da Seção B



A Figura 118 apresenta a análise de esforços normais máximos para a Seção C. Observa-se que nessa seção não foi possível verificar mudança significativa nos esforços normais nas bases das paredes quando comparadas as seções estudadas até o momento. Cabe destacar que tanto nesta seção, como na Seção B, estudada anteriormente, foi possível verificar o surgimento de esforços de tração nas extremidades das paredes da base, conforme apresentado por Goshy (1978). A Figura 119 indica representação gráfica da analogia.

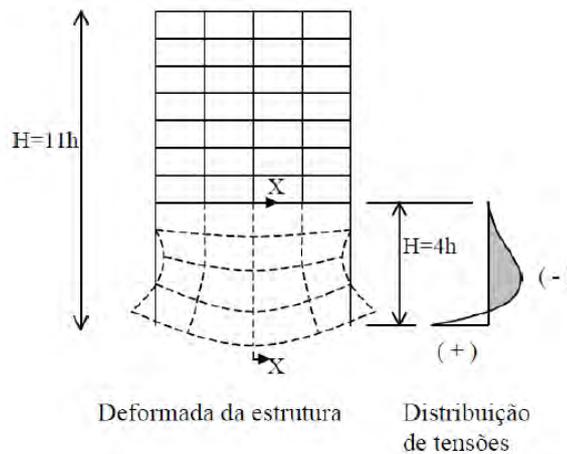
Farias (2018) apresentou estudo detalhado do mesmo projeto de edifício deste trabalho, com enfoque no sistema estrutural de paredes de concreto, onde o autor, observou as mesmas tensões de tração nas extremidades das paredes com utilização de modelo numérico utilizando o pacote computacional DIANA.

Figura 118 - Análise de esforços normais máximos da Seção C



Fonte: O Autor, 2019.

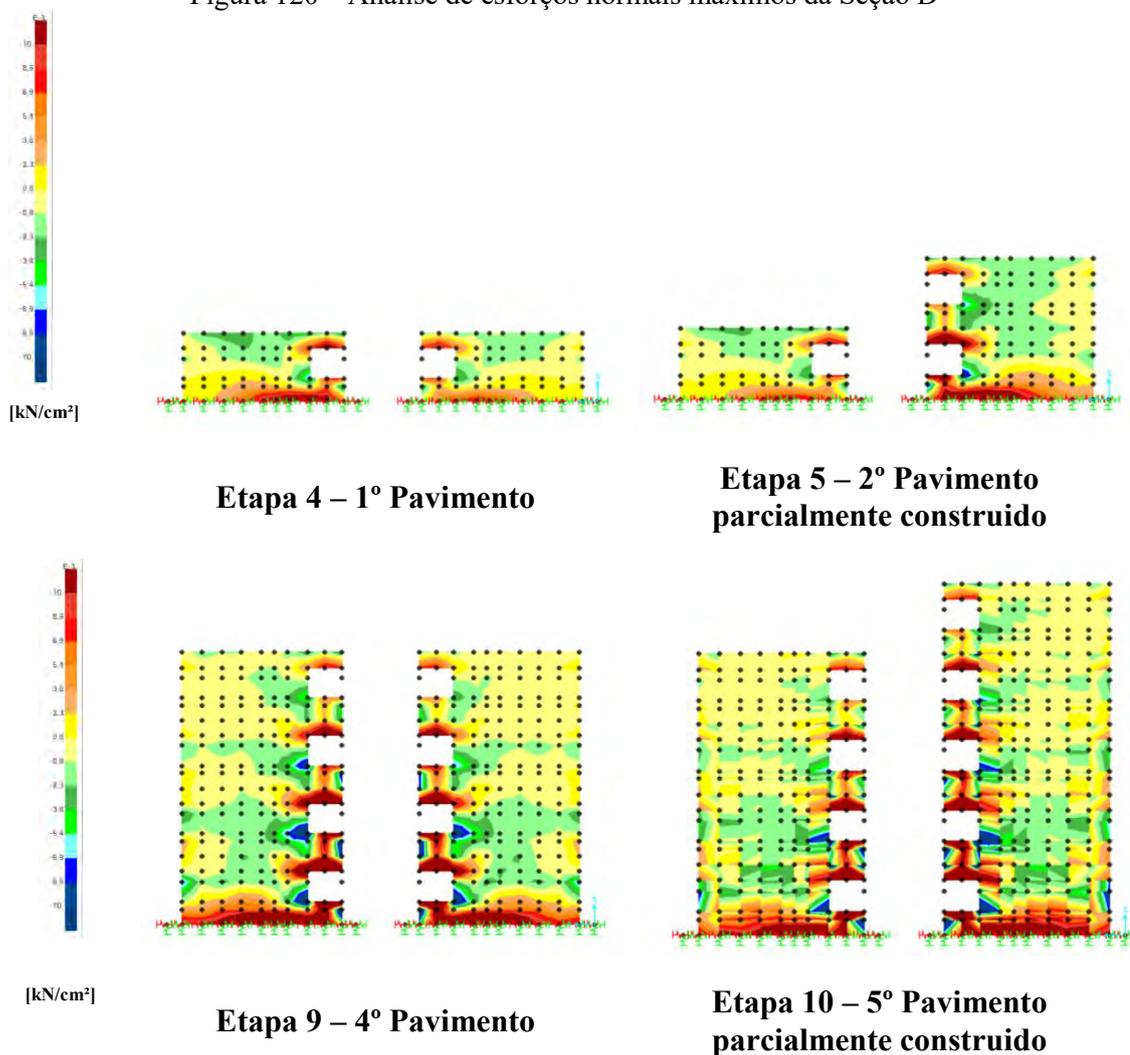
Figura 119 – Analogia apresentada por Goshy (1978)



Fonte: FARIAS,2018.

A Figura 120 apresenta a análise de esforços normais máximos para a Seção D. Os padrões do desenvolvimento dos esforços foram semelhantes ao apresentado na Seção A, avaliado anteriormente. Observa-se que no estágio 4 os esforços máximos estão mais concentrados na base das paredes do lado direito do observador e com execução parcial do pavimento superior, correspondente a etapa 5, os esforços máximos normais se concentram no lado oposto ao observado anteriormente. Analisando as etapas 9 e 10, observa-se que não houve distribuição significativa dos esforços nas paredes do lado oposto ao carregado pela execução parcial do pavimento devido à descontinuidade da estrutura na seção em estudo.

Figura 120 – Análise de esforços normais máximos da Seção D



Fonte: O Autor, 2019.

Farias (2018) propôs a utilização da Equação 38 para determinação de redistribuição dos esforços nas paredes.

$$\Delta AR = \frac{w_{iref} - w_{ise}}{\bar{w}} \quad (38)$$

Onde:

$\Delta AR$ : Variação de fator de recalque

$w_{iref}$ : recalque médio absoluto do modelo sem ISE

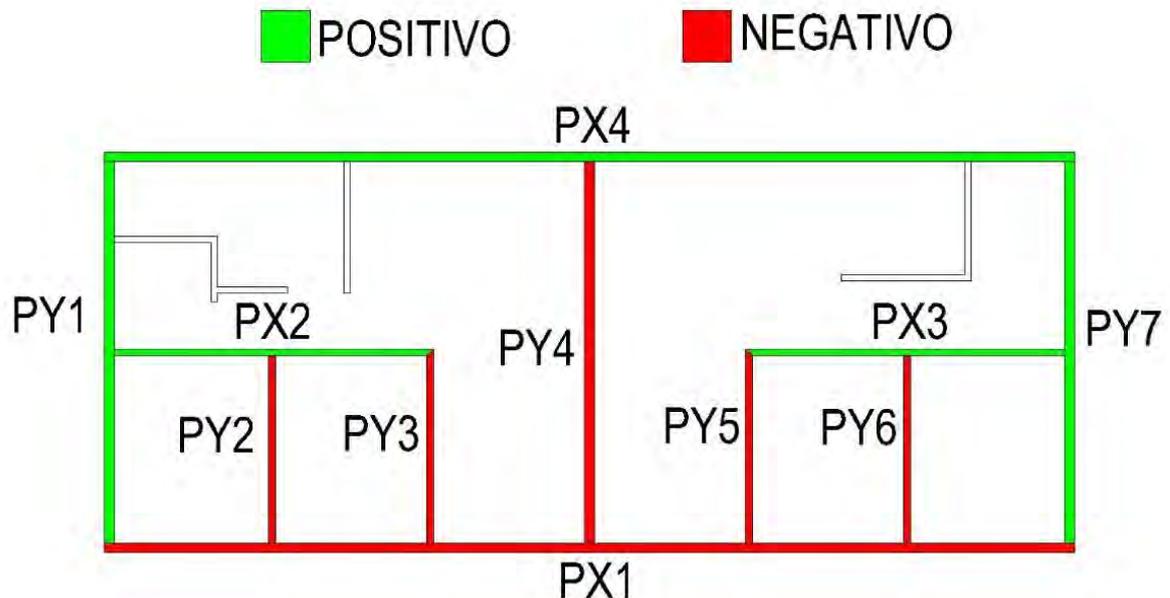
$w_{ise}$ : recalque médio absoluto do modelo com ISE

$\bar{w}$ : recalque médio do modelo com ISE

Segundo o autor a variação positiva do fator de recalque indica que a inclusão da ISE alivio os esforços normais, enquanto os valores negativos indicam redução dos esforços normais. A Tabela 43 e Figura 121 apresentam a variação de fator de recalque das paredes avaliadas.

Observou-se que as paredes externas PY1 e PY7 e as internas PX2, PX3 e PX5, apresentaram variações de fator de recalque positivas, indicando redução dos esforços normais devido ao efeito da ISE, enquanto as demais paredes houve variação negativa indicando aumento dos esforços nas paredes.

Figura 121 – Análise de variação de fator de recalque



Fonte: O Autor, 2019.

Tabela 43 - Variações de fator de recalque

<b>Paredes</b>	<b>Variação de Fator de Recalque</b>
PY1	23,9
PY2	-7,4
PY3	-15,8
PY4	-18,1
PY5	-14,4
PY6	-7,0
PY7	21,6
PX1	-9,1
PX2	3,2
PX3	2,8
PX4	8,1

Fonte: O Autor, 2019.

## 6.5 Conclusão do Capítulo

A partir das análises realizadas neste capítulo pode-se alcançar as seguintes conclusões:

- O modelo numérico ISE-EC mostrou a distorção da placa de radier quando executados parcialmente os pavimentos;
- O modelo numérico ISE-EC reforça a hipótese que explica o levantamento parcial das placas de radier, apresentado no Capítulo 4;
- A ISE contribui não só uniformizando os recalques, mas diminuindo as distorções da execução parcial com o avanço construtivo;
- Foi possível verificar que devido à ISE houve redistribuição de esforços nas paredes no modelo numérico.

## 7 CONCLUSÕES

São apresentadas as conclusões obtidas no desenvolvimento da tese. Elas estão divididas em itens específicos com base nos resultados apresentados. Também foi apresentada neste capítulo sugestões para trabalhos futuros.

### 7.1 Medições de Recalque

A partir da análise de medições de recalque é observado que o fator que mais influenciou no desenvolvimento dos recalques foi a terraplenagem. Os monitoramentos de recalques dos blocos construídos em seções de aterro indicaram maiores recalques quando comparados aos construídos em seção de corte. Os recalques médios medidos nas seções de aterro variaram de 10 mm a 35 mm, enquanto os de seção de corte apresentaram recalques médios menores que 10 mm.

Foram observadas velocidades de recalque maiores que 1600 micra/dia, velocidades essas consideradas altas para a avaliação comum de desempenho de fundações para edifícios em construção apresentadas pela literatura. As altas velocidades de recalque apresentadas são atribuídas às altas velocidades de carregamento impostas pelo sistema construtivo de paredes de concreto. Entende-se que limites específicos para o sistema construtivo devem ser avaliados.

Foram observadas rotações entre os pinos de recalque de até 1/350, mas as distorções angulares apresentadas foram baixas quando desconsiderado os desaprumos.

A execução parcial dos pavimentos impôs distorção à placa de radier, na qual foi possível verificar levantamento da placa do lado oposto ao carregado em alguns dos blocos em seções de corte, visto o menor recalque apresentado. Dessa forma, entende-se que a execução parcial dos pavimentos pode se tornar a etapa crítica em termos de distorções angulares e esforços na placa de radier, sendo importante a avaliação do comportamento do elemento de fundação durante a fase construtiva em projetos de paredes de concreto com execução parcial dos pavimentos.

### 7.2 Retroanálise dos Parâmetros de Deformabilidade dos solos

Os módulos de elasticidades retroanalizados tenderam a diminuir conforme aumento da tensão transmitida estimada, isto é, com avanço construtivo houve decréscimo de rigidez da camada compressível. Nas seções de aterro, a retroanálise do módulo de elasticidade indicou maior

sensibilidade à perda de rigidez quando comparadas às seções de corte, onde foi sugerido a utilização de fatores de redução para faixas de tensão. As retroanálises dos módulos de elasticidade nas seções de corte apresentaram pouca variação para aumento de tensão transmitida onde a adoção do parâmetro constante é aplicável, visto a boa aproximação apresentados pelos modelos numéricos utilizando essa consideração.

Os recalques por fluência contribuíram em valores na ordem de 20% no desenvolvimento dos recalques totais medidos em alguns dos blocos em seção de aterro, mostrando que os recalque secundário, muitas vezes desconsiderados na estimativa de recalque, podem influenciar de maneira significativa.

### **7.3 Modelagem numérica**

O modelo numérico ISE-EC mostrou a distorção da placa de radier quando executados parcialmente os pavimentos. A análise do modelo numérico indicou que a execução parcial dos pavimentos provoca maiores distorções angulares quando comparadas à execução completa dos pavimentos.

O modelo numérico ISE-EC reforçou a hipótese que explica o levantamento parcial das placas de radier, visto que nos estágios construtivos de execução parcial de um dos lados dos pavimentos, observaram-se deslocamentos negativos (levantamento) de nós na extremidade oposta da placa.

A ISE contribui não só uniformizando os recalques, mas diminuindo as distorções angulares devido à execução parcial dos pavimentos com o avanço construtivo.

### **7.4 Sugestões para futuras pesquisas**

São apresentadas sugestões para desenvolvimento de futuras pesquisas acerca do tema.

- Realizar estudo que indique de parâmetros de desempenho de fundações em radier específicos para o sistema de paredes de concreto associado a patologias no sistema devido a altas velocidade de recalque e rotações elevadas.
- Realizar estudo comparativo entre o desempenho da placa de radier executado sob solo com melhoramento de colunas de argamassa (não avaliado nesse estudo).
- Realizar estudo paramétrico associando a altura dos blocos aos desaprumos observados, indicando limites específicos para projetos desse tipo.
- Realizar interpretação de dados de medições de recalque por meio de monitoramento

nas etapas construtivas e de operação seguindo a periodicidade construtiva em função do número de pavimentos.

- Realizar estudo sobre a influência dos recalques secundários em projetos de radier utilizando o sistema construtivo de parede de concreto por meio de medições de recalque após execução dos edifícios.
- Realizar estudo em caráter estrutural sobre a influência da execução parcial dos pavimentos nos esforços das paredes, prática comum em projetos de parede de concreto.
- Realizar modelo numérico considerando coeficientes de reação variáveis com aumento de tensão transmitida.
- Realizar modelo numérico considerando meio elástico contínuo com adoção de módulo de elasticidade variável, podendo ser utilizado os fatores de redução propostos.

## REFERÊNCIAS

- ALHEIROS, M. M.; MENEZES, M.F; FERREIRA, M. G. **Carta geotécnica da cidade do Recife**. Relatório de atividades. Recife: FINEP/UFPE, 1990. pp. 81.
- ALMEIDA, L. C. **Concreto armado**: nota de aula. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, 2002.
- ALMEIDA, L.C. **Laje sobre solo para fundação de residências**. 2001. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, 2001.
- ALONSO, U. R. **Previsão e controle das fundações**: uma introdução ao controle de qualidade em fundações. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.
- ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.
- ANTONIAZZI, J. P. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. 2011. Dissertação (Mestrado). Universidade de Santa Maria. Santa Maria – RS, 2011.
- AOKI, N.; LOPES, F. R. Estimating stresses and settlements due to deep foundations by the Theory of Elasticity. In: **Panamerican conference on soil mechanics and foundation engineering**, 5., Buenos Aires, 1975.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16055**: paredes de concreto moldada no local para a construção de edificações - requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. \_\_\_\_ **NBR 6118**: projetos de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- \_\_\_\_\_. \_\_\_\_ **NBR 6122**: projeto e execução de fundações - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- \_\_\_\_\_. \_\_\_\_ **NBR 6484**: execução de sondagens de simples reconhecimentos dos solos – métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **NBR 8681: ações e segurança nas estruturas - procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BJERRUM, L. Interaction between structures and soil. In: **European conference on soil mechanics and foundation engineering**, 1963. p. 135-137.

BOWLES, J. E. **Foundation analyses and design**. New York: McGraw-Hill, 1968.

BOWLES, J. E. **Foundation analyses and design**. Third Edition. New York: McGraw-Hill, 1982.

BRANDI, J. L. G. **Previsibilidade e controle de recalques em radiers sobre solo mole**. 2004. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

BUDHU, M. **Fundações e estruturas de contenção**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP. **Model code**. London: Thomas Telford, 1990.

CHAMECKI, S. Structural rigidity in calculating settlements. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, Vol. 82, No. SM-1, pp.01-19. 1956.

CINTRA, J. C.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de textos, 2003.

CINTRA, J. C.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

COSTA, A. J. **O subsolo do Recife**. Recife: ITEP, 1960. (Publicação 19).

Computers & Structures, INC. CSI. **Analysis reference manual for SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSIBRIDGE®**. Berkeley: CSI, 2017.

DAS, B. M. **Shallow foundations: bearing capacity and settlement**. London: Library of Congress, 1999.

DORIA, L. E. S. **Projeto de estrutura de fundação em concreto do tipo Radier**. 2007. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade

Federal de Alagoas. Maceio, 2007.

EL ARABI; EL GENDY. On the optimum design of foundation systems. Suez Canal University, Faculty of Engineering, Port-Said. **Port-Sais Engineering Research Journal**. 2001.a.

EL ARABI; EL GENDY. Effect os openings on raft behavior. Suez Canal University, Faculty of Engineering, Port-Said. **Port-Sais Engineering Research Journal**. 2001.b.

EL GENDY, M. **Comparing examinations of the influence of calculation methods of basement slabs**. (PH.D) Thesis. Egypt: Suez Canal University, 1994.

EL GENDY, M. An analysis for determination of foundation rigidity. In: **Eighth International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering**. Cairo, Egypt: Ain Shams University, 1998.a.

EL GENDY, M. An iteration method for design of slab on elastic foundation. In: **Proceeding of the first International Conference on Civil Engineering**. Cairo, Egypt: Helewan University, 1998.b.

EL GENDY, M. Effect of girders on the raft rigidity. In: **1st International Conference for Advanced Trends in Engineering**. Minia, Egypt: Minia University, 1999.

EL GENDY, M. Numerical modeling of rigid circular rafts on consolidated clay deposits. In: **International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice**. Noordwijkerhout, Netherlands, 2003.

FARIAS, R. S. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto com a incorporação da interação solo-estrutura e das ações evolutivas**. 2018. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

GIROUD, J. P. **Tables pour le calcul des fondations**. Paris: DUnod, 1972.

GODOY, N. S. **Fundações**: notas de aula, curso de graduação. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1972.

GUSMÃO, A. D., GUSMÃO FILHO, J. A., MAIA, G. B. Medições de Recalque de um Prédio em Recife. Simpósio sobre Interação Solo-estrutura – São Carlos - SP – **Anais [...]** São

Carlos, 2000.

GUSMÃO, A. D. Prática de fundações no Recife. In: Gusmão, A. D., Gusmão Filho, J. A., Oliveira, J. T. R., Maia, G. B. (Orgs). **Geotecnia no Nordeste**. Recife: UFPE, 2005.

GUSMÃO, A. D. **Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalque da edificação**. 1990. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 1990.

GUSMÃO, A. D. Aspectos relevantes da interação solo-estrutura em edificações. **Solos e Rochas**, São Paulo. V. 17, pp 47-55. 1994.

GUSMÃO FILHO, J. A. **Contribuição à prática de fundações**: a experiência do Recife. 1995. (Tese para concurso de Professor Titular). Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 1995.

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

GUSMÃO FILHO, J. A., GUSMÃO, A. D., MAIA, G. B. Performance of a high building with superficial foundation in Recife, Brazil. In: **XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, Foz do Iguaçu, Vol. 3: 1563-1569. 1999.

HAMBLY, E. C. **Bridge deck behavior**. London: John Wiley & Sons, 1976.

HANSEN, J. B. Foundations of structures: General report. In: **4<sup>th</sup> ICSMFE**, vol.2, pp. 441-447. 1957.

HANSEN, J. B. A revised and extended formula for bearing capacity. In: **Danish Geotechnical Institute Bulletin**, no. 28, Copenhagen, 21 pp. 1970.

HARR, M. E. **Foundations of theoretical soil mechanics**. New York: MC Graw-Hill, Inc., 1966.

IWAMOTO, R. K. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. 2010. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

KANY, M. **Berechnung von Flächengründungen**. 2. Auflage. Berlin: Verlag Ernst &

Sohn,1974.

KANY, M.; EL GENDY, M. **Vergleichende Untersuchung über numerische Modelle für die Berechnung von Gründungsplatten.** Theorie und Praxis numerischer Modelle in der Bodenmechanik. Sonthofen Herausgeber: TU Graz, 1993.

KANY, M.; EL GENDY, M. Computing of beam and slab foundations on three dimensional layered model. In: **Proceeding of the Sixth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering**, Berlin, 1995.

KANY, M.; EL GENDY, M. **Unterlagen zu den TAW-Seminaren "Berechnung von Flächengründungen"**, Nürnberg, 1996.b.

KANY, M.; EL GENDY, M. Analysis of system of footing resting on irregular soil. In: **Proceeding of the XIVth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Hamburg, 1997.

KANY, M.; EL GENDY, M. Berechnung von großen. In: **Systemen starrer Sohlplatten Bauingenieur**, Bd. 74, Nr. 11, S. 471-478, 1999.

KANY, M.; EL GENDY, M. Einfluss der Bauwerkssteifigkeit auf das Fundament system 2. In: **Kolloquium Bauen in Boden und Fels Technische Akademie Esslingen**, Ostfildern, Germany, 2000.

KANY, M.; EL GENDY, M. Berechnung von Fundamenten auf nichtlinearem Baugrund 3. In: **Kolloquium Bauen in Boden und Fels Technische Akademie Esslingen**, Ostfildern, Germany, 2002.

KANY, M.;EL GENDY, M. Sicherheitsuntersuchungen bei Flächengründungen nach EC 7/ DIN 1054. In: **Forschungsbericht an IFBT**, Berlin, 1996.a.

LOPES, F. R.; GUSMÃO, A. D. On the influence of soil-structure iteration in the distribution of foundations loads and settlements. In: **European Conference on soil mechanics and foundation engineering**,10, Firenze, 1991.

LOPES, L. F. A. **Análise de recalques em fundações superficiais do tipo radier plano sobre solo silte-argiloso na região metropolitana de Recife.** 2016. (Trabalho de Conclusão de Curso), Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, Curso de Engenharia Civil,

Recife. 2016.

MEYERHOF, G. G. The ultimate Bearing Capacity of foundation. **Geotechnique**, vol. 2, no. 4, pp. 301-331, 1951.

MEYERHOF, G. G. Some recent foundation research and its application to design. **Structural Engineering**, Londres, Vol. 31, pp. 151-167, 1953.

MEYERHOF, G. G. Some recent researches on the Bearing Capacity of foundation. **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 1, no.1, September, pp. 16-26, 1963.

MORAES, M. C. **Estruturas de Fundações**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.

MOURA, A. R. L. U. **Interação solo-estrutura em edifícios**. 1995. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1995.

NG, M. Y. **Probability-based limiting tolerable displacement for serviceability design of foundations**. 2005. Ph.D (Master Degree of Philosophy). Civil Engineering Department, Hong Kong University of Science & Technology, 2005.

NUNES, V. Q. G. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto armado**. 2011. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

OLIVEIRA, J. T. R. Perfis típicos do subsolo na planície do Recife-Brasil: estudo de casos. **Symposium (Recife)**, Recife - PE, v. 8, n.2, p. 101-113, 2004.

OLIVEIRA, M. S; ROCHA, F. M. A; FERREIRA, S. R. M; OLIVEIRA, J. T. R. Identificação e classificação de perfis típicos de solos na planície do Recife. In: **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Belo Horizonte: ABMS, 2016.

OLIVEIRA, P. E. S. **Análise de provas de carga e confiabilidade para edifício comercial na região metropolitana do Recife**. 2013. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

PACHECO, J. L., GUSMÃO, A. D, GUSMÃO FILHO, J. A., AMORIM JUNIOR, W. M. Recalque de Edifícios em depósito de fragmentos de conchas. IV Seminário de Engenharia de

Fundações Especiais e Geotecnia, **Anais [...]** São Paulo, V.1, p.227-237, 2000.

PADFIELD, C. J.; SHARROCK, M. J. Settlement of structures on clay soils. In: **CIRIA Special Publication 27/PSA**, Civil Engineering Technical Guide 38, Department of the Environment, London, 1983.

PARK, K; STOKOE ii, K. H; OLSON, R. E; SEO, W. Settlements of footings in sand using dynamic soil properties. In: **Soil-Foundation-structure Interaction, selected papers form International workshop on soil-foundation structure interaction (2009)**, Auckland. Published by Taylor & Francis Group, London, 2010.

PERLOFF, W. H. Pressure distribution and settlements. In: WINTERKORN, H. F & FANG, H (1975). **Foundation Engineering Handbook**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1975.

POULOS, H. G. Settlement analysis of structural foundation systems. In: South-East Asian Conference on soil mechanics and foundation engineering, 4. Kuala Lumpur, 1975. **Proceedings [...]** Kuala Lumpur, South-East Asian Conference on Soil Engineering. V. 4, p.52-62, 1975.

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Elastic solutions for soil and rock mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1974.

PRANDTL, L. Über die Härte plastischer Körper. **Nachr. Ges. Wiss. Goettingen. Math.-Phys.** Kl.pp.74-85, 1920.

REIS, J. H. C. **Interação solo-estrutura de grupo de edifícios em fundações superficiais em argila mole**. 2000. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SANTOS R. A. M. **Análise dos tipos de fundações na Região Metropolitana do Recife de 2000 a 2010**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). 2011. Escola Politécnica de Pernambuco (UPE) Recife, 2011.

SANTOS, M. G. C. **Análise estrutural dos efeitos dos deslocamentos dos apoios de edifícios de paredes de concreto moldadas no local**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.a.

SANTOS, P. V. S. **Ações evolutivas em edifícios de paredes de concreto e de alvenaria, considerando a ação do solo**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.b.

SEED, H. B.; WOODWARD, R. J.; LUNDGREN, R. Prediction of Swelling Potencial for Compacted Clays. **Journal of soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, 88 (SM3): pp. 53-87, 1962.

SHULZE, W. E.; SIMMER, K. **Cimentaciones**. Tradução: José Maria Rodrigues Ortiz. Madri: Blumer, 1970. (Original alemão).

SOARES, M. B. **A paleontologia na sala de aula**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 2015. Disponível em: <https://www.paleontologianasaladeaula.com/> - Acesso em 22/01/2019.

SOUZA, F. A. **Radier simples, armada e protendido - Teoria e Prática**. 1ªEdição. São Paulo: Oficina de Texto, 2018.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley, 1948.

TEIXEIRA, A. H. Um aperfeiçoamento das sondagens de simples reconhecimento à percussão. In: Mesa-redonda solos do interior de São Paulo, 1993, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 1993. pg. 75-93.

TEIXEIRA, A. H. Projeto e execução de fundações. **3º Seminário de Engenharia de fundações especiais e geotecnia**, São Paulo, n.1, p. 33-50,1996.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N.S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: Hachich, W. *et al.* (ed.) **Fundações: teoria e prática**. São Paulo: Pini, 1998. Cap. 7, pp. 227-264.

TERZAGHI, K. Evaluation of coefficient of subgrade reaction. **Geotechnique**, London, v. 5, n. 4, pp. 297-326, 1955.

TESTONI, E. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto por meio de pórtico tridimensional sobre apoios elásticos**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia

de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

TROFIMENKOF, J. G. Penetration testing in Eastern Europe. In: **Proceedings European Symposium on Penetration Resistance**, Stockolm, vol. 2.1, pp. 24-28, 1974.

UNITED STATES. Army Corps Of Engineers. Department of the Army Corps of Engineers. Design and Construction of Mat Foundations, Final Report, OMB No. 0704-1888, **Miscellaneous Paper**, GL-89-27, Mississippi, 1989.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Engineering manual** - Settlement Analysis. Publication No. 1110-2-1904, Mississippi, 1994.

VARGAS,M; SILVA, F. R. O problema das fundações de edifícios altos: experiência em São Paulo e Santos. In: **Conferencia regional sul-americana sobre edifícios altos**, Porto Alegre. 1973.

VELLOSO, D. A. E LOPES, F. R. **Fundações**: critérios de projeto, investigação de subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

VELLOSO, D. A; MARIA. P. E. L. D; LOPES, F.R. Princípios e modelos básicos de análise. In: Hachich, W. *et al.* (ed.) **Fundações**: teoria e prática. São Paulo: Pini, 1998. Cap. 4, pp. 163-196.

WESTERGAAD, H. M. **A problem of Elasticity suggested by a problem in soil mechanics**: soft material reinforced by numerous strong horizontal sheets. New York: MacMillan, 1938. pp. 268-277.

WINTERKORN, H. F & FANG, H. **Foundation engineering handbook**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1975.

### ANEXO A – RECALQUES MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS

