



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL EAMBIENTAL

RAIMUNDO PAULO DA SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA COM MONITORAMENTO
DE RECALQUES E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA CONSTRUTIVA
NO DESEMPENHO DE RADIERS ESTAKEADOS**

Caruaru

2021

RAIMUNDO PAULO DA SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA COM MONITORAMENTO
DE RECALQUES E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA CONSTRUTIVA
NO DESEMPENHO DE RADIERES ESTAQUEADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello.

Coorientador: Prof. Dr. Jonny Dantas Patrício.

Caruaru

2021

RAIMUNDO PAULO DA SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA COM MONITORAMENTO
DE RECALQUES E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA CONSTRUTIVA
NO DESEMPENHO DE RADIERS ESTAQUEADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em: 09/08/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Dr.^a. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Douglas Mateus de Lima (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico e agradeço aos meus pais,
Raimundo Paulo e Carmelia carneiro, por
toda a força e confiança dedicada a mim.
Á minha filha Maria Alice, fonte de
combustível diário.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre ter me iluminado, dando forças. Sempre sendo o meu pastor, Amém.

Aos meus pais, Raimundo Paulo e Carmelia Carneiro, que sempre fizeram o impossível para mim, todas as lições continuam sendo aplicadas, a sua medida.

À minha esposa, Nathalia Arruda, por todo apoio e motivação.

À minha família, irmãos, tios e primos, por todo apoio e confiança.

À pessoa que acreditou no meu potencial, minha orientadora, Prof.(a) Maria Isabella, sem o seu apoio não seria possível esse trabalho. Sempre serei grato por seus ensinamentos, te admiro! Obrigado, “Realmente a vida é uma grande maratona”.

Ao meu coorientador, Jonny Dantas, pela orientação e disponibilidade e sugestão aos objetos, foi minha referência base, obrigado pelo conhecimento técnico passado. Grato!

À diretoria da obra por fornecimento do canteiro para monitoramento e dados do empreendimento em estudo.

Aos engenheiros da obra, por disponibilidade dos dados, Thiago Alexandre e Arthur Almeida. Pessoalmente obrigado pela amizade, motivação e confiança de sempre. Eternamente grato!

Aos meus amigos, Luís Eduardo e Yago Pinheiro, pela motivação e parceria. Grato!

Aos meus amigos, José Germano, Athos Murilo e Sergio Manoel, vocês sempre estiveram presentes. “só não pode desistir”, admiro vocês. Eternamente Grato!

Aos meus amigos, Emanuel Margues, Mateus Bezerra, Rogerio Querino, Fernando Henrique, Thiago Roque, Wesley Carlos, Antônio Soares e todos os meus amigos pela amizade e motivação para conclusão desta dissertação.

Ao programa e professores do PPGECA, por todo conhecimento passado até hoje.

À Universidade Federal de Pernambuco campos do agreste, que tenho tanto orgulho de fazer parte.

RESUMO

Nos projetos de edificações realizados no Brasil, é predominante a não consideração da interação solo-estrutura (ISE), não analisando a redistribuição de esforços devido ao rearranjo do carregamento devido aos deslocamentos do solo com avanço construtivo. Convencionalmente considera-se apoios indeslocáveis, divergindo do comportamento real da estrutura. O presente trabalho apresenta uma análise do comportamento do sistema de fundações por radier estaqueado sobre solo saturado, de dois blocos em estrutura de parede de concreto na cidade de Jaboatão dos Guararapes – PE, considerando os efeitos da interação solo-estrutura com relação ao processo construtivo, rigidez da superestrutura e número de pavimentos. Foi realizado o monitoramento e análise do comportamento em relação aos recalques da estrutura de fundação para dois blocos. Foi utilizado o método dos elementos finitos gerados na base de dados do SAP 2000. O módulo de elasticidade do solo foi calculado por retroanálise com os dados do monitoramento. Os recalques e cargas na fundação foram calculados com e sem consideração da ISE, sendo analisado as redistribuições de deslocamentos e esforços no radier estaqueado. Os resultados confirmam que os recalques previstos com a consideração da interação solo-estrutura aproximam-se da realidade monitorada. As análises sobre a influência da rigidez da estrutura e evolução construtiva realizadas para estacas resultaram variações de cargas e recalques entre os modelos numéricos, com percentuais de redistribuição médias de 33% e 20%, respectivamente. Os recalques referentes ao radier mostraram redução de 34% no coeficiente de variação CV (%) entre as análises com e sem ISE. Os monitoramentos comprovaram o quanto é importante a sequência construtiva no desempenho da estrutura de fundação. O trabalho em campo também mostra a estabilidade dos recalques diferenciais com o aumento do número de pavimentos. Os cálculos do módulo de elasticidade por retroanálise, coeficiente de reação vertical e mola gerados, servirão de parâmetros de referência para projetos de empreendimentos e estudos futuros na região.

Palavras-chave: sistema parede de concreto; fundação mista; módulo de elasticidade do solo por retroanálise; estágios construtivos.

ABSTRACT

In building projects carried out in Brazil, the lack of consideration of the soil-structure interaction is predominant, not analyzing the redistribution of efforts due to the rearrangement of loading due to soil displacements with constructive advance. conventionally it is considered non-displaceable supports, diverging from the real behavior of the structure. The present work presents the analysis of the soil-structure interaction, the calculation model was performed using the finite element method generated in the SAP 2000 database, applied to buildings with a concrete wall construction system, with mixed infrastructure radiator associated with stakes, in the city of Jaboatão dos Guararapes – PE. The monitoring and analysis of the behavior in relation to the settlement of the foundation structure was carried out considering the constructive evolution for two blocks. The modulus of elasticity was calculated by retroanalysis with the monitoring data. The settlements and loads on the foundation were calculated with and without consideration of the ISE, being analyzed the redistributions of displacements and efforts in the piled radier. The results confirm that the settlements predicted with the consideration of the soil-structure interaction are close to the monitored reality. The influence of structural rigidity and constructive evolution showed load and settlement analyzes between the numerical models, with average redistribution percentages of 33% and 20%, respectively, for piles, and 5% to 36% variation of settlement on the edges of the radiator. The monitoring showed how important the constructive sequence is in the performance of the foundation structure, the field work also shows the stability of the differential settlements with the increase in the number of floors. The modulus of elasticity calculations by retroanalysis, vertical reaction coefficient and spring generated, will serve as reference parameters for project projects and future studies in the region.

Keywords: concrete wall system; mixed foundation; soil elasticity module by retroanalysis; construction stages.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fotografia 1 -	(a) Disposição dos sistemas de armação, (b) Sistema formas, (c) Escoramento de lajes, (d) Radier, no local.....	27
Figura 1 -	Distribuição de cargas verticais entre paredes	29
Figura 2 -	Métodos de modelagem de paredes	30
Figura 3 -	Modelagem das paredes estruturais	31
Figura 4 -	Detalhe da interação das barras horizontais rígidas	32
Figura 5 -	Representação das barras e suas respectivas paredes	32
Figura 6 -	Modelo estaca “T” e balanço de cargas	36
Gráfico 1 -	Efeito do contato em estaca isolada	36
Figura 7 -	Commerzbank Tower em Frankfurt: (a) Foto da estrutura; (b) Disposição das estacas no radier	38
Figura 8 -	Edifício Messeturm em vista e corte. Planta do edifício Messeturm: distribuição e cortes do radier estaqueado	38
Fotografia 2 -	Edifício Burj Khalifa e perspectiva do radier estaqueado	39
Figura 9 -	Sistema de fundação: (a) Estaca isolada, (b) Grupo de estacas, (c) Radier estaqueado	41
Figura 10 -	Configuração dos sistemas de fundação em relação ao contato do solo	42
Gráfico 2-	Curvas carga x recalque para radier estaqueado de acordo com várias filosofias de projeto.....	43
Gráfico 3 -	Distorções angulares e danos associados	45
Figura 11 -	Sistema de medição de recalques com nível de mangueira	48
Figura 12 -	Detalhes de instalação da referência de nível profundo	49
Figura 13 -	Detalhes de fixação dos pinos de monitoramento	50
Figura 14 -	Efeito da ISE nos recalques e reações de apoio.....	52
Figura 15 -	Analogia da viga parede	53
Figura 16 -	Modelos para parede de concreto	54
Figura 17 -	Modelos de ISE em edifícios de parede de concreto (a) Modelo de casca; (b) Modelo misto	55
Figura 18 -	Rigidez relativa estrutura solo x recalques	58
Figura 19 -	Rigidez da superestrutura.....	59
Figura 20 -	Efeito da sequência construtiva nos recalques.....	60
Figura 21 -	Efeito da sequência construtiva	62

Gráfico 4 -	Limite de rigidez: (a) Limite de rigidez ao longo da construção; (b) Verificação do pilar da periferia da estrutura	63
Figura 22 -	Relação entre o NSPT e o módulo de elasticidade estático de solos residuais.....	64
Figura 23 -	Ilustração dos parâmetros de entradas da tabela de Harr (1996)	65
Gráfico 5 -	Curvas de tensão – recalques típicos.....	70
Gráfico 6 -	Estimativa dos valores de nh para solos arenosos, em função $NSPT$	72
Figura 24 -	Método de Winkler	73
Figura 25 -	Hipótese de Winkler: deformabilidade do solo através de molas discretas....	74
Figura 26 -	Modelos de maciços de solo para interação solo-estrutura.....	74
Figura 27 -	Definição dos elementos finitos da seção transversal.....	75
Figura 28 -	Representação da análise numérica do SAP 2000	76
Figura 29 -	Discretização do edifício através do modelo de casca	77
Mapa 1 -	Localização do Município de Jaboatão dos Guararapes	78
Figura 30 -	Localização da obra em estudo	79
Fotografia 3 -	Fachada da estrutura em parede de concreto	79
Planta 1 -	Situação e localização dos blocos 08 e 03 em planta	80
Planta 2 -	Planta de arquitetura do pavimento Tipo 01	81
Figura 31 -	Perspectiva tridimensional do pavimento tipo.....	81
Planta 3 -	Locação dos furos de sondagens SPT	83
Fotografia 4 -	Construção do radier.....	85
Fotografia 5 -	Locação e armação do radier estaqueado	86
Fotografia 6 -	Procedimento de cravação de estacas	86
Fotografia 7 -	Locação e armação do radier	87
Figura 32 -	Perfis de corte das seções longitudinais e transversais do radier.....	89
Planta 4 -	Distribuição dos pinos de monitoramento.....	90
Fotografia 8 -	Localização da instrumentação de monitoramento: (a) Ponto de referência indeslocável RN1; e (b) Ponto de referência deslocável P1	91
Figura 33 -	Esquema do modelo construtivo por etapas térreo	93
Figura 34 -	Esquema da sequência construtiva em planta x perfil, conclusão	94
Figura 35 -	Malha de elementos finitos para o radier.....	96
Figura 36 -	Malha de elementos finitos nas lajes	96
Figura 37 -	Malha de elementos finitos para paredes.....	97

Figura 38 -	Representação da análise numérica do SAP 2000	97
Fluxograma 1 -	Fluxograma das análises realizadas para os modelos numéricos	99
Planta 5 -	Carregamento do radier, simulação com apoios indesejáveis.....	100
Planta 6 -	Disposição do carregamento linear do radier para primeira análise	100
Figura 39 -	Estrutura referente a segunda análise.....	101
Figura 40-	Análise numérica por estágios, (a) Estágio 1, (b) Estágio 2, (c) Estágio 3, (d) Estágio 4, (e) Estágio 5, (f) Modelo por estágios	102
Gráfico 7 -	Fatores Is.Ih indicados por Harr (1966), para m=3.....	108
Gráfico 8 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 07 (mm).....	115
Planta 7 -	Sequência construtiva e locação de quadrantes.....	115
Gráfico 9 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 08 (mm).....	116
Gráfico 10 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 03	116
Gráfico 11 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 04	117
Gráfico 12 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 01	117
Gráfico 13 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 2	118
Gráfico 14 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 05	119
Gráfico 15 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 06	119
Gráfico 16 -	Recalques mínimos, médios, máximos, bloco 03	120
Gráfico 17 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 07	122
Gráfico 18 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 08	122
Gráfico 19 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 03	123
Gráfico 20 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 04	123
Gráfico 21 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 01	124
Gráfico 22 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 02	124
Gráfico 23 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 05	125
Gráfico 24 -	Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 06	125
Gráfico 25 -	Relação entre os valores de deslocamentos mínimo, médios, máximos e amplitude, Bloco 08	127
Gráfico 26 -	Variação máxima de deslocamento nos pinos por pavimento	130
Gráfico 27 -	Variação de recalques diferenciais máximos por pavimento.....	131
Gráfico 28 -	Curvas tensão x recalque para os blocos 03 e 08.....	131
Gráfico 29 -	Recalques para pinos, em análise sem rigidez da edificação.....	134
Gráfico 30 -	Recalques para pinos, para análise com rigidez da edificação	135
Gráfico 31 -	Comportamento dos pinos, estimados para análise numérica por estágios ..	137

Gráfico 32 -	Comportamento do primeiro quadrante, para análise com estágios e monitoramento: (a) Pino de monitoramento 07; (b) Pino de monitoramento 08.....	138
Gráfico 33 -	Comportamento do segundo quadrante, para análise com estágios e monitoramento: (a) Pino de monitoramento 03; (b) Pino de monitoramento 04.....	139
Gráfico 34 -	Comportamento do terceiro quadrante, para análise com estágios e monitoramento: (a) Pino de monitoramento 02; (b) Pino de monitoramento 01.....	140
Gráfico 35 -	Comportamento do segundo terceiro, para Mod. Num. com estágios e monitoramento: (a) Pino de monitoramento 05; (b) Pino de monitoramento 06.....	141
Gráfico 36 -	Comportamento das simulações numéricas, em relação aos pinos de monitoramento	143
Figura 41 -	Curvas de isorecalques em cm, anteprojeto do empreendimento, bloco 03 .	144
Figura 42 -	Curvas de isorecalques em cm, anteprojeto do empreendimento, bloco 08 .	145
Gráfico 37 -	Recalques estimados em relação aos pinos de monitoramento, blocos 03 08.....	146
Gráfico 38 -	Comportamento dos pinos para o último estágio construtivo.....	147
Gráfico 39 -	Curvas de comportamento entre recalques estimados e monitorados bloco 03	148
Gráfico 40 -	Curvas de comportamento entre recalques estimados e monitorados bloco 08	149
Gráfico 41 -	Curvas do comportamento para análise numérica por Est. e monitoramento (Recalque x Estágios).....	151
Gráfico 42 -	Comparação das curvas de recalque entre valores previstos e monitorados.	152
Gráfico 43 -	Relação entre as curvas de tensões nas estacas entre as análises.....	155
Gráfico 44 -	Relação entre os esforços mínimos, médios, máximos e amplitude dos modelos	156
Gráfico 45 -	Variação percentual de esforços, mínimo, médio e máximo entre os modelos.....	158
Gráfico 46 -	Comportamento das estacas entre modelos numéricos.....	160
Gráfico 47 -	Relação entre recalques mínimos, médios, máximos e diferencial máximos nas estacas.....	161

Gráfico 48 -	Distribuição dos esforços nas estacas por estágios construtivos.....	163
Figura 43 -	Deslocamento da estrutura de fundação, em relação aos estágios construtivos.....	164
Figura 44 -	Comportamento da estrutura de fundação para o primeiro estágio construtivo.....	165
Figura 45 -	Perfil de geotécnico individual – SPT- 01	190
Figura 46 -	Perfil de geotécnico individual – SPT- 02	191
Figura 47 -	Perfil geotécnico longitudinal característico.....	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores limites de distorção angular β para edifícios estruturados em paredes portantes armadas	46
Tabela 2 - Métodos de monitoramento em obras geotécnicas.....	51
Tabela 3 - Consequências das hipóteses de projetos em relação à ISE	56
Tabela 4 - Valores de $I_s.I_h$ para carregamentos na superfície ($I_d= 1$) de um meio de espessura finita.....	66
Tabela 5 - Valores de K_v segundo Terzaghi (1955).....	68
Tabela 6 - Valores de K_v de acordo com Moraes (1976).....	69
Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos do terreno.....	84
Tabela 8 - Características das estacas de projeto.....	88
Tabela 9 - Comprimentos das estacas.....	88
Tabela 10 - Modelo de anotações adotado para o levantamento de cotas diários	92
Tabela 11 - Geometria e propriedades dos elementos estruturais da edificação	95
Tabela 12 - Valores de $I_s.I_h$ para carregamentos na superfície ($I_d= 1$) de um meio de espessura finita.....	104
Tabela 13 - Resultados do ensaio PCE.....	105
Tabela 14 - Valores de entrada, junto ao módulo de elasticidade por retroanálise	108
Tabela 15 - Procedimento de cálculo, módulo de elasticidade Teixeira e Godoy (1998)	109
Tabela 16 - Valores dos parâmetros geotécnicos com e sem retroanálise.....	110
Tabela 17 - Valores de coeficientes de reação vertical e mola, para representação da rigidez relativa estaca-radier	112
Tabela 18 - Resultado dos recalques para cada pino de monitoramento, Bloco 03	114
Tabela 19 - Valores de deslocamentos mínimos, médios, máximos, para todos os pinos	120
Tabela 20 - Valores mínimos, médios, máximos e amplitude para cada pino monitorado....	126
Tabela 21 - Variação de recalques diferenciais nos pinos por pavimento.....	129
Tabela 22 - Valores de recalque para análise numérica sem rigidez da superestrutura	133
Tabela 23 - Valores de recalque para análise numérica com rigidez da superestrutura	134
Tabela 24 - Valores de previsão de recalques para pinos, em análise por estágios.....	136
Tabela 25 - Valores de recalques para as diferentes simulações numéricas	142
Tabela 26 - Resumos dos recalques estimados no anteprojeto.....	144
Tabela 27 - Recalques estimados em anteprojeto, correspondentes aos pinos de monitoramento	145

Tabela 28 - Valores de recalques finais nos pinos, para os blocos 03 e 08.....	147
Tabela 29 - Recalques previstos em anteprojeto e monitorados, para cada pino	148
Tabela 30 - Valores de recalques médios para o Mod. Num. por Estágios e dados monitorados	150
Tabela 31 - Dados de recalques estimados por modelos numéricos e monitoramentos.....	151
Tabela 32 - Valores dos esforços mínimos, médios, máximos e amplitude para cada caso ..	156
Tabela 33 - Valores de variação de esforços mínimos, médios e máximos entre modelos....	157
Tabela 34 - Valores de recalques mínimos, médios, máximos e diferencial máximo nas estacas.....	160
Tabela 35 - Valores de variação percentual de recalques máximos, mínimos e médios entre os modelos	161
Tabela 36 - Avaliação do comportamento do radier estaqueado para cada análise numérica	165
Tabela 37 - Comparação entre as cargas criadas pelas análises numéricas e o projeto executivo.....	166
Tabela 38 - Resultado dos recalques para cada pino de monitoramento, bloco 03.....	178
Tabela 39 - Resultado dos recalques para cada pino de monitoramento, bloco 08.....	178
Tabela 40 - Valores de previsão de recalques para pinos a cada estágio construtivo	179
Tabela 41 - Variação de recalques entre as análises numéricas para cada estaca	180
Tabela 42 - Valores de recalque nas estacas correspondentes as análises numéricas	182
Tabela 43 - Valores de esforços axiais para as estacas.....	184
Tabela 44 - Valores de variações percentuais de esforços entre modelos.....	186
Tabela 45 - Valores de esforços nas estacas por estágios construtivos	188

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Calc.	Calculado
fck	Resistência característica do concreto a compressão
GPa	GigaPascal
ISE	Interação Solo-Estrutura
kN	Kilonewton
Med.	Medido
Méd.	Médio
Mín.	Mínimo
Máx.	Máximo
MPa	MegaPascal
Num.	Numérico
Mod.	Modelo
SPT	Standart Penetration Test

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Carga por unidade de área
Id	Coeficiente de forma da área carregada do radier
Cv	Coeficiente de variação
ν	Coeficiente de poisson
L	Comprimento do vão
Fz	Esforço vertical
B	Menor largura da sapata
Gr	Módulo de elasticidade transversal
Es	Módulo de elasticidade longitudinal do solo
x, y e z	Posições dos eixos de referência
W	Recalque
Wi	Recalque absoluto
ΔW	Recalque diferencial
K _{mo}	Coeficiente de mola solo-radier
K _{mv}	Coeficiente de mola estaca-radier
Kv	Coeficiente de reação vertical
Kh	Coeficiente de reação horizontal
ϕ	Rotação da estrutura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
1.2	OBJETIVOS.....	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos.....	22
1.3	JUSTIFICATIVA.....	22
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	SISTEMA CONSTRUTIVO PAREDE DE CONCRETO	25
2.1.1	Características do sistema parede de concreto moldadas no local	27
2.1.2	Métodos de discretização da estrutura de parede de concreto	29
2.1.3	Normatização	33
2.2	FUNDAÇÃO TIPO RADIER ESTAQUEADO	33
2.2.1	Histórico e aplicações do radier estaqueado	35
2.2.2	Comportamento e concepções para o uso do radier estaqueado	39
2.3	MONITORAMENTO DE RECALQUES	43
2.3.1	Tipos e limites admissíveis de recalque	44
2.3.2	Prática de monitoramento de recalques em empreendimentos	46
2.3.3	Modelos de monitoramentos de edifícios.....	47
2.4	INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA.....	51
2.4.1	Trabalhos com sistema construtivo parede de concreto	53
2.4.2	Consequências das hipóteses de projetos em relação a ISE	56
2.4.3	Fatores que influenciam a interação solo estrutura	57
2.5	PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DO SOLO	63
2.5.1	Módulo de elasticidade.....	63
2.5.2	Coeficiente de reação vertical e coeficiente de mola do solo.....	66

2.5.3	Modelos de solos para análise da interação solo estrutura.....	73
2.6	SOFTWARE SAP 2000	75
2.6.1	SAP 2000	75
2.6.2	SAP 2000 empregado ao sistema parede de concreto	76
3	CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	78
3.1	APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	78
3.2	CARACTERÍSTICAS DO EMPREENDIMENTO.....	79
3.3	INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.....	82
3.4	DEFINIÇÃO DO TIPO DE FUNDAÇÃO	85
4	METODOLOGIA	90
4.1	INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE RECALQUES.....	90
4.2	METODOLOGIA CONSTRUTIVA	92
4.3	ANÁLISE NUMÉRICA EM ELEMENTOS FINITOS	94
4.3.1	Modelagem numérica da edificação	94
4.3.2	Análises numéricas	98
4.4	RETROANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO	103
4.4.1	Análises do módulo de elasticidade.....	103
4.4.2	Coefficiente de reação vertical e coeficiente de mola do solo-radier.....	104
4.4.3	Determinação do coeficiente de mola para as estacas-radier.....	105
5	RESULTADOS.....	107
5.1	RESULTADOS DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO SOLO	107
5.1.1	Resultado do módulo de elasticidade com e sem retroanálise.....	107
5.1.2	Resultado do Coeficiente de Reação Vertical (Kv) e Coeficiente de Mola (K_{mo}) para o contato radier-solo	110
5.1.3	Resultados da relação entre os parâmetros geotécnicos com e sem retroanálise.....	110
5.1.4	Resultado do Coeficiente de Reação Vertical (Kv) e Coeficiente de Mola (K_{mo}) para o contato radier-estaca.....	111

5.2	RESULTADO DOS RECALQUES PREVISTOS E MONITORADOS	113
5.2.1	Resultados dos recalques monitorados.....	113
5.2.2	Curva tensão x recalque baseado no monitoramento	131
5.2.3	Estimativa de recalques a partir das simulações numéricas	132
5.2.4	Estimativa de recalques a partir das curvas de isorecalque com base no anteprojeto executado	143
5.2.5	Comparação de resultados dos recalques estimados x monitorados	146
5.3	RESULTADOS DA REDISTRIBUIÇÃO DE CARGAS E RECALQUES NA FUNDAÇÃO.....	153
5.3.1	Redistribuição de esforços nas estacas	154
5.3.2	Resultados de recalques nas estacas	159
5.4	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA FUNDAÇÃO PARA O MODELO POR ESTÁGIOS.....	162
5.4.1	Comportamento do radier estaqueado entre os modelos numéricos.....	165
6	CONCLUSÃO	167
6.1	MONITORAMENTO DA ESTRUTURA DE FUNDAÇÃO	167
6.2	ANÁLISES NUMÉRICAS	168
6.3	COMPORTAMENTO DAS ESTACAS COM E SEM ISE	168
6.4	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	169
6.5	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	169
	REFERÊNCIAS	170
	APÊNDICE A – RESULTADOS DOS RECALQUES POR ESTÁGIOS	178
	APÊNDICE B – RESULTADOS DAS REDISTRIBUIÇÕES DE ESFORÇOS E RECALQUES.....	180
	ANEXO A – INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA	190

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O uso de novos sistemas construtivos torna-se cada vez mais importante no mercado da construção civil, buscando o melhor desempenho e custo-benefício dos empreendimentos. No Brasil, com o desenvolvimento e crescimento do programa de financiamento Minha Casa Minha Vida, destacaram-se conjuntos habitacionais oriundos do sistema parede de concreto.

Trata-se de um sistema totalmente industrializado e produzido *in-loco* em larga escala e em curto prazo. Ainda como vantagens tem-se o baixo número de mão de obra, fácil controle tecnológico e limpeza do canteiro. Como desvantagens, não é possível a flexibilização dos ambientes após a construção e o alto custo dos sistemas de forma, visto que as formas são fabricadas para um único projeto, inviabilizando o seu reuso (BRITO, 2012), umas das soluções de fundações empregadas ao sistema parede de concreto é o radier estaqueado.

Rincon (2016) afirma que no sistema radier estaqueado trabalha como estrutura completa, sendo o radier responsável por uniformizar e absorver as cargas e as estacas agindo pelo bom desempenho nos recalques totais.

Uma característica do modelo de fundação é a diminuição dos recalques diferenciais devido a rigidez do radier, além de diminuir os recalques totais devido a ação das estacas, outro fator é a redução de risco de inclinação da estrutura, todas essas e demais características são colocados como vantagens do sistema de fundação radier estaqueado como expressa (EL MOSSALLAMY, 2002).

A interação da rigidez do radier quanto da superestrutura de parede em concreto são desprezadas se o projeto for idealizado convencionalmente. Além da rigidez global não consideradas, existe a não consideração dos deslocamentos do solo, que provoca fenômenos extremamente importantes como a redistribuição de carga, modificando completamente o quadro de tensões da estrutura. Gusmão (1994) afirma que os recalques diferenciais podem ser reduzidos se considerado a rigidez da estrutura, e enfatiza que isso tudo pode ser contornado com a consideração da interação solo-estrutura.

Projetistas calculam comumente a superestrutura sem consideração dos movimentos do solo, assim sendo apoiados em superfícies indeslocáveis em todas as direções, sendo o grau de liberdade dos apoios nulo, o que não é uma condição realista.

Com a interação solo-estrutura, a rigidez da fundação e da estrutura são avaliadas além dos recalques do solo previstos e considerados. Mas, além da rigidez, existe outro fator que norteia o estado de tensões tanto global como local da estrutura que é a evolução da estrutura por etapas ou processo construtivo, assim considera-se a sequência construtiva por etapas, enfatizando a importância de não considerar o carregamento instantânea da estrutura de fundação na elaboração de projeto.

Gusmão (1994) avalia que na consideração da análise de interação solo estrutura é possível tornar viável um tipo de fundação, antes descartado, ao se analisar convencionalmente a estrutura, viabilizando assim outros projetos de fundações mais simples e economicamente viável, otimizando o sistema.

Os poucos estudos sobre interação solo-estrutura no Brasil geralmente usam modelos estruturais representados por pórticos espaciais, sendo as cargas das estruturas são transmitidas para fundação através de pilares, tendo-se uma ausência enorme de modelos de estudo que represente o sistema construtivo parede de concreto.

Gusmão (1994), Colares (2006), Mota (2009) e Antoniazzi (2011) apresentaram estudos e análises de modelos que representem a ISE; no entanto, existe um universo de combinações a depender da estrutura e da fundação a serem unidas, assim esses modelos em pórticos norteiam o estudo, mas não podem representar o sistema parede de concreto.

Os estudos sobre parede de concreto ainda carecem de pesquisas, sendo as referências mínimas, principalmente quando se trata da interação solo-estrutura, com consideração da sequência construtiva. O presente trabalho apresenta uma análise do desempenho do sistema de fundações por radier estaqueado sobre solo saturado, para dois blocos em estrutura de parede de concreto localizados na cidade de Jaboatão dos Guararapes – PE, considerando os efeitos da interação solo-estrutura com relação ao processo construtivo, rigidez da superestrutura e número de pavimentos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho do sistema de fundações por radier estaqueado sobre solo saturado, de dois blocos em estrutura de parede de concreto, considerando os efeitos da interação solo-estrutura com relação ao processo construtivo, rigidez da superestrutura e número de pavimentos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Acompanhar a evolução dos recalques monitorados em campo para cada etapa construída da edificação.
- Validar e analisar os modelos numéricos criados para o caso de obra, considerando simulações sem diferentes cenários, convencionalmente sem consideração da ISE e com os fatores que norteiam a interação solo-estrutura, baseados no método dos elementos finitos.
- Quantificar e avaliar a redistribuição de esforços na estrutura de fundação (radier e estaca), devido a consideração da ISE.
- Quantificar e avaliar os efeitos da interação solo-estrutura quanto ao desempenho e comportamento do radier estaqueado em relação aos fatores que caracterizam a interação solo-estrutura.
- Estabelecer valores de referência para os parâmetros geotécnicos através dos resultados do monitoramento de recalques.

1.3 JUSTIFICATIVA

O solo da região metropolitana de Recife é em sua maioria composto por solo mole, onde o mesmo exige dos projetistas uma atenção especial quanto aos recalques admissíveis e estabilidade das estruturas, sendo o cuidado de projeto também relacionado para edificações com o sistema construtivo parede de concreto.

O sistema construtivo parede de concreto vem se destacando em habitações populares. Comumente, os projetistas não utilizam a consideração da ISE, tanto para cálculo da superestrutura como para estrutura de fundação, ambos sendo calculados separadamente.

O monitoramento da estrutura de fundação dará embasamento teórico para o conhecimento do comportamento do solo e parâmetros geotécnicos para o solo da região, além do comportamento da estrutura.

A NBR 16055:2012 (Norma brasileira regulamentadora - parede de concreto moldada no local para a construções de edifícios – Requisitos e procedimentos), afirma a não obrigatoriedade do uso da ISE para edifícios de até cinco pavimentos, academicamente existe uma carência de estudos na área que comprove a não relevância de compatibilização do cálculo da superestrutura com a infraestrutura para esse sistema estrutural. Mesmo para edifícios “simplificados”, até cinco pavimentos como relata a norma, a rigidez global da estrutura, pode influenciar diretamente na redistribuição de esforços, distorções angulares e recalques diferenciais.

Com o aumento da demanda por esse tipo de edificação, existe a necessidade de avanços na área de projetos em parede de concreto principalmente quando se trata sobre pesquisas relacionadas a estudo da interação solo-estrutura, esses estudos tornariam os empreendimentos mais seguros e econômicos.

Os profissionais do mercado atual expressam que até teriam acesso ao computador facilmente, mas não existiria na literatura uma maneira prática e de custo computacional acessível, principalmente para um sistema complexo como o de parede de concreto, que não teriam seus apoios representados de maneira isolada como representa ao se analisar um pórtico. Assim essa não consideração por dificuldades da aplicação da interação em projetos, traz uma análise de cálculo convencional para a fundação podendo gerar a inviabilidade de um sistema, pois os recalques diferenciais previstos tendem a ser maiores, quando não se considera a ISE.

Existe uma escassez nessa área de pesquisa, interação solo-estrutura, com sistema estrutural parede de concreto associado a fundação mista por radier estaqueado. Outro fator relevante é o conhecimento dos parâmetros geotécnicos do solo na região, compreendida de um perfil de solo mole saturado de grande complexidade, sendo de muita importância seu estudo, pois a região ainda mostra um grande potencial de expansão imobiliária, com tudo ainda não há parâmetros geotécnicos regionais, sendo de fundamental importância uma referência geotécnica do local.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa foi dividida em 6 capítulos. Neste capítulo, foi apresentado a Introdução, contendo as considerações iniciais, os objetivos (geral e específicos), justificativa e a estrutura da pesquisa.

No Capítulo 2 é apresentado a Revisão Bibliográfica acerca dos estudos relacionados à interação solo-estrutura, parede de concreto, radier estaqueado, monitoramento de recalques, coeficiente de deformação do solo e software utilizado como o SAP 2000.

No Capítulo 3 é apresentado a Caracterização do Caso de Estudo, com suas principais características estruturais e geotécnicas.

No Capítulo 4 é descrita a Metodologia empregada neste trabalho, com relação ao monitoramento de recalque, modelos numéricos criados e análises, além dos procedimentos para obtenção dos parâmetros geotécnicos ligados a região em estudo.

No Capítulo 5 são apresentados os Resultados, que retrata as medições de recalque, comportamento da estrutura de fundação em relação a consideração ou não da interação solo-estrutura, além dos parâmetros geotécnicos calculados com e sem retroanálise.

No Capítulo 6 são apresentadas as Conclusões, correspondentes aos objetivos do presente trabalho, assim como as Sugestões de Trabalhos Futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico apresenta cinco tópicos relevantes ao desenvolvimento do estudo, como o sistema construtivo parede de concreto, fundação tipo radier estaqueado, monitoramento de recalques, interação solo estrutura, programa utilizado com base de dados em elementos finitos, SAP 2000.

2.1 SISTEMA CONSTRUTIVO PAREDE DE CONCRETO

Parede de concreto é conhecido como um sistema construtivo de alta produtividade, baixo custo de mão de obra no canteiro, sendo a mesma especializada, pois o sistema conduz um bom controle tecnológico o que está ligado diretamente ao acabamento final da estrutura.

Segundo a NBR 16055:2012 (Norma brasileira regulamentadora - parede de concreto moldada no local para a construções de edifícios – Requisitos e procedimentos), o sistema construtivo pode ser definido como elementos estruturais autoportantes, moldados no local, com comprimento maior que dez vezes sua espessura e capazes de suportar carga no mesmo plano da parede.

A parede de concreto quando solicitada tem a capacidade de transmitir os esforços solicitantes para toda a sua estrutura o que a caracteriza como um sistema monolítico.

Atualmente existe uma familiaridade e domínio dos projetistas estruturais para com o sistema construtivo parede de concreto, principalmente após a publicação da norma, NBR 16055:2012, que regulamenta os requisitos e procedimentos a respeito dos projetos de parede de concreto moldadas no local. No começo do sistema no Brasil as paredes de concreto eram projetadas sem função estrutural, não havendo estudos suficientes para seu uso como elemento autoportante (BRAGUIM, 2013).

O sistema parede de concreto se caracterizar por ser racionalizado, oferecendo inovações aliado a condições técnicas, trazendo econômicas e uma grande produção em escala, sem perder a qualidade no processo construtivo (CÊSTA, 2009).

O grande desenvolvimento do modelo construtivo no país deu-se após os investimentos do governo federal em habitações populares, em destaque o Programa Minha Casa Minha Vida.

Nacionalmente o modelo construtivo parede de concreto, vem sendo até hoje um modelo de expansão e de grande aceitação principalmente nas regiões norte e nordeste, devido o déficit populacional, situação parecida acontece internacionalmente com países

como México, Chile e Colômbia, por consequências das vantagens oferecidas pela tecnologia do sistema (JUSTUS, 2009).

Santos (2016) estudou a evolução percentual de empreendimentos construídos e financiados com o sistema construtivo parede de concreto, relatando um aumento percentual de 16% entre os anos de 2014-2015. É notório ainda hoje o constante avanço da tecnologia, principalmente quando comparado com outros sistemas convencionais.

Segundo Dantas (2019), no estado de Pernambuco foram geradas mais de 45.510 novas moradias, entre os anos de 2009-2011. Com o grande desenvolvimento de habitações populares após o ano 2000, procurou-se um sistema que se corresponde a demanda construtiva, unindo-se o controle de qualidade com curto prazo. Foi com essas características que o sistema parede de concreto destacou-se perante os demais.

Farias (2018) evidencia alguns fatores que solidifica a importância de estudos sobre o sistema parede de concreto, como a escassez na literatura de produção científica sobre o tema, não existindo muitos trabalhos sobre o sistema construtivo, o fato de ser recente a publicação da normatização do sistema, sendo assim a mesma precisa ser analisada e estudada, pois tem-se evoluído em grande escala o sistema estrutural nos últimos anos.

O sistema construtivo baseia-se em 6 etapas: armação de aço para paredes em tela eletrosoldada seguindo o eixo e esquadro da estrutura, instalações elétricas, montagem do conjunto de paredes, armação de aço da laje e passagens de instalações hidrossanitários, e a concretagem, a Fotografia 1(a), 1(b), 1(c) e 1(d) apresentam alguns dos procedimentos no local.

Sobre o consumo de aço, baseia-se no uso de telas soldáveis, postas no ponto médio entre as faces das paredes, esse ponto médio é garantido com a utilização de espaçadores, vergas e contravergas recebem aditivos com vergalhões de espessura a depender do projeto estrutural.

O sistema de concretagem pode ser executado em uma única etapa, união de paredes e lajes ou em duas etapas primeiro paredes depois a laje, isso vai depender do tipo de forma a qual o empreendimento adotou. A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP, 2008) especifica diversos tipos de concreto, como com incorporadores de ar, auto-adensável, concreto super-fluído, concreto celular entre outros.

Sobre o sistema de forma pode ser avaliado segundo dois parâmetros sendo eles: processo de montagem, o qual pode ser manual ou mecanizada, e material, existindo vários no mercado entre indicados pela associação (ABCP, 2008) estão: metálica feitas com aço ou alumínio, plásticas com arranjo entre matéria recicláveis e estrutura metálica, mistas unindo aço com material sintético ou madeira.

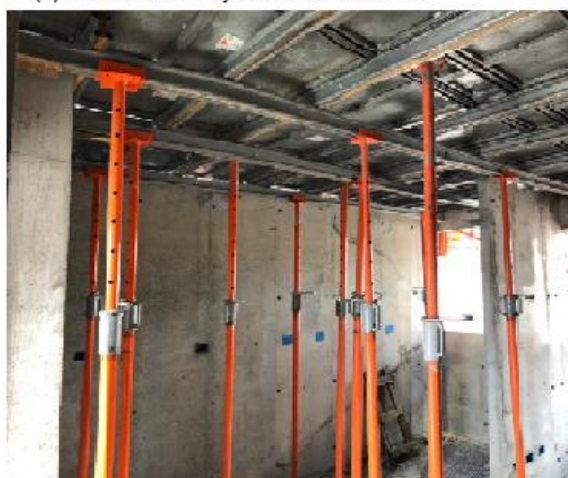
Fotografia 1– (a) Disposição dos sistemas de armação, (b) Sistema formas, (c) Escoramento de lajes, (d) Radier, no local



(a) sistema de armação em tela soldáveis.



(b) sistema de formas metálicas.



(c) sistema de escoramento de lajes.



(d) armação e concretagem do radier.

Fonte: O Autor (2021).

2.1.1 Características do sistema parede de concreto moldadas no local

Quando se procura a viabilidade de um sistema estrutural, os pontos mais relevantes levantados são mão de obra, materiais, qualidade no acabamento e prazo de entrega da obra.

Santos (2016) comenta que uma das grandes vantagens do sistema construtivo parede de concreto seria a racionalização da mão de obra no processo construtivo, apontando a facilidade de locação dos mesmos funcionários no decorrer do processo de construção e

instalações, mas chama a atenção para a indução de mão de obra especializada em respeito ao controle tecnológico exigido para adoção sistema.

O modelo construtivo parede de concreto tem como destaque o seu alto padrão de qualidade, devido ao grande controle tecnológico necessário e mão de obra especializada acarretando um alto padrão de acabamento da superfície, consequentemente dando um bom e econômico revestimento final (ABPC, 2008).

As paredes quando desmoldadas podem receber de imediato o seu acabamento, cerâmicas, gesso, pintura entre outros serviços, dependendo do estado de conservação da forma e processo executivo os acabamentos podem ser executados sem prévio tratamento das superfícies, essas situações mostram agilidade e economia para utilização do sistema.

Nos países das Américas latina e central, existe um destaque na utilização do sistema construtivo parede de concreto devido a sua rigidez pois se trata de um sistema monolítico, garantido resistência característica aos abalos sísmicos frequentes na região (NUNES, 2011).

A ABCP (2008) enfatiza como pré-requisito para adoção do sistema que o empreendimento a ser construído tenha um grande número de unidades idênticas para compensação do valor empregado na compra do conjunto de forma. Silva et al. (2007) coloca como um ponto crítico do sistema. Entretanto, Santos (2016) relata que o alto investimento inicial com conjunto de forma que o sistema impõe pode ser aliviado com o aluguel de formas plásticas, viabilizando o sistema até para pequenas repetições.

Luz (2012) estudou em uma obra em Salvador, com o objetivo de comparar dois sistemas trabalhados na obra, parede de concreto e alvenaria estrutural. O autor apontou a grande diferença no número de funcionários para cada sistema, mostrando que o sistema de parede de concreto se sobressai devido a sua racionalização e industrialização, acarretando a redução no número de funcionários, sendo esse um dos motivos do sistema parede de concreto nos últimos anos vir ganhando espaço.

Existe uma vantagem em se ter uma grande repetição no número de concretagem que viabilizem o sistema, além da absorção do custo da forma, há uma especialização e um alinhamento da mão de obra a cada concretagem executada.

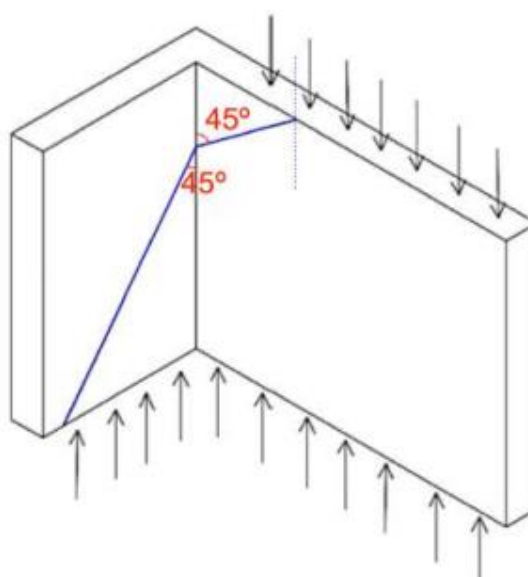
Após a concretagem das paredes e laje a estrutura deve passar por processo de cura, para evitar trincas por retração do concreto, dando assim maior segurança ao desempenho de serviço ao modelo.

2.1.2 Métodos de discretização da estrutura de parede de concreto

Breguim (2013) e Nunes (2011) estudaram a monoliticidade da estrutura de parede de concreto, ambos concluíram a importância da rigidez e conservação do diafragma de tensões criado entre as lajes e paredes, as lajes sempre calculadas como solidárias as paredes, garantido a transferência de esforços. A união entre paredes e lajes tem como necessidade resistir às tensões de cisalhamento na interface entre os elementos.

As cargas recebidas pelas lajes são transmitidas para as paredes como carregamento vertical que por sua vez tende a se espalhar ao longo da estrutura da parede que assume um ângulo limite de 45° . se a amarração entre as paredes for garantida, as tensões podem até ser transmitidas para paredes adjacentes, conforme está evidenciado na Figura 1 a transmissão de carga (NUNES, 2011).

Figura 1 - Distribuição de cargas verticais entre paredes



Fonte: Nunes (2011).

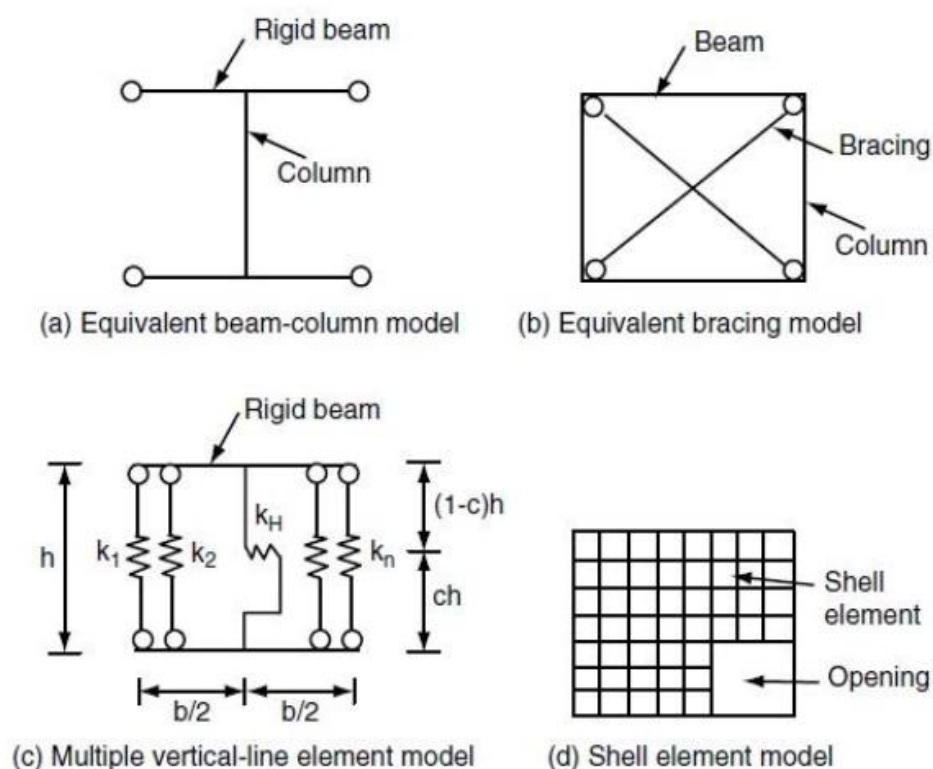
As análises do comportamento da estrutura, união dos elementos e distribuição de tensões é fundamental para a disposição da análise numérica da estrutura, garantindo um comportamento realista para o modelo estudado.

Segundo Pereira (2000), o conjunto de uma estrutura pode ser discretizada matricialmente por dois métodos, um baseado no método das forças ou método dos deslocamentos, sendo que ambos os métodos tratam como subestruturas o conjunto.

O método dos elementos finitos utiliza o sistema discreto, mas devido sua complexidade necessita de ajuda computacional devido ao grande número de incógnitas discretizadas, mas mesmo assim é o método discreto mais utilizado (SANTOS, 2016).

Liu et al. (2010) relata os modelos de barras equivalentes, barras verticais e elementos de cascas, para análise do sistema parede de concreto com utilização em modelo discreto. O modelo de barras equivalente pode ser usado em duas vertentes, com barras livre (Figura 2a) ou engastadas (Figura 2b), no caso de aberturas em paredes podendo ter a configuração de um pórtico plano. O modelo vertical tem um contorno de barras rígidas que simula os limites das paredes unidos por molas verticais (Figura 2c), já o modelo de casca se aplica bem na representação de paredes de concreto (Figura 2d). Todos os modelos apresentam considerações diferentes e podem ser usados em diferentes configurações a depender do tipo de estrutura.

Figura 2 - Métodos de modelagem de paredes



Fonte: Liu et al. (2010).

Yagui (1971) modelou o sistema parede de concreto considerando como pórtico formado pela união de viga e pilares na representação de uma parede plana. Neste modelo, existem algumas restrições colocadas como hipóteses, como: paredes relativamente delgadas

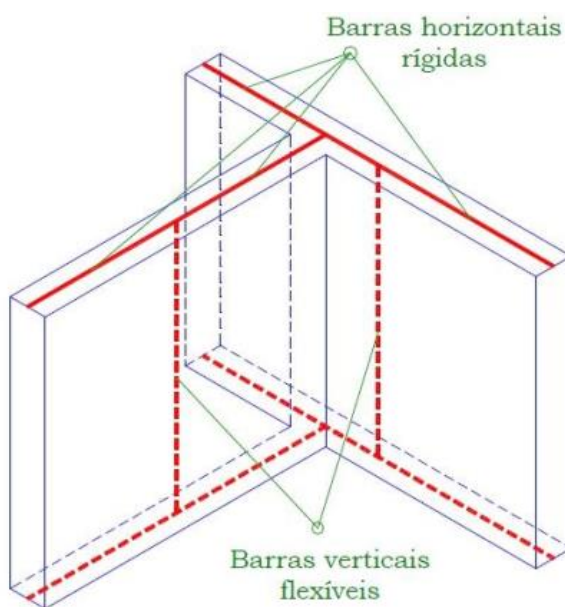
desprovidas de rigidez à flexão em suas paredes planas, considerações de linhas divisórias como pontos de interação, altura das paredes planas deve ser constantes com o seu comprimento entre outras restrições.

Nascimento Neto (1999) fez adaptações no modelo de Yagui (1971) para aplicações em sistema de alvenaria estrutural fazendo configurações de simplificação nos esforços de cisalhamento, existindo um fator de forma para determinação da deformação por cisalhamento.

Na análise de um modelo por barras, as características das paredes simuladas são postas no centro da parede sendo que se deve ter a mesma geometria pretendida. O complemento de andares entre paredes tem sua união representadas por barras horizontais rígidas (Figura 3).

Sobre o valor de rigidez adotadas para as barras horizontais, Corrêa (1991) reforça que deve ser considerada uma rigidez elevada, mas, reforça que devesse ter cuidado para não ser tão alto ao ponto de prejudicar a solução numérica.

Figura 3 - Modelagem das paredes estruturais

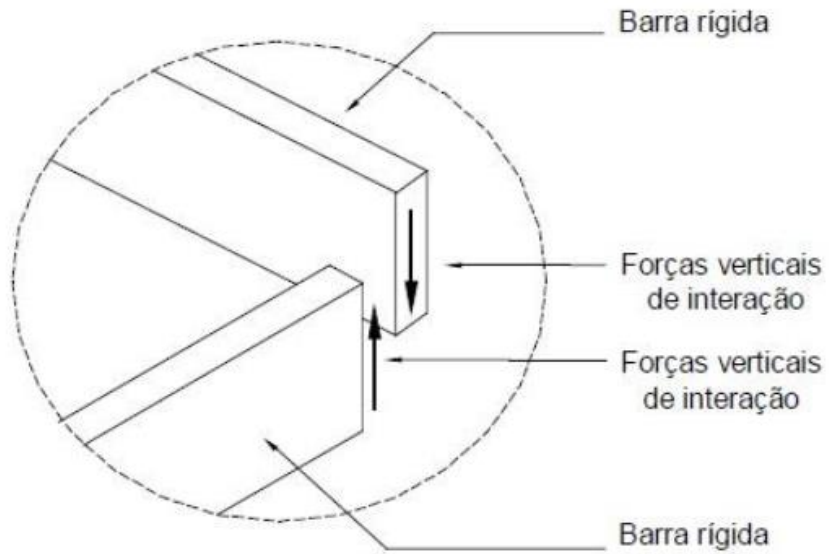


Fonte: Nascimento Neto (1999).

Existe um diafragma que trava a estrutura horizontalmente, isso possibilita a não distorção angular entre as paredes, sendo nas extremidades a união articulada, assim verticalmente só ocorrerão forças de cisalhamento (Figura 4) (PEREIRA, 1997). As aberturas

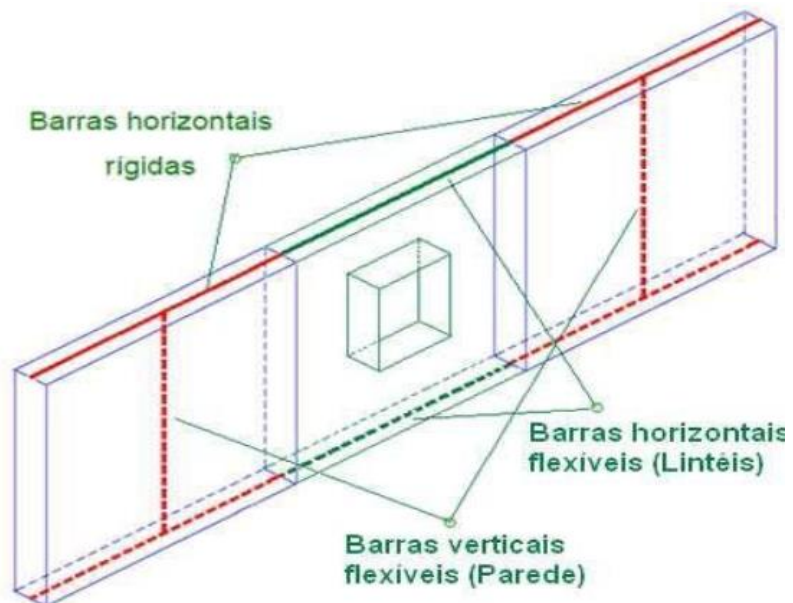
como janelas e portas, são consideradas como barras flexíveis, conforme visto na Figura 5 (NUNES, 2011).

Figura 4 - Detalhe da interação das barras horizontais rígidas



Fonte: Pereira (1997).

Figura 5 - Representação das barras e suas respectivas paredes



Fonte: Nunes (2011).

2.1.3 Normatização

O sistema construtivo parede de concreto possibilita grandes vantagens pela tecnologia empregada no seu processo, propiciando racionalidade, economia e segurança tudo em larga escala, tornando possível empreendimentos de “tiro curto”. Essas características trazem um incentivo por novos estudos o que tornou viável a redação de uma norma específica para a modalidade construtiva.

Em maio de 2012, entrou em vigor a norma técnica que regulamentaria o sistema construtivo parede de concreto no Brasil, NBR 16055:2012 (parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e Procedimentos), até essa data passaram-se 30 anos sem normatização os projetos no país.

Com a regulamentação do sistema no Brasil, os empreendimentos passaram a contar com uma fonte de regulamentação desde as inspeções de qualidade ao desenvolvimento e segurança dos projetos com os limites e procedimentos exigidos em norma, assim o sistema parede de concreto ganhar maior credibilidade e confiança, contribuindo na sua difusão no país.

A tecnologia parede de concreto já estava em difusão internacionalmente nos Estados Unidos da América (ACI318:2011 – Building Code Requirement for Structural Concrete), Europa (EN 1992 Eurocode 2:2004 – Design of Concrete Structure) e Austrália (AS 3600:2009 – Concrete Structures). Braguim (2013), comparou algumas verificações da norma brasileira com as de outros países, principalmente no que trata sobre o dimensionamento de parede de concreto.

A tecnologia parede de concreto tem sua aceitação comprovada na indústria da construção civil regional, nacional e internacional. Com um grande potencial de expansão notado, traz a necessidade de avanços em pesquisas com relação a otimização de projetos e análises de requisitos e procedimentos regulamentados na norma vigente.

2.2 FUNDAÇÃO TIPO RADIER ESTAQUEADO

Segundo a NBR 6122:2019, a estrutura de fundação deve ser dimensionada para segurança em relação aos:

- Estados limite último (ELU), requisitos ligados ao colapso total ou parcial da estrutura.

- Estado limite de serviço (ELS), referentes a fissuras, recalques e deslocamentos da estrutura de fundação, limites ligados ao uso pertinente da obra.

O sistema radier estaqueado traz a interação entre dois componentes estruturais de fundação, radier-estaca, que unindo-se ao solo forma-se o sistema radier estaqueado, sendo classificado como um sistema composto por três elementos: radier, estaca e o solo, responsáveis por absorção das cargas geradas na superestrutura (JANDA et al. 2009).

Poulos (2001) faz uma observação realista, que se uma fundação direta tipo radier não suportar os deslocamentos e os critérios de segurança, adota-se a fundação por estaca sendo a solução para o projeto.

Sales (2000) conceituou o sistema, sapata estaqueada, e, radier estaqueado, como nada mais que a união entre um elemento de fundação superficial com um grupo de estacas, sendo ambos responsáveis pelo desempenho da fundação em relação aos recalques e capacidade de carga.

A eficácia do radier estaqueado está diretamente ligado ao tipo de solo que a estrutura está apoiada podendo ser favoráveis ou não, Poulos (1991). O autor defende que os solos com argilas rígidas e areias compactas, são mais favoráveis para o uso do radier estaqueado.

Soares (2011) descreve que o uso da técnica de radier estaqueado tem um bom desempenho em perfis ditos como fracos, nesse grupo de solo estariam: argila mole, areia fofa, solos colapsíveis, solos expansivos. Nesses casos não se aconselha o uso do radier estaqueado.

Como solução para o uso de radiers estaqueados em solo fraco, Poulos (2001) cita o melhoramento do solo com escavação e compactação com intensão de compensação, trazendo um pré-adensamento para o perfil do solo.

A solução de união entre os dois sistemas de fundação radier estaca vem sendo adotado nas últimas décadas, como critério para reduzir recalques tanto totais como diferenciais excessivos, além de capacidade de carga superior a um sistema usado independente.

Bittencourt (2018) revela o passo a passo para a escolha do tipo de fundação, chama a atenção que a estrutura por estacas se adota quando existem recalques excessivos para uma fundação direta radier ou sapata, ou quando se precisa de uma grande capacidade de suporte.

2.2.1 Histórico e aplicações do radier estaqueado

Garcia (2015) relata o histórico de estudos relacionados ao radier estaqueado, mostra o direcionamento de novas pesquisas a respeito do tema, além das evoluções já alcançadas.

Zeevaert (1957) desenvolveu a técnica do sistema radier estaqueado com a intenção de controle dos recalques por sapatas usadas isoladamente. Outro estudo pioneiro no sistema fundação mista foi Kishida e Meyerhof (1965), considerando a contribuição de resistência do bloco em relação ao seu apoio no solo.

Um dos primeiros acompanhamentos sobre carga versus recalque de uma fundação direta associado a estacas foi feito por Poulos (1968) como mostra o Gráfico 1. O autor fez interações e análises sobre a influência bloco/estaca e estaca/estaca, sendo “L” (comprimento da estaca), “d” (diâmetro da estaca) e “dc” o diâmetro do radier, concluindo que quanto menor a relação L/d , maior a redução nos recalques e aponta que mesmo o comprimento da estaca for pequeno não se deve ser desconsiderado a influência.

Akinmusuru (1980) relata que o trabalho do radier no desempenho de capacidade de carga do conjunto pode variar, e que a capacidade de carga não será apenas a soma dos desempenhos dos elementos individuais podendo ser em maior magnitude devido a interação entre os mesmos.

Decourt (1996) fez a consideração simplista para o grupo bloco/estaca, assim propôs que 70% do carregamento oriundo da superestrutura seria usado para o dimensionamento das estacas e os restantes 30% considerado para o bloco. Está presente nas Figuras 6a e 6b o balanço de carga para o sistema.

responsabilidade de transferência somente das estacas. Nesse caso as estacas devem ser consideradas como único meio de transferência de carga para o solo.

Akinmusuru (1973) objetivando saber a porcentagem de influência do radier no conjunto radier estaqueado fez um dos primeiros estudos em um mesmo solo, analisando quatro estruturas diferentes: sapata isolada, estaca isolada, conjunto de estacas sem radier e conjunto de estacas com radier, percebendo que com uso do radier tem-se um grande ganho de capacidade de carga, sendo a estrutura com mais suporte entre as observadas.

Lima (2007) ressalta o quanto é importante o trabalho de experimentos práticos de modelos adotados nos cálculos de projeto. Segundo o autor, cria-se parâmetros para o solo de uma região observada, sendo colhido parâmetros de forma direta, além de mostrar as limitações existentes nos modelos de cálculo adotados.

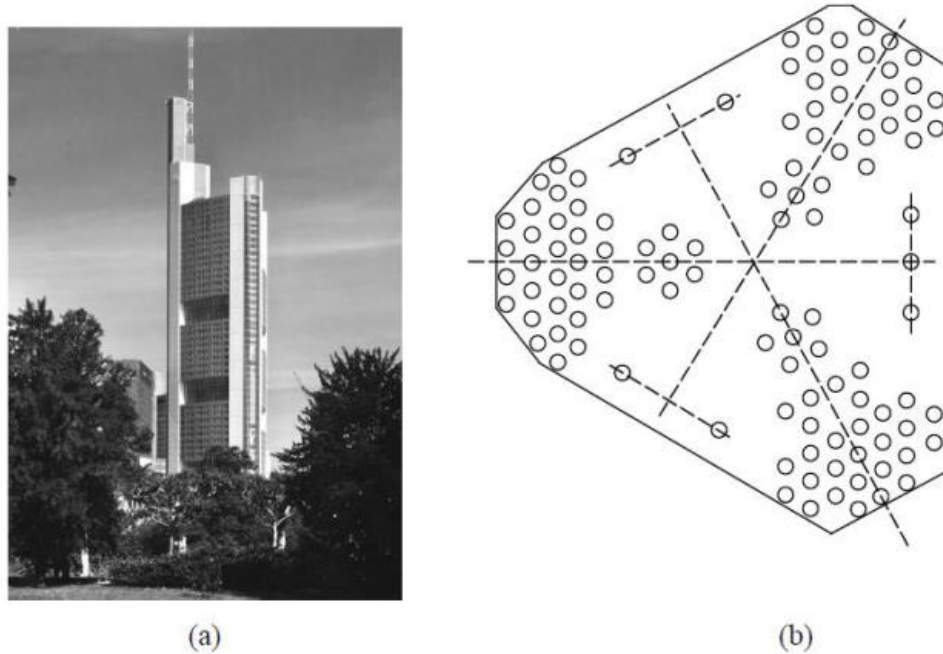
Horikoshi e Randolph (1996) trabalhou com três modelos de conjuntos de estacas diferentes 9, 25 e 69, tentando otimizar uma fundação utilizando-se teste em centrífugas, sendo a fundação com configuração de 69 estacas calculado de maneira convencional. Concluiu-se que quanto menor a consideração convencional, menor a magnitude de recalques diferenciais.

Grandes comparações práticas foram realizadas por O'Neil et al. (1996) fazendo uma coletânea de 15 obras com acompanhamento, todas com solução de fundação adotados o radier estaqueado, fez comparações entres os projetos, métodos utilizados, capacidade de carga e perfis de solo trabalhados, além dos acompanhamentos pós-obra realizada.

O Commerzbank Tower, um edifício de 300m metros de altura situado sobre solo argiloso na cidade e Frankfurt na Alemanha. Katzentbach et al. (1994) estudou a distribuição de carga entre os elementos de fundação e a estrutura. A fundação foi construída em radier estaqueado, composto com 11 elementos de estaca, um fato interessante, que a fundação foi dimensionada considerando que a transferência de carga para o solo seria realizando somente pelas estacas. Os autores concluíram que somente 5% das cargas foram transmitidas pelo radier, essa análise foi realizada por um modelo elastoplástico criado (Figura 7).

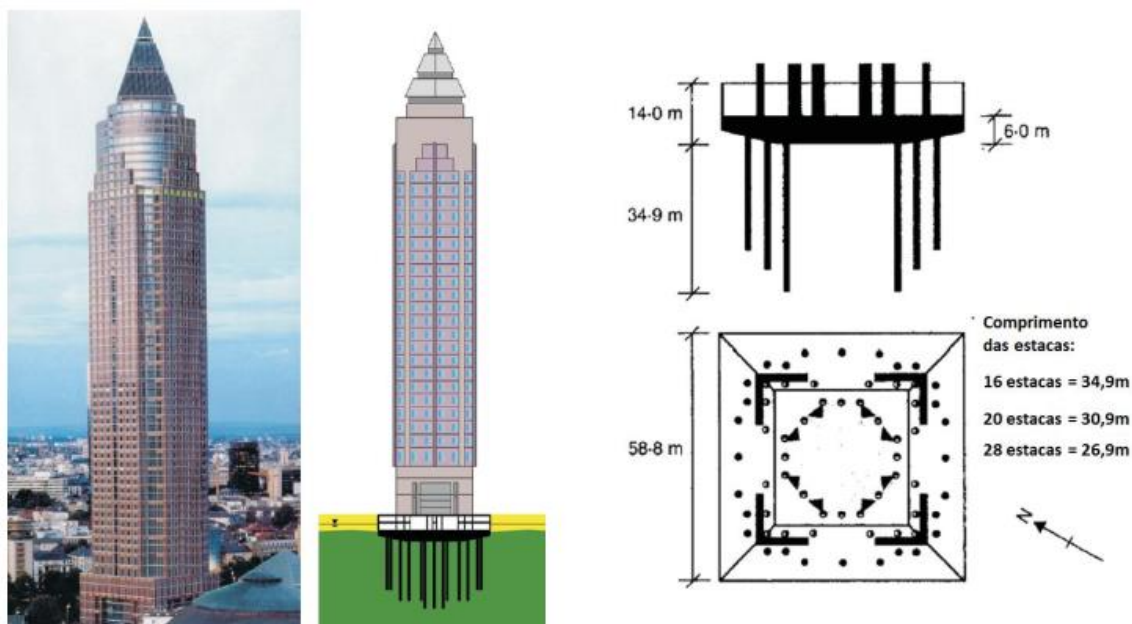
Outro exemplo de aplicação do sistema radier estaqueado foi na mesma cidade de Frankfurt, o Messeturm, com 256 m de altura, sendo na época considerado um dos maiores empreendimento da Europa (Figura 8). Sob solo argiloso com subsolo a uma profundidade de 100 m abaixo da superfície, a estrutura do radier com base de 3 m a 6 m de espessura e 64 estacas escavadas de 1,3 m de diâmetro, responsáveis por controle de recalques (KATZENTBACH et al.1994).

Figura 7 - Commerzbank Tower em Frankfurt: (a) Foto da estrutura; (b) Fisposição das estacas no radier



Fonte: Katzenbach et al. (1994).

Figura 8 - Edifício Messeturm em vista e corte. Planta do edifício Messeturm: distribuição e cortes do radier estaqueado

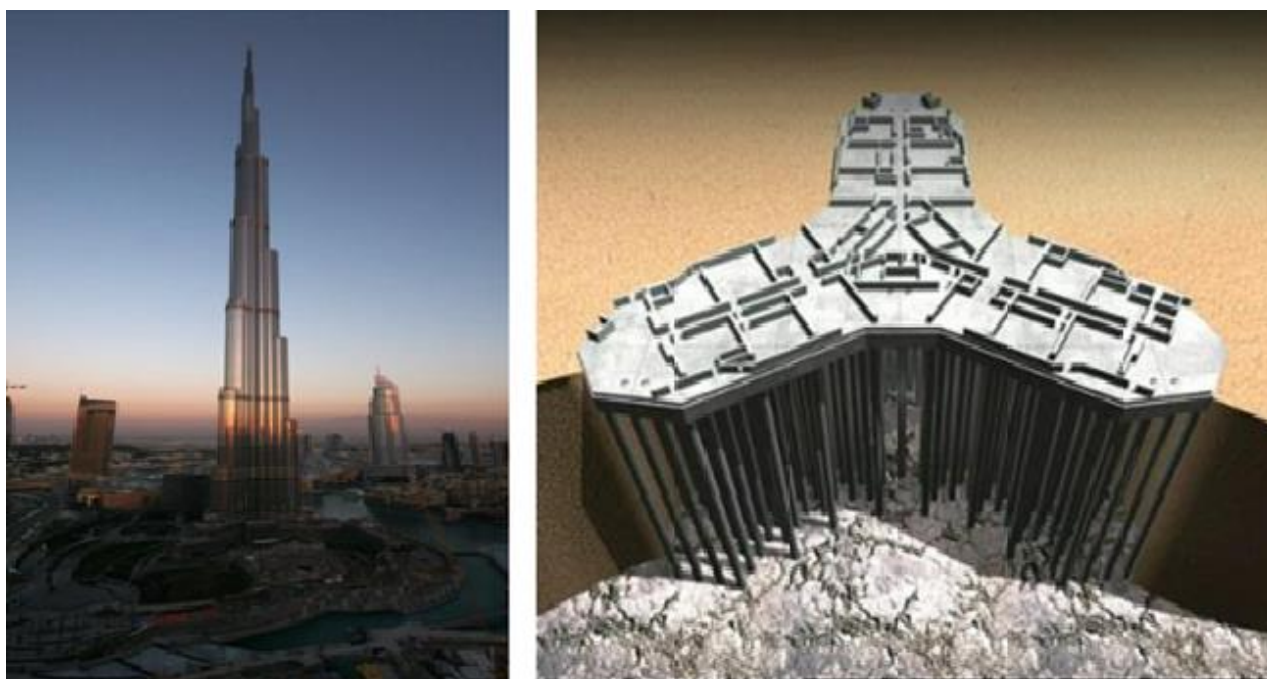


Fonte: Katzenbach et al. (2005).

Para realçar a evidência do emprego de projetos em radiers estaqueado para edifícios altos, destaca-se o edifício mais alto do mundo, o Burj Khalifah localizado nos Emirados

Árabes, em Dubai (Fotografia 2). Com 828 m de altura, o edifício foi projetado sobre um radier estaqueado com 3,5 m de espessura e sobre 194 estacas de 1,5 m de diâmetro, a solução e emprego de estacas ao projeto tem por objetivo o controle de recalques, tornando os recalques diferenciais os menores possíveis, com estacas apoiadas a 50 m de profundidade (GARCIA, 2015).

Fotografia 2 – Edifício Burj Khalifa e perspectiva do radier estaqueado



Fonte: Hernández (2014).

2.2.2 Comportamento e concepções para o uso do radier estaqueado

Existe várias análises prévias realizadas pelos projetistas antes de se adotar o sistema de radier estaqueado, partindo de simples a avançadas análises, a depender do estudo de caso.

O radier empregado isoladamente pode absorver bem a carga da estrutura de um edifício, mas deve-se atentar aos recalques não absolvidos pelo sistema de fundação direta aplicado como solução única. mostra-se como alternativa a aplicação de estacas com intuito de absorção aos recalques diferenciais, tendo-se como razão para se usar o radier estaqueado nesses casos (Lima, 2007).

Poulos (2001) definiu critérios e análises para o uso de radier estaqueado, se definindo em três etapas:

(a) a primeira seria uma análise de escolha preliminar do sistema. Nesta etapa, usa-se fórmulas que relaciona o número de estacas com relação aos recalques.

(b) a segunda seria a análise da capacidade de carga necessária das estacas e onde seria o local de posicionamento ótimo. Nesta etapa, posiciona-se as estacas nos locais de carga concentradas com objetivo de eliminar esforços ao radier.

(c) a terceira análise seria a compatibilização do número, capacidade de carga e posicionamento das estacas. Essa análise pode até trazer economias na estrutura de fundação, já que não se precisa de um grande número para eficiência do sistema, mas sim de uma boa otimização.

Garcia (2015) relata em seu estudo o quanto é importante o contato do radier ou bloco com o solo, pois quando o mesmo está em contato com o maciço a capacidade de transmissão de carga é dividida com as estacas tornando o sistema um conjunto misto.

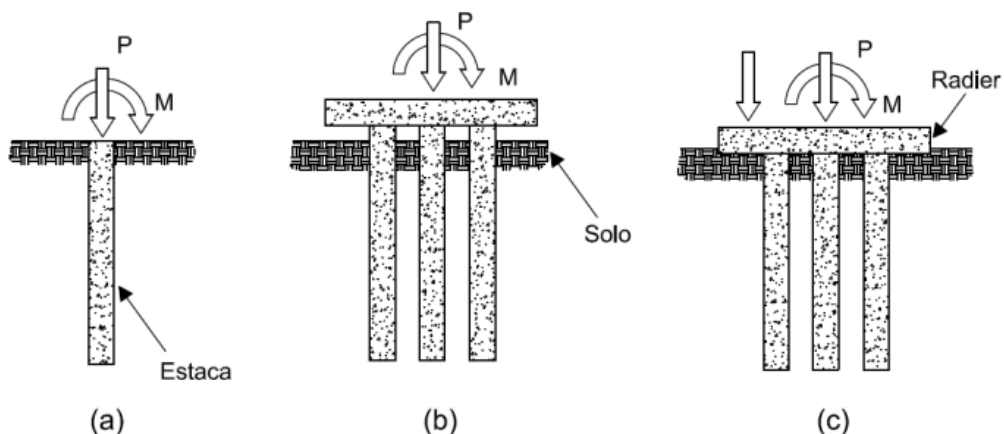
Ainda sobre o contato do radier com o solo, Janda et al. (2009) fez um estudo da influência do comportamento do radier estaqueado com o tipo de solo sob a estrutura, o autor fez o seu estudo em Brasília onde o solo é composto por argila porosa e colapsáveis, obtendo resultados de 10% da transmissão de carga por parte do radier.

Assim como Aoki, Cintra (1996) e Cintra e Aoki (1999), Bezerra (2003) a fundação é criada pela associação entre os elementos estruturais e o solo, sendo essa relação de fundamental importância para a classificação de uma fundação mista.

Soares (2011) comenta que a diferença entre o sistema radier estaqueado e o sistema convencional de grupo de estacas, está relacionado se o bloco está ou não em contato com o solo (Figura 9).

A efetivação do sistema de fundação mista somente se valida com a garantia de contribuição do radier em relação a capacidade de suporte da estrutura, sendo assim, o radier estaqueado trabalha de forma otimizada, exigindo o número mínimo de estacas para o conjunto (Texeira, 1996).

Figura 9 - Sistema de fundação: (a) Estaca isolada, (b) Grupo de estacas, (c) Radier estaqueado



Fonte: Bezerra (2003).

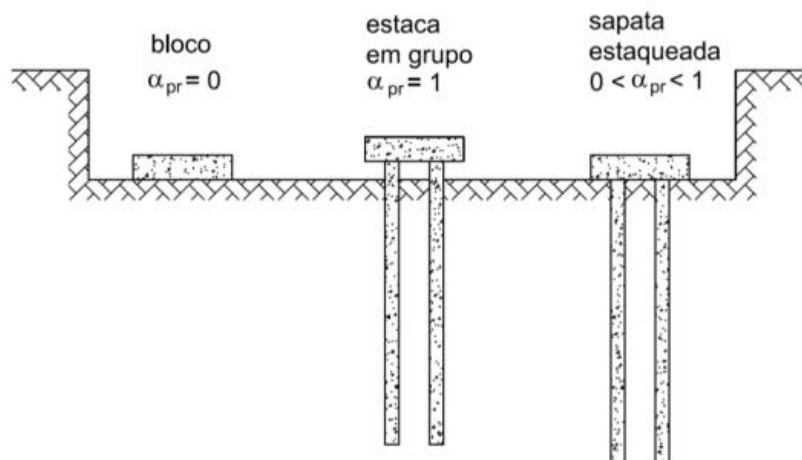
Os tipos e comportamentos de fundações são estudados e descritos por Soares (2011), sendo assim, o autor classifica as funções e características do sistema de infraestrutura variando em relação a forma de transmissão de carga para o solo, classificando em: fundação superficial, estacas isoladas, grupos de estacas e radier estaqueado.

Sobre as características do dimensionamento de grupos de estacas e radiers estaqueados, segundo Sousa (2003), a diferença entre os cálculos das estruturas estaqueadas estão resumidos em:

- (a) Bloco de estacas: toda carga suportada apenas pelas estacas; bloco considerado como rígido; despreza-se o contato bloco/solo; e considera apenas as interações estaca-estaca;
- (b) Radier estaqueado: considera-se o contato radier/solo, considera-se o radier estaqueado como rígido, as estacas são consideradas como rígidas em função do perfil do solo, assim considera-se os possíveis tipos de interação (por exemplo, estaca-estaca, estaca-solo, solo-estaca e solo-solo).

Mandodolini (2003), ilustra com a Figura 10 em síntese a disposição do sistema de fundação em relação ao contato com o solo. Garcia (2015) relata que toda fundação profunda trabalha como radier estaqueado, exceto quando o bloco não está em contato com o solo.

Figura 10 - Configuração dos sistemas de fundação em relação ao contato do solo

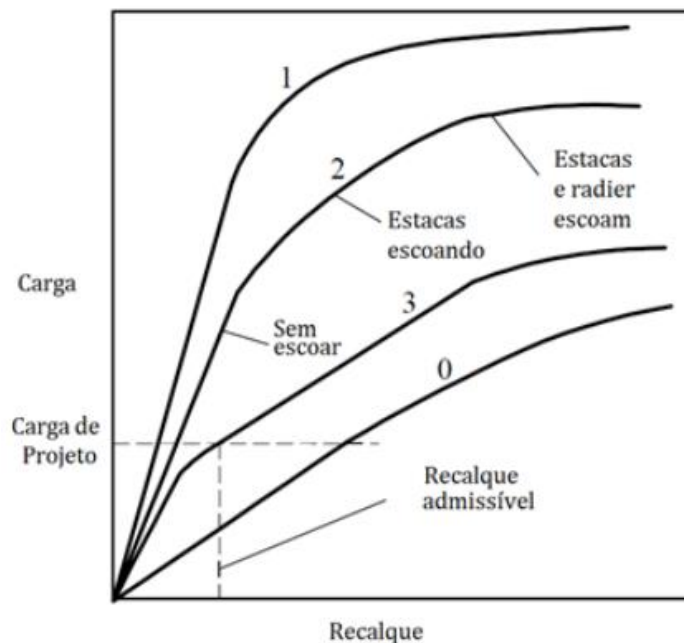


Fonte: Mandolini (2003).

Poulos (2001) fez um estudo numerando o comportamento x recalque de todos os elementos de um radier estacado. o gráfico criado no estudo enumera as curvas para cada elemento da fundação. A curva 0 mostra o radier estacado sendo governado somente pelo radier, tornando os recalques excessivos. Na curva 1 mostra a estrutura de fundação sendo governada por o grupo de estacas tornando linear a carga de projeto, assim as estacas absorvendo grande parte das cargas. A curva 2 apresenta o caso “*creep pilling*”, devido ao baixo número de estacas o radier absorver mais carga que na curva1, tendo um baixo fator de segurança para as estacas. A curva 3 tem as estacas trabalhando como redutores de recalque utilizando sua capacidade de carga máxima de projeto, sendo a curva 3 a mais aceitável e considerada a mais econômica. Está ilustrado na Gráfico 2 o comportamento de cada curva separadamente.

Existem vários fatores que podem alterar o comportamento de trabalho de um radier estacado, desde o tipo de solo que a infraestrutura está apoiada, contato entre o radier e o solo, interações entre a fundação e a estrutura, distribuição e número de estacas, método de execução da fundação, entre outros fatores.

Gráfico 2- Curvas carga x recalque para radier estaqueado de acordo com várias filosofias de projeto



Curva 0: Radier simples (recalque excessivo);

Curva 1: Radier com estacas dimensionadas para fator de segurança convencional;

Curva 2: Radier com estacas dimensionadas para um baixo fator de segurança;

Curva 3: Radier com estacas dimensionadas para utilização total da capacidade de

carga.

Fonte: Poulos (2001).

2.3 MONITORAMENTO DE RECALQUES

A forma mais precisa de se obter o deslocamento do solo é através da medição in loco, sendo a melhor maneira de se observar e ter o comportamento do sistema, mas existe diversos métodos de se fazer previsões sobre o comportamento das fundações.

O monitoramento de recalques geralmente ocorre em edifícios com algum problema na estrutura de fundação, tendo função de tomada de decisão para medidas corretiva. O costume de não monitorar geralmente parte dos construtores que tem o intuito de economizar na fase de execução, contudo essa economia traz uma falha no controle de projeto e execução da obra, além de incertezas ao longo da vida útil da edificação (SARAIVAS, 2008).

Danzinger et. al. (2000), a nível local, relata que no Brasil os monitoramentos de edificações só acontecem que existe algum problema de forma visual ou funcional, não sendo a instrumentação uma prática rotineira no país, destaca com seu estudo a importância de se garantir o controle e desempenho de recalques nas fundações desde o início da construção.

Os estudos de Alonso et al. (2020), Qafetan et al. (2020) e Lu et al. (2020) são referências na área de monitoramento de fundações para diferentes tipos de estrutura, usando-se diferentes considerações e análises. Esses estudos expressam a importância dos parâmetros e da consideração da ISE nos projetos de engenharia.

Alonso et al. (2020) propõem um modelo simplificado para a análise da construção de movimentos isolados de fundação relacionados aos processos de interação solo-atmosfera-estrutura. Qafetan et al (2020) fala sobre investigações experimentais e numéricas do modelo dimensionado de uma estrutura de parede de vários andares com várias bases em solo arenoso.

A instrumentação de monitoramento torna possível a obtenções de distorções angulares, recalques, rotações angulares, deflexões, desaprumo entre outros deslocamentos da estrutura. Todos esses parâmetros são de grande importância para o estudo e análise da estrutura não só durante as fases de projeto e execução, mas, durante toda a vida útil da estrutura, além de contribuir com parâmetros para empreendimentos futuros na região.

2.3.1 Tipos e limites admissíveis de recalque

Nas fundações podem ocorrer os recalques imediatos, recalques por adensamento primários e adensamento secundário. Os recalques imediatos ocorrem predominantemente em solos arenosos, ocorrendo devido ao rearranjo das partículas sem a expulsão de água do solo. A deformação ocorre instantaneamente com a aplicação de carga, sem modificação do volume do maciço. Já os recalques primários ocorrem a longo do tempo e devido a diminuição dos vazios do solo com a expulsão de água ocorrendo principalmente em solos coesos. O recalque secundário se dá ao longo do tempo ainda maior que o primário, devido ao rearranjo das partículas (SOUZA; REIS, 2008).

Existe dois tipos de recalques com relação ao tipo de deslocamento, os absolutos e os diferenciais. Os recalques absolutos ocorrem quando a estrutura desloca igual por todo o perímetro da estrutura e os recalques diferenciais ocorrem quando os deslocamentos entre pontos de mesma cota da estrutura são diferentes.

Os recalques podem trazer tantos danos de serviços ou funcionabilidade (quando se tem recalques absolutos ou totais), quanto danos estruturais (quando a edificação apresenta os recalques diferenciais). A dificuldade observada nos deslocamentos diferenciais entre pontos está na redistribuição de esforços causada com esse fenômeno, que não ocorre com o acontecimento de recalques absolutos (VELLOSO; LOPES, 2004).

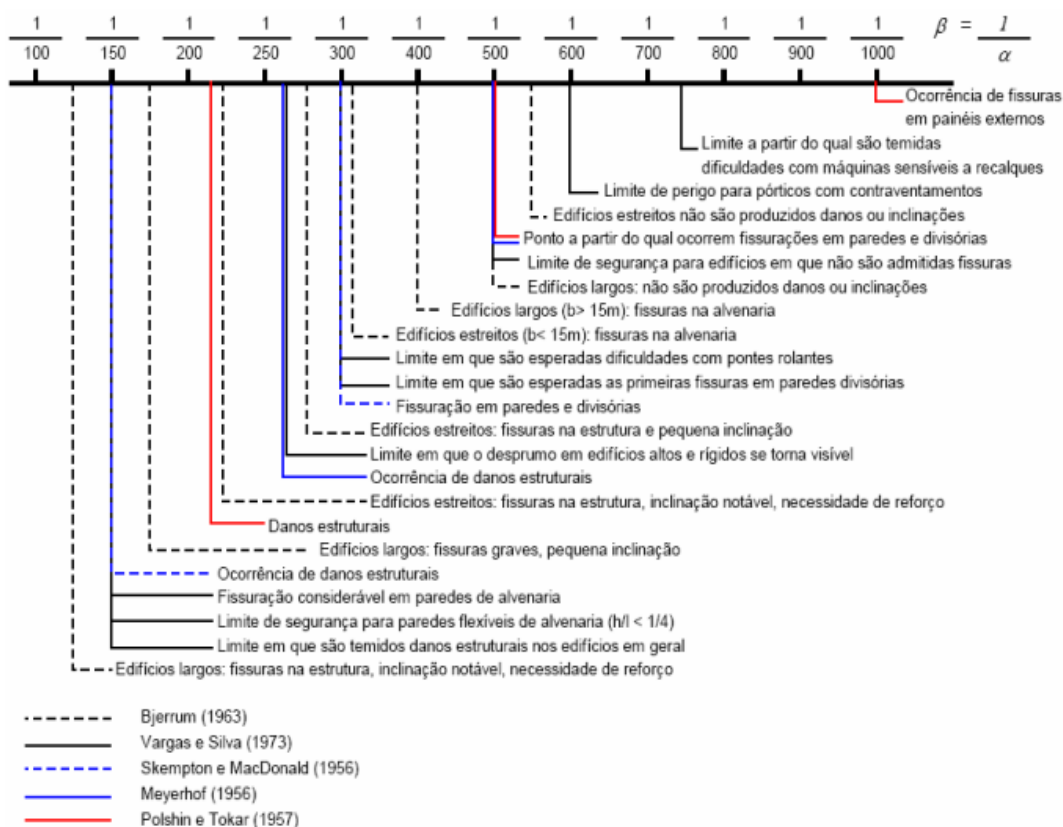
Gusmão (2006) comenta que os recalques diferenciais podem mudar de forma significativa os esforços nas edificações, criando efeitos secundários entre esses esforços cisalhantes nas faces das paredes, chegando a mudanças de sinais de esforços em apoios de viga e pilares periféricos.

Existe uma grande importância nos dados oriundos do monitoramento de uma edificação. Da análise desses são definidos os recalques admissíveis e aceitáveis da estrutura com relação a segurança estrutural e desempenho de serviço, sendo os estados limites último (ELU) e de serviço (ELS).

Alonso (1991) chama a atenção para a obtenção desses parâmetros mostrando que os limites são gerados de forma prática por acompanhamento de casos reais de obras pelos projetistas. Os valores são gerados a partir da análise e acompanhamento executivo para sistemas construtivos unidos a um determinado tipo de solo, a partir desse acompanhamento se propõe os limites aceitáveis para aquele modelo construtivo apoiado em determinado tipo de solo.

Barros (2005) coletou as análises de diversos autores que propuseram limites de deslocamentos em relação ao tipo de estrutura (Gráfico 03).

Gráfico 3 - Distorções angulares e danos associados



Fonte: Barros (2005).

Geralmente os limites admissíveis são gerados por distorções angulares que nada mais é que a razão entre a diferença de cota entre dois pontos da estrutura pelo comprimento entre eles. A Tabela 1, são apresentados os valores limites de distorção angular β para edifícios estruturados em paredes portantes armadas (I.S.E. 1989).

Tabela 1 - Valores limites de distorção angular β para edifícios estruturados em paredes portantes armadas

	Skempton e MacDonald	Meyerhof	Polshin e Tokar	Bjerrum
Danos estruturais	1/150	1/250	1/200	1/150
Danos em paredes e divisorias	1/300 (porém, recomendado 1/500)	1/500	1/500 1/500 (0,7/1000 a 1/1000 em painéis externos)	1/500

Fonte: I.S.E. (1989).

Souza e Reis (2008) afirmam que os danos causados pelos recalques diferenciais não podem ser previstos por modelos analíticos ou diferenciais, destacando a sequência de carregamento, a variabilidade das propriedades mecânicas dos materiais, o efeito de grupo e principalmente a redistribuição de cargas, como fatores que dificultam a assertiva aos danos.

Silva et al. (2003) fez um estudo de patologias em edificações na capital do estado da Paraíba (João Pessoa), revelando que 14,29% dos problemas encontrados relacionados a patologias eram por consequência de ações mecânicas como os recalques, esses podendo já serem avaliados em projeto.

Realmente, as consequências causadas pelos deslocamentos diferenciais não é uma análise fácil de estimar e quantificar, mas grande parte das movimentações do solo podem ser previstas de forma condizentes com a realidade, isto através de métodos que consideram a interação solo estrutura. Assim, os projetistas podem prever de maneira mais realista os deslocamentos, evitando os danos causados por recalques e esforços não esperados, que pela análise convencional estarão sujeitos.

2.3.2 Prática de monitoramento de recalques em empreendimentos

É de muita importância o conhecimento do comportamento do solo para o estudo de recalques e suas estimativas, isso consegue ser reproduzido com o monitoramento de deformações com a evolução progressiva de cargas em edificações.

Os instrumentos podem ser colocados em pilares quando se tratar de sistemas aporticados, reproduzindo os deslocamentos de pilares, ou diretamente na fundação. Em um

sistema construtivo com elementos construtivos contínuos, como parede de concreto, a instrumentação pode ser realizada diretamente no radier.

A instrumentação de obras de fundação não é colocada de forma obrigatória pela norma NBR6122; 2019, mas, cita como recurso muito importante para o acompanhamento real da estrutura e ainda recomenda a divulgação de seus dados independente do resultado. No item 9.1.1, há citações de vantagens e contribuições vindas com o uso de instrumentações para medição de recalques, como esclarecimento de comportamentos não previstos a tempo hábil de tomadas de decisões, comparações entre as estimativas de projeto e o real executado.

Os monitoramentos de obras no Brasil tem sido a base do desenvolvimento de diversos avanços de novos projetos, norteando as estimativas e criando sensibilidades relacionadas a atividade real, lembra-se que os modelos teóricos da literatura são fundamentados nesses levantamentos práticos, assim relata Saraivas (2008).

Santos (2018) estudou a instrumentação de duas torres apoiadas sobre maciço rochoso, mostrando com isso os recalques sofridos pela estrutura de fundação, cujo sistema é composto por sapatas isoladas e associadas, as leituras em campo mostram-se na magnitude de 18,99 mm para a torre A e 12,15 mm para torre B. O autor ainda fez a análise de velocidades parciais dos recalques nos pilares.

Farias (2018) e Dantas (2019), observaram o comportamento dos recalques para um empreendimento com 64 blocos, com oito pavimentos, localizado na região metropolitana do Recife, o sistema construtivo da superestrutura contempla paredes de concreto, os recalques foram monitorados junto com a evolução construtiva da obra.

Dantas (2018) constatou no seu estudo recalques variando entre 10 mm e 35 mm, para recalques medidos nas sessões de aterros. Foram observadas altas velocidades de recalques comparadas com dados presentes na literatura, já com relação as rotações da estrutura as distorções foram avaliadas como baixas. As análises apresentadas foram baseadas nas leituras do monitoramento.

2.3.3 Modelos de monitoramentos de edifícios

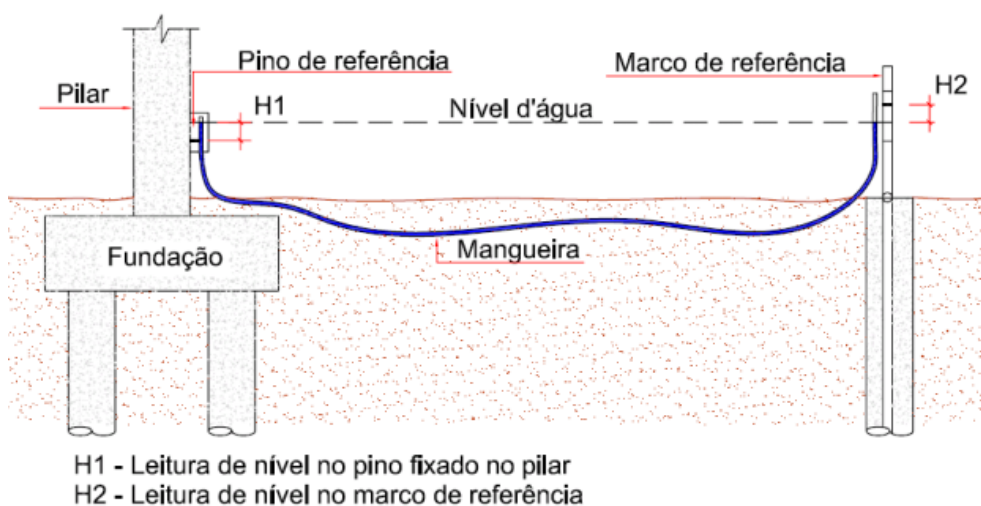
Quanto grande a importância para o desenvolvimento de modelos teóricos sobre o estudo de recalques, o monitoramento deve ser cauteloso e eficiente o máximo em seus resultados pois, isso pode gerar um estudo totalmente fora da realidade gerando modelos impróprios e atrasando pesquisas futuras, com isso precisa-se de um grande cuidado na escolha de qual equipamento e referencias utilizar em campo.

Os níveis óticos e os níveis d'água através de vasos comunicantes desenvolvido por Terzaghi, são os instrumentos mais utilizados para aferições de recalques em edifícios.

A instrumentação por níveis d'água é feita por tubulações interligados preenchidas geralmente por água, com base na teoria de vasos comunicantes. Os ramos interligados mantêm o mesmo nível horizontal se o líquido estiver sob o mesmo estado de temperatura e pressão, possibilitando assim a medida de variação de conta entre dos pontos diferentes. São fixados pinos na estrutura tendo como referência outro pino indeslocável de partida, e as medidas geralmente são feitas com escalas graduadas colocadas junto aos pinos. A Figura 11 mostra um esquema de monitoramento com instrumentação a nível d'água.

Os resultados são obtidos diretamente quando as medições são realizadas com escalas graduadas, trazendo praticidade ao monitoramento. Contudo, existem algumas desvantagens no processo, como o menisco criado no líquido no final do conduto, trazendo dificuldades de acurácia na aferição. As desvantagens relacionadas ao nível d'água estão relacionadas a fatores físicos e ambientais, tais como congelamento da mangueira, surgimento de fungos, rompimento da mangueira e mudanças de temperatura e pressão que podem mudar a configuração do sistema, mas ainda se destaca por seu baixo custo e facilidade de operação (SARAIVAS, 2008).

Figura 11 - Sistema de medição de recalques com nível de mangueira



Fonte: Saraivas (2008).

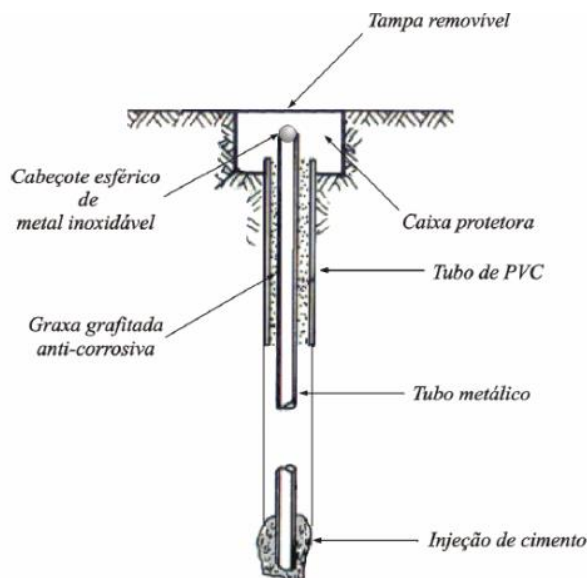
As instrumentações por meio de Nível ótico são realizadas através de pinos de referência, que são posicionados engastados na estrutura monitorada, Salomão e Faggion (2008). Os pinos que são locados externos a estrutura, esses indeslocáveis e independentes da

obra, servem de referência para os demais, devendo-se garantir o seu estado de deslocamento nulo em relação aos demais.

As medições dos recalques são feitas através de uma mira graduada com precisão milimétrica apoiada sobre os pinos de referência, sendo ideal que a superfície de apoio da mira esteja pontual, de modo a não ocorrer variações de cota de uma medição para outra.

As referências indeslocáveis (externas), utilizadas como referência para os pinos a estrutura devem ser instaladas de modo a não receber nenhuma interferência da obra, não podendo ser influenciada por nada que comprometa a sua estabilidade, a referência deve ser protegida e fixada em base de concreto. Está presente na Figura 12 o modelo de instrumentação de pinos de referência indeslocáveis por Alonso (1991).

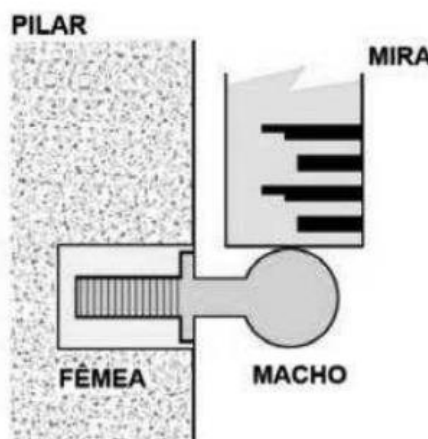
Figura 12 - Detalhes de instalação da referência de nível profundo



Fonte: Alonso (1991).

Os pinos de referência da estrutura são compostos por duas partes: uma fêmea engastada na estrutura e outro macho de extremidade esférica que serve de apoio para a mira graduada, parafusado na fêmea (Figura 13).

Figura 13 - Detalhes de fixação dos pinos de monitoramento



Fonte: Viacarta (2007, *apud* SALOMÃO E FAGGION, 2008).

O método de monitoramento por nível ótico foi o procedimento utilizado para levantamento de dados de recalque do presente trabalho, o levantamento consistiu na medição de cota dos pontos, através de uma mira graduada apoiada nos pinos de referência, o levantamento é realizada a cada evolução da estrutura observada.

Barros (2005) elaborou um resumo com os métodos mais utilizados no levantamento de recalques em edifícios, os métodos listados estão ligados aos comentários sobre suas vantagens e desvantagens com relação ao desempenho e praticidade do sistema (Tabela 2).

Tabela 2 - Métodos de monitoramento em obras geotécnicas

Método	Vantagens	Desvantagens
Elevação por Nível Ótico e mira de Invar	Medição efetuada de forma rápida nos casos onde são utilizados instrumentos autonivelantes. Utilização de alta tecnologia.	Necessidade de equipamentos de alta precisão.
Medições com teodolitos e escalas	Medição feita de forma direta.	Requer referência fixa.
Nível a Laser	Mais rápido do que os métodos óticos convencionais; as leituras podem ser feitas por uma única pessoa.	Seramente afetado por perturbações que ocorram no ar como: poeira; umidade e diferença de temperatura; Requer correções da refração em média a cada 200m.
Medidor de Distância EDM	Cobre uma grande distância; Rápido e muito acurado.	Acurácia influenciada pelas condições atmosféricas.
Nivelação Trigonométrica	Alcança uma grande distância; Rápido.	Acurácia influenciada pelas condições atmosféricas; necessita de um sistema de medição do zênite muito preciso.
Métodos fotogramétricos	Pode gravar simultaneamente movimento de vários pontos.	As condições climáticas podem afetar sua utilização; A interpretação dos dados deve ser feita por pessoal técnico especializado.
Sistema por posicionamento global	Muito acurado; pouca influência do operador nas medições.	Equipamentos envolvidos são de alto custo.
Níveis d'água	Equipamento simples e robusto, baixo custo, possui adaptabilidade à diversidade da obra	Pode ser influenciado por variações climáticas, de temperatura; Erros de leitura.

Fonte: Barros (2005).

2.4 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

O estudo da interação solo estrutura teve início com as pesquisas de Meyerhof (1953) e de Chameki (1954). Meyerhof (1953) concluiu o quão é importante a rigidez da estrutura para os recalques diferenciais, mostrando a não influência da mesma para os recalques totais.

Gusmão Filho (1995) e Reis (2000) fizeram estudos com relação a magnitude das variações de esforços devido a consideração ou não da ISE. No estudo de Gusmão Filho na cidade do Recife, aconteceu variações de até 30% nas cargas normais em pilares. No estudo de Reis (2000), realizado na cidade de Santos-SP, a redistribuição de carga foi na ordem de 15% a 25% a depender dos números de pavimentos da edificação analisada.

Quando se considera a interação entre a estrutura e o solo, os recalques diferenciais tendem a ser em menor magnitude, além de comprovação de variações nas rotações da

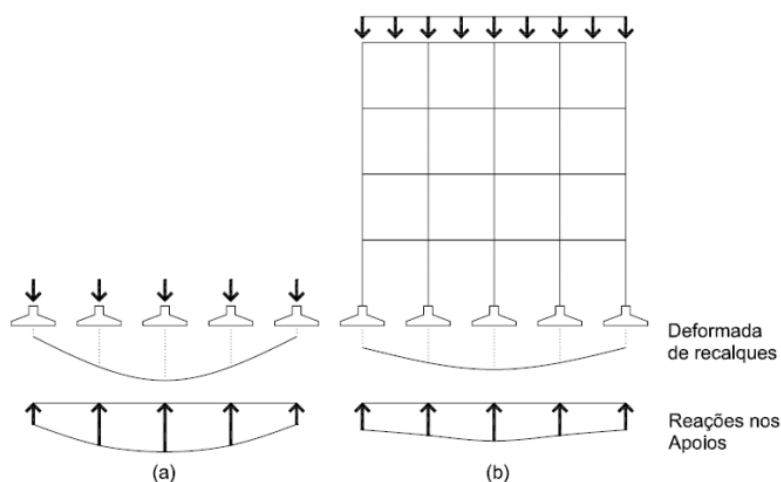
estrutura, tanto para mais quando para menos, dependendo de onde ocorre os recalques. Esse fenômeno foi relatado por Antunes e Iwamoto (2000), em um estudo realizado em edificação de 15 pavimentos.

A minimização dos recalques diferenciais devido a consideração da interação entre o solo e a estrutura, pode viabilizar o uso de sistemas de fundações antes descartados quando calculadas convencionalmente. Segundo Gusmão e Calado Jr (2002), no estudo dos 12 edifícios na cidade do Recife-PE, essa diminuição de recalques diferenciais ocorre devido a rigidez da superestrutura.

Está presente na Figura 14 a diferença de deformação e esforços com a estrutura calculada convencionalmente e com consideração da ISE.

Quando a consideração das redistribuições de esforços, existe uma tendência na uniformização dos recalques, a estrutura as principais deformações e esforços nos primeiros pavimentos isso foi relatado no estudo de GOSHY (1978). Enfatiza-se na Figura 15 que as principais deformações ocorrem nos primeiros pavimentos, para o sistema aporticado.

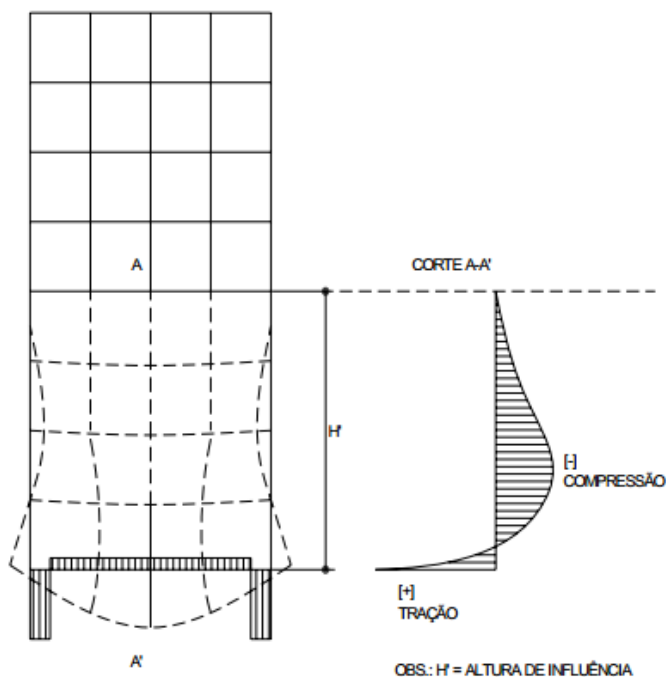
Figura 14 - Efeito da ISE nos recalques e reações de apoio



Fonte: O Autor (2021).

Nota: adaptado de GUSMÃO (1994).

Figura 15 - Analogia da viga parede



Fonte: Goshy (1978).

Gusmão e Calado Jr. (2002) chamam a atenção para a redistribuição de esforços e suas magnitudes, relatando que os esforços axiais são realmente a preocupação na redistribuição de carga devido a movimentação do solo, sendo desprezíveis os esforços de flexão e cisalhamentos. A tendência na redistribuição é: os pilares que recalcam mais transferem suas cargas para os que recalcam menos. Essa mudança na configuração dos esforços pode prejudicar a estrutura com patologias em todos os elementos estruturais, vigas e lajes, ocorrendo o aparecimento de fissuras e o mais preocupante o esmagamento dos pilares, pois o excesso de carga não é previsto nos cálculos convencionais (GONÇALVES, 2004).

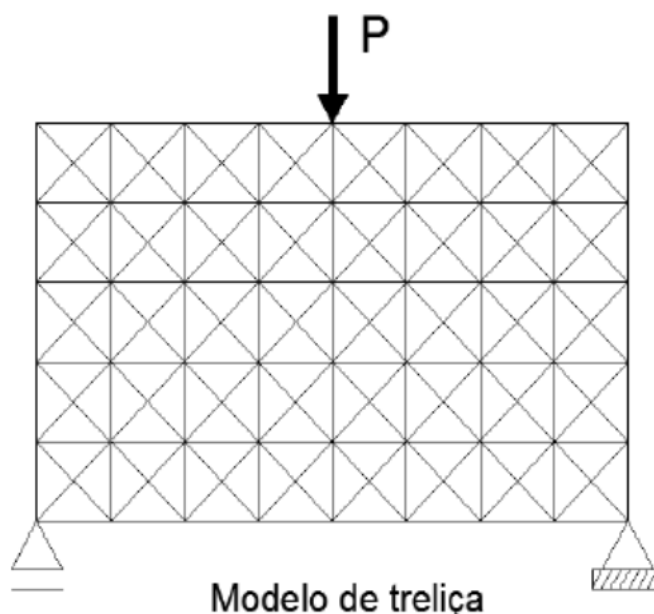
Santos (2018), comprou a redistribuição de esforços após análise da interação solo estrutura, observando que os pilares com maiores carregamentos não estavam situados no centro da estrutura, gerando acréscimos de cargas nos pilares da extremidade e alívio de carga nos pilares centrais.

2.4.1 Trabalhos com sistema construtivo parede de concreto

Testoni (2013) testou dois modelos para analisar a estrutura de parede de concreto, um com elementos de casca para representar as paredes e outro modelo através de um pórtico simples, para o modelo de pórtico espacial foi proposto elementos de treliças no primeiro

pavimento, sendo os demais construídos com modelos de barras equivalentes. O modelo por treliças está representado na Figura 16.

Figura 16 - Modelos para parede de concreto

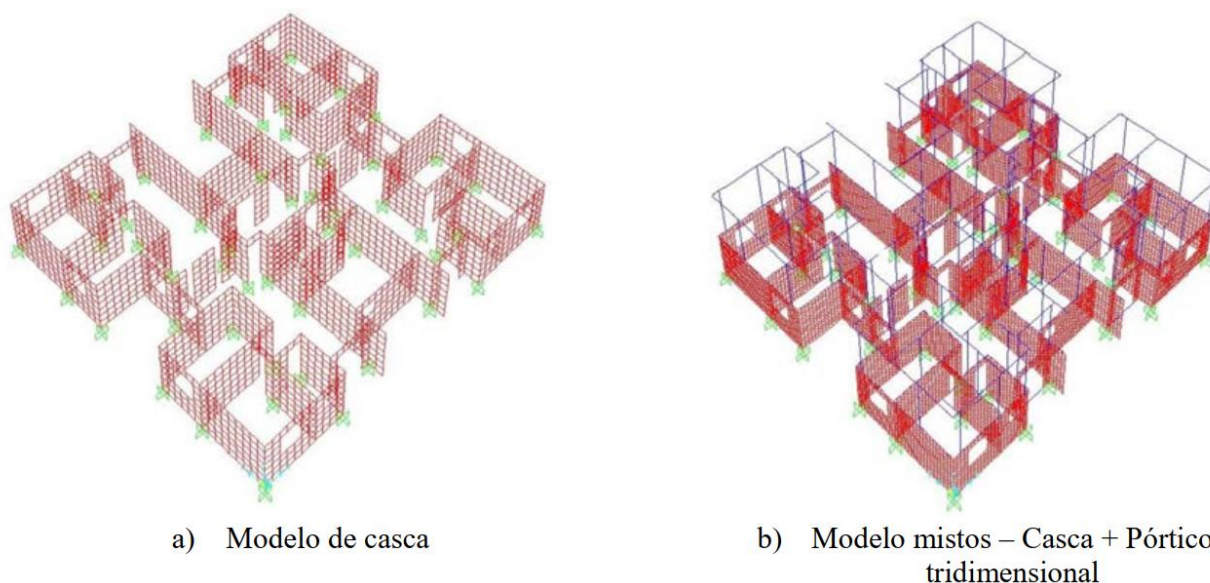


Fonte: Testoni (2013).

Testoni (2013) estimou os recalques de três edifícios de parede concreto, dois com 15 pavimentos e outro com 10 pavimentos, o processo foi realizado com e sem interação solo-estrutura. Os resultados mostraram alterações nos recalques, além disso uma grande variação no fluxo de tensões das paredes e alterações de esforços na fundação, observou-se uniformização dos recalques na fundação e redução de esforços nos apoios os mais carregados e aumento nos apoios menos carregados.

Santos (2016) estudou o comportamento do sistema parede de concreto, tanto para fundações profundas como para fundações superficiais do tipo sapatas, o autor deu continuidade ao estudo desenvolvido por Testoni (2013), foi criado dois modelos, um modelo simulando as paredes de concreto como elementos de casca e outro com somente o primeiro para com elementos de casca sendo os demais pavimentos modelados como um sistema aporticado, esse modelo simplificado e baseado no “modelo de Yagui”. A modelagem foi realizada por meio de elementos finitos. Os modelos estão ilustrados nas Figuras 17a e 17b.

Figura 17 - Modelos de ISE em edifícios de parede de concreto (a) Modelo de casca; (b) Modelo misto



Fonte: Santos (2016).

Santos (2016) mostrou como resultados a normatização dos recalques com consideração da ISE, redistribuição de esforços superiores a 18%, no trabalho concluiu-se ainda, que a consideração da interação solo-estrutura poderia ser considerada somente até o 5 pavimento, considerando nos pavimentos superiores apenas o acréscimo de cargas.

Farias (2018) comprovou no seu estudo com modelo de parede de concreto associado a fundação em radier com consideração da interação solo-estrutura, a homogeneização de recalques na fundação, redução nas distorções angulares, variação mínima de recalques após o 5 pavimento e afirma que com a inclusão da ISE aumenta os momentos nas paredes devido a redistribuição de esforços.

Dantas (2019) dando continuidade ao trabalho de Farias (2018), modelou um edifício com sistema construtivo parede de concreto, por sua vez com auxílio do programa computacional SAP 2000, tendo como base de dado sem MEF, concluindo que com a consideração da ISE em seu modelo não houve somente uma uniformização dos recalques, mas também a diminuição das distorções angulares no radier. Também se comprovou a redistribuição de esforços nas paredes na análise numérica criado.

2.4.2 Consequências das hipóteses de projetos em relação a ISE

Gusmão (2006) listou as consequências das simplificações usadas pelos projetistas. O autor tenta com seu estudo, enfatizar a importância de consideração da ISE em projetos. Apresenta-se na Tabela 3 a relação patológica de consideração simplista.

Segundo Jones et al. (2012 apud Qafetan et al. 2020), existe uma resposta estrutural devido os movimentos do solo, que se caracteriza pelo estudo da interação solo estrutura. Qafetan et al. (2020) aponta que essa interação é amplificada à medida que o comportamento e as propriedades do solo variam sob carga dinâmica. Quando não se existe técnicas analíticas tomadas como padrão para interação solo- estrutura, os projetistas encontram lacunas, onde simplificam ou mesmo excluem o uso da interação, calculando-se assim separadamente, estrutura e fundação.

Tabela 3 - Consequências das hipóteses de projetos em relação à ISE

Hipótese de projeto	Consequência na edificação
Apoios são considerados indieslocáveis	Redistribuição de cargas e esforços nos elementos estruturais especialmente vigas e pilares. Alívio de cargas nos pilares mais carregados e sobrecarga nos pilares menos carregados. Pode haver danos nos elementos estruturais.
Apoios podem recalcar de maneira independente uns dos outros.	A ligação entre os elementos estruturais confere à estrutura uma rigidez, que restringe os recalques diferenciais. A deformada de recalques medida é mais suave que a estimada convencionalmente. Há uma tendência de uniformização dos recalques.
O carregamento do prédio só ocorre ao final da sua construção	À medida que a estrutura vai sendo construída, vai havendo um aumento do seu carregamento e dos recalques absolutos. Há, no entanto, um aumento da rigidez da estrutura, que faz com que haja uma tendência de uniformização dos recalques. Há uma altura limite, correspondente aos cinco primeiros pavimentos, em que praticamente não há mais aumento de rigidez para fins de uniformização dos recalques.

Fonte: Gusmão (2006).

Lu et al. (2020) fez uma análise de interação complexa, onde se mostra a influência não só da estrutura com o solo, mas também levando em consideração a interação cruzada IC, que estuda a relevância da movimentação de edificações adjacentes, caracterizando-se a chamada SSSI, interação estrutura-solo-estrutura.

Bycroft et al. (1956 apud Lu et al. 2020) afirma que as pesquisas sobre a interação SSSI estão em desenvolvimento e seus avanços surgiram em decorrência das análises de outras interações anteriores como a ISE. Lu et al. (2020) considera que a união entre as duas

interações ISE e IC, tenha ocorrido no intensão de melhoramento do sistema de segura das usinas nucleares devido aos terremotos, assim contribuindo nesse âmbito.

Vu et al. (2006 apud Alonso et al, 2020) considera que os modelos de interação entre a estrutura do solo para solos expansivos são baseados principalmente no modelo Winkler ou modelagem hidromecânica acoplado do domínio do solo coberto com teoria do feixe ou placa para a estrutura. Foi proposto por Alonso et al. (2020) um modelo para edificações, com considerações da ISE e a influência da quantidade de água presente no solo nas movimentações angulares da estrutura, fazendo a união estrutura-solo-atmosfera, comprovou grandes distorções na estrutura, devia transferência de água do solo para atmosfera, os maiores movimentos verticais ocorrem nas extremidades das edificações, pois teriam maior potencial de transferência de teor de água para atmosfera.

Alonso et al. (2020) chama a atenção afirmando que esses deslocamentos podem, por sua vez, ser utilizados para avaliação de danos de construção relacionados à distorção angular entre as fundações.

2.4.3 Fatores que influenciam a interação solo estrutura

Existe alguns fatores destacados na literatura que expressam importância maior ou menor sobre o desempenho na relação entre as partes da estrutura com relação a sua rigidez. Dos quais serão considerados três grandes fatores de importância: (a) Rigidez relativa entre a estrutura-solo; (b) Influência do número de pavimentos; e (c) Evolução construtiva.

(a) Rigidez relativa estrutura-solo

Gusmão (1994) destaca o quanto é importante a rigidez da estrutura para diminuição dos recalques diferenciais. Nas análises convencionais essa rigidez é desprezada, o que não é condizente com a realidade de monitoramento, que mostra que quanto maior a rigidez da estrutura menor os deslocamentos diferenciais e absolutos da fundação.

Lopes e Gusmão (1991) confirmaram o trabalho desenvolvido por Meyerhof (1953), concluindo que o aumento da rigidez relativa solo-estrutura, influencia na diminuição dos recalques, como uma maior interferência nos recalques diferenciais. Está presente na Figura 18 o comportamento dos recalques com o aumento de rigidez da estrutura.

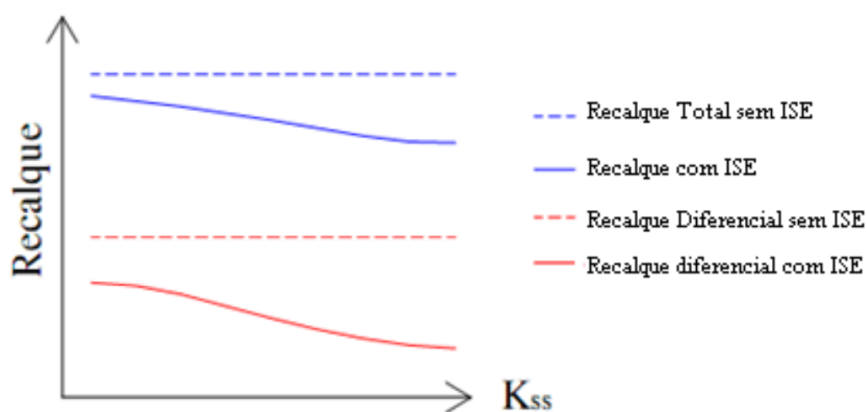
Após analisarem o comportamento de um edifício aporticado de concreto armado Gusmão e Lopes (1991) propuseram a Equação 1 onde descreve o coeficiente de rigidez

estrutura-solo, (K_{ss}). Assim, de forma aproximada é possível prever a variação de ordem de grandeza dos recalques.

$$K_{ss} = \frac{E_c I_b}{E_s L} \quad (1)$$

Em que: E_c e E_s são os módulos de elasticidade do concreto e do solo respectivamente, L é o comprimento entre os apoios dos pilares e I_b é o momento de inércia da viga típica da estrutura.

Figura 18 - Rigidez relativa estrutura solo x recalques



Fonte: Lopes e Gusmão (1991).

Ramalho e Corrêa (1991) fizeram um estudo em dois tipos de estrutura uma com sistema de laje laje-cogumelo e outro com sistema convencional de laje, viga e pilar. O estudo se propôs a avaliar o comportamento da estrutura com solo considerado rígido e com sua flexibilização. Foi comprovada uma significativa redistribuição de esforços axiais nos pilares e momentos fletores nas vigas da estrutura, mostrando uma maior sensibilidade a consideração de flexibilização da estrutura para a estrutura em laje-cogumelo.

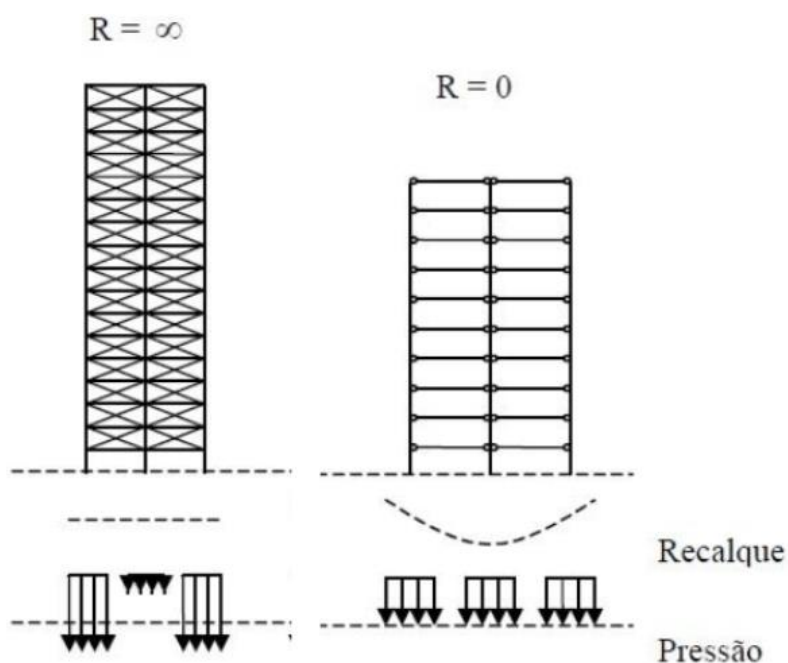
Iwamoto (2000) considerou a rigidez da união entre laje, viga e pilar de um edifício de 15 pavimentos utilizando artifícios computacionais para análise da interação solo-estrutura, concluiu que é de grande influência a rigidez da estrutura na magnitude dos recalques diferenciais da estrutura.

Chamecki (1969) revela que a rigidez da estrutura pode alterar de forma expressiva a redistribuição de esforços na estrutura e na distribuição de recalques, o autor fez duas análises em seu estudo, uma com a rigidez da estrutura infinita e outra com estrutura com rigidez nula,

os resultados mostram que a estrutura com rigidez infinita os recalques mostraram-se uniformes e os esforços maiores nos cantos que no centro. A situação é oposta a estrutura com rigidez nula, lembrando que essa consideração de rigidez nula é convencionalmente usada. Resume-se na Figura 19 as duas situações estudadas.

Gusmão (1990) indica em seu estudo que uma edificação apoiada em rocha pode se comportar como flexível e uma estrutura apoiada em solo mole pode ter seu comportamento rígido, o autor defende que a rigidez relativa solo-estrutura governa todo o comportamento da edificação.

Figura 19 - Rigidez da superestrutura



Fonte: Chamecki (1965, apud IWAMOTO, 2000).

(b) Sequência construtiva

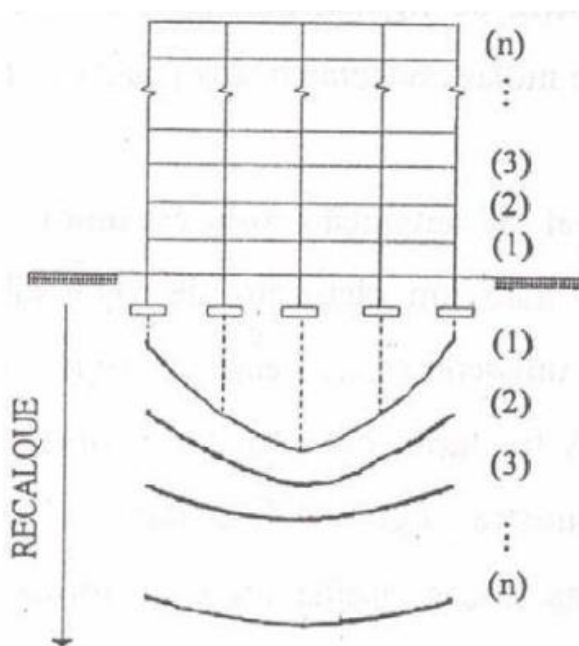
Convencionalmente, considera-se o carregamento da estrutura de forma instantânea, com todo carregamento inserido de uma única vez e com a construção finalizada. Essa consideração não é realista ao passo executivo, pois a construção é realizada com carregamento monotônico de forma gradativa, da mesma forma que os recalques também ocorrem de forma gradual, com o carregamento dos elementos da estrutura (SARAIVAS, 2008).

Fonte et al. (1994) estudou a influência do processo executivo de um edifício com 14 pavimentos, chamando a atenção das consequências de não consideração dos recalques diferenciais oriundos da interação de engaste dos elementos estruturais com a evolução construtiva. O estudo reafirma a importância da consideração da interação e o enrijecimento gradual da estrutura.

Brown e Yu (1977), observaram que a rigidez de uma estrutura que tem seu carregamento de forma evolutiva, corresponde à metade da rigidez de uma estrutura carregada de maneira instantânea, sendo o estudo feito com consideração da interação solo-estrutura, com um modelo trabalhado com e sem carregamento instantâneo.

Segundo Gusmão e Gusmão Filho (1994), a grande maioria dos estudos sobre interação solo-estrutura não assumem a consideração da evolução construtiva, no entanto é de grande importância o avanço construtivo para a ISE, já que com a evolução dos pavimentos existe um aumento gradativo da rigidez da estrutura, sendo essa não linear ao com o número de pavimentos. Está presente na Figura 20 o efeito da sequência construtiva nos recalques.

Figura 20 - Efeito da sequência construtiva nos recalques



Fonte: Gusmão Filho (1994).

Moura (1999) observou em um edifício de 19 pavimentos uma grande influência do processo construtivo principalmente na redistribuição de esforços em pilares.

Farias (2018) conclui em seu estudo em parede de concreto, que a consideração da interação solo-estrutura levou a uniformização dos recalques. o autor comparou os resultados

dos modelos com carregamento instantâneo e por etapas, concluindo que o modelo com carregamento da estrutura de forma instantânea, mostra não ser mais realista.

Dantas (2019) comprovou em seu estudo a relevância da consideração da sequência construtiva na análise numérica com ISE, principalmente com relação as distorções angulares, para o mesmo modelo obteve maiores distorções angulares quando se considerou o carregamento parcial da estrutura. A análise numérica criada pelo autor com consideração da evolução construtiva, revelou um (levantamento) na extremidade de uma parte da placa do radier, esse fenômeno foi constatado quando se considerou os estágios construtivos da estrutura.

(c) Número de pavimentos

Gusmão (2006) fez um estudo do reflexo do número de pavimentos em relação a rigidez e os recalques, notando o aumento da rigidez com o número de pavimentos e a diminuição na dispersão dos recalques com a evolução da obra. O autor revela a tendência de uniformização dos recalques não acontece de forma linear com o aumento do número de pavimentos.

Iwamoto (2000), no seu estudo, previu, que além da rigidez relativa entre a estrutura e o solo, outro fator importante nos resultados dos esforços secundários provenientes da interação, estão relacionados ao número de pavimentos, relatando que os efeitos da ISE são mais significantes nos primeiros pavimentos.

A relação entre o desvio padrão e média dos recalques, dá origem ao coeficiente de variação de recalques (CV). Esse coeficiente mostra a tendência de uniformização dos recalques com os aumentos do número de pavimentos e consequentemente da rigidez da estrutura (GUSMÃO e GUSMÃO FILHO, 1994). Mostra-se na Figura 21 a relação entre o aumento do número de pavimentos, diminuição dos recalques diferenciais e a diminuição no coeficiente de variação de recalques.

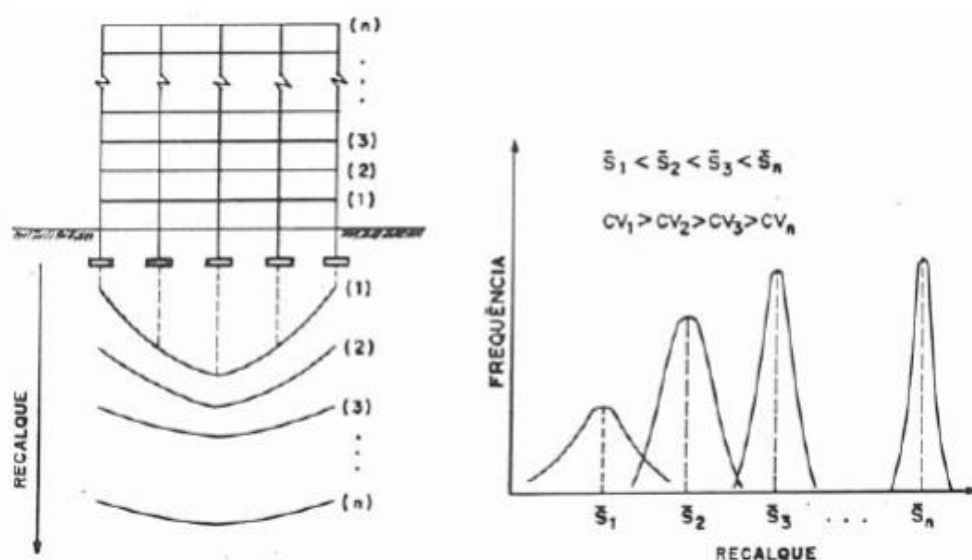
Gusmão e Calado Jr (2002) comprovaram a diminuição do CV com o passar do tempo, após a redistribuição dos esforços e aumento da rigidez da estrutura. Ainda relatam que a diminuição do CV ocorre principalmente nos primeiros pavimentos.

Gonsalves (2004) no seu estudo para um edifício de 4 pavimentos na cidade do Rio de Janeiro - RJ, também constatou a variação de recalques com o aumento do número de pavimentos. As medições apontaram uma diminuição no CV a partir da 3ª leitura, com início da execução das alvenarias e fim da estrutura.

Goshy (1978) concluiu que a estrutura aumenta sua rigidez com o acréscimo de pavimentos, o autor compara a rigidez da estrutura com relação ao número de pavimentos, com uma viga flexível apoiada em meio elástico, de rigidez com aumento gradual a evolução da estrutura, ainda verifica no estudo diminuição nas distorções angulares com a evolução da superestrutura.

Segundo Gusmão e Gusmão Filho (1994), a estrutura de um edifício chega ao limite de rigidez que não há mais variações de recalque devido a interação solo-estrutura, ocorrendo somente por adição de carga. Isso acontece devido a rigidez limite que ocorre nos primeiros de pavimentos, terminada assim a redistribuição de carga e os efeitos devido a interação solo estrutura. Os autores comentam ainda que a grande maioria dos estudos não consideram acréscimo de carga durante a evolução da obra, mas estudos comprovam que com o aumento da altura da estrutura proporcionalmente cresce a rigidez e existe com isso uma tendência de uniformização dos recalques, no entanto a rigidez não cresce diretamente proporcional ao número de pavimentos.

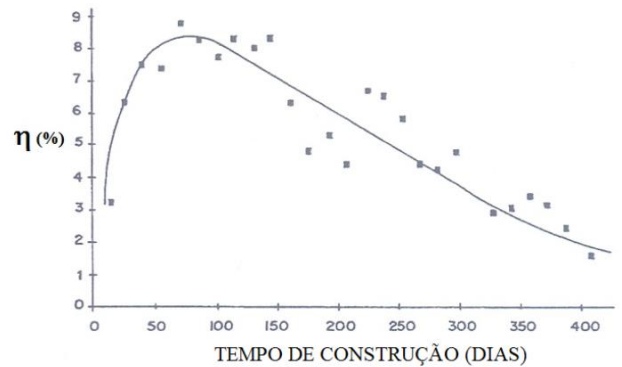
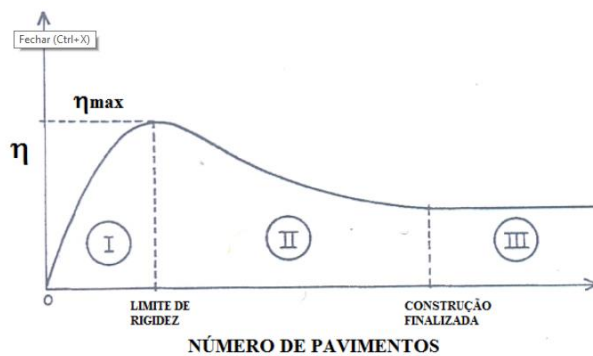
Figura 21 - Efeito da sequência construtiva



Fonte: Gusmão e Gusmão Filho (1994).

Está presente na Gráfico 4a representação da redução na redistribuição de cargas devido a interação solo-estrutura, após o limite de rigidez da estrutura, de acordo com o trabalho de Gusmão Filho e Guimarães (1994). Nota-se que com a evolução da estrutura existe a uniformização dos recalques.

Gráfico 4 - Limite de rigidez: (a) Limite de rigidez ao longo da construção; (b) Verificação do pilar da periferia da estrutura



a) Limite de rigidez ao longo da construção

b) Verificação do pilar da periferia da estrutura (experimental e numérico)

Fonte: Gusmão e Guimarães (1994, apud FARIAS, 2018).

2.5 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DO SOLO

O sucesso de uma simulação, para uma análise numérica está na representação mais realista possível do comportamento da estrutura com o solo, para o caso de obra construída, para o bom desempenho do modelo necessita-se dos parâmetros e características do solo da região, onde estará locada a edificação. Através desses dados pode-se construir análises confiáveis a respeito do comportamento da estrutura com as considerações da interação solo-estrutura, (ANTONIAZZI, 2011).

2.5.1 Módulo de elasticidade

O modulo de elasticidade em condições estáticas foi estudado por autores como Sandroni (1991) e Teixeira e Godoy (1996), apresentam algumas formas avaliar o modulo de elasticidade transversal (G) e longitudinal (E) do solo para uma fundação, através do ensaio SPT. As Equações 2 e 3, baseadas na teoria da elasticidade relacionam as duas grandezas citadas.

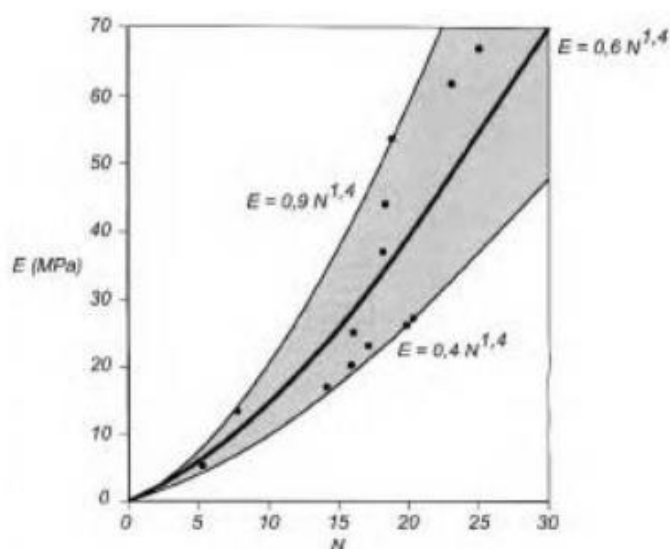
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3)$$

- *Método de Sandroni (1991)*

Solos residuais de gnaiss, encontrados em grande parte do Brasil e em algumas partes dos Estados Unidos, Sandroni (1991) fez relações baseadas em resultados de provas de cargas para o tipo de solo citado, o estudo obteve as curvas da Figura 22, podendo o módulo de elasticidade do solo ser estimado a partir de correlações seguindo o N_{SPT} , devido a restrições do tipo de solo esse método é recomendado para solos do tipo residuais.

Figura 22 - Relação entre o NSPT e o módulo de elasticidade estático de solos residuais



Fonte: Sandroni (1991), apud VELLOSO e LOPES, 2011).

- *Método de Teixeira e Godoy (1996)*

O método de Teixeira e Godoy (1998) utiliza expressões que se baseiam em uma correlação com a resistência de ponta de cone (q_c), para se obter o módulo de elasticidade longitudinal do solo (E_s). Não havendo ensaios de cone, a correlação se dá pelas Equações 4 e 5.

$$E_s = q_c \cdot a \quad (4)$$

$$E_s = K \cdot N_{spt} \cdot a \quad (5)$$

Os valores de K e α são obtidos em TEIXEIRA e GODOY (1996), apud CINTRA, AOKI e ALBIERO (2011).

- *Método De Retroanálise Para Módulo De Elasticidade*

Através do monitoramento de recalques de uma estrutura de fundação é possível a obtenção do módulo de elasticidade do solo E_s por retroanálise, utilizando a Equação 6.

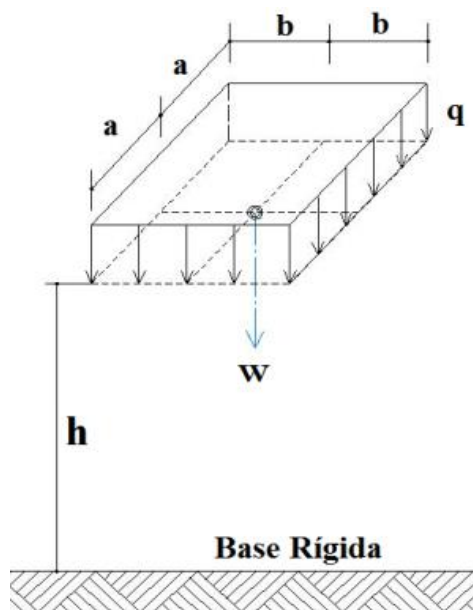
$$E_s = q \cdot B \cdot \frac{1-\nu^2}{w} \cdot I_s I_h I_d \quad (6)$$

Sendo: ν : 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; q : carga da estrutura; w : recalque da estrutura.

A relação (a/b) entre as dimensões do radier determina o fator m , como indica na Figura 23, nesse caso quanto maior a relação entre a maior dimensão do radier (a) e a menor dimensão (b), menos quadrada será a forma da estrutura de fundação. A cota de profundidade rígida h é importante para determinação dos fatores I_s e I_h que possuiam vez são determinados pela Tabela 4.

A cota de profundidade rígida (h) tem como base o $N_{spt} > 30$ para os últimos 0,3 cm de haste, os valores são determinados através de reconhecimento simples com ensaio a percussão N_{spt} .

Figura 23 - Ilustração dos parâmetros de entradas da tabela de Harr (1996)



Fonte: Harr (1996).

Tabela 4 - Valores de $I_s.I_h$ para carregamentos na superfície ($I_d = 1$) de um meio de espessura finita

h/a	b/a						
	1	2	3	5	7	10	∞
0,2	0,096	0,098	0,098	0,099	0,099	0,099	0,1
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	0,91	0,952	0,964	0,982	1,018
5	0,8	1,01	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	0,875	1,155	1,309	1,475	1,556	1,619	1,758
∞	0,946	1,3	1,527	1,826	2,028	2,246	∞

Fonte: Harr (1996).

Para determinação do coeficiente de Poisson (ν), considerou-se os valores são propostos por Barata (1984), com correlações feitas através de experiência do autor com solos Brasileiros.

2.5.2 Coeficiente de reação vertical e coeficiente de mola do solo

Scarlat (1993) propôs o efeito da deformabilidade do solo através de molas discretas, onde se apoiaria a base das fundações, as molas teriam o seu coeficiente de apoio elástico $K(mo)$ relacionado ao coeficiente de reação vertical que por sua vez dependeria das propriedades do solo.

A Equação 7, relaciona o coeficiente de reação vertical $K(v)$ com o coeficiente de mola do solo $K(mo)$, sendo diretamente proporcional a área de base da fundação apoiada no maciço.

$$Kv = \frac{Kmo}{Af} \quad (7)$$

O Kv nada mais é que relação entre a pressão transmitida para solo (σ) e o recalque (w) correspondente, a Equação 8 mostra a relação.

$$Kv = \frac{\sigma}{w} \quad (8)$$

Um dos métodos que tem como princípio base a aplicação de molas sob a estrutura de fundação é o modelo que Winkler. Nesse modelo a deformação vertical do solo será dada pela Equação 9.

$$W(x, y) = \frac{\sigma(x, y)}{Kv} \quad (9)$$

Na qual: $\sigma(x, y)$ é a tensão de contato média na base da fundação; $W(x, y)$ é o deslocamento vertical (recalque); Kv é o módulo ou coeficiente de reação vertical (depende do tipo de solo que compõe o maciço de fundação).

O conjunto de molas pode ser substituído por três molas globais que representem os esforços na fundação, essa hipótese pode ser admitida se garantir que a base da fundação permaneça rígida após a deformação do solo (ANTONIAZZI, 2011). As molas teriam as seguintes características:

k_{nv} : coeficiente de mola para os deslocamentos verticais;

k_{nh} : coeficiente de mola para os deslocamentos horizontais;

$k_n\sigma$: coeficiente de mola para as rotações.

Pela hipótese de Winkler é possível obter os deslocamentos em todas as direções por meio dos respectivos coeficientes de mola, segundo as Equações 10, 11 e 12.

$$W = \frac{N}{Kmv} = \frac{F}{Kv.Af} \quad (10)$$

$$Z = \frac{H}{Kmh} = \frac{H}{Kv.Af} \quad (11)$$

$$\varphi = \frac{M}{Km\sigma} = \frac{M}{Kv.If} \quad (12)$$

VELLOSO e LOPES (2011) enumera as diferentes formas de se obter o coeficiente de reação do solo, dentre eles: (a) tabelas de valores típicos; (b) ensaio de placa; (c) cálculo de recalque na fundação; (d) equações aproximadas.

Sendo assim na falta de ensaios de campo e possível estimar o coeficiente de reação vertical através de tabelas presentes na literatura, esses coeficientes são padronizados e podem servir de base de dados para o maciço da região de estudo.

Através de ensaios de placas Terzaghi (1955) elaborou um acervo de dados referente ao coeficiente de reação vertical e o tipo de solo. Tabela 5 estão apresentados os valores de K_v de acordo com Terzaghi (1955).

Tabela 5 - Valores de K_v segundo Terzaghi (1955)

Argilas	Rija	Muito Rija	Dura
q_u (MPa)	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	> 0,4
Faixa de valores	16.000 a 32.000	32.000 a 64.000	> 64.000
Valor proposto	24.000	48.000	96.000
Areias	Fofas	Mediamente Compacta	Compacta
Faixa de valores	6.000 a 19.000	19.000 a 96.000	96.000 a 320.000
Areia acima NA	13.000	42.000	160.000
Areia submersa	8.000	26.000	96.000

q_u corresponde à resistência à compressão não-drenada. Os resultados foram determinados por meio de ensaios de placa, de tal modo que necessitam de correção em função da forma e dimensão da sapata.

Fonte: Terzaghi (1955).

No Tabela 6 estão os valores de coeficiente de reação vertical, segundo Moraes (1976). Mais uma opção na literatura de dados de K_v relacionados as propriedades do solo.

A forma de se obter os coeficientes de reação, não seria essa a mais adequada, porém na falta de dados ou na presença de dados duvidosos, é um bom parâmetro de comparação e análise.

Tabela 6 - Valores de K_v de acordo com Moraes (1976)

Tipo de solo	$k_v(\text{KN.m}^{-3})$
Turfa leve - solo pantonoso	5.000 a 10.000
Turfa pesada - solo pantonoso	10.000 a 15.000
Areia fina de 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

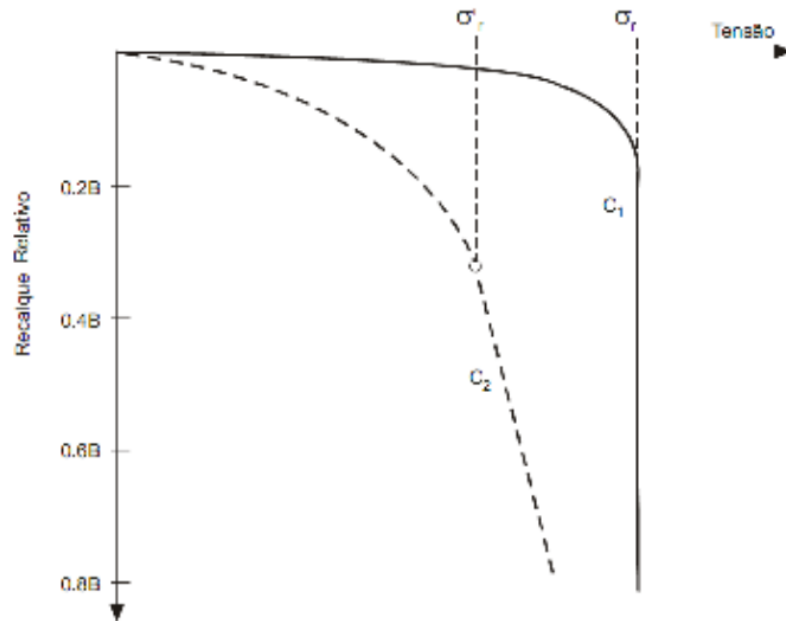
Fonte: Moraes (1976).

O ensaio de placa serve como uma das principais bases de informação para os projetos de fundações superficiais. Além das informações a respeito das propriedades do solo, o ensaio de placa é influenciado pela forma e dimensão da sapata. O ensaio que gera as informações para o projeto de fundação profunda está ligado aos ensaios de prova de carga estática e dinâmica.

As curvas tensão x recalques, C1 e C2, ilustradas na Figura 30, criada por Terzaghi (1943), mostra o comportamento do solo em relação aplicação de tensão e a capacidade de suporte do solo, que no caso da Gráfico 5 abaixo poderia considerar a capacidade de carga do solo como σ'_r .

Barbosa (2017) relata que no Brasil o ensaio de placa é padronizado pela NBR 6489: 2019 e, dentre as suas recomendações destacam-se: A cota da superfície em que o ensaio será realizado deve ser sempre a mesma que a das eventuais bases das sapatas da futura fundação. A placa de ensaio deve ser rígida e ter uma área mínima de 0,5m². A relação entre a profundidade e largura da placa deve ser a mesma da futura fundação.

Gráfico 5 - Curvas de tensão – recalques típicos



Fonte: Terzaghi (1943).

Outro método de se encontrar o coeficiente de reação vertical, seria através de monitoramento da fundação, com os dados de recalque medidos e a carga correspondente para cada estágio seria possível obter o (K_v) utilizando a Equação 13.

$$K_v = \frac{q}{w_i} \quad (13)$$

Vesic (1961), propôs a Equação 14, que relaciona o módulo de elasticidade do solo (E_s) e o coeficiente de reação (K_v), a relação não é tão simples, pois a rigidez da estrutura de fundação tem grande influência nas pressões de contato (BARBOSA, 2017).

$$K_v = 0,65 \cdot \frac{E_s}{B \cdot (1-\nu^2)^2} \cdot \sqrt[12]{\frac{E_s \cdot B}{E_c \cdot I}} \quad (14)$$

Onde: ν é o coeficiente de Poisson do solo; B é a menor dimensão da fundação; E_c é o módulo de elasticidade do material da fundação (geralmente concreto); I é o momento de inércia da seção considerada da fundação.

Existe diversas maneiras de se obter o coeficiente de reação vertical para o solo, dentre todos apresentadas nessa revisão, o presente trabalho chega ao (K_v) para solo em estudo, através da Equação 15, que está correlacionado ao módulo de elasticidade do solo (E_s).

$$Kv = \frac{Es}{WB.(1-\nu^2).Is.Ih.Id} \quad (15)$$

Sendo: ν : coeficiente de Poisson; E : módulo de elasticidade; K : coeficiente de reação; B : menor dimensão do elemento; Is : fator de forma do elemento de fundação; Ih : fator de espessura da camada compressível; Id : fator de embutimento da camada.

Os dados de entradas são todos dependentes da forma da estrutura de fundação, propriedades do solo em estudo e o módulo de elasticidade retroanalisado, para caso em estudo. A Equação 15 foi utilizada para metodologia do presente estudo, na obtenção do coeficiente de reação vertical (Kv), para o contato solo-radier.

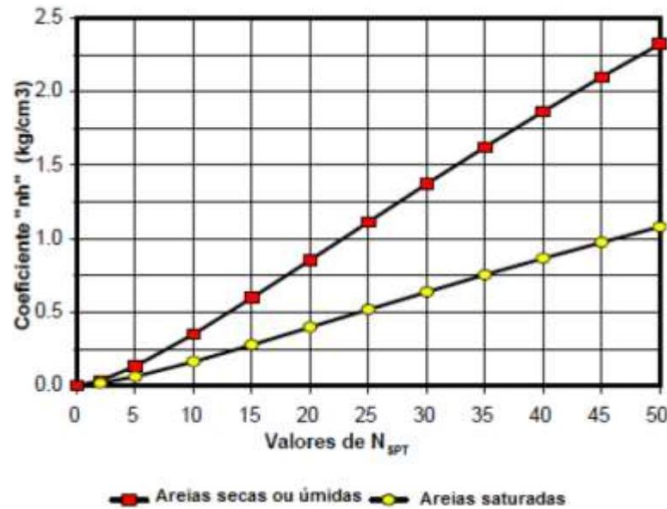
As considerações para solos arenosos podem ser feitas através de equações com determinação dos valores de N_h a partir de correlações empíricas com as propriedades do solo. As equações utilizam valores de resistência à penetração mediano ensaio SPT (ARAÚJO, 2013).

A Equação 16 define o coeficiente de reação horizontal (K_h), para o caso de solos com perfis de característica de solos arenosos.

$$Kh = n_h \frac{Z}{B} \quad (16)$$

Sendo: n_h : constante de reação horizontal do solo; Z : profundidade; B : diâmetro da estaca.

A Gráfico 6 relaciona os valores de N_h com os valores de N_{spt} . Existe um valor específico para o comportamento de N_h depende do nível de água no solo, podendo ter duas representações de acordo com características de areias secas, úmidas ou saturadas.

Gráfico 6 - Estimativa dos valores de n_h para solos arenosos, em função N_{SPT} 

Fonte: Leoni (2009).

As Equações 17 e 18 regem o comportamento das curvas mostradas na Figura 31, sendo elas dadas por:

$$\bullet \quad n_h = \left(\frac{N_{spt}}{N_{spt \cdot 0,18} + 22} \right)^{1,5} + 0,08; \text{ para areias secas e úmidas (kgf/cm}^3\text{)}. \quad (17)$$

$$\bullet \quad n_h = \left(\frac{N_{spt}}{N_{spt \cdot 0,36} + 32} \right)^{1,7} + 0,03; \text{ para areias saturadas (kgf/cm}^3\text{)}. \quad (18)$$

O coeficiente de variação horizontal K_h pode ser calculado em seguida com a Equação 16, substituindo os valores de profundidade, diâmetro da estaca e n_h .

A determinação do coeficiente de mola K_{mo} , utiliza-se a Equação 19:

$$K_{Mi} = K \cdot A_i \quad (19)$$

Em que: K_{mi} é a rigidez relativa no nó i ; K é o coeficiente de reação do solo, podendo ser K_v (vertical) ou K_h (horizontal); A_i é a área de influência do nó i dada pelo diâmetro da estaca multiplicado pela distância entre os nós ($A_I = B \cdot L$).

Para a determinação da constante de mola verticais (K_{mv}) em KN/m, que determina o coeficiente de atrito lateral do solo em torno da estaca, foi usado a Equação 20.

$$Kmv = \frac{Kh}{v} \quad (20)$$

Em que: v é o coeficiente de Poisson do solo, que para o caso em estudo se trata de solos arenosos.

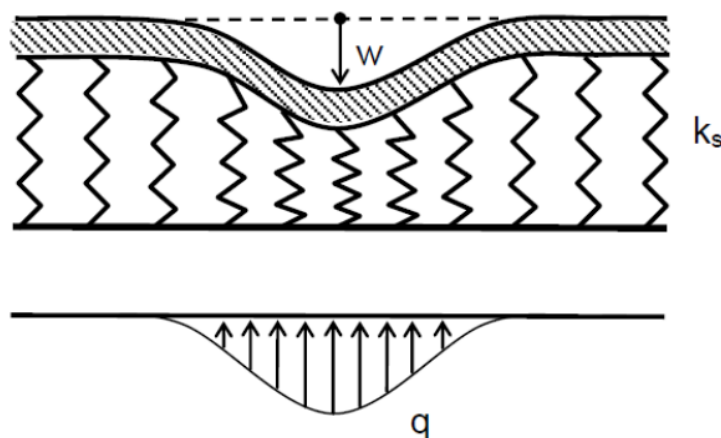
A metodologia para solos arenosos saturados foi utilizada para representação das características e valores do contato representado por molas entre as estacas e o radier, no presente trabalho.

2.5.3 Modelos de solos para análise da interação solo estrutura

Para Velosso e Lopes (2011), para interação solo estrutura a representação do solo pode se dá por dois modelos principais, sendo eles: Hipótese de Winkler e Meio contínuo.

Winkler (1867 Apud Vesic, 1961), foi o primeiro método que representou o comportamento do solo em relação ao seu deslocamento com aplicação em uma análise estrutural. Para o estudo o solo se comportaria como molas, que por sua vez representariam um tipo de apoio elástico para estrutura de fundação, como mostra a Figura 24, as molas teriam rigidezes que relacionam as pressões de contato (q) com os seus respectivos recalques (w).

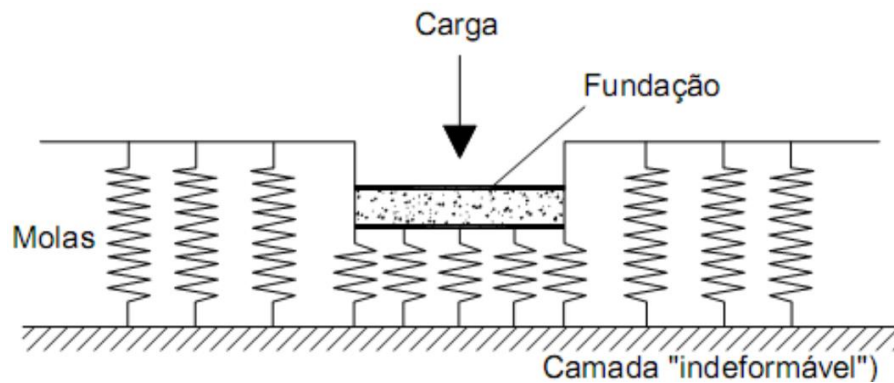
Figura 24 - Método de Winkler



Fonte: Winkler (1986, apud VESIC, 1961).

Para Antoniazzi (2011) o modelo de Winkler considera o sistema de molas como linear e independente entre si, mostra-se na Figura 25 como o modelo se comporta, deformando-se somente no ponto de aplicação de carga, não considera interações entre as deformações existentes no contorno.

Figura 25 - Hipótese de Winkler: deformabilidade do solo através de molas discretas

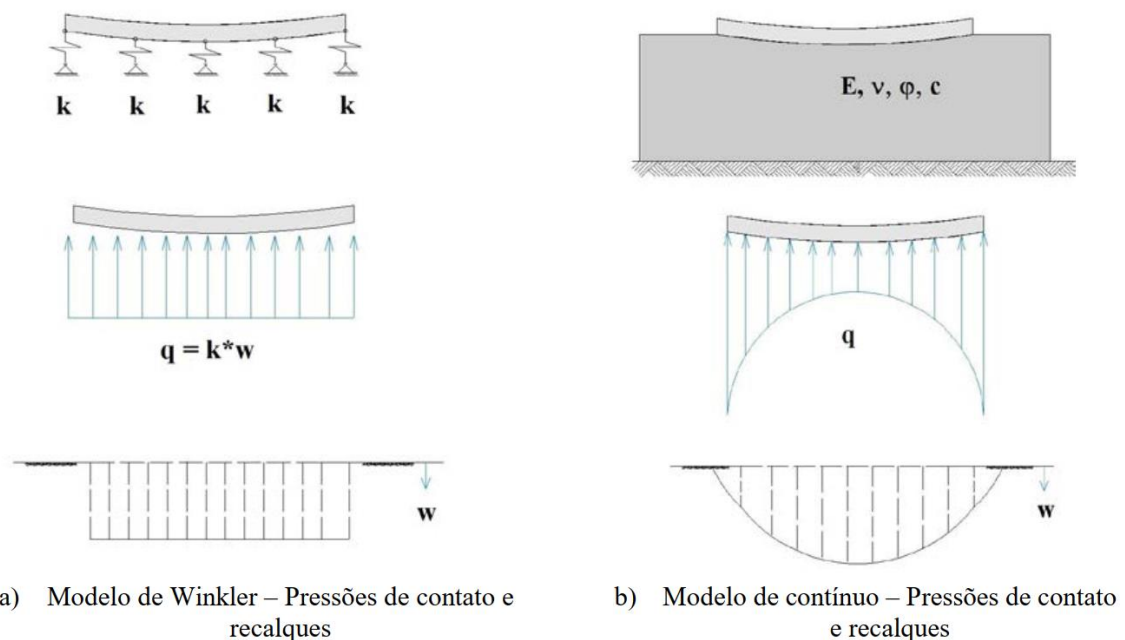


Fonte: Antoniazzi (2011).

A grande vantagem do modelo é a sua simplicidade de modelagem, dentre os demais, tornando-se aplicável aos projetos estruturais, agregando e sendo utilizado no presente estudo, que tem como intuito literário de trazer em seu corpo, um modelo aplicável aos projetos contemporâneos.

Outra forma de se representar o solo consiste em considerar o maciço do solo como um meio contínuo conjugado a estrutura. Está exposto na Figura 26 a representação dos dois modelos mais frequentes na literatura quando se trata de representação do maciço de solo em uma análise sobre interação solo-estrutura (FARIAS, 2018).

Figura 26 - Modelos de maciços de solo para interação solo-estrutura



Fonte: Velosso e Lopes (2010, apud FARIAS, 2018).

2.6 SOFTWARE SAP 2000

Um dos grandes pontos, se não o mais relevante para o desenvolvimento de projetos de engenharia foi o aperfeiçoamento dos microcomputadores e ferramentas computacionais, virando rotina entre os profissionais da área. Os modeladores estruturais trouxeram prática e segurança aos usuários. Entre esses softwares estão os usados para modelagem da estrutura está o SAP 2000.

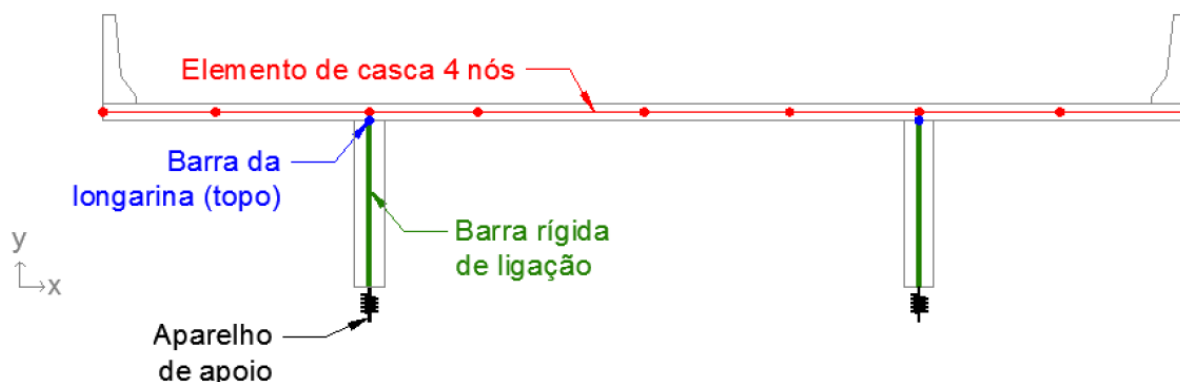
2.6.1 SAP 2000

O SAP 2000, existe a 30 anos no mercado, sempre com características de métodos analíticos, apesar de tanto tempo sendo usado sua interface é sofisticada. O programa é uma grande ferramenta computacional de análise estrutural, auxilia projetistas de diversas áreas, como infraestrutura, transporte, indústria entre outros.

O programa se destaca por suportar uma boa modelagem gráfica, por meios de elementos finitos, como elementos de barra, membrana e casca, dentre outros, a utilização dependendo sempre do tipo de projeto a ser modelado, a discretização das estruturas pode ser aplicada de acordo com o tipo de análise empregada. Destaque para gráfica em 3D, possuindo variedades em suas análises estruturais.

Freitas (2018), utilizou o programa SAP 2000 para modelar um conjunto de pilar-tubulão, o procedimento teve como fim, considera a interação solo-estrutura para uma ponte, especificadamente representado a rigidez relativa em a meso e infraestrutura, está presente na Figura 27 a definição dos elementos finitos na representação da estrutura.

Figura 27 - Definição dos elementos finitos da seção transversal



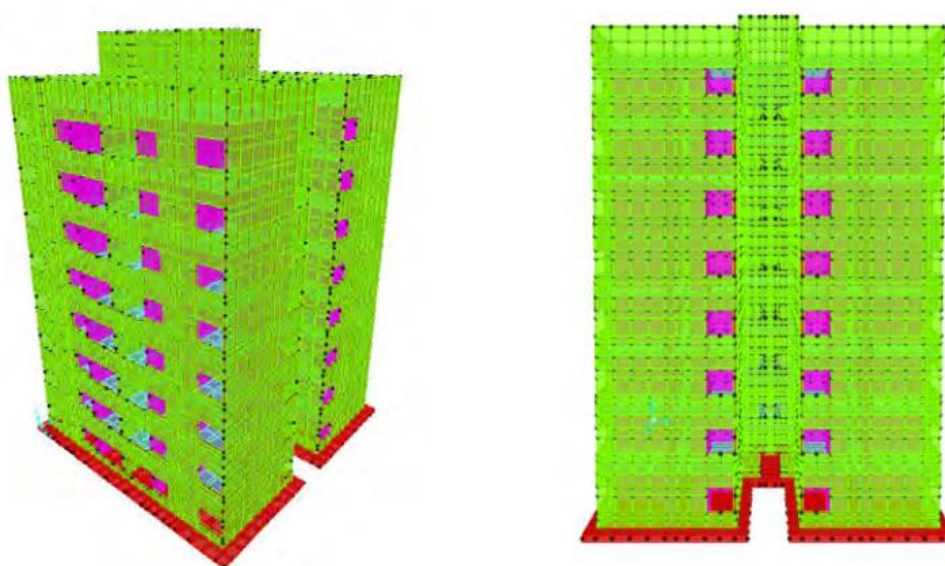
Fonte: Freitas (2018).

2.6.2 SAP 2000 empregado ao sistema parede de concreto

Dantas (2019) criou análises numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos utilizando o SAP 2000, o autor empregou por necessidade do modelo elementos de cascas para as paredes e elementos de membrana para representação das lajes, sendo construído uma edificação com sistema construtivo parede de concreto. As análises foram realizadas com foco na estrutura de fundação, avaliando as redistribuições de carga na fundação e o comportamento da estrutura em relação a evolução construtiva, mostra-se na Figura 28 o referido modelo criado.

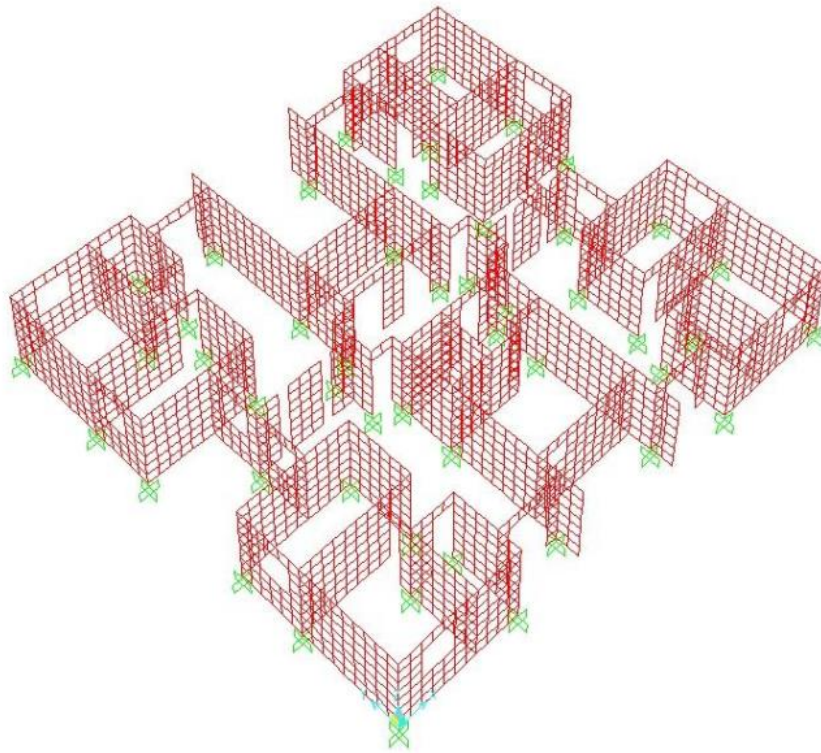
Santos (2016) determinou os esforços e os deslocamentos na superestrutura usando elementos de casca, através da utilização do Método dos Elementos Finitos mediante o emprego do programa SAP 2000 v14.2, como mostrado na Figura 29. Ainda sendo proposto pelo trabalho uma modelo simplificada para sistema parede de concreto com aplicação da interação solo-estrutura, com a estrutura sendo discretizadas por elementos de barra.

Figura 28 - Representação da análise numérica do SAP 2000



Fonte: Dantas (2019).

Figura 29 - Discretização do edifício através do modelo de casca



Fonte: Santos (2016).

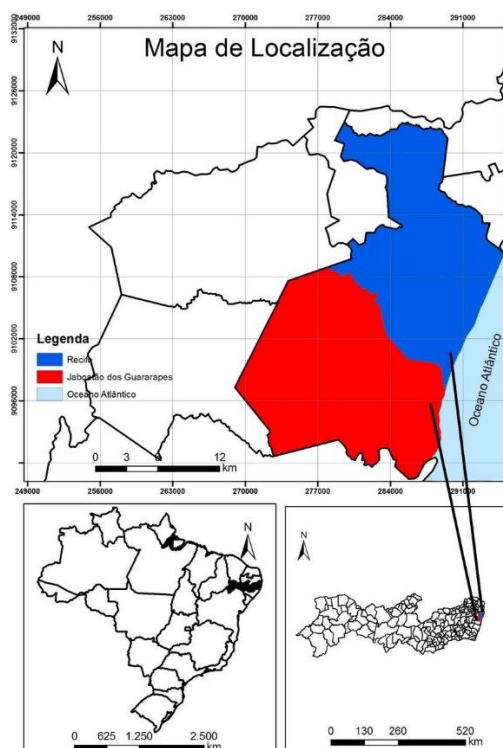
3 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

3.1 APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nesse Capítulo são apresentadas as características do estudo de caso, desde a caracterização da área de estudo e do maciço de solo, até o tipo de estrutura e fundação do empreendimento.

A área de estudo localiza-se no município de Jaboatão dos Guararapes, Região Metropolitana do Recife, Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil (Mapa 30). Está situado ao sul da capital do estado, da qual dista cerca de 18 km e ocupa uma área de 258,7 km². Em 2018, sua população era de 697.636 habitantes, sendo o segundo município mais populoso do estado. Destaca-se por sua indústria, possuindo o terceiro maior PIB industrial de Pernambuco. Na Figura 30 está apresentada a localização da área de estudo.

Mapa 1 - Localização do Município de Jaboatão dos Guararapes



Fonte: Silva (2013).

Figura 30 - Localização da obra em estudo



Fonte: Google Earth (2021).

3.2 CARACTERÍSTICAS DO EMPREENDIMENTO

O empreendimento estudado trata-se de um conjunto residencial composto por 14 (quatorze) blocos de 05 (cinco) pavimentos (térreo + 04 andares) cada, com distribuição linear de cargas para a fundação realizada através de paredes de concreto armado moldado in loco, está mostrado na Fotografia 3. Durante a construção, dois blocos do empreendimento foram monitorados, a instrumentação ocorreu em 8 pontos fixados na estrutura do radier, as medições ocorreram para toda a evolução da estrutura, os resultados do monitoramento serão utilizados para nível de comparação com a análise numérica proposto.

Fotografia 3 - Fachada da estrutura em parede de concreto



Fonte: O Autor (2021).

A área do terreno que está locado o empreendimento dispõe de 20.899,08 m² de área, está disposto como mostra a Planta 1 que propõe a planta situação e localização da obra cedida pela administração. Todas as análises realizadas neste trabalho serão referentes aos Blocos 08 e 03.

O condomínio possui duas tipologias de edificação:

- Tipo 01, sendo o sistema para esse tipo parede de concreto: configurado com 4 apartamentos de 50,00m² de área e 4 apartamentos de 53,62m² de área, totalizando 414,48m² de área por pavimento. Como o condomínio possui 13 blocos desse tipo de edificação, cada bloco com 5 pavimentos, a área total de construção é de 26.941,20 m². A planta de arquitetura e a perspectiva tridimensional do pavimento Tipo 01 estão representadas nas Plata 2 e Figura 31, respectivamente.

- Tipo 02, realizada com alvenaria estrutural: configurado com 4 apartamentos de 51,84m² de área e 4 apartamentos de 207,36m² lâmina. O condomínio possui apenas 1 bloco de 5 pavimentos deste tipo, a área total é de 1.036,80 m² de área construída para essa estrutura.

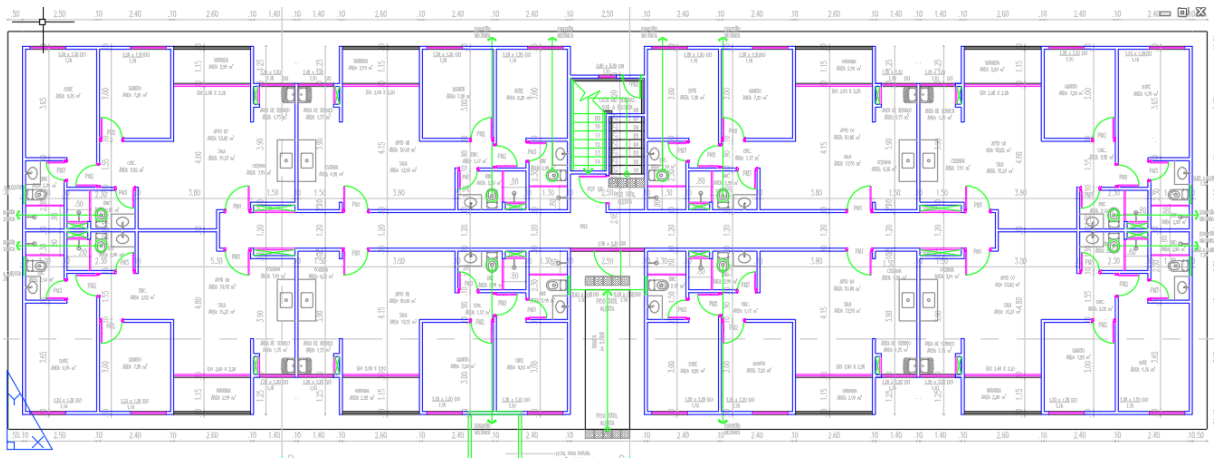
O empreendimento conta com vários equipamentos comunitários e respectivas áreas: guarita (9,91m²), administração do lixo (77,57m²), salão de festa (202,38m²).

Planta 1 - Situação e localização dos blocos 08 e 03 em planta



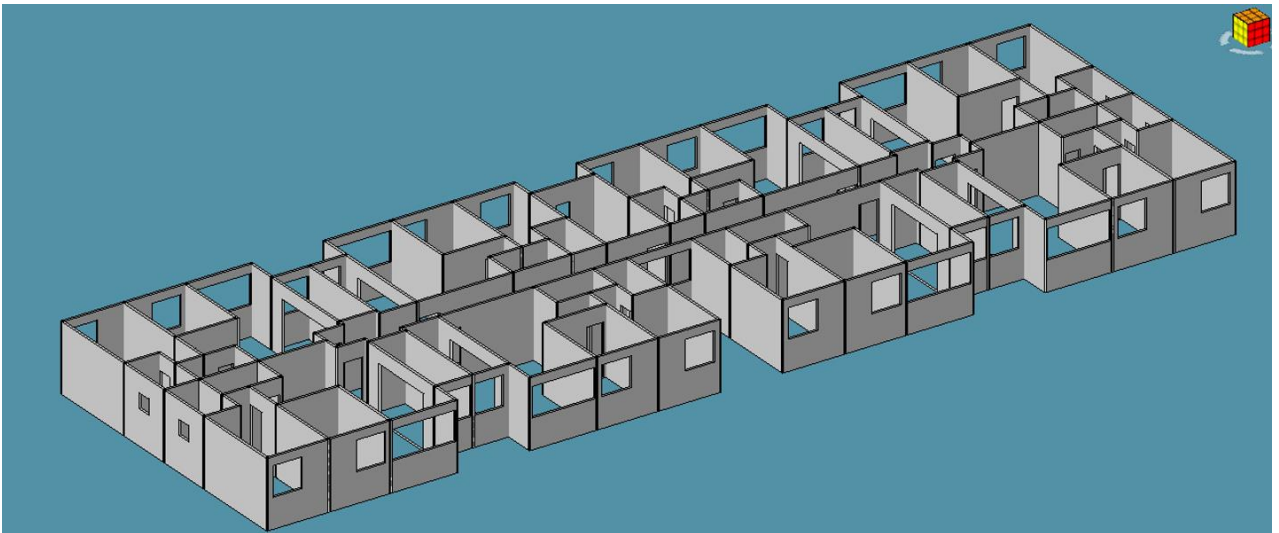
Fonte: Construtora (2021).

Planta 2 - Planta de arquitetura do pavimento Tipo 01



Fonte: Construtora (2021).

Figura 31 - Perspectiva tridimensional do pavimento tipo



Fonte: O Autor (2021).

3.3 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

A região de estudo está situada numa zona estratégica de desenvolvimento econômico do estado, localizando no caminho entre Recife e o Porto de Suape, que é o principal polo de investimentos do estado. É cortado pelas principais rodovias do estado, a BR-101 (de norte a sul), a BR-232 (de leste a oeste) e o Arco Metropolitano, que tem em seu projeto um traçado no sul do município. Possui temperatura média anual de 24,4 °C, tendo a Mata Atlântica como vegetação nativa e predominante, também alguns trechos de restinga e manguezal.

Situado em uma planície sujeito a sucessivos avanços do mar durante o período Quaternário a região metropolitana contempla em seu perfil geotécnico uma série de sedimentos como: Terraços Marinhos, Terraços Fluviais, Cochas entre outros.

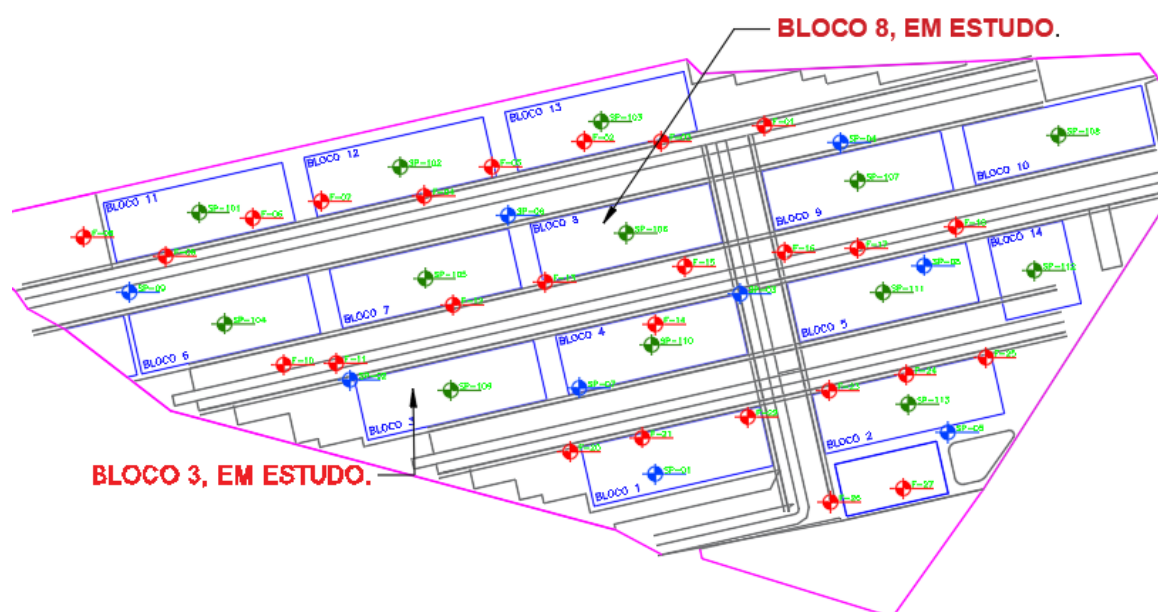
Gusmão (2005) relata a ocupação do solo da região metropolitana, onde as grandes obras de engenharia estão situadas nas planícies com subsolo de baixa resistência, sendo as áreas de boa resistência os morros e estando ocupados por pessoas de baixa renda não existindo assim avanços de empreendimentos de grande porte.

Oliveira (2004) fez a caracterização e classificação geotécnica de perfis típicos da região metropolitana do Recife, todos os levantamentos com dados de monitoramento de recalques das estruturas de fundação. O estudo classificou o solo de Jaboatão dos Guararapes como perfil com fragmentos de corais, as sondagens mostraram inicialmente uma camada de 3m com presença de areia fina, fofa, com camada sequente de mesma espessura com areia compacta a mediamente compacta.

As medições de recalque para um edifício de 20 pavimentos situado na região, com sistema construtivo parede de concreto, sua fundação apoiada a 3 m de profundidade em camada de areia compacta, obteve valores de recalques na ordem de 40 a 75 mm durante e após a construção, (OLIVEIRA 2004).

No presente estudo as sondagens a percussão (SPT) foram realizadas por três empresas, mostradas com cores diferentes na Planta 3. As características do subsolo do terreno em estudo têm como característica o nível de água no solo elevada com menos de 1 m de profundidade, perfil com camadas de areia, areias siltosa, fofa, compacta, mediamente compacta, e muita matéria orgânica.

Planta 3 - Locação dos furos de sondagens SPT



Fonte: Autor (2020).

O subsolo da edificação foi modelado observando a estratificação, sendo divididos em 6 perfis tipo, agrupando os blocos que possuíam subsolo com características mais semelhantes, indicados na Tabela 7. Os módulos de Elasticidade das camadas, E , foram obtidos a partir de correlações propostas por Teixeira e Godoy (1996).

Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos do terreno

BLOCOS	CAMADA	E(KPa)	H(m)
1=3=4	Areia com matéria orgânica	3.300	0,00 – 15,15
	Areia	35.100	15,15 – 19,15
	Areia siltosa	12.600	19,15 – 25,15
	Areia	55.000	25,15 – 29,15
2=5	Areia com matéria orgânica	3.300	0,00 – 1,30
	Areia com matéria orgânica	4.950	1,30 – 8,30
	Areia	55.000	8,30 – 17,30
	Areia siltosa	21.000	17,30 – 24,50
	Areia siltosa	55.000	24,50 – 26,50
06=07=08	Areia com matéria orgânica	9.900	0,00 – 1,65
	Areia com matéria orgânica	4.950	1,65 – 5,65
	Areia	24.300	5,65 – 11,15
	Areia com matéria orgânica	3.000	11,15 – 16,15
	Areia	55.000	16,15 – 19,15
	Areia argilosa	11.550	19,15 – 29,15
	Areia siltosa	55.000	29,15 – 32,15
09=10	Areia siltosa	8.400	0,00 – 4,15
	Turfa	3.000	4,15 – 5,15
	Areia	35.100	5,15 – 7,15
	Areia com matéria orgânica	3.300	7,15 – 11,15
	Areia	27.000	11,15 – 14,15
	Areia	55.000	14,15 – 18,00
	Areia siltosa	25.200	18,00 – 35,00
11=12=13	Areia com matéria orgânica	4.950	0,00 – 1,15
	Areia com matéria orgânica	6.600	1,15 – 5,35
	Areia	43.200	5,35 – 8,85
	Areia com matéria orgânica	3.000	8,85 – 18,85
	Areia	35.100	18,85 – 24,85
14	Areia argilosa	4.950	0,00 – 2,30
	Areia	8.100	2,30 – 4,30
	Areia	51.300	4,30 – 6,30
	Areia com matéria orgânica	3.300	6,30 – 11,30
	Areia argilosa	23.100	11,30 – 20,30

Fonte: Construtora (2021).

3.4 DEFINIÇÃO DO TIPO DE FUNDAÇÃO

Em virtude das características geotécnicas do terreno superficial, o projetista não recomendou a adoção de fundações superficiais tipo radier, nem mesmo com a utilização de técnicas de compactação, visto que as características de granulometria, resistência e posição das camadas superficiais não são favoráveis, e os recalques estimados são elevados, podendo ocasionar danos na edificação.

O sistema de fundação escolhido como solução para as dificuldades e características do solo, sendo a estrutura composta por um elemento horizontal (radier) e elementos verticais (estacas). A transferência de carga se dá ao solo pelo radier, e pela área lateral e de ponta das estacas, então foi avaliada uma solução de fundação mista, com radier associado a estacas pré-moldadas de concreto.

Nesta solução segundo o projetista do empreendimento, foi adotado um radier sobre base elástica considerando sua rigidez, com dimensões de 40,70 x 13,60 m (Blocos 1 a 13) e 17,10 x 18,51 m (Bloco 14). Foi adotada uma espessura de laje radier de 0,25 m para todos os blocos, está exposto na Fotografia 4 a construção do radier estaqueado no local.

Fotografia 4 - Construção do radier



Fonte: Autor (2020).

Alguns aspectos da solução de fundação em radier estaqueado devem ser ressaltados: A solução não elimina os recalques absolutos, mas a rigidez do radier e da própria estrutura diminuem consideravelmente os recalques diferenciais. O próprio radier passa a ser o piso do térreo, reduzindo os custos com a execução do piso convencional.

Está exposto na Fotografia 5 a locação e armação do radier, com a demarcação dos blocos de coroamento das estacas. O gabarito do radier é gerado e delimitado com uma fiada

de alvenaria estrutural, sobre a mesma nasce um sistema de forma de madeira que delimita a concretagem da fundação.

Fotografia 5 – Locação e armação do radier estaqueado



Fonte: O Autor (2021).

As estacas da fundação têm seções quadrada de dimensões 26,5x26,5 cm, com sistema executivo cravada sendo do tipo pré-fabricada. Mostra-se na Fotografia 6 o procedimento de cravação das estacas.

Fotografia 6 - Procedimento de cravação de estacas



Fonte: O Autor (2021).

Para a estimativa de capacidade de carga do bloco equivalente, foi utilizada inicialmente a equação de Terzaghi (1948) com fatores corretivos propostos por Vèsic (1975). Os parâmetros geotécnicos foram estimados a partir de correlações propostas por diversos pesquisadores e da experiência de aplicação de casos semelhantes.

As análises foram procedidas para o carregamento total. O radier apresentou fator de segurança superior a 3,0, que é o limite proposto na NBR 6122/2019 da ABNT.

A avaliação da capacidade de cargas das estacas foi feita através dos Métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978, 1982). Tais métodos relacionam a resistência por atrito lateral e por ponta dadas com base nos ensaios de SPT.

Está presente na Tabela 8 as características geométricas das estacas, bem como sua carga estrutural. Foram determinadas a utilização de 1.490 estacas com comprimento variando de 12,00 a 20,00m, totalizando 24.265,00m de estaca (Tabela 9).

Para o Bloco 8 e 3 foram calculadas 80 estacas com comprimento médio de 17,00 m e 18,00 m respectivamente (em projeto). A execução da fundação foi realizada com 82 estacas, por motivos de reforços ao rompimento na cravação de uma das estacas. Aponta-se na Fotografia 7 a disposição das estacas sob radier do Bloco 8 e Bloco 3.

Fotografia 7 - Locação e armação do radier



Fonte: Autor (2020).

Tabela 8 - Características das estacas de projeto

REF. DA ESTACA	LADO (mm)	SEÇÃO TRANSVERSAL	COMP.(m)	CARGA ESTRUTURAL DA ESTACA (kN)
E1	26,5x26,5 (PREFAZ)	QUADRADA	12,00 a 20,00	350

Fonte: Construtora (2021).

Tabela 9 - Comprimentos das estacas

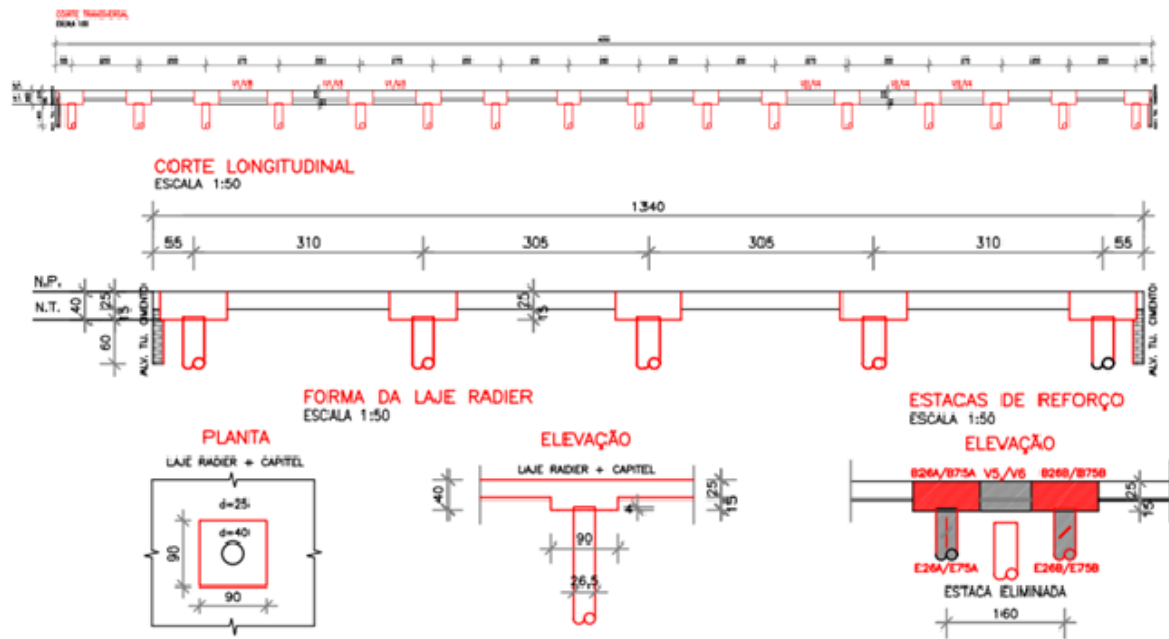
	REF.DA ESTACA	QUANTIDADE DE ESTACAS POR BLOCO	COMP. MÉDIO* (m)	COMP. TOTAL (m)
01=03=04	E1	80	16,00 A 17,00	5.500,00
02=05	E1	80	12,00 A 13,50	2.805,00
06=07=08	E1	80	17,00 A 19,00	5.830,00
09=10	E1	80	12,00 A 14,00	2.860,00
11=12=13	E1	80	19,00 A 20,00	6.490,00
14	E1	60	13,00	780,00
		$\Sigma = 1.490$		$\Sigma = 24.265,00$

(*) Em virtude da heterogeneidade do terreno, irá ocorrer variações de comprimentos de estacas dentro do mesmo bloco.

Fonte: Construtora (2021).

A Figura 32 mostra os perfis de corte das seções longitudinais e transversais do radier. Nota-se o detalhamento executivo dos blocos de transição radier-estaca e as estacas de reforço.

Figura 32 - Perfis de corte das seções longitudinais e transversais do radier



Fonte: O Autor (2021).

4 METODOLOGIA

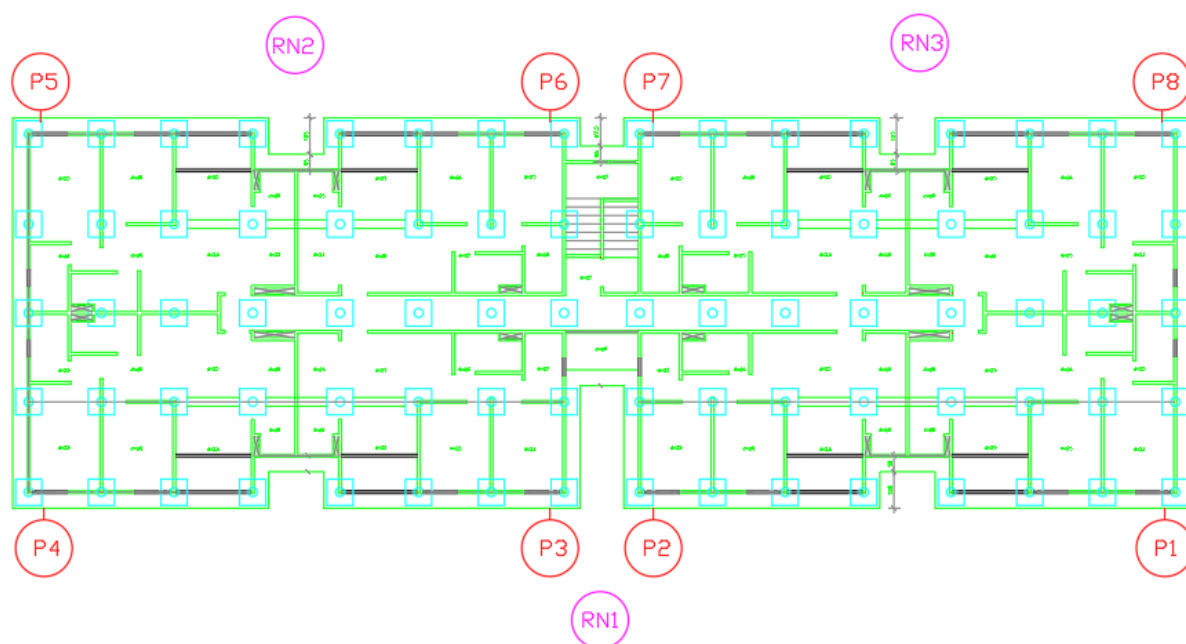
Neste capítulo estão descritas as etapas do estudo de campo e modelagem da estrutura e fundação, assim como as análises que foram realizados neste trabalho.

4.1 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE RECALQUES

A primeira etapa consiste no monitoramento dos recalques do Bloco 8 e Bloco 3, que teve início dia 18/08/2020 com previsão de término dia 25/09/2020. O levantamento ocorre diariamente, a cada concretagem executada, revelando um total de 20 leituras para cada pino.

O procedimento de instrumentação foi realizado através de nível ótico, em 8 pinos de referência fixados na base do radier (Pi) e 3 pinos de referência indeslocáveis (RNi), cada pino foi previamente numerado de 1 a 8 e marcados com tinta, assim como mostra a Planta 4, que norteia o esquema de distribuição dos pinos de monitoramento no entorno do radier estaqueado.

Planta 4 - Distribuição dos pinos de monitoramento



Fonte: O Autor (2021).

Os pinos de referência deslocáveis (Pi) são fixados juntos ao radier e sua mudança de nível se dá através do deslocamento da estrutura de fundação. As referências indeslocáveis são fixadas em perfis de estacas cravadas ao solo, essa estrutura não podendo ter influência de ações externas que venham a perturbar a sua cota de referência isolada da dinâmica da obra. E

observado nas Fotografia 8a e 8b, as visadas referentes ao ponto de referência indeslocável (RN1) e o ponto de referência deslocável (P1), respectivamente.

Fotografia 8 - Localização da instrumentação de monitoramento: (a) Ponto de referência indeslocável RN1; e (b) Ponto de referência deslocável P1



Fonte: O Autor (2021).

O levantamento começa com a criação do nível de referência indeslocável, com o plano de cota (CRNi). Posteriormente geram-se os planos com as cotas dos pinos de referências deslocáveis (CPi), com visadas referente ao nível (RNi). Esse procedimento é realizado em todo acréscimo de carga. Os recalques são estabelecidos para cada pino, quando se mede a variação de cota entre a cota da referência indeslocável (CRNi) e a cota do ponto de referência deslocável ligado a estrutura (CPi). A Tabela 10 mostra o modelo de anotações adotado para o levantamento de cotas diário.

O trabalho em campo foi realizado durante a execução da obra com o intuito principal de fornecer o comportamento da estrutura de fundação com relação a evolução construtiva. As evoluções diárias de carga devido as concretagens, revelam o comportamento real da estrutura, determinado um grande fator que norteia a interação solo-estrutura que é a evolução construtiva e a influência do método construtivo.

Tabela 10 - Modelo de anotações adotado para o levantamento de cotas diários

PREENCHIMENTO RAPIDO EM CAMPO		
PLANILHA DE MONITORAMENTO DE RECALQUES BL 8 ECOVILA PRAIA		
FAVOR DOCUMENTAR DIARIAMENTE		OBS
DATA	20/08/2020	
	MEDIÇÃO NIVEL (m)	
RN 3 '	0,337	
P1	0,681	
P2	0,635	
RN3''	0,43	PAREDE LADO B - TÉRREO/ LAJE LADO A - TÉRREO
P3	0,758	
P4	0,71	
RN 4	0,385	
P5	0,808	
P6	0,81	
RN 5	0,53	
P7	0,868	
P8	0,847	

Fonte: O Autor (2021).

4.2 METODOLOGIA CONSTRUTIVA

O processo construtivo do empreendimento em estudo se dá por montagem de formas de aço deslizantes e concretagens realizadas diariamente, em um conjunto de 21 dias de concretagem. Ao todo são 21 etapas para término da estrutura do bloco. Cada pavimento é composto por 4 concretagens, entre paredes e lajes. O serviço preliminar se dá pela montagem do radier e concretagem, posteriormente se inicia a concretagem de paredes e lajes na seguinte ordem para cada lâmina da estrutura:

- Etapa 1, montagem forma e concretagem paredes lado B;
- Etapa 2, montagem forma e concretagem paredes lado B e montagem de forma laje e concretagem lado A;
- Etapa 3, montagem forma e concretagem paredes lado C e montagem de forma laje e concretagem lado B;
- Etapa 4, montagem forma e concretagem paredes lado D e montagem de forma laje e concretagem lado C;
- Etapa 5, montagem de forma laje e concretagem lado D, forma e concretagem escada.

Está representado na Figura 33 o esquema construtivo, exemplificando a evolução construtiva para o pavimento térreo. O procedimento é repedido para os outros 4 pavimentos.

Mostra-se na Figura 34, o esquematiza do processo construtivo finalizado, com cada etapa correspondente.

Figura 33 - Esquema do modelo construtivo por etapas térreo

BLOCO					
ETAPA 1	D'	D		A'	A
	B'	B		C'	C
	D			A	
PAV 4* ---->	B		hall 4*	C	
	D			A	
PAV 3* ---->	B		hall 3*	C	
	D			A	
PAV 2* ---->	B		hall 2*	C	
	D			A	
PAV 1* ---->	B		hall 1*	C	
	D			A	
TÉRREO ---->	B		hall Térreo	C	
	D			A	
	B			C	
RADIER					

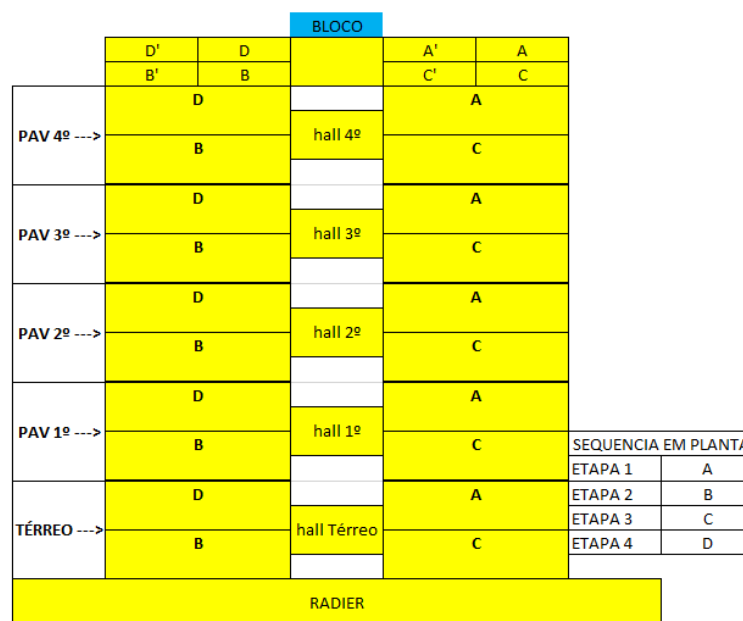
BLOCO					
ETAPA 2	D'	D		A'	A
	B'	B		C'	C
	D			A	
PAV 4* ---->	B		hall 4*	C	
	D			A	
PAV 3* ---->	B		hall 3*	C	
	D			A	
PAV 2* ---->	B		hall 2*	C	
	D			A	
PAV 1* ---->	B		hall 1*	C	
	D			A	
TÉRREO ---->	B		hall Térreo	C	
	D			A	
	B			C	
RADIER					

BLOCO					
ETAPA 3	D'	D		A'	A
	B'	B		C'	C
	D			A	
PAV 4* ---->	B		hall 4*	C	
	D			A	
PAV 3* ---->	B		hall 3*	C	
	D			A	
PAV 2* ---->	B		hall 2*	C	
	D			A	
PAV 1* ---->	B		hall 1*	C	
	D			A	
TÉRREO ---->	B		hall Térreo	C	
	D			A	
	B			C	
RADIER					

BLOCO					
ETAPA 4	D'	D		A'	A
	B'	B		C'	C
	D			A	
PAV 4* ---->	B		hall 4*	C	
	D			A	
PAV 3* ---->	B		hall 3*	C	
	D			A	
PAV 2* ---->	B		hall 2*	C	
	D			A	
PAV 1* ---->	B		hall 1*	C	
	D			A	
TÉRREO ---->	B		hall Térreo	C	
	D			A	
	B			C	
RADIER					

Fonte: O Autor (2021).

Figura 34 - Esquema da sequência construtiva em planta x perfil, conclusão



Fonte: O Autor (2021).

4.3 ANÁLISE NUMÉRICA EM ELEMENTOS FINITOS

Diversos estudos têm sido desenvolvidos em busca de um modelo que melhor representa o comportamento do solo. À vista disso, um dos objetivos deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma análise numérica para o edifício que represente da melhor forma a união da superestrutura com o sistema de fundação. A consistência deste modelo é de suma importância na determinação do comportamento mais realista da estrutura. Os deslocamentos gerados pela análise numérica mais avançado, serão comparados com os recalques medidos em campo.

4.3.1 Modelagem numérica da edificação

A modelagem numérica da edificação foi realizada através do SAP2000, versão 16.0 (software para análise estrutural por Elementos Finitos - MEF). Para o desenvolvimento das análises, os procedimentos realizados foram baseados nos Projetos Arquitetônico, Estrutural e de Fundações fornecidos pela construtora. Ao final das análises, foi possível verificar os esforços nos elementos de fundação e os deslocamentos correspondentes para cada caso analisado.

A modelagem numérica do edifício compreendeu os seguintes passos:

- Criação de um novo modelo de projeto;
- Seleção das unidades de medidas (kN, m, C) e do template de trabalho (*Grid Only*);

- Configuração das linhas de Grid com base nas coordenadas cartesianas de projeto;
- Definição da geometria dos elementos estruturais e das propriedades mecânicas dos materiais empregados na execução (Tabela 11), com base nas especificações técnicas do Projeto Estrutural;
- Definição das cargas e das combinações de carregamento que atuam sobre a estrutura, baseada na NBR 6120:2019. Foram consideradas apenas as cargas permanentes e a carga accidental de sobrecarga na combinação dos esforços;
- Modelagem completa da edificação com base no projeto arquitetônico da edificação. Foi atribuído o elemento SHELL (casca) para o radier, as lajes e as alvenarias.
- Discretização da análise numérica: o radier, as lajes e as alvenarias foram discretizados em malhas de elementos finitos de 20 x 30 cm e 25 x 25 cm, respectivamente.

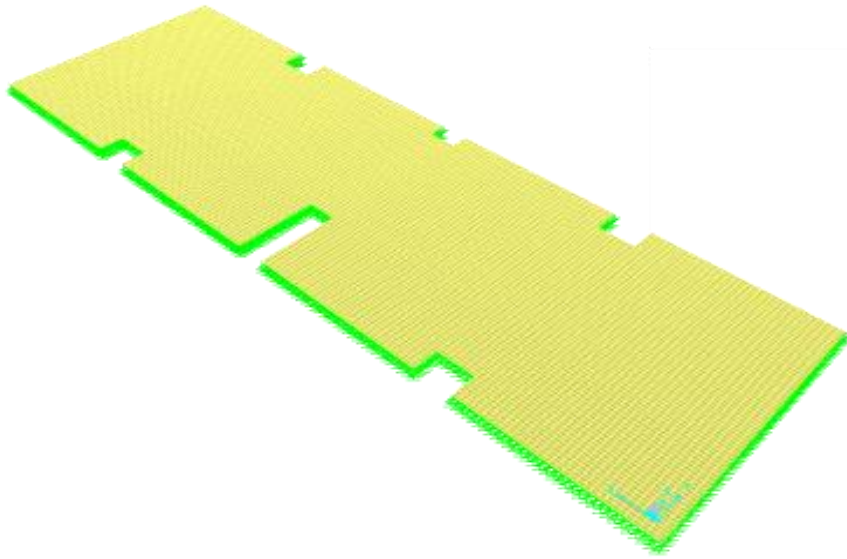
Nas Figuras 35, 36, 37 estão representadas as malhas em elementos finitos do radier, das lajes e das paredes de concreto obtidas através da modelagem. A Figura 38 é a representação final da análise numérica da edificação criado no SAP2000 para avaliação da ISE. O modelo final apresenta 262465 nós e 125779 elementos áreas.

Tabela 11 - Geometria e propriedades dos elementos estruturais da edificação

ELEMENTO	PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)	f_{ck} (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON	ELEMENTO DE ÁREA	ESPESSURA DO ELEMENTO (cm)
Radier	25	40	0,2	Shell	25
Laje	25	30	0,2	Shell	10
Parede	25	30	0,2	Shell	10

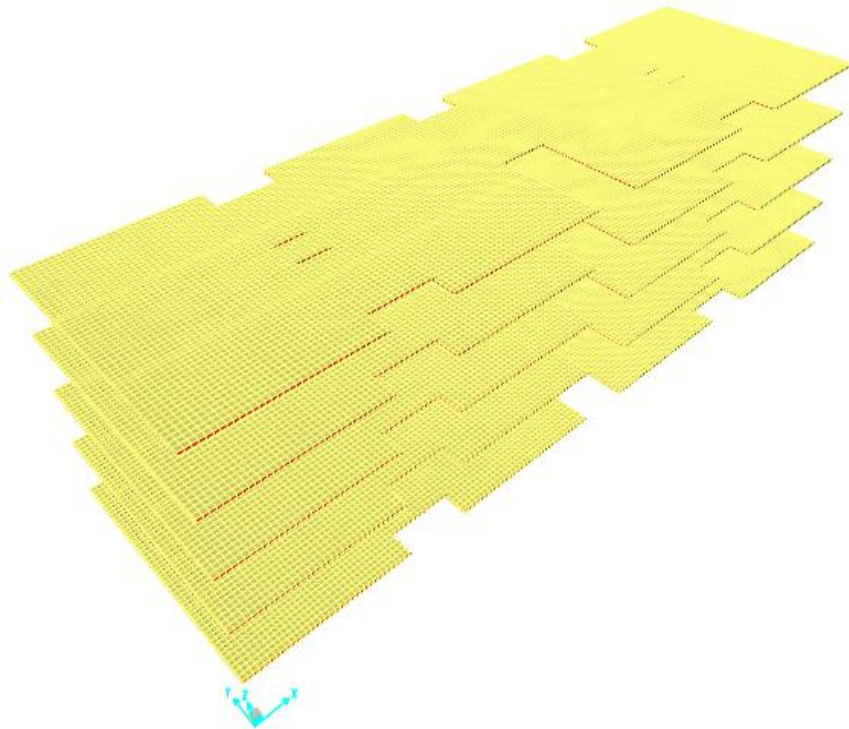
Fonte: O Autor (2021).

Figura 35 - Malha de elementos finitos para o radier



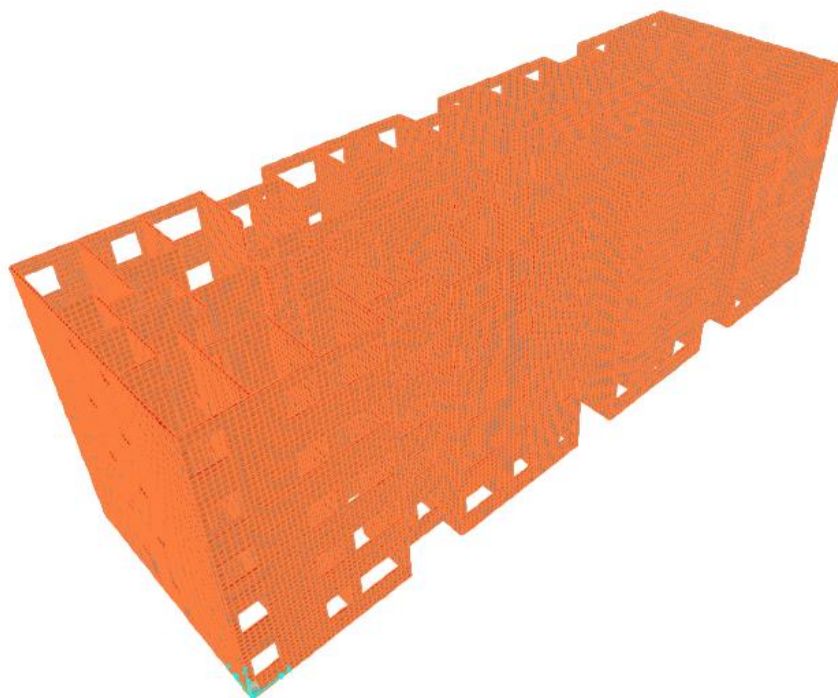
Fonte: O Autor (2021).

Figura 36 - Malha de elementos finitos nas lajes



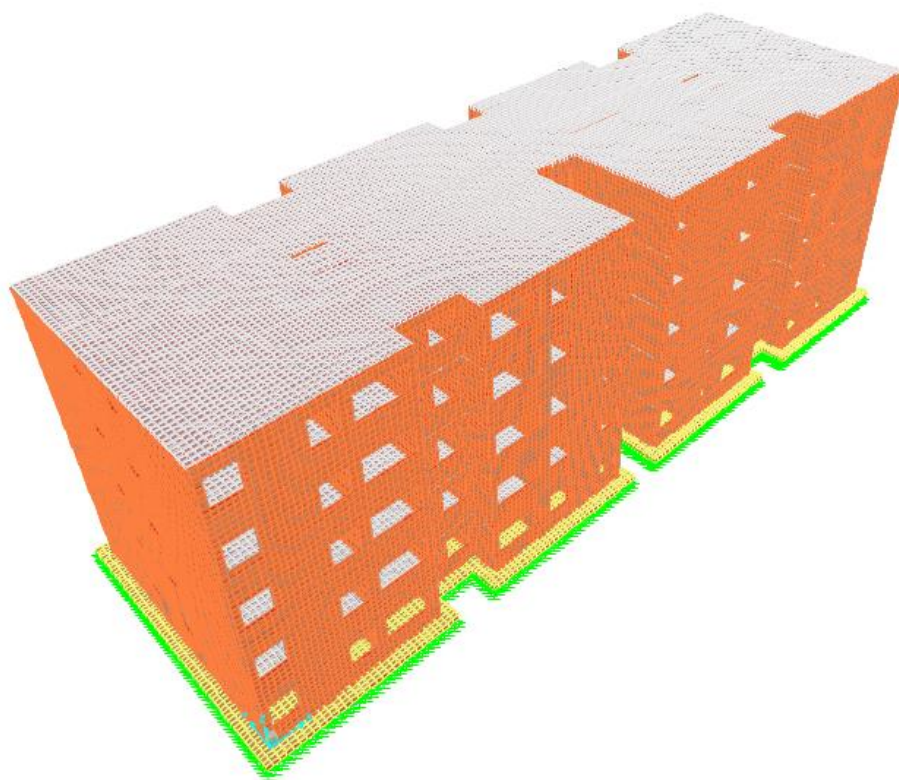
Fonte: O Autor (2021).

Figura 37 - Malha de elementos finitos para paredes



Fonte: O Autor (2021).

Figura 38 - Representação da análise numérica do SAP 2000



Fonte: O Autor (2021).

4.3.2 Análises numéricas

Neste trabalho foram desenvolvidas quatro análises de carregamento para a fundação em radier estaqueado. Essas análises basearam-se no modelo clássico de fundação elástica-linear, idealizado por Winkler (1867), popularmente conhecido como Modelo de Molas. Em cada análise, a configuração de carregamento do radier estaqueado foi modificada com a intenção de avaliar a diferença de comportamento do sistema de fundação devido a consideração, ou não, da interação Solo-Estrutura (ISE). O objetivo é criar um modelo simples que represente da melhor forma o comportamento da estrutura de fundação. Os deslocamentos obtidos na análise numérica mais avançada serão comparados com os recalques medidos em campo com o intuito de mostrar a importância em considerar a interação solo-estrutura na etapa de projeto.

As análises evoluem de um cenário menos realista, onde a carga total da edificação é aplicada diretamente no radier, para um cenário próximo ao real, que considera a interação solo-estrutura, ao modelar o método construtivo (parede de concreto) combinado com o sistema de fundação (radier estaqueado). A unificação destes sistemas permite considerar os principais fatores que norteiam a interação solo-estrutura, que são: a rigidez da estrutura, o número de pavimentos e a consideração da evolução construtiva na análise numérica. As análises desenvolvidas são descritas a seguir:

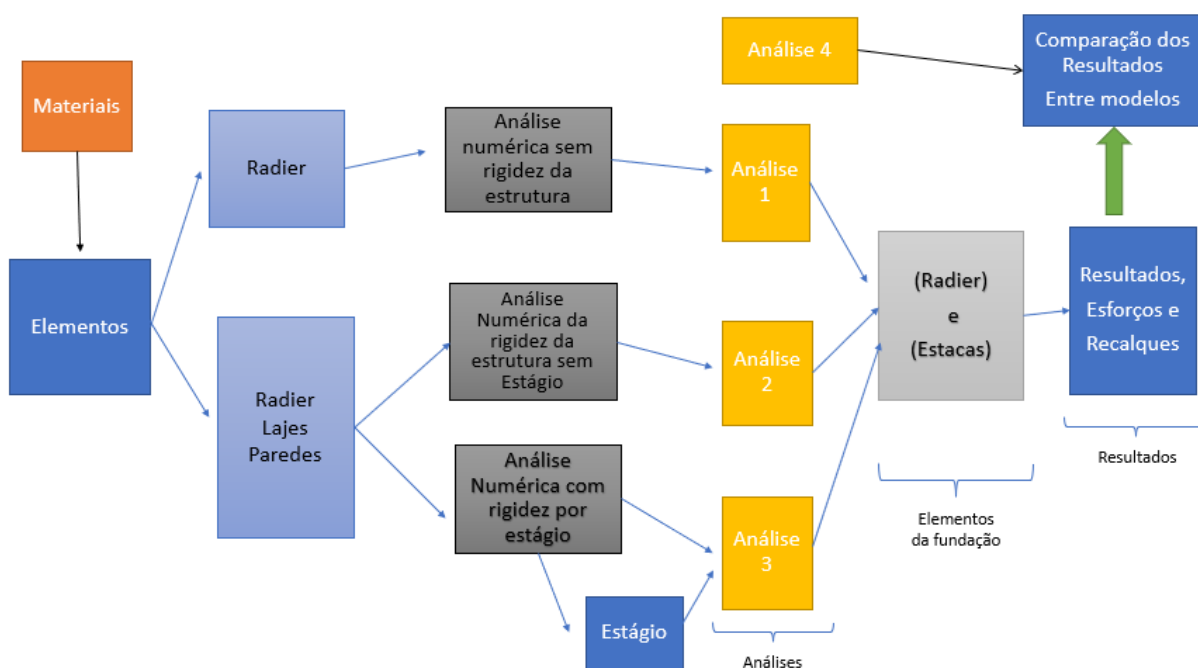
- Análise 1: a previsão de recalque para fundação foi realizada através da modelagem convencional que não considera a interação solo-estrutura. Nesta análise, a distribuição linear de cargas para a fundação, realizada através das paredes de concreto, foi aplicada diretamente no radier estaqueado. As cargas lineares variaram de 3,96 a 10,15 kN/m e foram obtidas considerando o radier livre e apoios indeslocáveis nas paredes no cálculo estrutural. A Figura 60 ilustra a fundação com o carregamento aplicado.
- Análise 2: cria-se uma análise numérica, em elementos finitos, a partir da união da estrutura de parede de concreto com o radier estaqueado. O radier é posto sobre apoios elásticos, sendo as estacas e o maciço de solo representados por molas, conforme elencado por Winkler. Neste modelo, apesar de ser feita a modelagem completa do edifício, o carregamento total da superestrutura é descarregado de maneira instantânea sobre o radier (Figura 61).
- Análise 3: cria-se um modelo idêntico ao obtido na análise 2, que considera a edificação (superestrutura + infraestrutura + solo) como um sistema que trabalha de

forma unificada. A diferença em relação ao modelo anterior consiste na consideração da análise construtiva não linear, onde o edifício é modelado em estágios sequenciais de duração conhecida. Em cada estágio foi admitido a execução de uma parte da estrutura. Esta análise considera um carregamento progressivo na fundação que simula a execução real da estrutura.

- **Análise 4:** traz os resultados do comportamento da estrutura de fundação em consequência ao efeito da evolução construtiva, com relação ao número de pavimentos e método construtivo. Estes resultados foram obtidos a partir do monitoramento de recalque, realizado durante a execução da obra.

Está apresentado no fluxograma 1 para análises realizadas, em tornos dos modelos numéricos criados, coloca-se todo procedimento adotado em cada análise realizada.

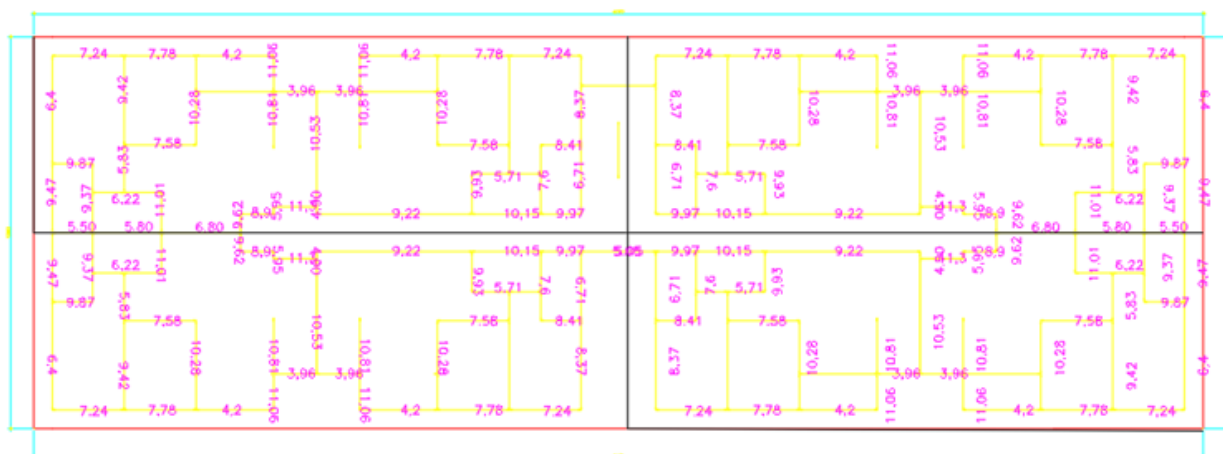
Fluxograma 1 - Fluxograma das análises realizadas para os modelos numéricos



Fonte: O Autor (2021).

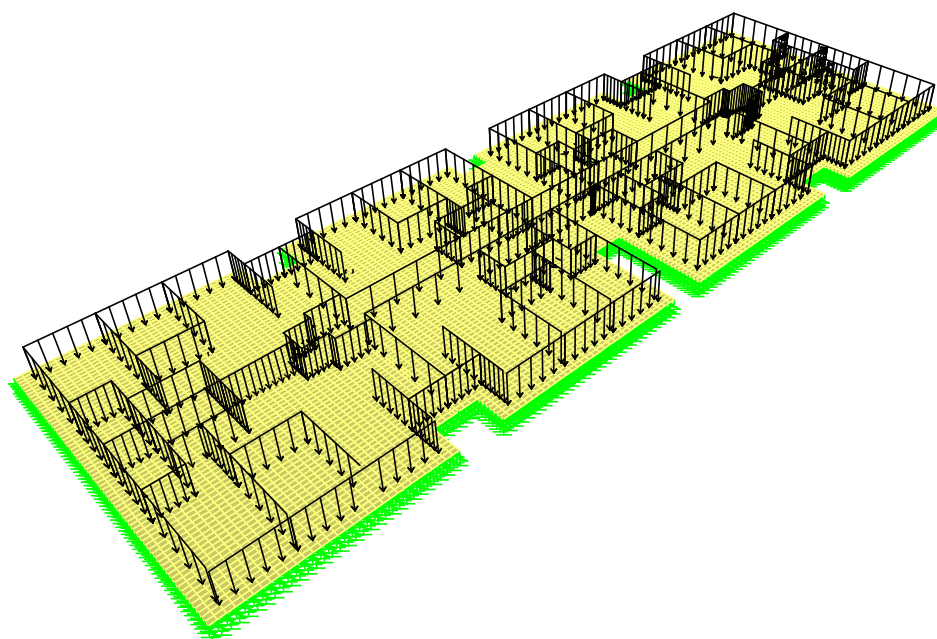
Representa-se na Planta 5 o carregamento para a análise numérica simulado, considerando os apoios rígidos, na Planta 6 o carregamento do radier, representando a primeira análise, a qual não considera existe a interação solo-estrutura, no modelo não há consideração da rigidez da estrutura, o que delimita o modelo a uma análise preliminar as demais.

Planta 5 - Carregamento do radier, simulação com apoios indeslocáveis



Fonte: O Autor (2021).

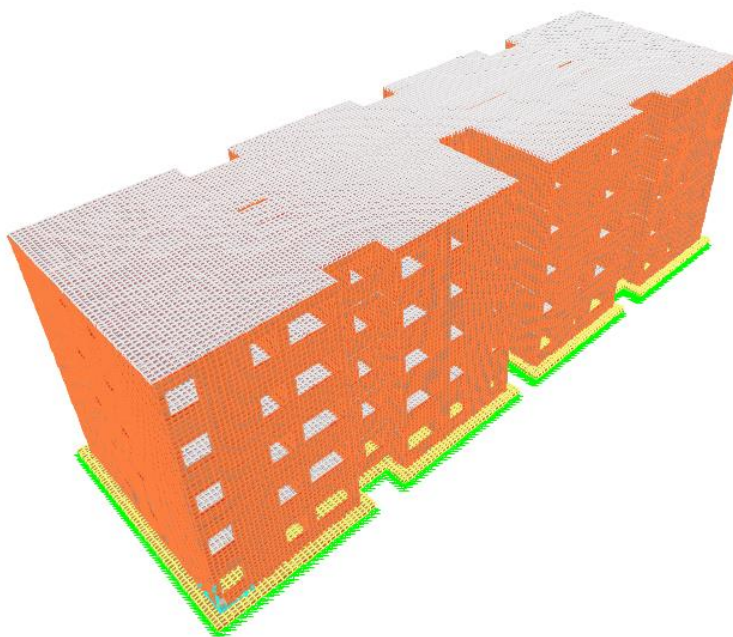
Planta 6 - Disposição do carregamento linear do radier para primeira análise



Fonte: O Autor (2021).

A simulação da segunda análise ocorre de forma instantânea, sendo exemplificado na Figura 39, a representação da análise numérica com consideração da rigidez da estrutura sem estágios construtivos.

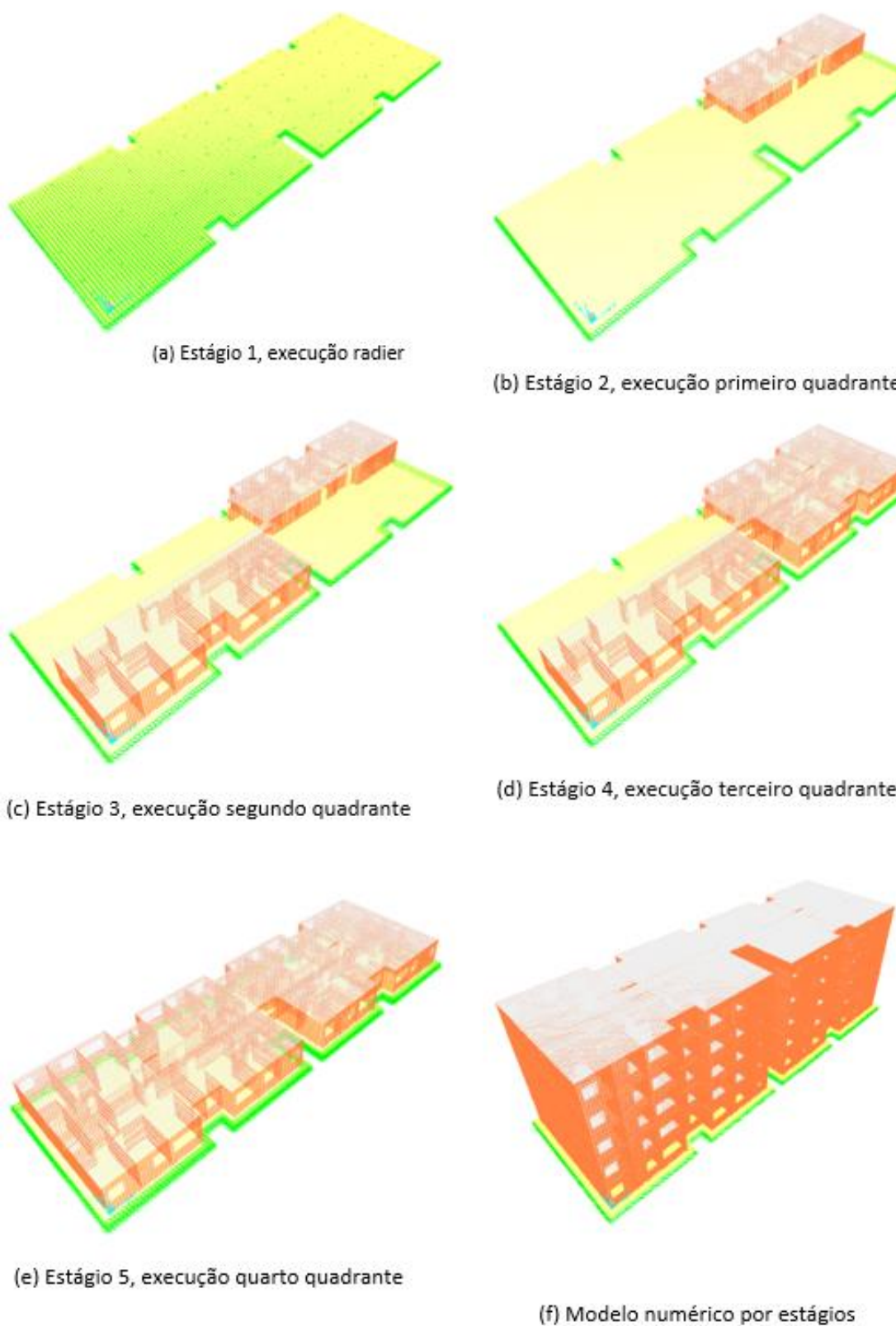
Figura 39 - Estrutura referente a segunda análise



Fonte: O Autor (2021).

Está representado nas Figuras 40 (a-e), o processo construtivo aplicado a terceira análise, as ilustrações são referentes a construção do pavimento térreo, o processo construtivo é considerado para toda a estrutura até o quinto e último pavimento. A análise numérica empregado a terceira análise é considerado como o mais realista, para representação do comportamento da interação solo-estrutura.

Figura 40- Análise numérica por estágios, (a) Estágio 1, (b) Estágio 2, (c) Estágio 3, (d) Estágio 4, (e) Estágio 5, (f) Modelo por estágios



Fonte: O Autor (2021).

4.4 RETROANÁLISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO

As propriedades do solo foram definidas com base no emprego de valores medidos no monitoramento feito na fundação, sendo esses valores referência para as propriedades de rigidez e coeficiente de mola entre radier-solo. Já as propriedades ligadas à interação solo-estrutura, correspondentes à estaca-solo, partiram da análise do ensaio de prova de carga feito para uma estaca modelo.

Assim o capítulo traz as propriedades elásticas do solo para os dois elementos presentes na fundação, tanto radier quando para estaca. Considera-se que os deslocamentos da estrutura de fundação têm como fatores relevantes o carregamento da oriundo da superestrutura, forma da estrutura de fundação e as propriedades do maciço.

4.4.1 Análises do módulo de elasticidade

Por meio dos dados do monitoramento da fundação e estimativa do carregamento da superestrutura, através da Equação 6, referenciada anteriormente na revisão da literatura é possível estimar o módulo de elasticidade por retroanálise.

A profundidade/embutimento (I_d) foi considerada igual a 1, considerando os radiers executados na cota de terraplano, o valor do coeficiente de Poisson utilizado foi de 0,3, considerando o solo como arenoso.

Um dado importante é a cota de profundidade rígida (h), como ilustra a Figura 29, indicado a consideração para a sua escolha valores com $N_{spt} > 30$ golpes/30, como no maciço em estudo não se tem essa resistência de N_{spt} , foi utilizado como base rígida o maior N_{spt} encontrado no perfil, presente na cota de 16 m de profundidade.

Para obtenção dos fatores $I_s I_h$, ainda é necessário estabelecer o fator m que é determinado pela relação entre as dimensões do radier a e b , sendo $m = a/b$, para o estudo de caso o fator m foi considerado igual a 3.

Com a determinação da altura rígida (h) e o fator m , é possível através de Harr (1966), determinar os fatores $I_s I_h$ indicados na Tabela 12, lembrando que os dados determinados consideram a placa do radier como elemento rígido.

Tabela 12 - Valores de $I_s.I_h$ para carregamentos na superfície ($I_d = 1$) de um meio de espessura finita

h/a	b/a						
	1	2	3	5	7	10	∞
0,2	0,096	0,098	0,098	0,099	0,099	0,099	0,1
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	0,91	0,952	0,964	0,982	1,018
5	0,8	1,01	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	0,875	1,155	1,309	1,475	1,556	1,619	1,758
∞	0,946	1,3	1,527	1,826	2,028	2,246	∞

Fonte: Harr (1996).

4.4.2 Coeficiente de reação vertical e coeficiente de mola do solo-radier

Como a modelagem do solo é baseada através da hipótese de Winkler, é necessário determinar as propriedades que representam a elasticidade do solo, sendo elas o coeficiente de reação vertical (K_v) e consequentemente o coeficiente de mola para o solo (K_{mo}).

Através do módulo de elasticidade determinado por retroanálise, foi possível determinar também o coeficiente de reação vertical (K_v) por retroanálise, através da Equação 15 descrita na revisão literária.

$$K_v = \frac{E}{WB.(1-\nu^2).I_s.I_h.I_d} \quad (15)$$

O coeficiente de mola (K_{mo}) é obtido com base na relação entre a área da fundação e o coeficiente de reação vertical, segundo a Equação 7.

$$K_v = \frac{K_{mo}}{A_f} \quad (7)$$

A metodologia discutida para os coeficientes K_v e K_{mo} , está relacionada as propriedades elásticas entre o radier e o solo. As relações entre as estacas e o solo, terá como base o ensaio de prova estática realizado em campo, e por meio de equações aproximadas

com as características dos perfis de sondagens, em seguida será descrito a metodologia para determinação dessas propriedades.

4.4.3 Determinação do coeficiente de mola para as estacas-radier

Para os cenários que consideram apoios elásticos lineares nas estacas, o coeficiente de mola (K_{me}), em $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$, foi determinado pela equação 10, adaptada da Lei de Hooke, que expressa o valor do coeficiente pela razão entre a carga (F), em kN, e o recalque (Z), em m, das estacas (ANTONIAZZI, 2011).

$$K_{me} = \frac{F_v}{z} \quad (10)$$

O coeficiente de reação vertical e mola para as estacas foram realizados na aplicação do trabalho por meio de equações aproximadas descritas na revisão bibliográfica desse trabalho. Os resultados foram aplicados para a representação da rigidez entre a estaca e o radier. Em termos de comparação os parâmetros também foram analisados por meio do ensaio de prova estática.

A carga (F_v) corresponde a carga média por estaca e seu valor foi estimado pela razão do carregamento total da edificação pelo número total de estacas. O recalque (z), correspondente a carga (F), foi estimado através de uma interpolação dos dados da curva Carga x Deslocamento, obtida através dos resultados do ensaio de Prova de Carga Estática (PCE) realizado em campo, durante a fase de execução da obra.

Na Tabela 13 foram reunidas as informações do ensaio de PCE, necessárias para a realização do ajuste de curvas pretendido.

Tabela 13 - Resultados do ensaio PCE

Estágio	Carga (F) (kN)	Deslocamento (Z) (10^{-3} m)
1º	100	0,43
2º	200	1,12
3º	300	1,92
4º	400	2,94
5º	500	4,82
6º	600	15,60
7º	700	48,05

Fonte: construtora (2021).

A realização de 10 estágios de carregamento sucessivos com carga aplicada na estaca variando de 100 a 1000 kN foi previsto no Programa de Carregamento da estaca ensaiada. Diferente do esperado, o ensaio de Prova de Carga foi interrompido no 7º estágio de carregamento, com carga de 700 kN, devido aos deslocamentos elevados encontrados a partir do 5º estágio.

Para definir a carga de ruptura, Décourt (1995) estabelece o limite de recalque como 10% do diâmetro ou largura da estaca, no caso de estacas de deslocamento. Para o caso em estudo, o recalque máximo aceitável é de 26,5 mm, correspondente a 10% do lado da estaca (26,5 cm), o que justifica a interrupção do ensaio no 7º estágio (MARANGON, 2018).

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados e discussões de análises, sendo relacionados os recalques monitoramentos, com as análises feitas por meio dos modelos numéricos com e sem a interação solo-estrutura.

Os resultados estão apresentados conforme a seguinte sequência no texto: resultados dos parâmetros geotécnicos por retroanálise, resultados dos recalques previstos e monitorados, resultados da redistribuição de cargas e recalques na fundação e análise do comportamento da fundação para a análise numérica por estágio.

O módulo de elasticidade por retroanálise, assim como os coeficientes de reação vertical (K_v) e coeficiente de mola (K_{mo}), tanto no contato solo-radier quanto na relação estaca-radier, todos definidos por meio dos deslocamentos medidos em campo.

As análises e avaliações do radier são feitas através do comportamento dos pinos de monitoramento em relação ao monitoramento da estrutura e modelos numéricos, mostra-se assim o desempenho da estrutura para cada estágio construtivo. As análises do comportamento e redistribuição de esforços e recalques das estacas, foram feitas através dos modelos numéricos, mostrando o desempenho da estrutura para cada análise numérica considerado.

5.1 RESULTADOS DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO SOLO

Os parâmetros geotécnicos referenciados e gerados a seguir foram usados como dados na representação do maciço de solo nos modelos numéricos analisados. Os parâmetros são gerados para o contato entre o maciço de solo e o radier, e também para o contato entre as estacas e o radier.

O procedimento de cálculo para o módulo de elasticidade do solo, coeficiente de reação vertical e coeficiente de mola, foram realizados por retroanálise com os dados medidos no monitoramento, mostrando uma característica mais realista para o modelo de Winkler que representa o solo de maneira elástico linear através do uso de molas.

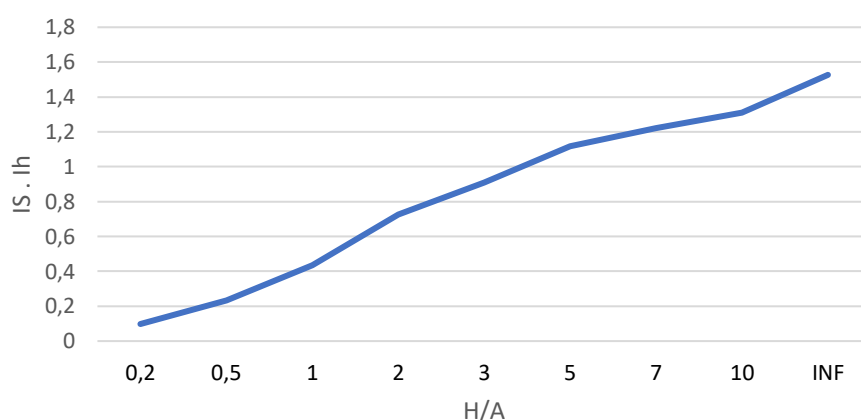
5.1.1 Resultado do módulo de elasticidade com e sem retroanálise

O módulo de elasticidade foi definido por meio de retroanálise dos valores de leituras de recalques medidas em campo. Os valores de tensão e recalque foram utilizados baseados na análise final do estado de tensão e recalque monitorado.

A Equação 6 (ver referencial teórico) possui os fatores de forma $I_s.I_h.I_d$, coeficiente de Poisson (ν), menor dimensão da função, recalque da estrutura e carregamento, como parâmetros de entrada.

O fator de embutimento I_d foi considerado igual a 1. Utilizou-se a curva do Gráfico 7 com valores indicados por Harr (1966) para a determinação dos fatores $I_s.I_h$, considerando o fator de relação entre as dimensões do radier, $m=3$, $H/A=0,8$, obtendo assim um fator de $I_s.I_h$ igual a aproximadamente 0,35.

Gráfico 7 - Fatores $I_s.I_h$ indicados por Harr (1966), para $m=3$



Fonte: O Autor (2021).

Na Tabela 14 são apresentados todos os valores de entrada para obtenção do módulo de elasticidade por retroanálise, juntamente com seu valor expresso em KN/m^2 , os valores têm as características do solo da região em estudo, tido como arenoso. Outro fator relevante está relacionado a forma do radier, tendo influência direta no resultado.

Tabela 14 - Valores de entrada, junto ao módulo de elasticidade por retroanálise

MÓDULO DE ELASTICIDADE POR RETROANÁLISE	
PARAMETROS	VALORES
Q (KN/m^2)	58,483
ν (coef. Poisson)	0,300
W (m)	0,012
I_d	1,000
$I_s.I_h$	0,350
B (m)	13,400
E_s (KN/m^2)	20799,995

Fonte: O Autor (2021).

Com base no estudo do solo por sondagens a percussão do tipo SPT, estimou-se o módulo de elasticidade do solo utilizando método de Teixeira e Godoy (1998), conforme mencionado no item 2.

Os valores de K (MPa) e α foram determinados de acordo com as características dos materiais que compõe o maciço de solo. Em seguida, determinou-se o Nspt médio de cada camada do perfil geotécnico, sendo assim determinado o módulo de elasticidade de forma literária para cada camada. Posteriormente, no cálculo final, se considera a ponderação dos valores de Es entre os perfis do solo. A Tabela 15 as características do perfil do solo juntamente com o procedimento de cálculo.

Tabela 15 - Procedimento de cálculo, módulo de elasticidade Teixeira e Godoy (1998)

MÉTODO DE TEIXEIRA E GODOY (1998)					
CARACTERISTICA POR CAMADA	PROFUNDIDADE DA CAMADA	MÉDIA NSPT	K (Mpa)	α	Es POR CAMADAS (MPa)
AREIA FINA E MÉDIA, SILTOSA, COM POUCA MATÉRIA ORGANICA, CINZA ESCURA, FOFA A C/POUCO COMPACTA (ATERRO)	1,68	4,5	0,7	3	9,45
AREIA FINA E MÉDIA, SILTOSA, COM POUCA MATÉRIA ORGANICA, CINZA ESCURA, FOFA A CPOUCO COMPACTA	3,32	3,4	0,7	3	7,14
AREIA FINA E MÉDIA, SILTOSA, CINZA CLARA, MEDIAMENTE COMPACTA	2,5	15,33	0,7	3	32,2
AREIA FINA E MÉDIA, SILTOSA, COM POUCA MATÉRIA ORGANICA, CINZA ESCURA, MUITO MOLE	2,5	0,043	0,7	3	0,09
ARGILA ORGANICA, SILTOSA, COM POUCA AREIA FINA, POUCOS FRAGMENTOS DE CONCHAS, CINZA ESCURA, MUITO MOLE.	2,9	0,03	0,25	7	0,06
AREIA FINA, SILTOSA, POUCO SILTOSA, COM MATERIA ORGANICA, CINZA ESCURA, MUITO MOLE.	0,8	2	0,7	3	4,2
AREIA FINA E MÉDIA, SILTOSA, CINZA CLARA, COMPACTA	4,3	20,25	0,7	3	42,52
Es (KN/M²)	17040,58972				

Fonte: O Autor (2021).

5.1.2 Resultado do Coeficiente de Reação Vertical (K_v) e Coeficiente de Mola (K_{mo}) para o contato radier-solo

Através do módulo de elasticidade obtido por pela retroanálise, foi possível calcular o coeficiente de reação vertical, aplicando a Equação 15 (ver item 3). Como uso da equação por retroanálise é possível estimar valores de coeficiente de reação e coeficientes de mola para o contato solo-radier, de modo que as dimensões do radier sejam levadas em consideração.

O coeficiente de mola obtido por retroanálise é calculado com a Equação 7 (ver item 3), que consiste no produto entre o coeficiente de reação vertical (K_v) e a área de contato entre o solo e o radier. Vale ressaltar que a área de influência de cada nó onde haverá aplicação de sua respectiva mola é definido na modelagem.

Outro processamento foi realizado de maneira semelhante aos cálculos dos coeficientes de reação vertical e mola, sem retroanálise, com diferença na aplicação do módulo de elasticidade, que foi o encontrado pelo modelo de Teixeira e Godoy (1998). Criando parâmetros baseados em equações literárias para o mesmo caso de obra, a intenção é estimar para o caso em estudo uma relação entre as duas metodologias. Vale ressaltar que foi considerando a retroanálise com as medidas em campo nos dados utilizados para representação do maciço do solo.

5.1.3 Resultados da relação entre os parâmetros geotécnicos com e sem retroanálise

Está apresentado na Tabela 16 os resultados das duas aplicações, assim como um coeficiente de relação entre as duas formas de cálculo dos parâmetros.

Tabela 16 - Valores dos parâmetros geotécnicos com e sem retroanálise

PARAMETROS GEOTÉCNICOS COM E SEM RETROANÁLISE			
MODELO DE CÁLCULO	E_s (KN/m ²)	K_v (KN/m ³)	K_{mo} (KN/m)
COM RETROANÁLISE	20799,9946	4873,59	252,4284
SEM RETROANÁLISE	17040,5897	3992,734	206,8044
RELAÇÃO ENTRE METODOS	1,220614717		

Fonte: O Autor (2021).

Nota-se um aumento nos valores dos parâmetros geotécnicos quando a retroanálise foi considerada. Dessa forma, a relação entre os valores analisados com e sem a retroanálise

mostra-se relevante para o meio acadêmico, assim como de grande aplicabilidade prática para demais obras e empreendimentos na região.

As análises podem ser expandidas para outros fatores que norteiam a problemática sobre as variáveis que podem influenciar os valores dos parâmetros geotécnicos, como dimensões das fundações, número de pavimentos ou magnitude do carregamento, entre outras causas.

5.1.4 Resultado do Coeficiente de Reação Vertical (K_v) e Coeficiente de Mola (K_{mo}) para o contato radier-estaca

Os parâmetros geotécnicos, em relação ao contato estaca-radier, foram gerados em duas etapas. A primeira etapa está relacionada com as Equações 19 e 20 (ver item 2), onde foi possível obter os coeficientes de reação vertical devido o contato lateral e de pontas das estacas. Esses esforços têm o fluxo de tensão contrário aos deslocamentos do radier, sendo assim responsável pela grandeza que representa a rigidez entre o radier e o solo. Está disposto na Tabela 17 os valores e relações para obtenção dos coeficientes de reação vertical (K_v) e coeficiente de mola (K_{mo}) para cada camada.

O valor de coeficiente de mola (K_{mo}) está relacionado com a média entre os chamados do solo. A nível de comparação, foi exposto três valores médios para as profundidades de 16,17 e 18 metros de profundidade, sendo a cota de 18 metros a utilizada como profundidade rígida da estaca.

A segunda etapa está ligada à prova de carga estática da estrutura, sendo feita uma interação entre o modelo anterior trabalhado e o ensaio. As cargas da análise numérica com os primeiros coeficientes são usadas para estimar os recalques para cada estaca e consequentemente gerar um novo coeficiente de mola.

Com a realização do processo, notou-se a convergência dos valores dos parâmetros para o modelo de equações aproximadas anteriormente usado. Os resultados em termos de cenários de cargas e recalques do modelo criado não foram afetados.

Nota-se que a rigidez relativa entre a estaca-radier é maior em amplitude que as rigidez relativa entre a solo-radier, tal fato pode ser comprovado na função de aplicação das estacas no sistema radier estaqueado, sendo projetada para conter principalmente os recalques e a maior parte da carga oriunda da estrutura.

Tabela 17 - Valores de coeficientes de reação vertical e mola, para representação da rigidez relativa estaca-radier

CORRELAÇÕES COM AS PROPRIEDADES DE SOLOS ARENOSOS (AREIAS)									
PROFUNDIDADE	NSPT	NH (KGF/M3)	NH (KN/M3)	KH (KN/M3)	AI=B*L (M2)	KMH=KH*AI (KN/M)	KV=KH/V (KN/M3)	AI=B*L (M2)	KMO=Kv*AI (KN/M)
0	-	-	-	1832,0	0,133	242,7	6106,6	0,133	809,1
1	3	0,05	468,98	1832,0	0,265	485,5	6106,6	0,265	1618,2
2	6	0,08	819,85	6405,1	0,265	1697,3	21350,2	0,265	5657,8
3	7	0,10	963,66	11292,9	0,265	2992,6	37643,0	0,265	9975,4
4	0,212	0,03	301,97	4718,3	0,265	1250,3	15727,7	0,265	4167,8
5	3	0,05	468,98	9159,8	0,265	2427,4	30532,8	0,265	8091,2
6	16	0,26	2623,00	61476,6	0,265	16291,3	204922,0	0,265	54304,3
7	15	0,24	2415,79	66056,9	0,265	17505,1	220189,6	0,265	58350,2
8	15	0,24	2415,79	75493,6	0,265	20005,8	251645,2	0,265	66686,0
9	0,050	0,03	300,17	10552,8	0,265	2796,5	35176,1	0,265	9321,7
10	0,037	0,03	300,10	11722,7	0,265	3106,5	39075,8	0,265	10355,1
11	0,019	0,03	300,03	12892,1	0,265	3416,4	42973,5	0,265	11388,0
12	0,05	0,03	300,17	14070,4	0,265	3728,7	46901,5	0,265	12428,9
13	2	0,04	386,41	19622,4	0,265	5199,9	65408,1	0,265	17333,1
14	14	0,22	2212,83	121014,3	0,265	32068,8	403381,0	0,265	106896,0
15	21	0,37	3707,51	217236,9	0,265	57567,8	724123,0	0,265	191892,6
16	22	0,39	3931,57	245723,2	0,265	65116,7	819077,5	0,265	217055,5
17	24	0,44	4384,49	291157,5	0,265	77156,7	970525,1	0,265	257189,2
18	5	0,07	688,23	48391,3	0,133	6411,8	161304,2	0,133	21372,8
Kmo MÉDIO A 16 M						46254,8			
Kmo MÉDIO A 17 M						57973,3			
Kmo MÉDIO A 18 M						56047,0			

Fonte: O Autor (2021).

5.2 RESULTADO DOS RECALQUES PREVISTOS E MONITORADOS

O estudo sobre o comportamento dos recalques organizou-se da seguinte forma: recalques estimados através de anteprojeto executado, recalques previstos com e sem consideração da ISE, e os recalques medidos em campo. Todos os deslocamentos analisados e comparados neste capítulo, estão relacionados a estrutura de fundação.

5.2.1 Resultados dos recalques monitorados

O monitoramento de recalques ocorreu para os blocos “03” e “08”. Os recalques para o bloco 03 variaram de -8 mm a 3 mm, já os deslocamentos do bloco 08 apresentaram uma amplitude de -12 mm a 2 mm.

Para os dois blocos foram feitas leituras diárias ao longo dos estágios construtivo sem relação aos oito pinos (pontos de monitoramento). Além do comportamento de cada pino por estágios, também foi verificada as relações entre valores mínimos, máximos, médios e a amplitude de trabalho para cada pino.

- *Evolução de recalques do bloco 03*

A evolução dos recalques nos pinos de monitoramento, instalados em campo, ao longo de cada estágio construtivo. Foram ao todo realizadas 21 leituras. Os dados são expressos em milímetros na Tabela 18 para o bloco 03.

Ao analisar o comportamento dos pinos ao longo da evolução da sequência construtiva, notou-se um comportamento singular para cada ponto monitorado da estrutura de fundação. As análises seguintes evidenciam os deslocamentos com o passar do tempo para os pinos de monitoramento do bloco 03.

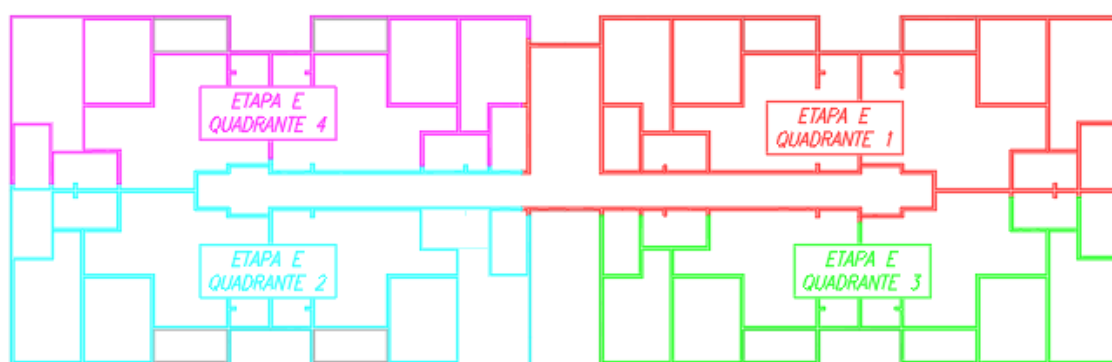
O processo construtivo se deu por estágios, sendo o método construtivo executado em quatro estágios por pavimento, como mostra a Planta 7. As concretagens seguiram em estágios diagonais na ordem: primeiro, segundo e terceiro quadrantes. O processo de concretagens sequenciais foi de extrema importância para o comportamento da estrutura de fundação no caso monitorado.

Tabela 18 - Resultado dos recalques para cada pino de monitoramento, Bloco 03

RECALQUES BLOCO 03 (mm)																					
PINOS	LEITURAS POR ESTÁGIOS DA OBRA																				
	EST 1	EST 2	EST 3	EST 4	EST 5	EST 6	EST 7	EST 8	EST 9	EST 10	EST 11	EST 12	EST 13	EST 14	EST 15	EST 16	EST 17	EST 18	EST 19	EST 20	EST 21
1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	2	1	1	0	-2	-1	0	0	0	0	0	0
2	0	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-4	-2	-1	-2	-2	-2
3	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	0	0	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2
4	0	-1	-1	0	-2	-1	-2	-2	-2	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-2	-1	-1	-1	-2	-2
5	0	0	0	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	0	1	1	1	-	3	3	3
6	0	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	1	1	-	1	3	3
7	0	-1	-1	-2	-4	-4	-5	-5	-6	-6	-6	-6	-5	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-5
8	0	-6	-6	-7	-5	-8	-7	-7	-7	-7	-7	-6	-7	-8	-7	-6	-7	-7	-7	-7	-7

Fonte: O Autor (2021).

Planta 7 - Sequência construtiva e localização de quadrantes

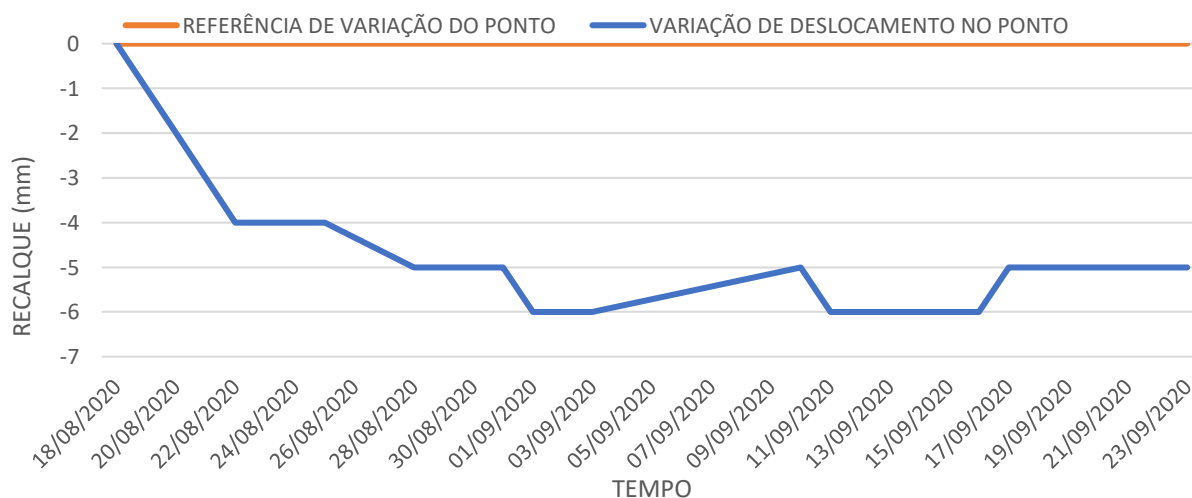


Fonte: O Autor (2021).

Nas Gráficos 8 e 9 são apresentados os deslocamentos dos pinos de monitoramento correspondentes ao primeiro quadrante do radier, que são governados pelos recalques medidos ao longo do tempo para nos pinos 07 e 08. Os dois pontos tiveram seu comportamento parecido, com amplitudes de 0 mm a -06 mm e 0 mm a -8 mm, para os pinos 07 e 08 respectivamente.

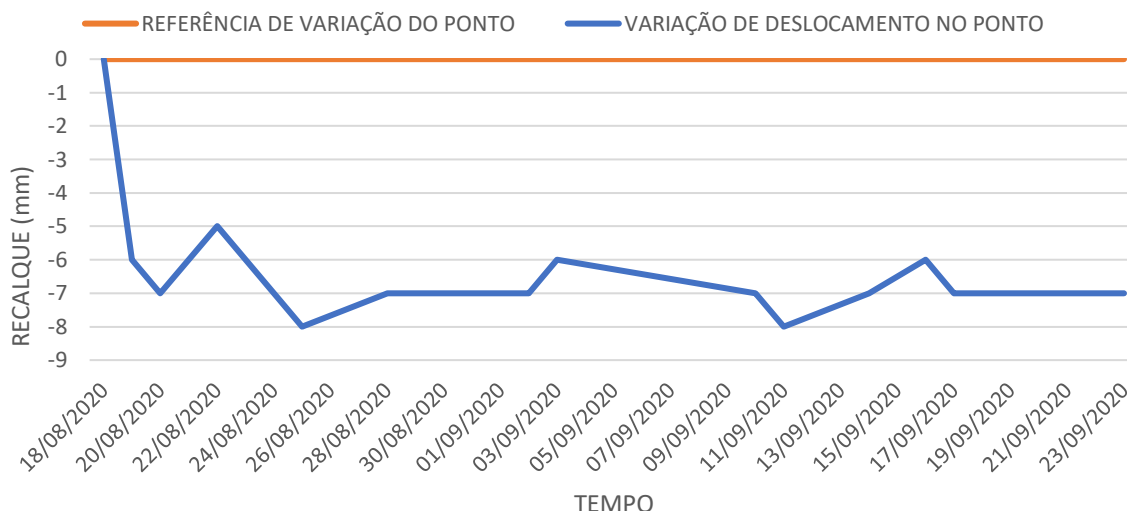
O pino 07 terminou os estágios construtivos medindo um recalque de -5 mm, caracterizando uma baixa na placa do radier nessa região de análise. Já o outro pino do quadrante apresentou uma medição de recalque na ordem de -7 mm, sendo o seu último recalque medido após o carregamento total da estrutura de fundação.

Gráfico 8 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 07 (mm)



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 9 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 08 (mm)

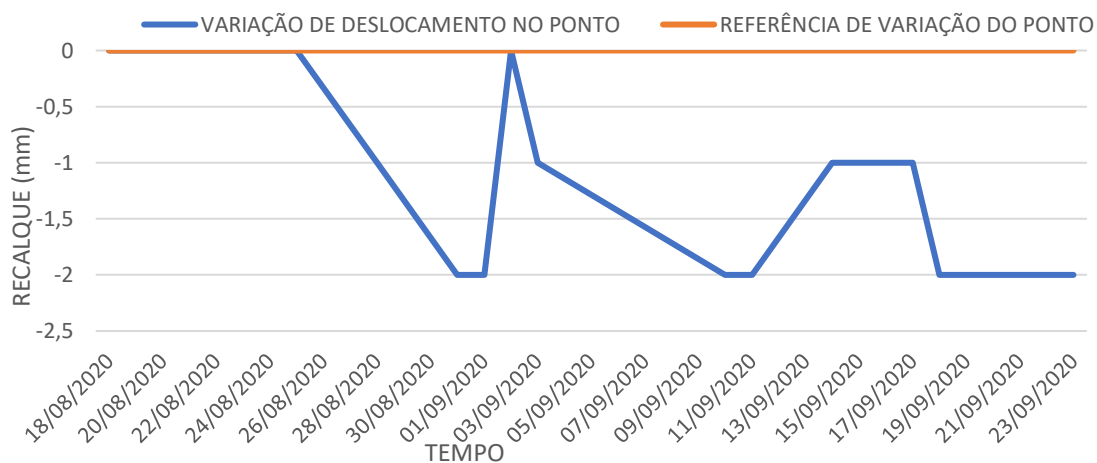


Fonte: O Autor (2021).

O segundo quadrante tem seu comportamento avaliado nos dados gerados devido ao monitoramento dos pinos 03 e 04. Estes pinos possuem um comportamento semelhante, mostrando que para os pinos de mesma região de estágios existem características comuns norteadas ao processo construtivo.

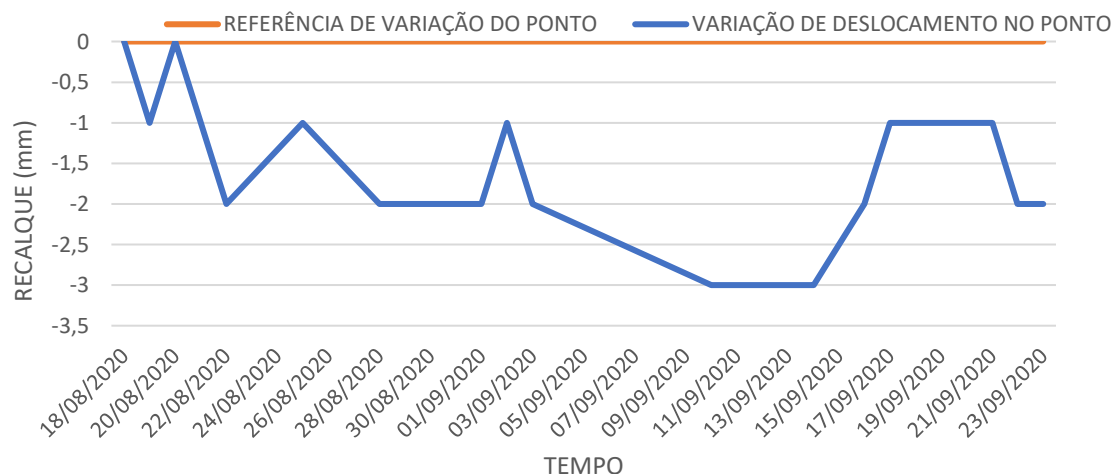
O pino 03 mostrou um comportamento oscilatório entre 0 mm e -2 mm, como mostra a Gráfico 10, a sua amplitude de recalque sendo igual a 2 mm, o pino 03 concluiu o término da estrutura com deslocamento final de -2 mm. Já o pino 04, como mostra a Gráfico 11, tem uma variação de deslocamento de 3 mm, com movimentações entre 0 mm e -3 mm.

Gráfico 10 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 03



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 11 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 04



Fonte: O Autor (2021).

Em análise ao terceiro quadrante, nota-se uma característica de oscilações dos recalques em valores positivos e negativos. Estas variações são governadas pela sequência construtiva, uma vez que os pinos 01 e 02, que norteiam a base de dados de recalque para esse quadrante, estão localizados na fase intermediária das quatro etapas construtivas do processo de concretagem de um pavimento.

Nota-se que para o Pino 01 existe levantamento do radier em boa parte do tempo (Gráfico 12). A estrutura chega a última concretagem com deslocamento vertical igual a zero. A variação de deslocamento do Pino 01 vai de -2 mm a 2 mm, trabalhando em uma amplitude de deslocamento de 4 mm.

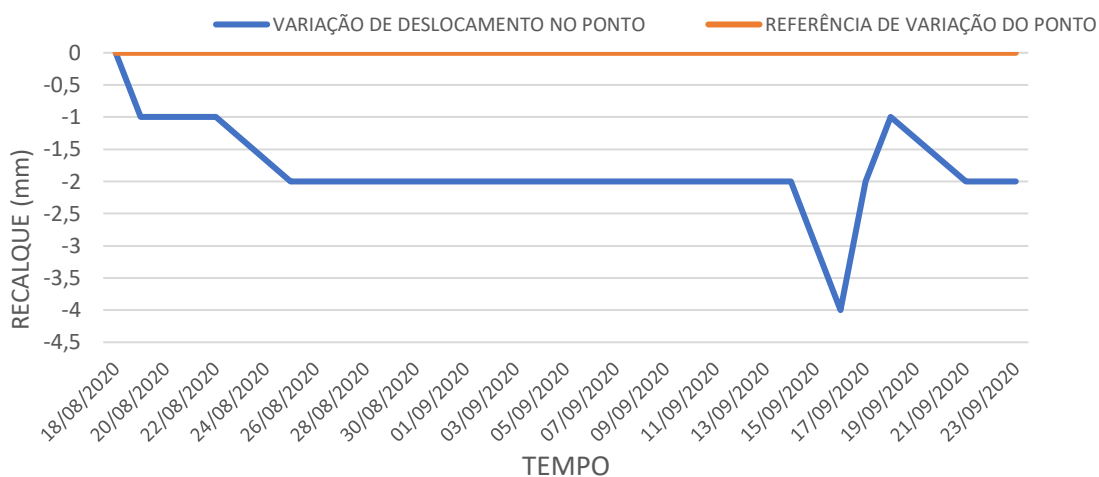
Gráfico 12 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 01



Fonte: O Autor (2021).

Mostra-se na Gráfico 13 o comportamento do pino 02 de referência, ele tem o seu deslocamento sempre abaixo do nível de referência, dessa forma, é possível concluir que o deslocamento é sempre negativo para a referência tomada. Os recalques variam de 0 mm a -4mm, existindo uma amplitude de 4 mm.

Gráfico 13 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 2



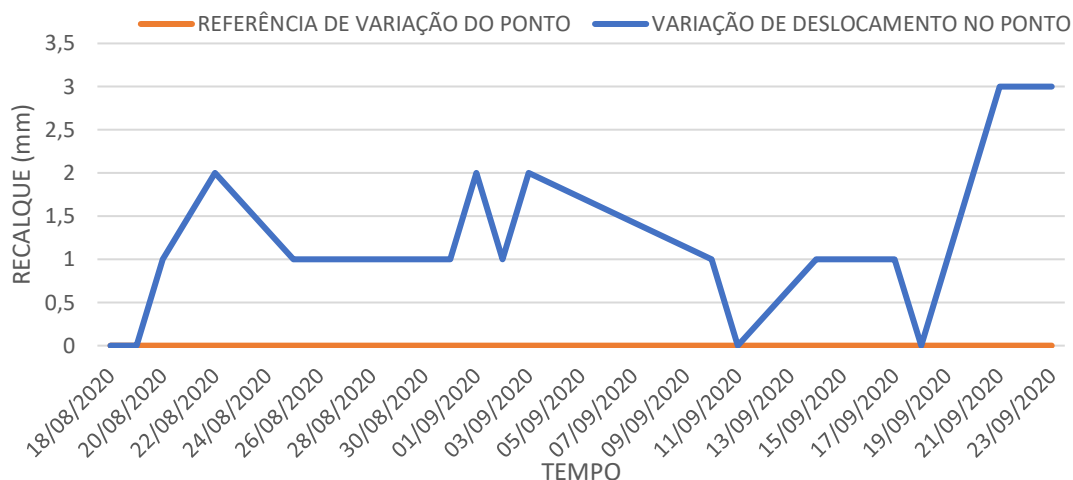
Fonte: O Autor (2021).

Os pinos 05 e 06 estão localizados no quarto quadrante do radier a ser concretado por pavimento, que corresponde a última concretagem executada para todos os carregamentos do radier, explicando o comportamento semelhante dos pontos, ambos mostrando o comportamento de levantamento da estrutura de fundação.

O levantamento da estrutura do radier é notoriamente observado no pino 05. Os deslocamentos para o ponto são todos positivos, variando de 0 mm a 3 mm. Na Gráfico 14 é apresentado o comportamento do pino com o tempo. No fim dos estágios construtivo com o pino 05, caracterizando o comportamento da estrutura como levantado.

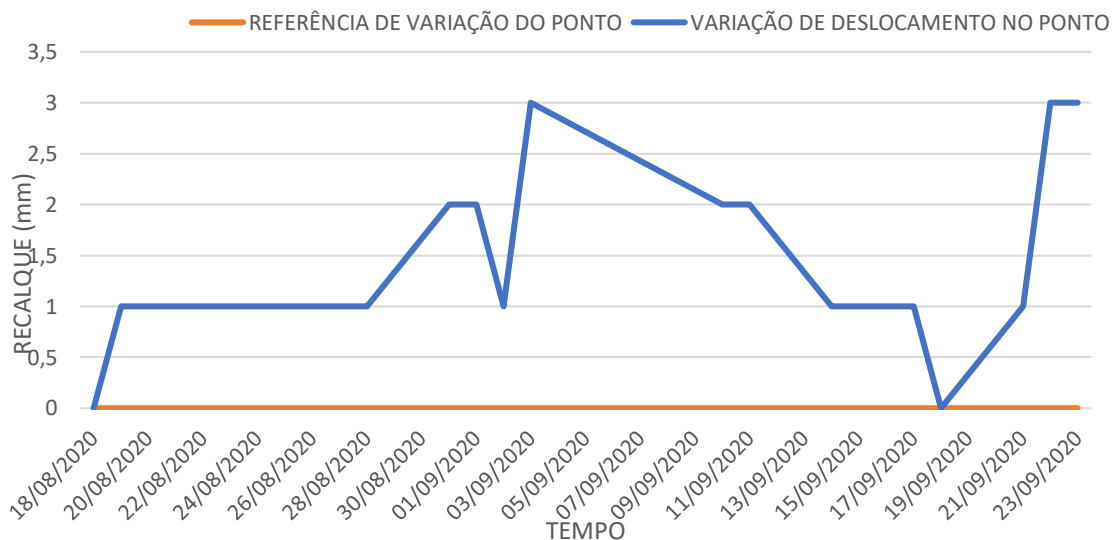
O comportamento do pino 06 está disposto na Gráfico 15. Os deslocamentos variam de 0 mm a 3 mm, de maneira similar ao pino 05. O levantamento da estrutura de fundação no pino 06 foi notada em todo o monitoramento. Ao término das medições o radier permaneceu elevado na posição de 3 mm.

Gráfico 14 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 05



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 15 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 06



Fonte: O Autor (2021).

Os valores mínimos, médios e máximos foram determinados para cada ponto individualmente, com valores mostrados na Tabela 19. Observa-se que os deslocamentos dos pinos 05 e 06 apresentam valores positivos, não só na análise individual dos deslocamentos dos pinos monitorados, mas também em todos os parâmetros estatísticos, comprovando seu comportamento geral, aponta levantamento na estrutura do radier para a região do terceiro quadrante.

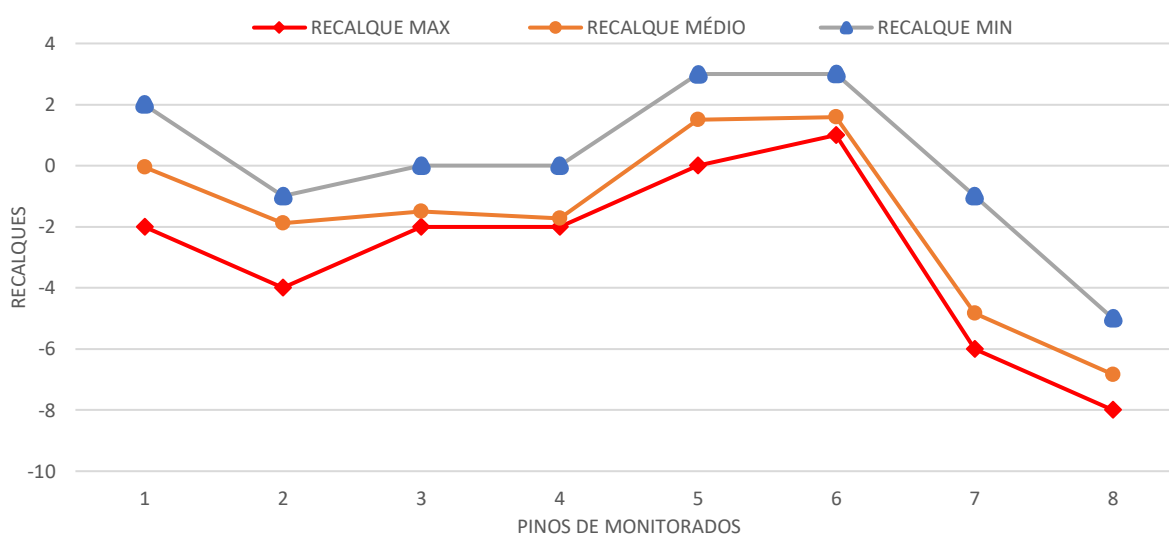
Tabela 19 - Valores de deslocamentos mínimos, médios, máximos, para todos os pinos

RESULTADOS DOS VALORES MIN MEDIOS E MAXIMOS DOS PINOS BLOCO 3			
PINO	RECALQUE MÁX	RECALQUE MÉD	RECALQUE MÍN
1	-2	-0,1	2
2	-4	-1,9	-1
3	-2	-1,5	0
4	-2	-1,7	0
5	0	1,5	3
6	1	1,6	3
7	-6	-4,8	-1
8	-8	-6,8	-5

Fonte: O Autor (2021).

As curvas com o comportamento dos parâmetros estatísticos, deslocamentos máximos, mínimos e médio são apresentadas no gráfico ilustrado na Gráfico 16. Nota-se uma boa aproximação entre as curvas analisadas. Todos os valores estão no entorno da média, os valores ficam um pouco distantes da média para os pinos 01, 02, 07 e 08 que possuem valores maiores de amplitude, comportamento causado pelo processo construtivo. São os pinos com valores de mínimos fora do padrão do restante da curva, com valores positivos no pino 01 e valores muito negativos próximos do máximo, com isso mudando o comportamento da curva de amplitude, contudo o comportamento das curvas ainda mantém a assimetria no geral.

Gráfico 16 - Recalques mínimos, médios, máximos, bloco 03



Fonte: O Autor (2021).

É possível observar a trabalhabilidade da placa de radier através da observação da amplitude dos valores de recalques medidos. A variação entre valores positivos e negativos indica a movimentação dos pinos durante o período de monitoramento e associado a esse movimento, o trabalho da placa de radier.

O monitoramento do bloco 03 representa o comportamento real da estrutura de fundação em radier estaqueado. Para o sistema construtivo parede de concreto, a análise da estrutura em relação aos recalques mostra oscilações para o ponto de origem referenciado, sendo representado pelo eixo zero nas ilustrações usadas, que corresponde a primeira medição.

O radier tem seus deslocamentos variando entre recalques e levantamentos em relação a origem. Os levantamentos ocorreram nos pinos 01, 05 e 06, já os pinos 02, 03, 04, 07 e 08 tiveram seus deslocamentos caracterizados como recalques.

- *Evolução de recalques do bloco 08*

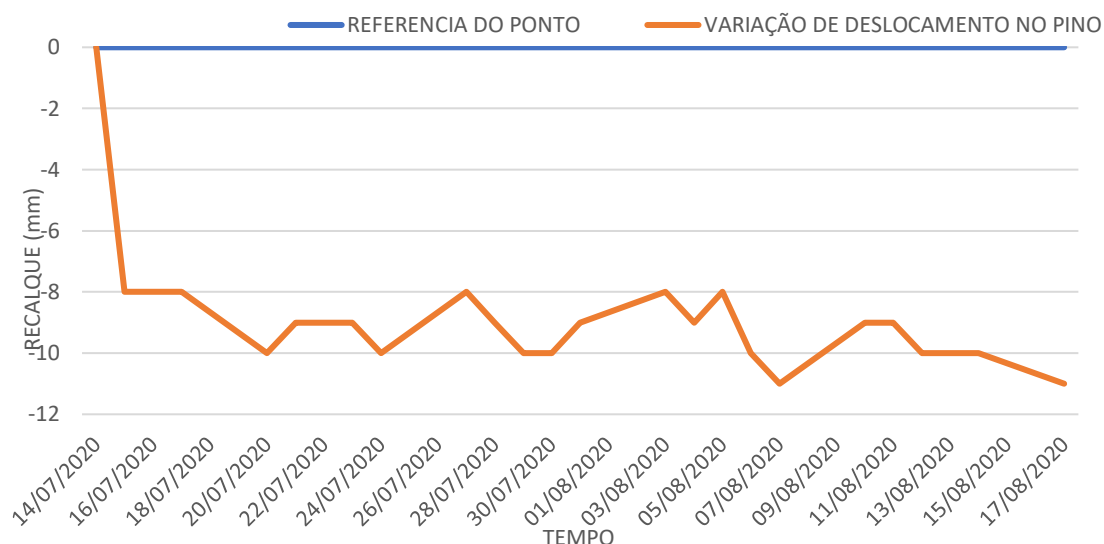
As características construtivas do bloco 08 e as instrumentações do radier são idênticas àquelas do bloco 03. Assim a posição dos pinos de referência, quadrantes, etapas construtivas e pontos de referência inicial (cota 0 mm, estrutura de fundação sem carregamento) são semelhantes.

Está presente na Tabela 39 do Apêndice os resultados do monitoramento em campo, com as respectivas leituras de recalques por estágio de obra, os dados são para os oito pinos de referência estudados.

O primeiro quadrante continua sendo representado pelos pinos 07 e 08. As leituras de recalques variam respectivamente de 0 mm a -11 mm e 0 mm a -12 mm, os pontos de monitoramento tiveram todos os deslocamentos negativos, evidenciando o não levantamento da estrutura de fundação.

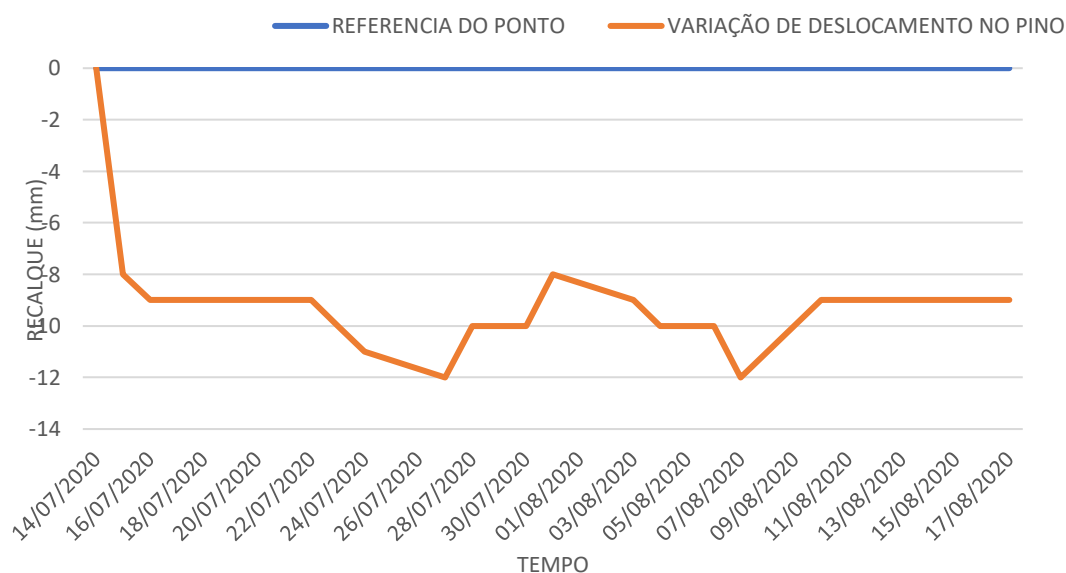
No fim dos estágios construtivos, o pino 07, como mostrado na Gráfico 17, apresentou recalques estabilizados em -11 mm. Nota-se que o ponto teve oscilações entre -8 mm e -11 mm durante a grande maioria dos estágios. Para o pino 08, o comportamento é semelhante, com oscilações variando de -8 mm a -12 mm, sendo a última medição de recalque para o pino de -9 mm, está apresentado na Gráfico 18.

Gráfico 17 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 07



Fonte: O Autor (2021).

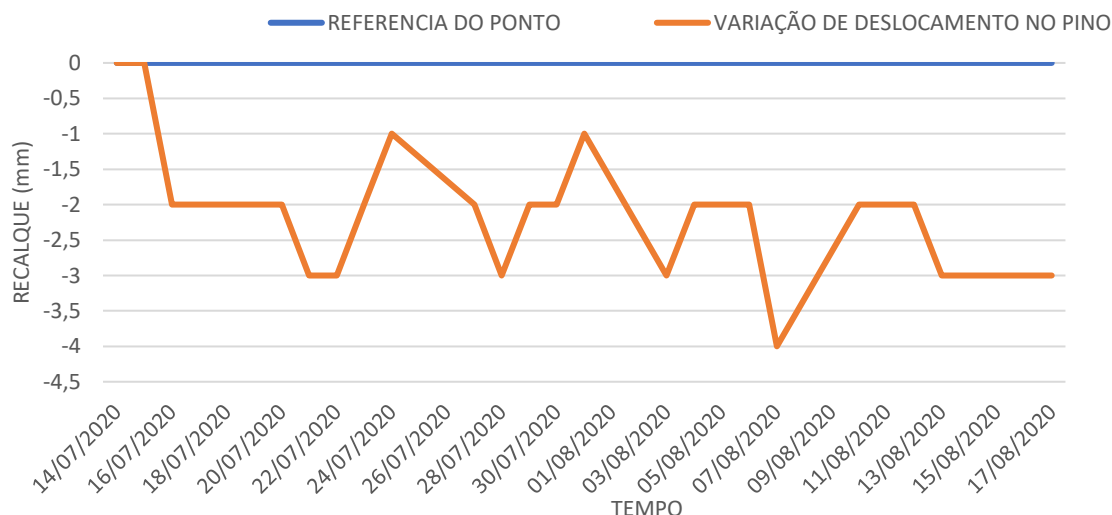
Gráfico 18 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 08



Fonte: O Autor (2021).

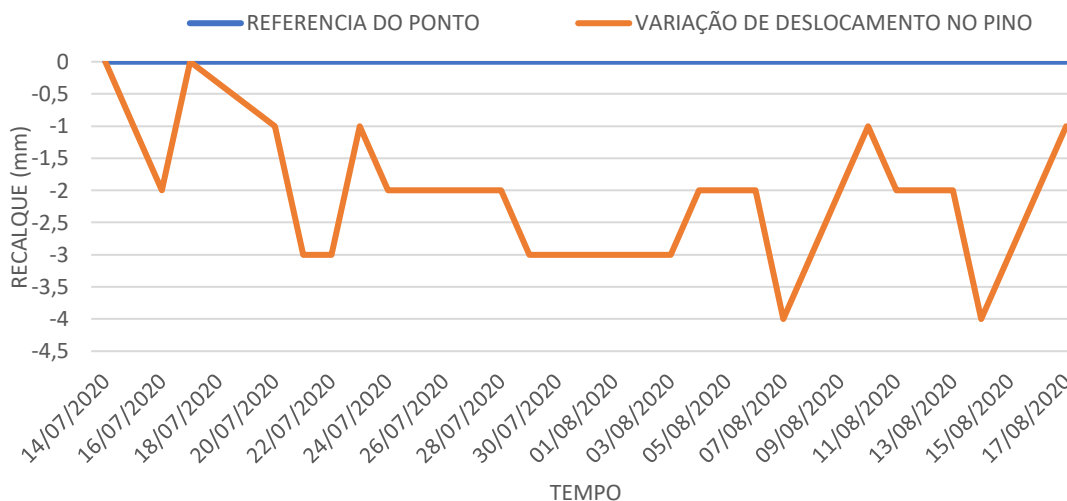
Os pinos 03 e 04, pertencentes ao segundo quadrante, tem comportamentos similares. Todos com características de recalque (valores de deslocamento negativos), ambos oscilando de 0 mm a -4 mm. O pino 03 tem como recalque final a cota de -3 mm, já o pino 04 encerra os estágios construtivos com deslocamento de -1 mm. Mostra-se nas Gráficos 19 e 20 o comportamento dos pinos com a evolução dos estágios.

Gráfico 19 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 03



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 20 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 04



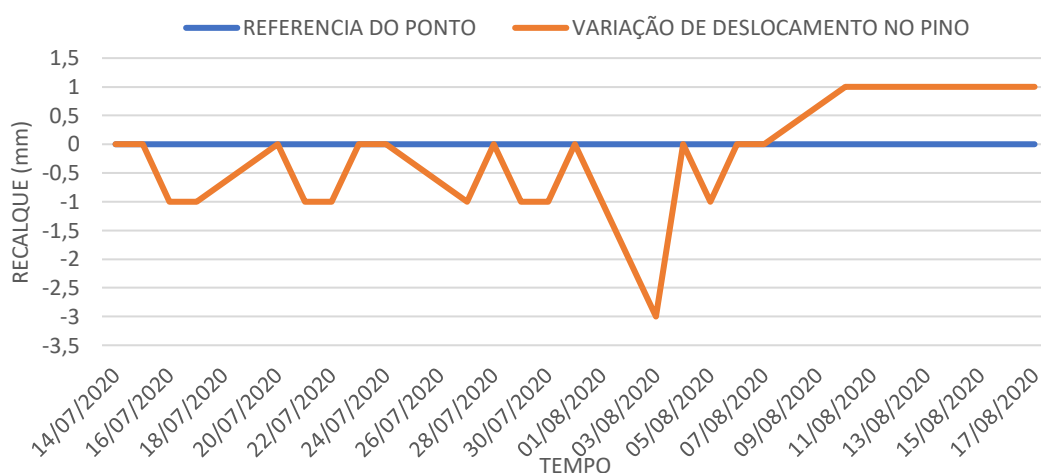
Fonte: O Autor (2021).

Nos Gráfico 21 e 22 é mostrado o comportamento para os pinos “01” e “02”, instrumentados no bloco 08. A locação dos pinos pertence ao terceiro quadrante. Observa-se movimentações de levantamento (deslocamentos positivos) e recalques (deslocamentos negativos) na estrutura do radier. Devido a metodologia construtiva, os pontos pertencem a uma etapa de transição entre as primeiras e últimas concretagens do pavimento, comportamento semelhante aos pinos de mesmo número localizados no bloco 03.

O pino 01 tem variação de deslocamento com amplitude de 4 mm, alternando entre deslocamentos positivos (levantamento) e negativos (recalques). O ponto tem seu comportamento definido por oscilações de 1 mm a -3 mm, como mostrado na Figura 78. A leitura de recalque ao fim da execução da estrutura foi de 1 mm, com indicação de levantamento da estrutura do radier.

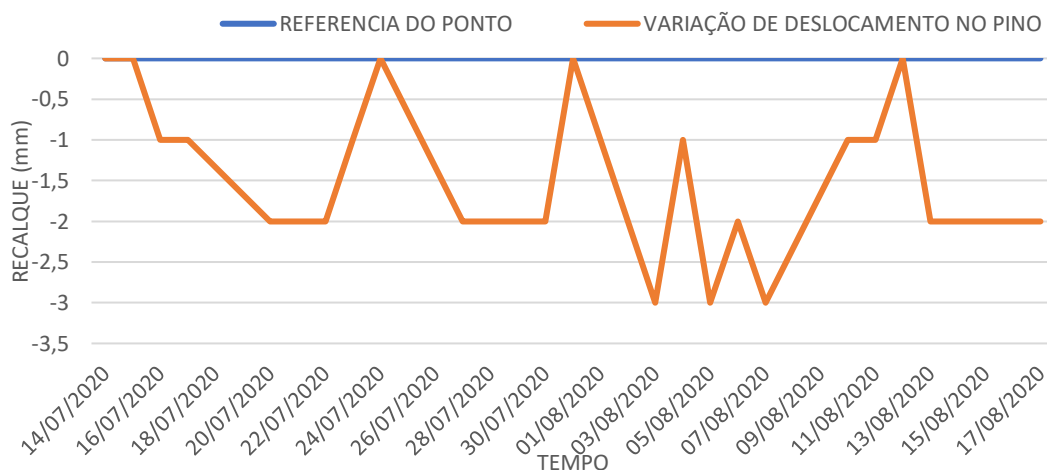
As leituras de recalques para o pino 02, variaram conforme indicado na Figura 79, que mostra deslocamentos máximos e mínimos na ordem de 0 mm e -3 mm, respectivamente. Ao final dos últimos carregamentos na estrutura de fundação, o pino de referência mostra-se estável na cota de referência -2 mm.

Gráfico 21 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 01



Fonte: O Autor (2021).

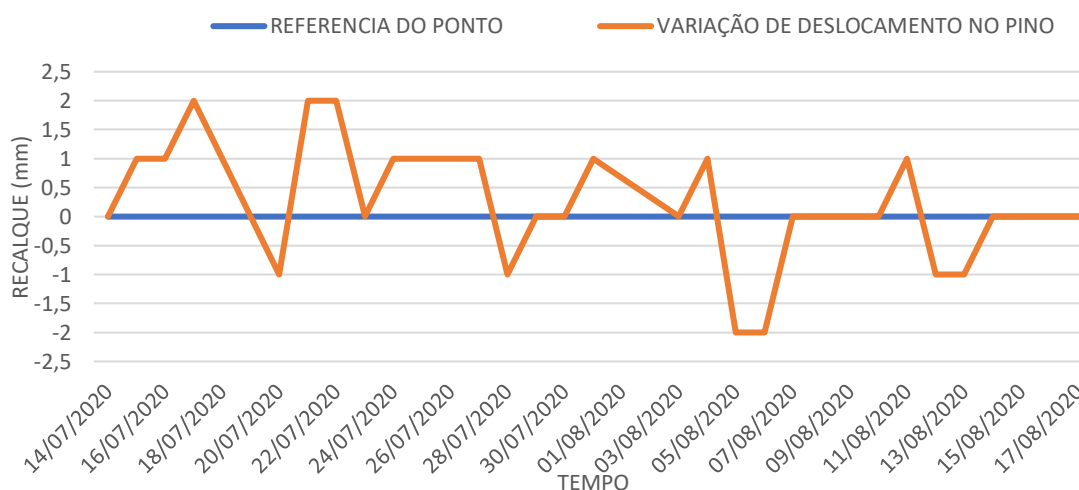
Gráfico 22 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 02



Fonte: O Autor (2021).

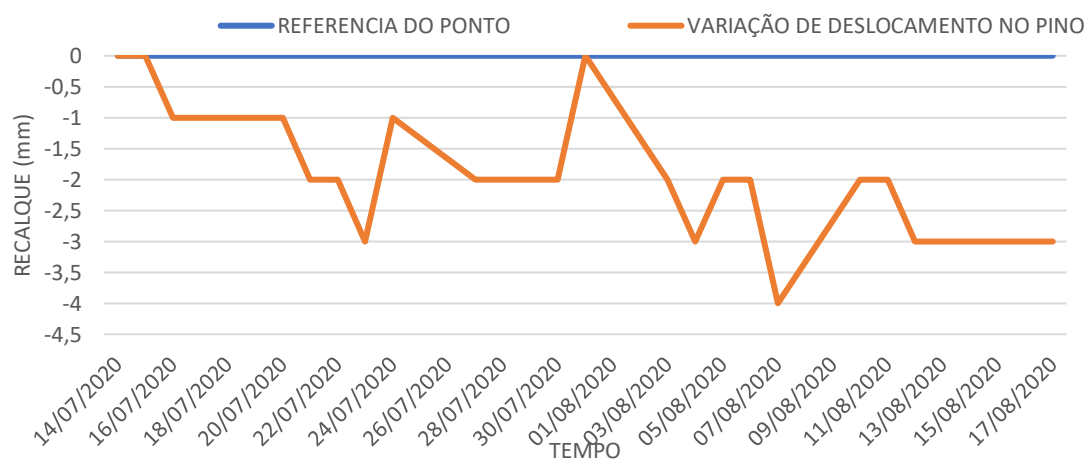
Nos Gráfico 23 e 24 estão mostrados o comportamento do último quadrante na evolução construtiva dos pavimentos. O comportamento é semelhante ao bloco 03. As leituras que representa a base de dados dos recalques da estrutura, são realizadas através dos pinos de referência 05 e 06. Diferentemente dos resultados do bloco 03, as leituras de recalques indicaram que a estrutura, apesar de apresentar levantamentos durante os estágios construtivos, não apresentou levantamentos nas últimas medições de deslocamento. Assim para o terceiro quadrante da fundação, conforme observado nas Figuras 80 e 81, o pino 05 termina na cota de início com 0 mm e o pino 06 encerra com deslocamento negativo, indicando recalque da estrutura com leitura de -3mm.

Gráfico 23 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 05



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 24 - Variação de recalques ao longo do tempo, para o pino 06



Fonte: O Autor (2021).

As leituras de recalque referentes a cada ponto monitorado, possibilitou criar análises em relação aos valores mínimos, médios, máximos e a amplitude de deslocamento em cada pino. Na Tabela 20 é mostrado os valores de cada um desses parâmetros.

Tabela 20 - Valores mínimos, médios, máximos e amplitude para cada pino monitorado

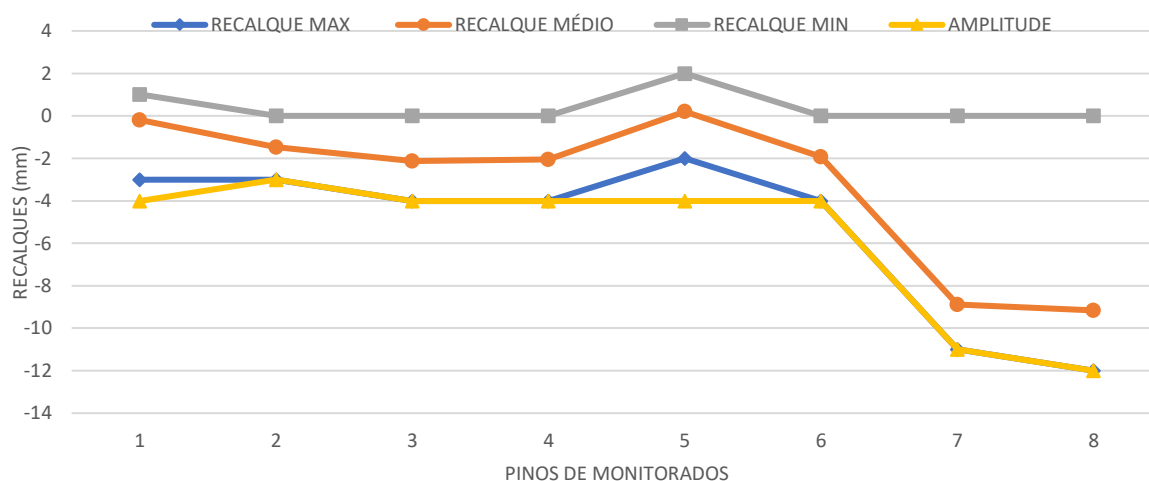
RESULTADOS DOS VALORES MIN MEDIOS E MAXIMOS DOS PINOS BLOCO 8 (mm)				
PINO	RECALQUE MÁX	RECALQUE MÉD	RECALQUE MÍN	AMPLITUDE
1	-3	-0,2	1	-4
2	-3	-1,48	0	-3
3	-4	-2,12	0	-4
4	-4	-2,04	0	-4
5	-2	0,2	2	-4
6	-4	-1,92	0	-4
7	-11	-8,88	0	-11
8	-12	-9,16	0	-12

Fonte: O Autor (2021).

Nota-se na Tabela 20 que as maiores amplitudes de deslocamento estão relacionadas aos pinos presentes no primeiro quadrante, comprovando a relevância da sequência construtiva no desempenho da fundação.

Na Gráfico 25 é mostrado a relação entre os valores médios, mínimos, máximos e amplitude, na forma de gráfico. Observa-se que os valores máximos estão muito próximo da amplitude nos pontos pois temos valores de recalques mínimos próximos do eixo zero. Com os valores mínimos variando de 0 mm a 2 mm (positivo), os recalques médios seguem uma tendência de meio entre os valores mínimos e a amplitude. Os pinos 07 e 08, fogem do comportamento, apresentando valores de recalques com amplitude mais elevada, com seus valores mínimos se distanciando da média.

Gráfico 25 - Relação entre os valores de deslocamentos mínimo, médios, máximos e amplitude, Bloco 08



Fonte: O Autor (2021).

- *Discussões dos resultados do monitoramento*

Em relação as deformações observadas na estrutura de fundação, nota-se uma grande influência da metodologia construtiva no comportamento do radier. Existe uma tendência de que os maiores recalques, para os pinos de referências monitorados, ocorram no quadrante de primeiros estágios, representados pelos pinos 07 e 08, sendo esses os pontos de deslocamentos com maiores amplitudes, tal fato se comprova para os dois blocos instrumentados.

Observou-se dois comportamentos característicos para os pinos situados nos quadrantes intermediarias. Os pinos 01 e 02, pertencentes ao terceiro quadrante, destacam-se por variações entre recalques (leituras negativas) e levantamentos (leituras positivas). Esse fato decorre da transição entre as duas diagonais da sequência construtiva. As distorções são consequência dos altos deslocamentos das primeiras etapas pertencentes a primeira diagonal.

Verifica-se com os dados coletados no monitoramento, uma tendencia a levantamento do radier para os pinos 05 e 06, situados no último quadrante a ser concretado do pavimento, evidenciam uma tendencia a levantamento do radier. Os dois blocos monitorados tiveram o mesmo comportamento em relação a seus quadrantes, desse modo justifica-se a importância do método construtivo, no desempenho da estrutura.

Destaca-se que nos primeiros estágios as variações de recalque são maiores. Isso é notório para todos os pinos observados, tal comportamento indica a influência da rigidez da

superestrutura, pois nota-se uma tendência a menores variações de deslocamentos com o avanço construtivo, consequentemente com o aumento do número de pavimentos existe uma tendência de não distorções na estrutura de fundação.

- *Resultados da influência do número de pavimentos no monitoramento*

Um dos fatores que norteiam os estudos sobre a interação solo-estrutura está relacionado ao número de pavimentos. O presente item relata a relação do número de pavimentos com o comportamento da estrutura observado em campo. Os dois blocos são compostos de cinco pavimentos cada e os pavimentos são concretados em quatro etapas.

Os dados gerados nos oito pinos monitorados tiveram sua variação de deslocamento avaliadas por pavimentos, entende-se assim que cada pino teve uma variação máxima de deslocamento por pavimento, entre o conjunto de quatro estágios que representam o término de construção para um pavimento, sendo a variação máxima de deslocamento a amplitude entre as leituras de monitoramento entre os quatro estágios construtivos. É mostrado na Tabela 21 as variações de deslocamento máximos por pavimento para todos os pinos monitorados. O procedimento foi realizado para os dois blocos monitorados.

Comprova-se com os dados apresentados na Tabela 21 que as variações de deslocamento no último pavimento já mostram uma estabilização. Nota-se que a partir de um certo número de pavimentos existe uma uniformização dos deslocamentos. Entende-se que a estrutura chegou a uma rigidez limite para influência da interação solo- estrutura.

Alguns estudos, entre eles (GUSMÃO e GUSMÃO FILHO, 1994), observaram uma relação entre o aumento do número de pavimentos com a diminuição dos recalques diferenciais e a diminuição no coeficiente de variação de recalques.

No Gráfico 26 está a variação máxima de deslocamento por pavimento correspondente a cada pino monitorado. Observa-se que os pinos têm uma alta variação de deslocamento nos primeiros pavimentos, nota-se que com o aumento do número de pavimentos essa variação de deslocamento diminui.

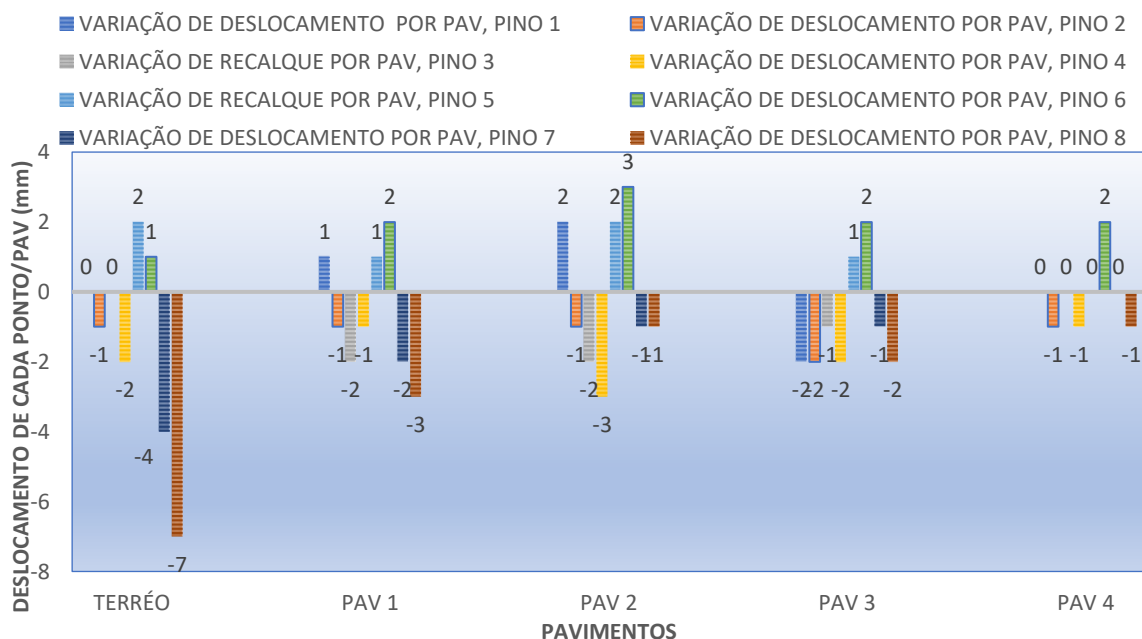
O recalque diferencial máximo de um pavimento corresponde a amplitude entre as leituras de deslocamentos mínimo e a máximo entre os oito pinos do pavimento. Os dados são baseados no conjunto de resultados da variação de deslocamento máximo nos pinos, correspondentes a toda lâmina monitorada.

Tabela 21 - Variação de recalques diferenciais nos pinos por pavimento

VARIAÇÃO DE RECALQUE POR PAVIMENTO MEDIDOS PARA OS BLOCOS MONITORADOS										
PINOS	VARIAÇÃO DE DESLOCAMENTO (mm) TÉRREO		VARIAÇÃO DE DESLOCAMENTO (mm) PAV 1		VARIAÇÃO DE DESLOCAMENTO (mm) PAV 2		VARIAÇÃO DE DESLOCAMENTO (mm) PAV 3		VARIAÇÃO DE DESLOCAMENTO (mm) PAV 4	
	BLOCO	BLOCO	BLOCO	BLOCO	BLOCO	BLOCO	BLOCO	BLOCO	BLOCO	BLOCO
	03	08	03	08	03	08	03	08	03	08
1	0	-1	1	-1	2	1	-2	-2	0	0
2	-1	-2	-1	1	-1	-3	-2	-2	-1	0
3	0	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-2	0	0
4	-2	-3	-1	-2	-3	-2	-2	-3	-1	-3
5	2	3	1	-3	2	-2	1	3	0	-1
6	1	-2	2	2	3	2	2	-2	2	-1
7	-4	-10	-2	-2	-1	-2	-1	-3	0	-1
8	-7	-9	-3	-3	-1	-2	-2	-3	-1	0
RECALQUE DIFERENCIAL MAX	9	13	5	5	6	5	4	6	3	3

Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 26 - Variação máxima de deslocamento nos pinos por pavimento

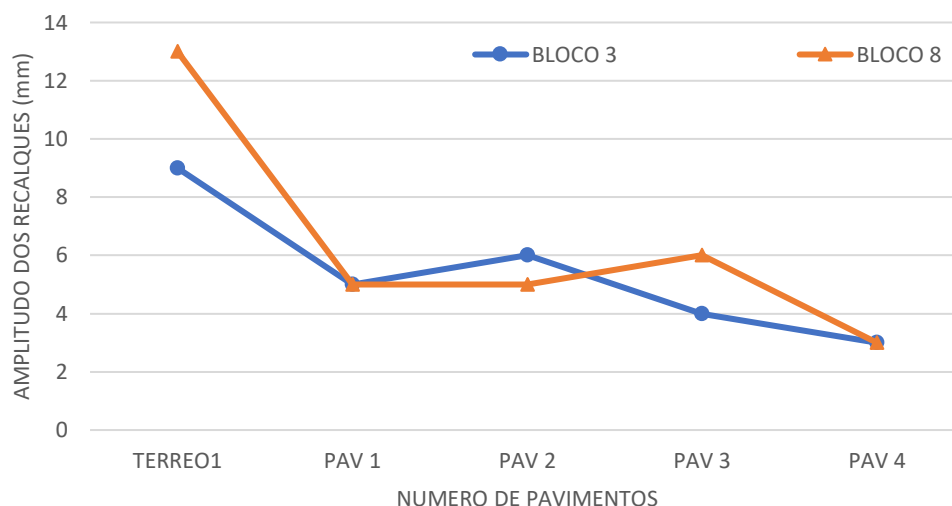


Fonte: O Autor (2021).

O gráfico de recalques diferenciais máximos relacionados ao número de pavimentos construídos, apresentado (Gráfico 27), permite visualizar o comportamento do radier com o avanço do número de pavimentos para os dois blocos monitorados. Esses resultados apresentam, de modo geral, variações de recalques mais elevadas para os primeiros pavimentos. O fato é comprovado com leituras diferenciais na magnitude de 13 mm para o bloco 08 e 9 mm para o bloco 03, valores correspondentes ao pavimento térreo, até menores variações, sendo representadas por medições referentes ao quinto e último pavimento com recalques diferenciais na ordem de 3 mm. Nota-se uma não linearidade nas curvas dos recalques diferenciais com o avanço construtivo.

Para nível de comparação, entre as curvas geradas para os blocos “03” e “08”, nota-se que entre os blocos existe um bom grau de aproximação sobre os valores de recalques diferenciais máximos por pavimentos, evidenciando um grau de confiabilidade ao comportamento real da estrutura de fundação, dessa forma, o número de pavimentos é realmente um fator que norteia a interação solo-estrutura, como também que os resultados do monitoramento são adequados.

Gráfico 27 - Variação de recalques diferenciais máximos por pavimento

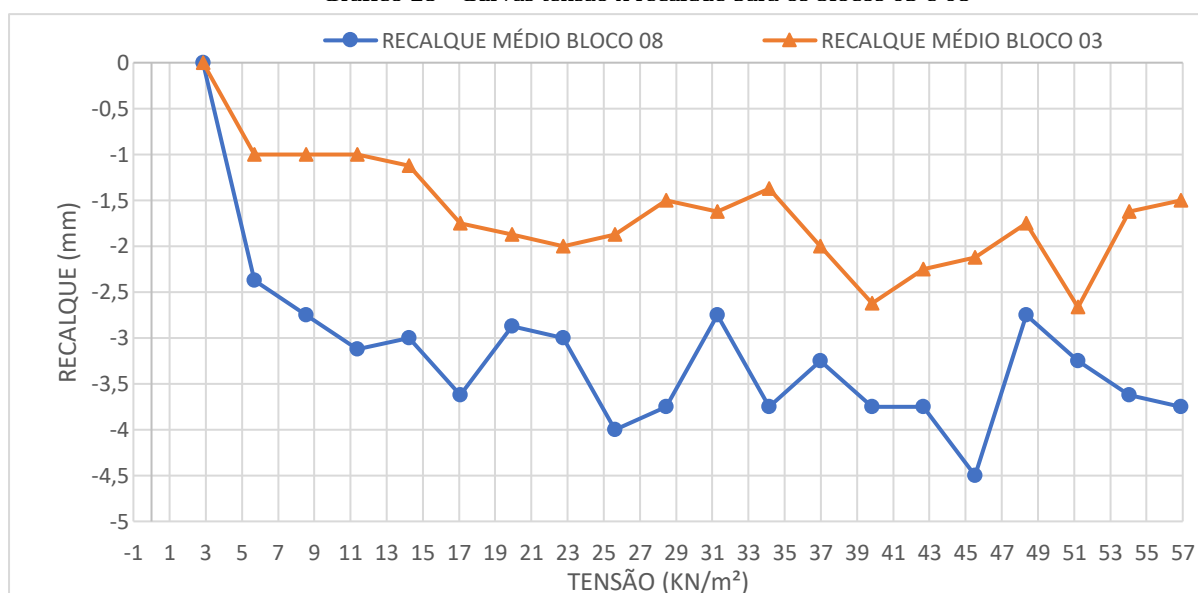


Fonte: O Autor (2021).

5.2.2 Curva tensão x recalque baseado no monitoramento

As curvas tensão x recalque, presentes no Gráfico 28, expressa o comportamento da estrutura com a evolução construtiva, através das leituras de recalque realizadas em campo, trazendo uma avaliação realista do desempenho da estrutura de fundação. A análise simula a execução de um ensaio de prova de carga estática. Os dados de entrada são os resultados dos recalques monitorados para cada etapa construída, relacionados com suas respectivas cargas.

Gráfico 28 - Curvas tensão x recalque para os blocos 03 e 08



Fonte: O Autor (2021).

Os comportamentos das curvas são semelhantes, nota-se uma diferença de fase na leitura de recalque dos primeiros estágios criando-se uma amplitude entre as curvas, com tudo as curvas tem a mesma tendencia no seu comportamento. Observa-se que o comportamento da curva tensão x recalque se mostra não linear, com isso prova-se que os deslocamentos não obedecem a um comportamento diretamente proporcional ao acréscimo de tensão a estrutura.

5.2.3 Estimativa de recalques a partir das simulações numéricas

As análises feitas nesse subtópico refletem o desempenho dos modelos numéricos criados com relação aos deslocamentos da estrutura de fundação. As análises numéricas realizadas são: estrutura de fundação sem consideração da rigidez da superestrutura, modelagem da fundação acoplada a estrutura (com rigidez da estrutura) e a análise numérica mais realista, considerando a união da fundação com superestrutura (com rigidez da estrutura) e o avanço construtivos por estágios.

Todos os resultados nesse item se referem a recalques situados na estrutura do radier, mais precisamente em sua borda, situando-se em pontos específicos correspondentes aos pinos de monitoramento.

Mais à frente nos itens correspondentes ao desempenho das estacas será discutido o seu comportamento em relação aos modelos numéricos criados.

A primeira análise da estrutura de fundação foi modelada e submetida ao carregamento da superestrutura de forma instantânea. Os esforços aplicados na estrutura de fundação foram coletados a parte da simulação da estrutura sobre apoios indeslocáveis, assim sem consideração da interação solo estrutura.

Importante destacar que mesmo que a superestrutura não trabalhe no presente modelo, de forma a contribuir com sua rigidez, o modelo ainda considera a rigidez relativa entre a estrutura de fundação e o solo, com a presença das molas representando tanto as estacas em contato com o radier quanto no contato do solo com o radier, tal fato prova que mesmo não existindo a representação do modelo unificado solo-infraestrutura-superestrutura, ainda se tem a representação de interação entre o maciço e a fundação.

Os dados de deslocamentos para primeira análise estão dispostos na Tabela 22, onde os valores de recalques estão acompanhados do recalque diferencial máximo entre os pinos, juntamente com os valores médio, mínimo e máximo das previsões de recalques para o comportamento da borda do radier.

Tabela 22 - Valores de recalque para análise numérica sem rigidez da superestrutura

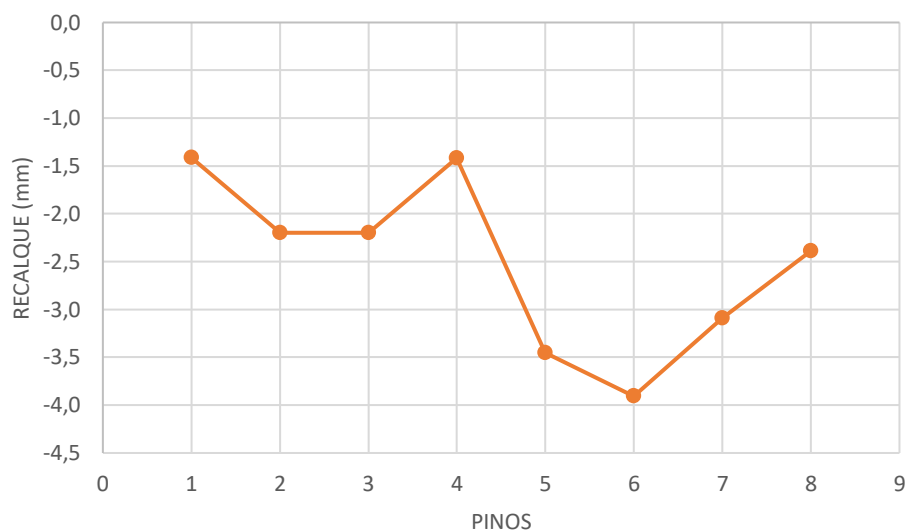
ANÁLISE QUE NÃO CONSIDERA A RIGIDEZ DA EDIFICAÇÃO	
PINOS	RECALQUES PARA ANÁLISE SEM CONSIDERAÇÃO DA RIGIDEZ DA SUPERESTRUTURA (mm)
1	-1,4
2	-2,2
3	-2,2
4	-1,4
5	-3,5
6	-3,9
7	-3,1
8	-2,4
MÉDIA	-2,5
RECALQUE MÍNIMO	-1,4
RECALQUE MÁXIMO	-3,9
RECALQUE DIFERENCIAL MÁXIMO	2,5

Fonte: O Autor (2021).

Apesar da não consideração da rigidez da estrutura, o modelo teve pequenas distorções angulares na para borda do radier, mostrando uma grande rigidez para estrutura de fundação modelada. O Gráfico 29 traz o comportamento da fundação para os pinos, em forma de curva, com intensão de melhor visualização.

A segunda análise, considera o comportamento da estrutura de forma unificada com: maciço do solo, infraestrutura e superestrutura, o sistema global de estrutura, trabalha com um nível de rigidez alto, com engaste de todos os elementos. O solo foi representado por molas para o contato radier- estaca e radier-solo.

Gráfico 29 - Recalques para pinos, em análise sem rigidez da edificação



Fonte: O Autor (2021).

Os resultados de recalques para a segunda análise estão dispostos na Tabela 23, juntamente com os valores de deslocamentos médio, mínimo, máximo e o recalque diferencial máximo, para os locais que correspondem aos pinos de monitoramento. Nota-se que os valores dos recalques diferenciais diminuíram significativamente em relação a análise numérica sem consideração da interação solo estrutura.

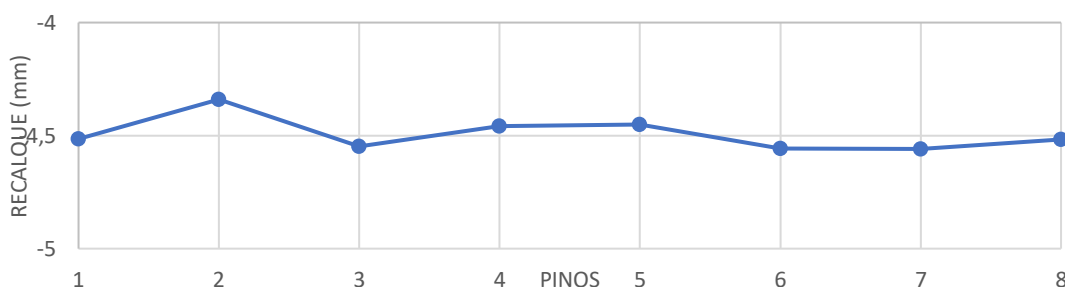
Tabela 23 - Valores de recalque para análise numérica com rigidez da superestrutura

MODELO COM CONSIDERAÇÃO A RIGIDEZ DA EDIFICAÇÃO	
PINOS	RECALQUES ANÁLISE COM CONSIDERAÇÃO DA RIGIDEZ DA SUPERESTRUTURA (mm)
1	-4,515
2	-4,34
3	-4,547
4	-4,457
5	-4,451
6	-4,557
7	-4,559
8	-4,516
MÉDIA	-4,49275
RECALQUE MÍNIMO	-4,34
RECALQUE MÁXIMO	-4,559
RECALQUE DIFERENCIAL MÁXIMO	0,219

Fonte: O Autor (2021).

Está representado no Gráfico 30 a curva do comportamento dos recalques nos pontos de monitoramento. Nota-se uma pequena variação nos recalques entre as bordas do radier, no presente modelo, tal fato se comprova pela grande rigidez criada na união de todas as estruturas, existindo uma tendência a normalização dos recalques.

Gráfico 30 - Recalques para pinos, para análise com rigidez da edificação



Fonte: O Autor (2021).

O foco deste trabalho desde o princípio é estabelecer uma representação numérica que proporcione análises cada vez mais realistas para o caso de obra em estudo, representado na terceira análise numérica que contempla o comportamento da estrutura de fundação com a evolução construtiva, através de estágios construtivos, além da rigidez relativa entre as estruturas.

Neste ponto, se discute o comportamento do radier em relação a projeção de carregamentos ao longo do tempo, simulando as concretagens executadas diariamente em loco. Está referenciado na Tabela 24, os valores de recalques máximos, médios, mínimos e diferencial máximo (amplitude de recalque entres os pinos no mesmo estágio), nos locais correspondentes aos pinos de monitoramento, para cada etapa construída. Os valores dos recalques por estágios construtivos estão presentes no Apêndice A, Tabela 40.

Tabela 24 - Valores de previsão de recalques para pinos, em análise por estágios

RECALQUES MÁXIMOS, MÉDIOS E MÍNIMOS CORRESPONDENTES AOS PINOS, PARA ANÁLISE POR ESTAGIOS CONSTRUTIVOS (mm)																					
	EST. 1	EST. 2	EST. 3	EST. 4	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST. 9	EST. 10	EST. 11	EST. 12	EST. 13	EST. 14	EST. 15	EST. 16	EST. 17	EST. 18	EST. 19	EST. 20	EST. 21
RECALQUE MÉDIA MOD. NUM.	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-1,0	-1,2	-1,4	-1,6	-1,8	-2,0	-2,2	-2,3	-2,5	-2,7	-2,9	-3,1	-3,3	-3,5	-3,7	-3,9	-4,1
RECALQUE MÍNIMO	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-1,5	-1,6	-1,7	-1,6	-2,3	-2,3	-2,5	-2,4	-3,1	-3,1	-3,3	-3,2	-3,8
RECALQUE MÁXIMO	-0,4	-0,8	-1,1	-1,2	-1,1	-1,6	-1,8	-1,9	-1,9	-2,4	-2,6	-2,8	-2,8	-3,2	-3,4	-3,6	-3,6	-4,0	-4,1	-4,4	-4,4
RECALQUE DIFERENCIAL MÁXIMO	0,2	0,7	1,0	1,0	0,4	0,7	0,9	1,1	0,4	0,8	0,9	1,1	0,4	0,9	0,9	1,2	0,5	0,9	0,9	1,2	0,6

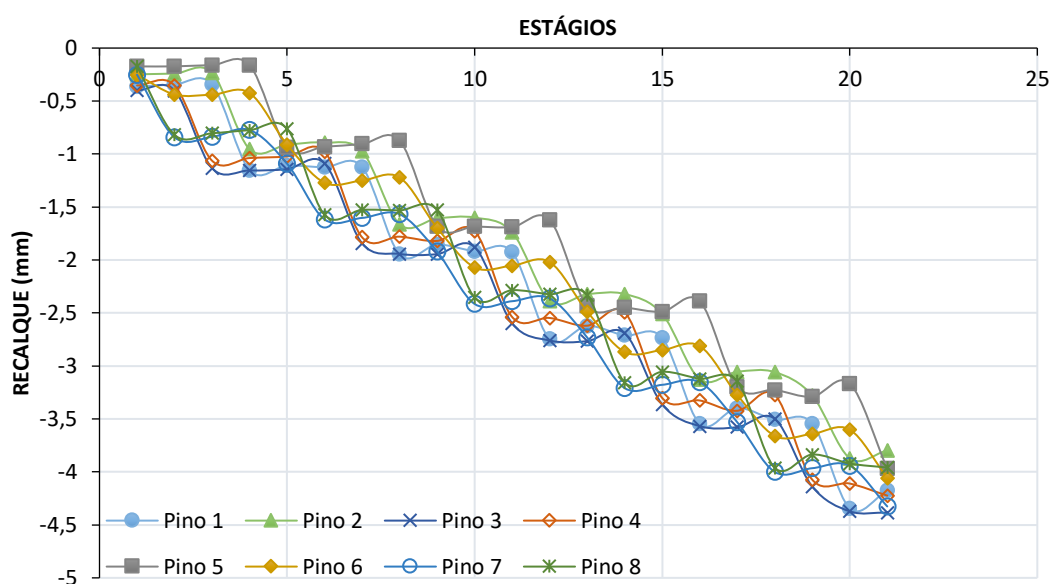
Fonte: O Autor (2021).

Observa-se na Tabela 24 que os valores de recalque aumentam com os estágios construtivos, mostrando valores médios de -4 mm de recalque para o último estágio construtivo. Nota-se que para o modelo por estágios os valores de recalques diferenciam também diminuíram comparados ao modelo número sem interação solo-estrutura.

Nota-se que os valores de recalque para análise numérica com estágios construtivos, crescem com a aplicação do carregamento, esse aumento ocorre de maneira linear, como pode-se ver no Gráfico 31, que expressa em forma de gráfico o comportamento de todos os locais correspondentes aos pinos de monitoramento em relação aos estágios construtivos aplicados com o tempo.

O comportamento linear das curvas de recalques em relação a construção dos estágios se dá pelo tipo de representação do maciço de solo, que está simulado por molas de modelo elástico linear.

Gráfico 31 - Comportamento dos pinos, estimados para análise numérica por estágios



Fonte: O Autor (2021).

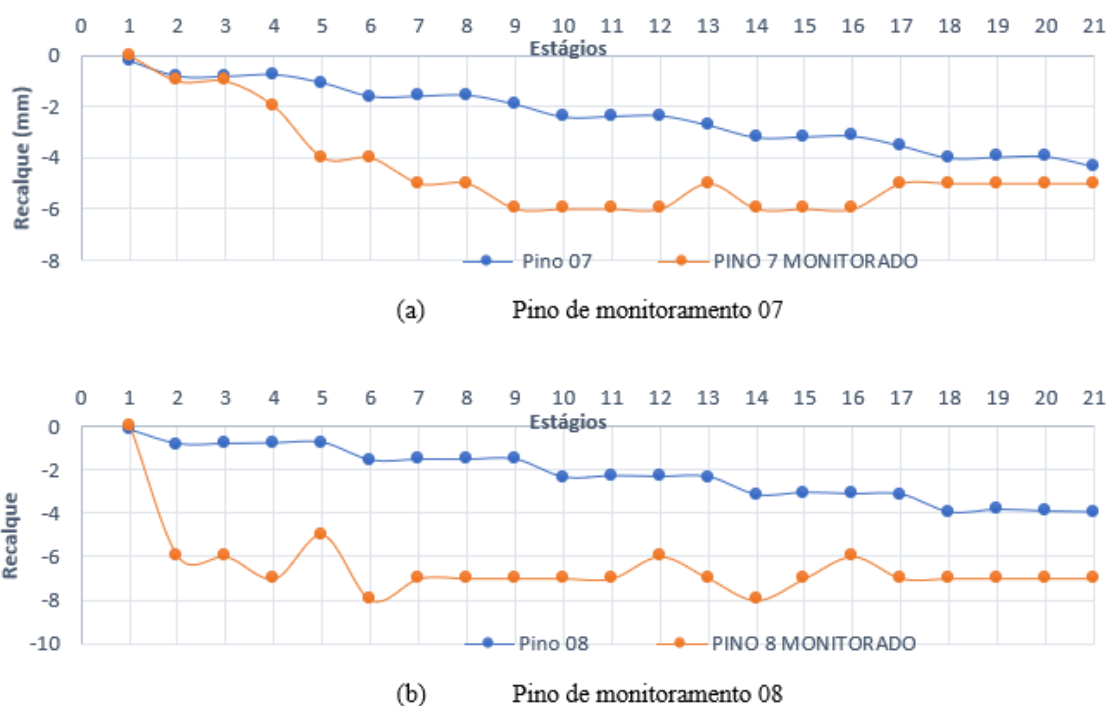
Ainda em relação ao estimado, sobre os pontos de monitoramento, os Gráficos 32 ao 35, mostram em forma de análise a relação entre os deslocamentos dos pinos monitorados e estimados na análise numérica com estágios construtivos. O comportamento do radier em relação a análise numérica mostra-se linear devido às características dos coeficientes de mola aqui já enfatizado, já os resultados gerados no monitoramento exprimem comportamentos variáveis, se comparados à linearidade da análise numérica, mostra comportamentos

semelhantes, como nos pinos 02 e 03, a deslocamentos opostos como os pinos 05 e 06, que fazem parte do quarto quadrante.

Os pinos pertencentes ao primeiro e quarto quadrante, mostram um comportamento singular devido ao processo construtivo, o primeiro quadrante com deslocamentos de alta amplitude, em relação a análise numérica e o quarto quadrante mostrando comportamento de levantamento da estrutura, sendo o último estágio da lâmina do pavimento.

Os Gráficos 32a e 32b mostram o comportamento do radier para o primeiro estágio de concretagem. Os comportamentos são semelhantes, contudo, existe uma defasagem nos primeiros estágios.

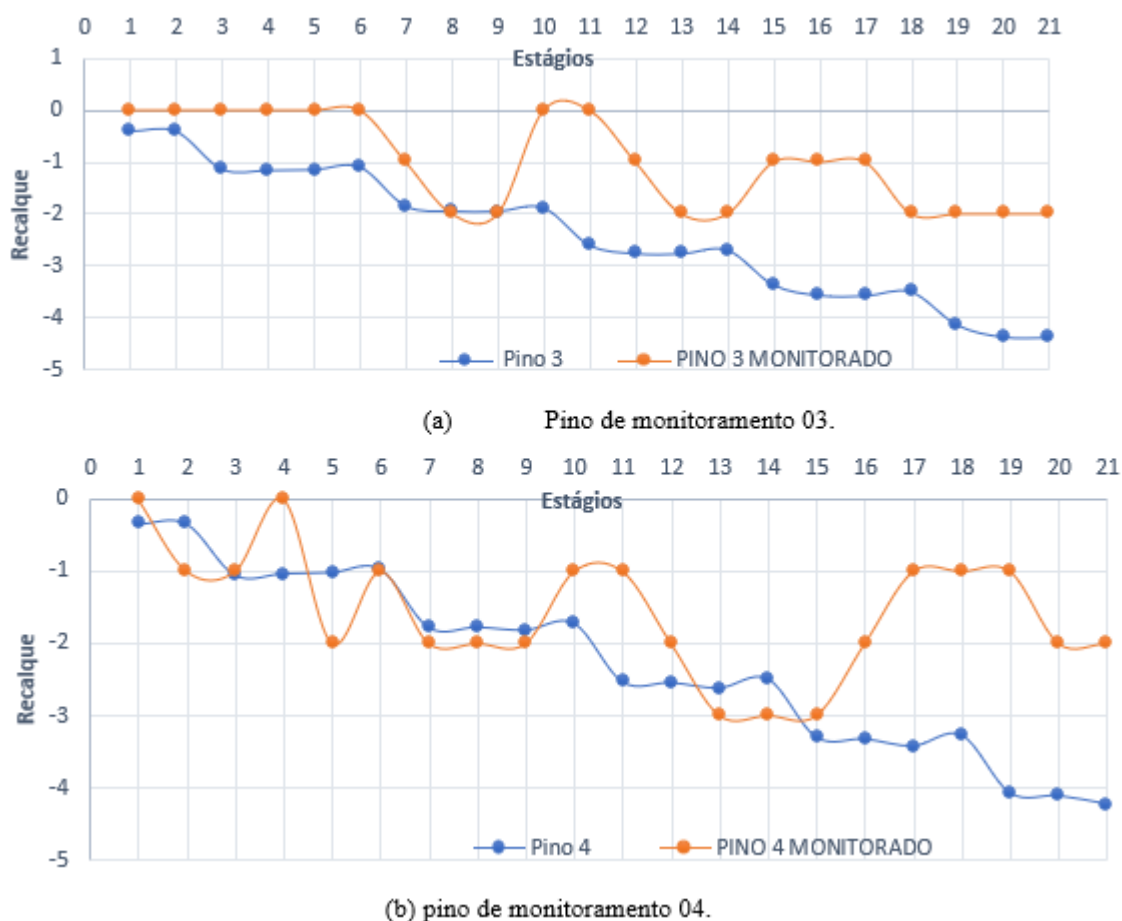
Gráfico 32 - Comportamento do primeiro quadrante, para análise com estágios e monitoramento: (a) Pino de monitoramento 07; (b) Pino de monitoramento 08.



Fonte: O Autor (2021).

O segundo quadrante é representado pelos pinos 03 e 04, onde seus comportamentos estão ilustrados nos Gráficos 33a e 33b. As leituras em campo se assemelham com o comportamento da simulação numérica por estágios para a maioria dos pinos, diferenciando-se estado de tendencia nos últimos estágios.

Gráfico 33 - Comportamento do segundo quadrante, para análise com estágios e monitoramento: (a) Pino de monitoramento 03; (b) Pino de monitoramento 04



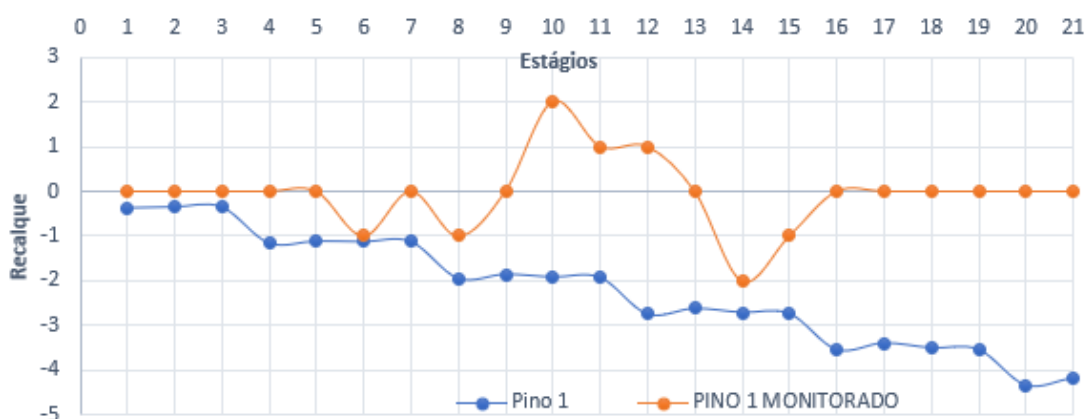
Fonte: O Autor (2021).

A relação entre os recalques previstos para a análise numérica por estágios e os recalques monitorados, em relação ao terceiro quadrante, sendo representados pelos pinos 01 e 02, estão relacionadas nos Gráfico 34a e 34b. As curvas em análise possuem comportamentos semelhantes, mostrando comportamento diferente apenas para os últimos estágios construtivos, com característica de fuga do comportamento linear predominante observado.

Gráfico 34 - Comportamento do terceiro quadrante, para análise com estágios e monitoramento: (a) Pino de monitoramento 02; (b) Pino de monitoramento 01



(a) Pino de monitoramento 02.

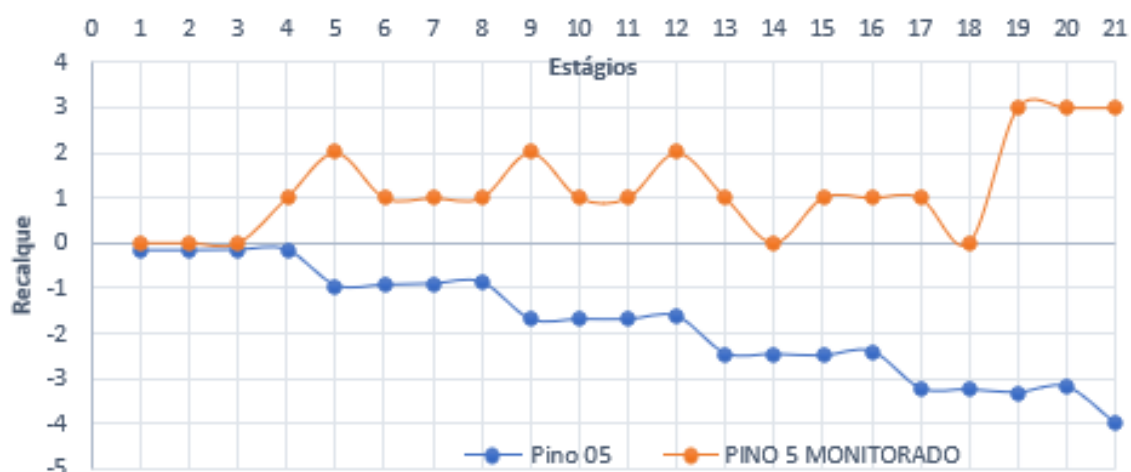


(b) Pino de monitoramento 01

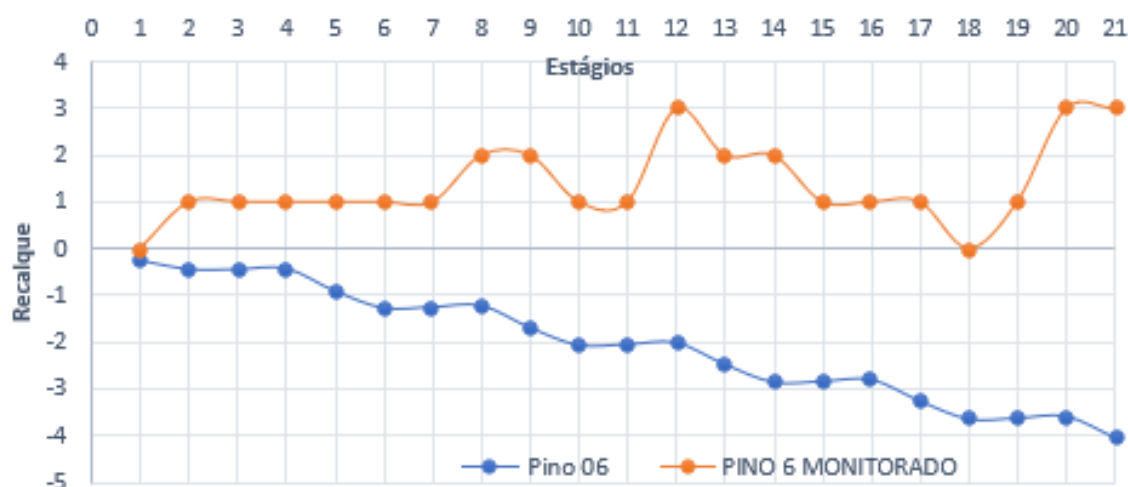
Fonte: O Autor (2021).

O quarto quadrante tem maior dispersão entre os demais, com relação aos deslocamentos monitorados e previstos pelo modelo por estágios. Os comportamentos entre os métodos são opostos. O monitoramento para os pinos 05 e 06, tem comportamento com características de levantamento, tal fato se explica ao método construtivo aplicado execução da estrutura. A simulação numérica por estágios apesar de mostrar comportamentos oscilatórios nas bordas do radier, com avanço das etapas construtivas, não mostra valores positivos, levantamentos, como as leituras levantadas em campo. Os Gráfico 35a e 35b mostram os comportamentos da estrutura do radier para a análise numérica e o monitoramento.

Gráfico 35 - Comportamento do segundo terceiro, para Mod. Num. com estágios e monitoramento: (a) Pino de monitoramento 05; (b) Pino de monitoramento 06



(a) Pino de Monitoramento 05.



(b) Pino de Monitoramento 06.

Fonte: O Autor (2021).

Apresenta-se na Tabela 25 os resultados para os recalques nas bordas do radier, referentes aos modelos criados. Além dos deslocamentos, tem-se os valores de média, amplitude e coeficiente de variação correspondente a cada modelo. Ainda se observa os valores de média e amplitude de recalques para todos os pinos estimados.

Observa-se uma boa relação entre os resultados dos modelos, existindo um baixo coeficiente de variação entre os recalques. A análise numérica sem consideração da rigidez da estrutura é o único a apresentar coeficiente de variação mais alto. Dentre os modelos, já era esperado esse resultado, pois o modelo tende a apresentar maiores distorções devido a não consideração de rigidez da edificação.

Tabela 25 - Valores de recalques para as diferentes simulações numéricas

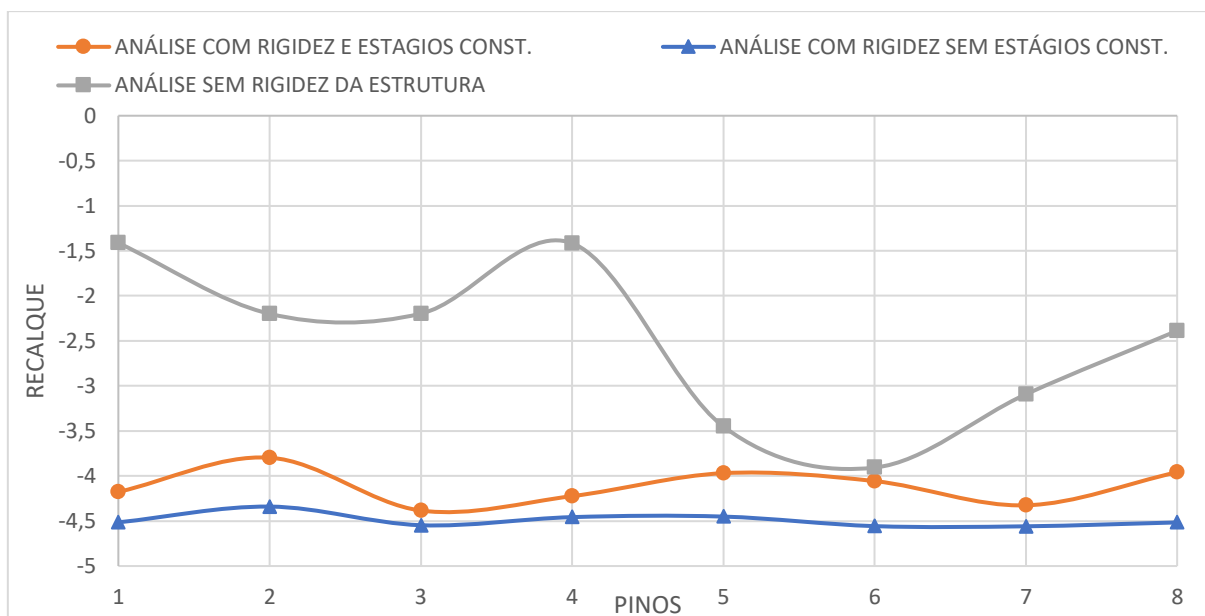
PREVISÃO DE RECALQUE PARA OS MODELOS NUMERICOS CRIADOS, (mm)					
PINOS	ANÁLISE COM ESTAGIOS CONST. RECALQUE	ANÁLISE COM CONSIDERAÇÃO DA RIGIDEZ DA SUPERESTRUTURA	ANÁLISE SEM CONSIDERAÇÃO DA RIGIDEZ DA SUPERESTRUTURA	MÉDIA DOS DESLOCAMENTOS POR PONTO	AMPLITUDES DESLOCAMNETOS
1	-4,177	-4,515	-1,4	-3,4	3,1
2	-3,797	-4,34	-2,2	-3,4	2,1
3	-4,384	-4,547	-2,2	-3,7	2,3
4	-4,224	-4,457	-1,4	-3,4	3,0
5	-3,969	-4,451	-3,5	-4,0	1,0
6	-4,057	-4,557	-3,9	-4,2	0,7
7	-4,326	-4,559	-3,1	-4,0	1,5
8	-3,959	-4,516	-2,4	-3,6	2,1
DESVIO PADRÃO	0,200946288	0,074497843	0,90917112	0,309122054	0,891380621
MÉDIA	-4,111625	-4,49275	-2,508125	-3,704166667	1,984625
C.V. (%)	5%	2%	36%	8%	45%

Fonte: O Autor (2021).

Observa-se na Tabela 25 que o coeficiente de variação (C.V.) aumenta muito com a não consideração da interação solo-estrutura. O fator que mostra maior influência no C.V., está ligada a consideração ou não da ISE, com 34%. A consideração ou não dos estágios construtivos teve uma influência de 2% na variação do coeficiente. Os resultados em torno da magnitude dos coeficientes de variação, comprovam a uniformização dos recalques devido a consideração da ISE.

No Gráfico 36 é apresentado a relação entre as análises numéricas propostos no presente trabalho. Todos refletem o comportamento esperado devido as considerações particulares adotadas, seguindo as seguintes características: a análise sem consideração da rigidez estrutura mostra valores de recalques com maiores distorções, já a análise com rigidez da estrutura, apresenta resultados de deslocamentos normatizados, seguindo uma faixa de baixa amplitude em relação aos valores de recalques obtidos na análise com estágios que mostram distorções diferentes ao segundo modelo, observando-se mudanças e distorções consequentes a metodologia construtiva.

Gráfico 36 - Comportamento das simulações numéricas, em relação aos pinos de monitoramento



Fonte: O Autor (2021).

Os resultados de recalques previstos para a análise numérica com estágios construtivos mostram um comportamento norteado pela sequência construtiva. Com relação ao desempenho das simulações, não se esperava que tivessem exatamente o mesmo comportamento, consequente as particularidades a cada um imposta, as considerações na modelagem do solo, sendo representadas por meio de molas lineares. Para as simulações não haverá distinções, a representação do maciço irá impactar na comparação entre os modelos numéricos e os resultados de recalque, devido as simplificações impostas pela hipótese de Winkler.

Notório observar que todos os deslocamentos em análise são referentes aos locais correspondentes ao monitoramento em campo, como todos as análises realizadas nesse tópico. As previsões de recalques coletadas nas simulações numéricas foram realizadas como acervo de dados, para a quarta análise, que se refere a avaliação e comparação dos cenários de previsão de recalque, com os dados do monitoramento.

5.2.4 Estimativa de recalques a partir das curvas de isorecalque com base no anteprojeto executado

Os dados informados nesse tópico foram fornecidos pela construtora. Os resultados dizem respeito dos deslocamentos estimados em anteprojeto executivo. Com base nos parâmetros indicados na Tabela 26 foi possível estimar o comportamento do sistema quanto a

recalques e distorções angulares. Para a estimativa do recalque do radier, foi coletado os valores do anteprojeto de fundação do empreendimento.

Os dados não levam em consideração a interação solo estrutura. Eles serão usados na comparação entre os valores gerados pela análise numérica criado nesse trabalho, com e sem consideração da ISE.

Esses deslocamentos foram a base para o projeto de fundação e escolha do tipo de elemento de fundação. Recaindo no propósito que os recalques previstos convencionalmente podem inviabilizar tipos de fundação, ou onerar o projeto, devido a não consideração da rigidez da estrutura interagindo com o solo (ISE).

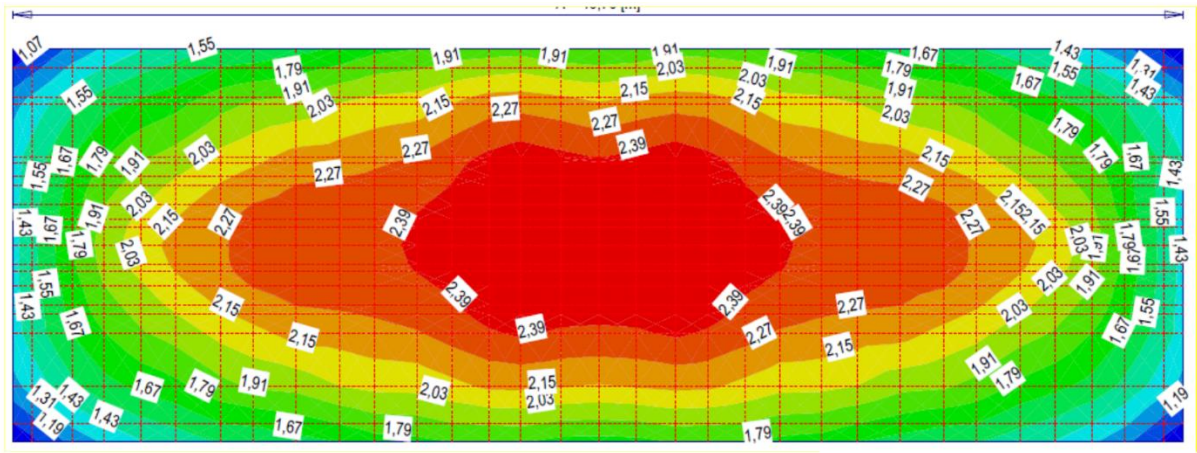
Tabela 26 - Resumos dos recalques estimados no anteprojeto.

BLOCO	COMP. MÉDIO DAS ESTACAS (m)	RECALQUE (mm)		
		MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO
03	16,00 A 17,00	9,50	19,95	25,10
08	17,00 A 19,00	12,4	2,58	33,00

Fonte: Construtora (2020).

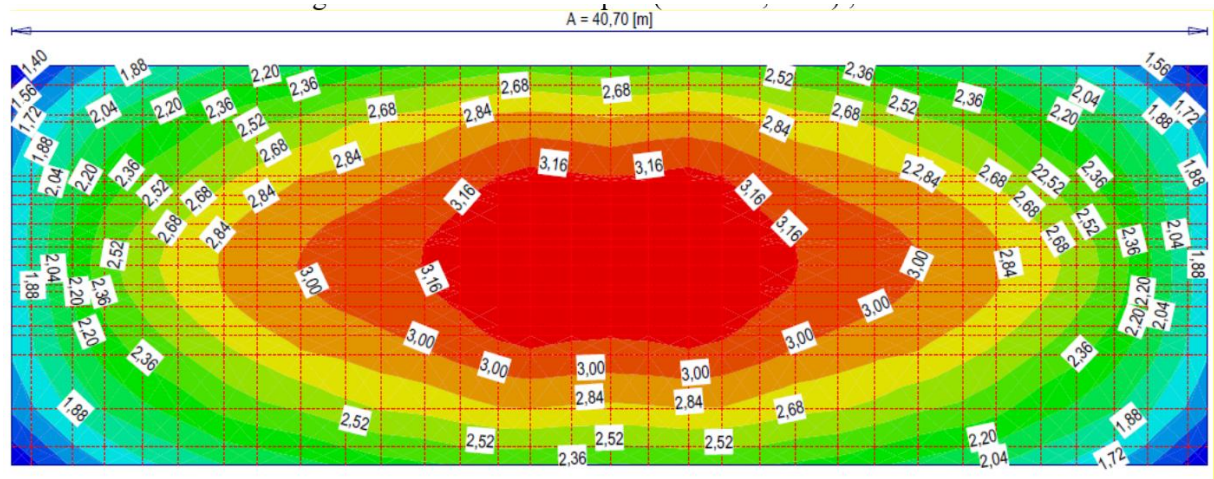
Nas Figuras 41 e 41 são mostradas as curvas de isorecalques para as fundações dos blocos 03 e 08. É possível observar as tendências de recalques para o radies que estão sobre o mesmo perfil que os Blocos 08 e Bloco 03 em estudo estudado.

Figura 41 - Curvas de isorecalques em cm, anteprojeto do empreendimento, bloco 03



Fonte: Construtora (2020).

Figura 42 - Curvas de isorecalques em cm, anteprojeto do empreendimento, bloco 08



Fonte: Construtora (2020).

A Tabela 27 faz referência aos recalques estimados em anteprojeto, sendo esses resultados tomados como base para solução de projeto da estrutura de fundação. Os dados de recalques foram gerados através das curvas de isorecalques, expostas em relatório de parecer técnico. Os resultados gerados no anteprojeto foram baseados em estudos geotécnicos feitos na região em análise. Os documentos utilizados previamente foram: projeto Arquitetônico, plantas de cargas na fundação e relatórios de sondagens a percussão feitos me campo.

Tabela 27 - Recalques estimados em anteprojeto, correspondentes aos pinos de monitoramento

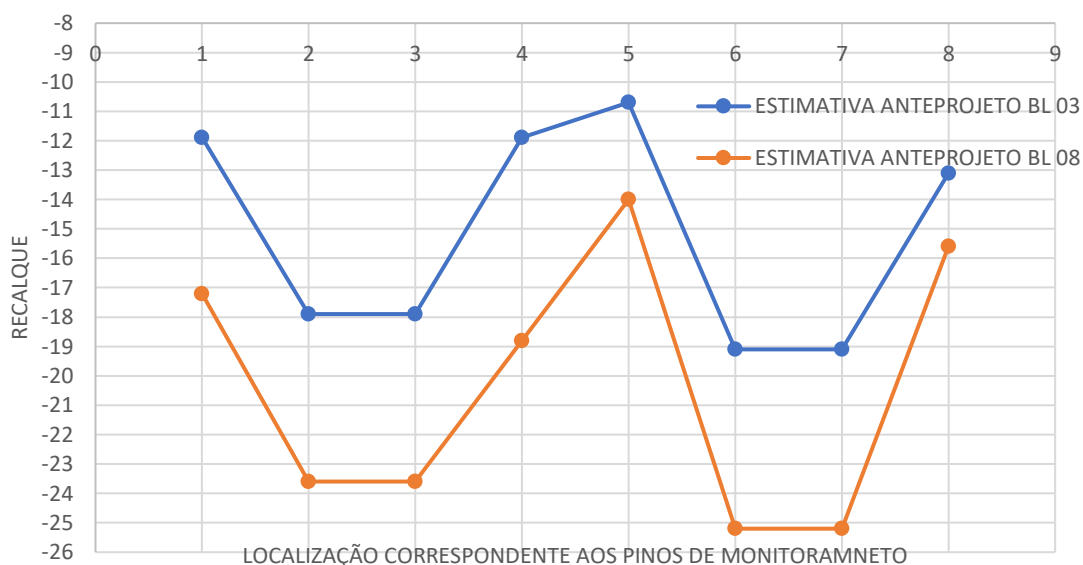
RECALQUES ESTIMADOS NOS PINOS (mm) EM ANTEPROJETO		
PINOS	ESTIMATIVA ANTEPROJETO BL 03	ESTIMATIVA ANTEPROJETO BL 08
1	11,9	17,2
2	17,9	23,6
3	17,9	23,6
4	11,9	18,8
5	10,7	14
6	19,1	25,2
7	19,1	25,2
8	13,1	15,6

Fonte: Construtora (2020).

O Gráfico 37 representa os recalques para os blocos 03 e 08 definidos a partir das curvas de isorecalques gerados em anteprojeto. Os deslocamentos são correspondentes aos

locais dos pinos de monitoramento, sendo posteriormente possível compará-los com os recalques monitorados e previstos por modelos numéricos criados. Os comportamentos dos blocos são semelhantes, a principal mudança entre as curvas está na amplitude dos deslocamentos.

Gráfico 37 - Recalques estimados em relação aos pinos de monitoramento, blocos 03 08



Fonte: O Autor (2021).

5.2.5 Comparação de resultados dos recalques estimados x monitorados

Apresenta-se a seguir os resultados e relações entre os recalques e comportamentos da estrutura de fundação em os função dos modelos numéricos criados e monitoramentos realizados em campo. Nota-se perante os resultados aqui apresentados que cada um possui características singulares ao seu comportamento e desempenho da estrutura, sendo de grande importância a comparação entre cada estudo aqui mencionado.

As comparações de comportamento começam com os dados de monitoramento, a Tabela 28 e o Gráfico 38 mostram, respectivamente, os valores de recalques e desempenho da estrutura para os últimos estágios do monitoramento. As curvas são geradas para os dois blocos monitorados, onde é possível observar que o comportamento entre os mesmos pinos visados assume deslocamentos parecidos, mudando apenas as amplitudes nos pontos, supõe-se então um desempenho característico ao monitoramento.

Observa-se que, para os dois blocos, o método construtivo ou a sequência de preenchimento da estrutura influenciou a maneira como se distribuiu os deslocamentos dos

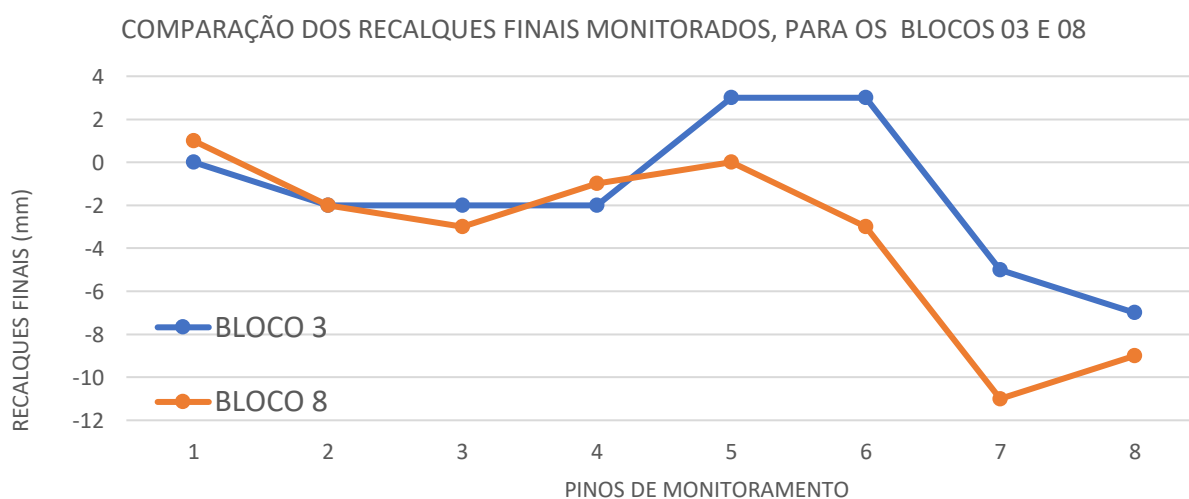
pinos. Tal fato se comprova com os pinos referentes ao primeiro e quarto quadrantes, com desempenho de maiores recalques na primeira etapa e menores deslocamentos na última etapa de concretagem da lâmina que para alguns pontos resultou em levantamento da estrutura.

Tabela 28 - Valores de recalques finais nos pinos, para os blocos 03 e 08

RECALQUE MEDIDOS PARA OS BLOCOS DO MONITORADOS		
PINOS	RECALQUE MEDIDO FINAL DOS PINOS (mm)	
	BLOCO 3	BLOCO 8
1	0	1
2	-2	-2
3	-2	-3
4	-2	-1
5	3	0
6	3	-3
7	-5	-11
8	-7	-9
RECALQUE DIFERENCIAL MÁXIMO	10	12

Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 38 - Comportamento dos pinos para o último estágio construtivo



Fonte: O Autor (2021).

Nos Gráficos 39 e 40 são relacionados os valores de recalques monitorados e estimados em anteprojeto do empreendimento. A representação é feita para os dois blocos monitorados. As curvas apresentam comportamentos opostos com relação aos deslocamentos nos pontos, onde são maiores no anteprojeto são menores no monitoramento.

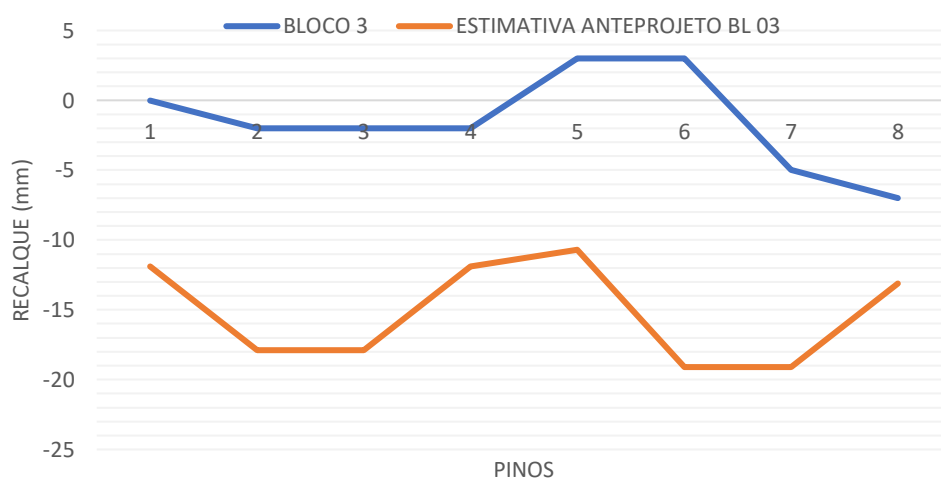
A diferença entre as curvas dos recalques monitorados e previstos, representa uma amplitude de 22,1 mm para o estudo do bloco 03 e 22,2 mm para o bloco 08. A Tabela 29 apresenta os valores das diferenças entre os recalques monitorados e estimados em anteprojeto.

Tabela 29 - Recalques previstos em anteprojeto e monitorados, para cada pino

COMPARAÇÃO ENTRE RECALQUES ESTIMADOS EM ANTEPROJETO E MONITORADOS (mm)						
PINOS	ESTIMATIVA ANTEPROJETO		MONITORADO		DIFERENÇA ENTRE METODOS	
	BLOCO 03	BLOCO 08	BLOCO 03	BLOCO 08	BLOCO 03	BLOCO 08
1	-11,9	-17,2	0	1	11,9	18,2
2	-17,9	-23,6	-2	-2	15,9	21,6
3	-17,9	-23,6	-2	-3	15,9	20,6
4	-11,9	-18,8	-2	-1	9,9	17,8
5	-10,7	-14	3	0	13,7	14
6	-19,1	-25,2	3	-3	22,1	22,2
7	-19,1	-25,2	-5	-11	14,1	14,2
8	-13,1	-15,6	-7	-9	6,1	6,6

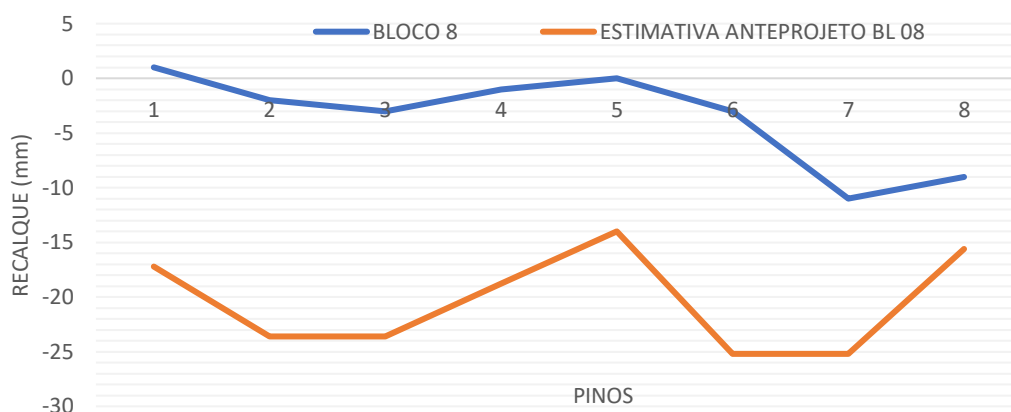
Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 39 - Curvas de comportamento entre recalques estimados e monitorados bloco 03



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 40 - Curvas de comportamento entre recalques estimados e monitorados bloco 08



Fonte: O Autor (2021).

As próximas análises estão relacionadas aos comportamentos das simulações numéricas nos diferentes cenários e o monitoramento de recalque praticado em campo. O terceiro modelo, tomado como o mais realista por ser o mais fidedigno ao comportamento da estrutura com relação as rigidezes relativas e avanços por estágios, foi comparado em relação aos seus deslocamentos por estágios com as leituras realizadas em campo.

São mostrados na Tabela 30 e Gráfico 41 os dados associados ao levantamento e coletados no modelo. Os valores analisados são em relação ao deslocamento médio de todas os pinos, assim como a comparação entre as curvas que representa os recalques médios dos estágios.

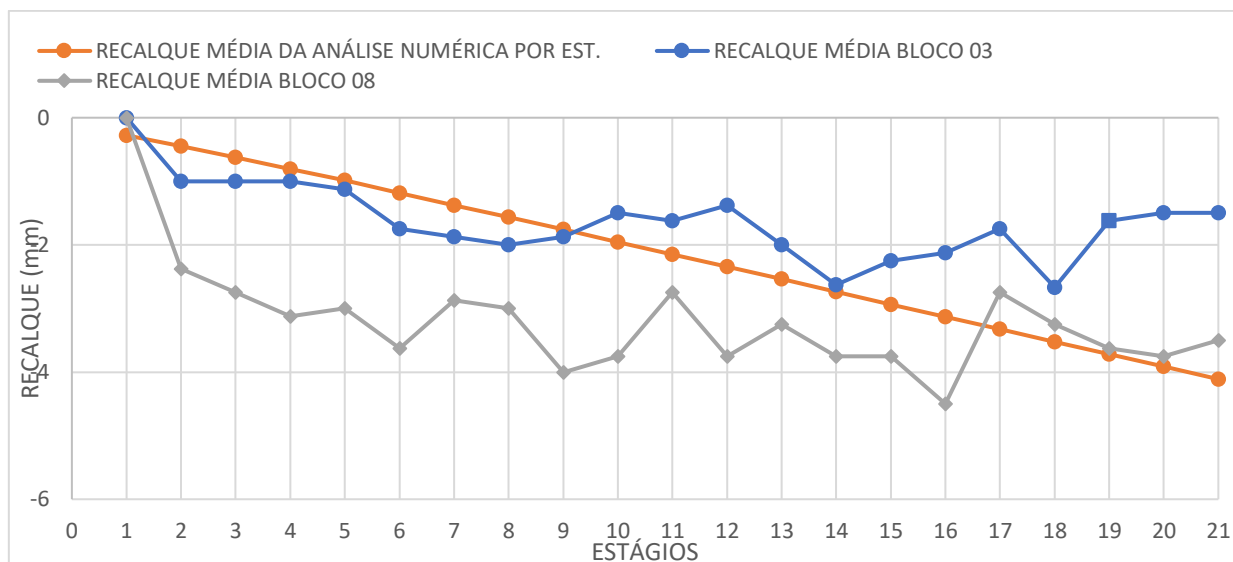
O gráfico que compara o comportamento por estágios entre a análise numérica e o monitoramento em campo mostra uma boa aproximação entre as curvas principalmente se tratando de valores médios a variações entre o modelado e o comportamento real são mínimas, as divergências ocorrem principalmente por simplificações usadas na modelagem do solo como sendo um meio elástico linear, caracterizando o comportamento da curva de deslocamento para a análise numérica.

Tabela 30 - Valores de recalques médios para o Mod. Num. por Estágios e dados monitorados

COMPARAÇÃO ENTRE OS RECALQUES MÉDIOS POR ESTÁGIOS ENTRE MOD. NUM. POR ESTAGIOS E OS MONITORADOS (mm)																					
PINOS	EST. 1	EST. 2	EST. 3	EST. 4	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST. 9	EST. 10	EST. 11	EST. 12	EST. 13	EST. 14	EST. 15	EST. 16	EST. 17	EST. 18	EST. 19	EST. 20	EST. 21
RECALQUE MÉDIO MOD. NUM. POR EST.	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-1	-1,2	-1,4	-1,6	-1,8	-2	-2,2	-2,3	-2,5	-2,7	-2,9	-3,1	-3,3	-3,5	-3,7	-3,9	-4,1
RECALQUE MÉDIA BLOCO 03	0	-1	-1	-1	-1,1	-1,8	-1,9	-2	-1,9	-1,5	-1,6	-1,4	-2	-2,6	-2,3	-2,1	-1,8	-2,7	-1,6	-1,5	-1,5
RECALQUE MÉDIA BLOCO 08	-	-2,4	-2,8	-3,1	-3	-3,6	-2,9	-3	-4	-3,8	-2,8	-3,8	-3,3	-3,8	-3,8	-4,5	-2,8	-3,3	-3,6	-3,8	-3,5

Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 41 - Curvas do comportamento para análise numérica por Est. e monitoramento (Recalque x Estágios)



Fonte: O Autor (2021).

Na Tabela 31 é mostrado os recalques para as análises numéricas propostas com e sem consideração da rigidez relativa da estrutura. Os recalques estimados em anteprojeto pertencente a construtora e os deslocamentos registrados nas leituras em campo correspondentes aos pinos numerados de 01 a 08. Lembra-se que os valores discutidos são referentes aos deslocamentos finais do monitoramento.

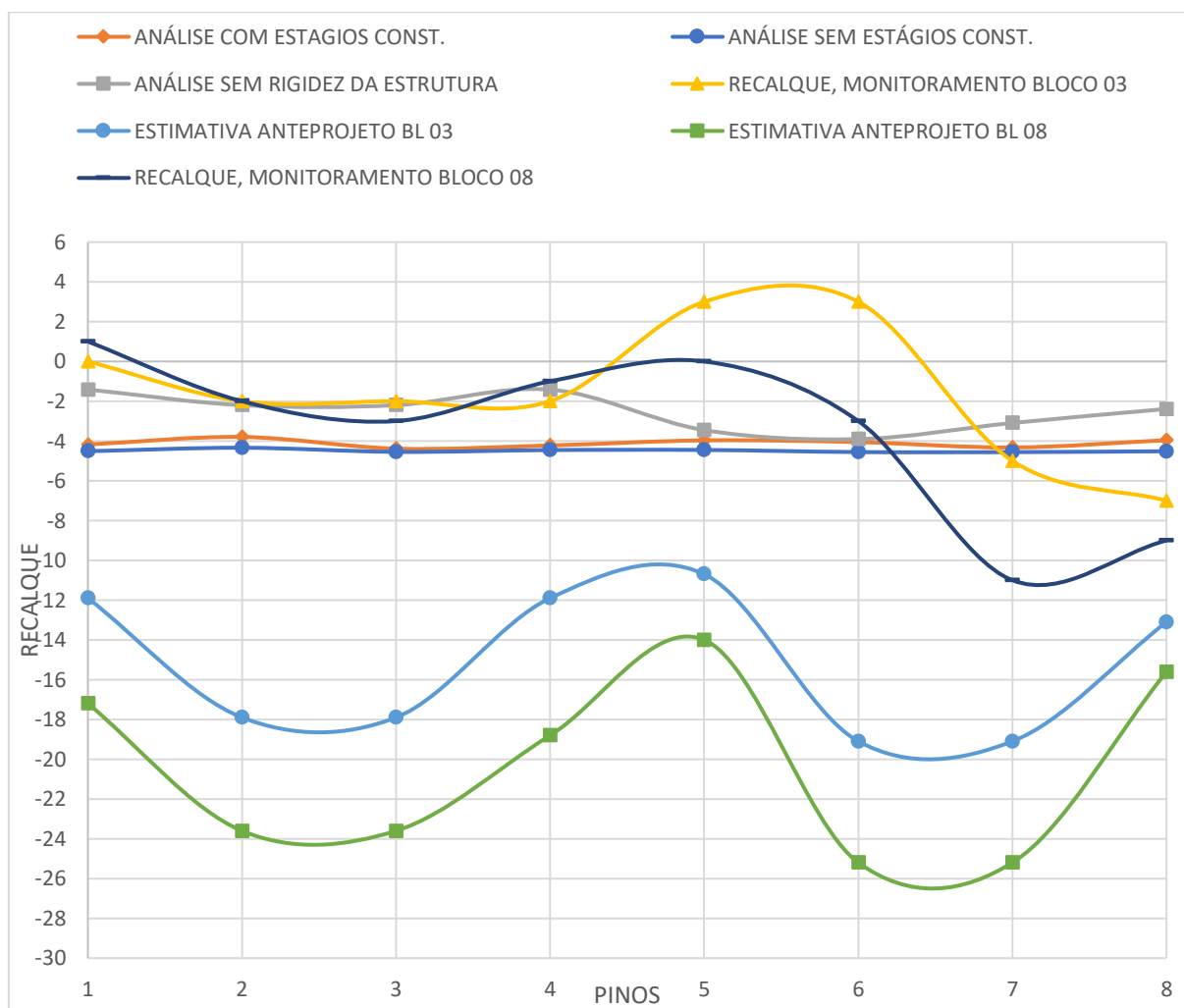
Tabela 31 - Dados de recalques estimados por modelos numéricos e monitoramentos

VALORES DE RECALQUE PARA TODOS OS METODOS DE ESTIMATIVAS E MONITORAMENTOS (mm)							
PINOS	ANÁLISE			RECALQUE, MONITORAMENTO		ESTIMATIVA ANTEPROJETO	
	NÃO CONSIDERA A RIGIDEZ DA ESTRUTURA	COM RIGIDEZ DA ESTRUTURA, SEM ESTÁGIOS	COM EST. CONST.	BLOCO 03	BLOCO 08	BLOCO 03	BLOCO 08
1	-3,093	-4,515	-4,177	0	1	-11,9	-17,2
2	-2,388	-4,34	-3,797	-2	-2	-17,9	-23,6
3	-3,907	-4,547	-4,384	-2	-3	-17,9	-23,6
4	-3,451	-4,457	-4,224	-2	-1	-11,9	-18,8
5	-1,413	-4,451	-3,969	3	0	-10,7	-14
6	-2,199	-4,557	-4,057	3	-3	-19,1	-25,2
7	-2,198	-4,559	-4,326	-5	-11	-19,1	-25,2
8	-1,416	-4,516	-3,959	-7	-9	-13,1	-15,6

Fonte: O Autor (2021).

Com os dados sobre o comportamento da estrutura de fundação com relação aos recalques monitorados é possível relacionar os resultados dos modelos em análise com as leituras realizadas em campo. No Gráfico 42 são representadas as curvas de recalques entre os sete conjuntos de dados formadas por previsões de anteprojeto, modelos numéricos com suas particularidades e os dados coletados em campo.

Gráfico 42 - Comparação das curvas de recalque entre valores previstos e monitorados



Fonte: O Autor (2021).

Apesar das simplificações feita para a análise numérica sem rigidez da estrutura, os deslocamentos para os pinos 2, 3 e 4, resultaram uma boa aproximação para os recalques medidos em campo. Os pinos que representam o primeiro e o quarto quadrantes se afastam um pouco dos dados monitorados. As variações ocorrem de 0,2 mm, menor variação entre os pontos, e 7,9 mm, maior variação.

Os cenários numéricos com consideração da rigidez da estrutura, possui deslocamentos com magnitudes semelhantes aos dados do monitoramento. O comportamento é que se difere um pouco, pois os resultados do modelo são bem normatizados e com baixa amplitude de variação de deslocamento.

Os dados de deslocamento do cenário com consideração da rigidez e evolução por estágio exprime um comportamento mais variável devido aos estágios considerados, observando-se um comportamento semelhante nas maiorias dos pinos, diferenciando-se a magnitude dos resultados. As diferenças entre os resultados dos modelos numéricos e as leituras em campo fazem sentido devido as considerações simplificadas de representação do solo por molas de comportamento elástico linear, de qualquer forma as se tem uma boa aproximação entre análises numéricas e monitoramento em campo, sendo a diferença entre os resultados com baixa magnitude.

Com tudo se compararmos com as previsões em anteprojeto que são realizadas sem interação solo-estrutura, essas se afastam muito dos resultados criados tanto para os cenários numéricos nas análises quanto para leituras do monitoramento. A variação de uma curva para outra chegar a representar 22,2 mm.

5.3 RESULTADOS DA REDISTRIBUIÇÃO DE CARGAS E RECALQUES NA FUNDAÇÃO

Foram criados modelos estruturais com e sem a interação solo-estrutura. As análises numéricas para cada cenário foram construídas a partir do software SAP 2000. Foram feitas análise em relação aos esforços nos cenários numéricos simulados e o projeto de fundação executado chamado aqui de anteprojeto.

Sendo assim, os esforços na fundação foram analisados e comparados perante cada modelo. Os primeiros esforços foram gerados considerando a fundação como indeslocável nos apoios fixos, posteriormente foi flexibilizada a fundação com apoios representados por molas com os modelos numéricos, em seguida se analisa a redistribuição de esforços na fundação.

Os recalques para as estacas foram analisados em relação aos modelos numéricos nas seguintes condições: sem rigidez da estrutura, com rigidez da estrutura e com rigidez da estrutura por estágios.

Os casos em análise mostram modelos de estrutura, sem interação solo estrutura, como é o caso do modelo de projeto executivo do empreendimento. Existem modelos numéricos que avançam o nível de consideração da ISE. A intenção dessa variação dos fatores

que norteiam a interação solo-estrutura é analisar qual a influência na consideração de cada fator em estudo para um projeto de fundação.

As relações de variações percentuais foram todas geradas em relação a análise numérica por estágios construtivos esse tomado como estrutura mais realista, sendo assim usada como parâmetro de comparação.

5.3.1 Redistribuição de esforços nas estacas

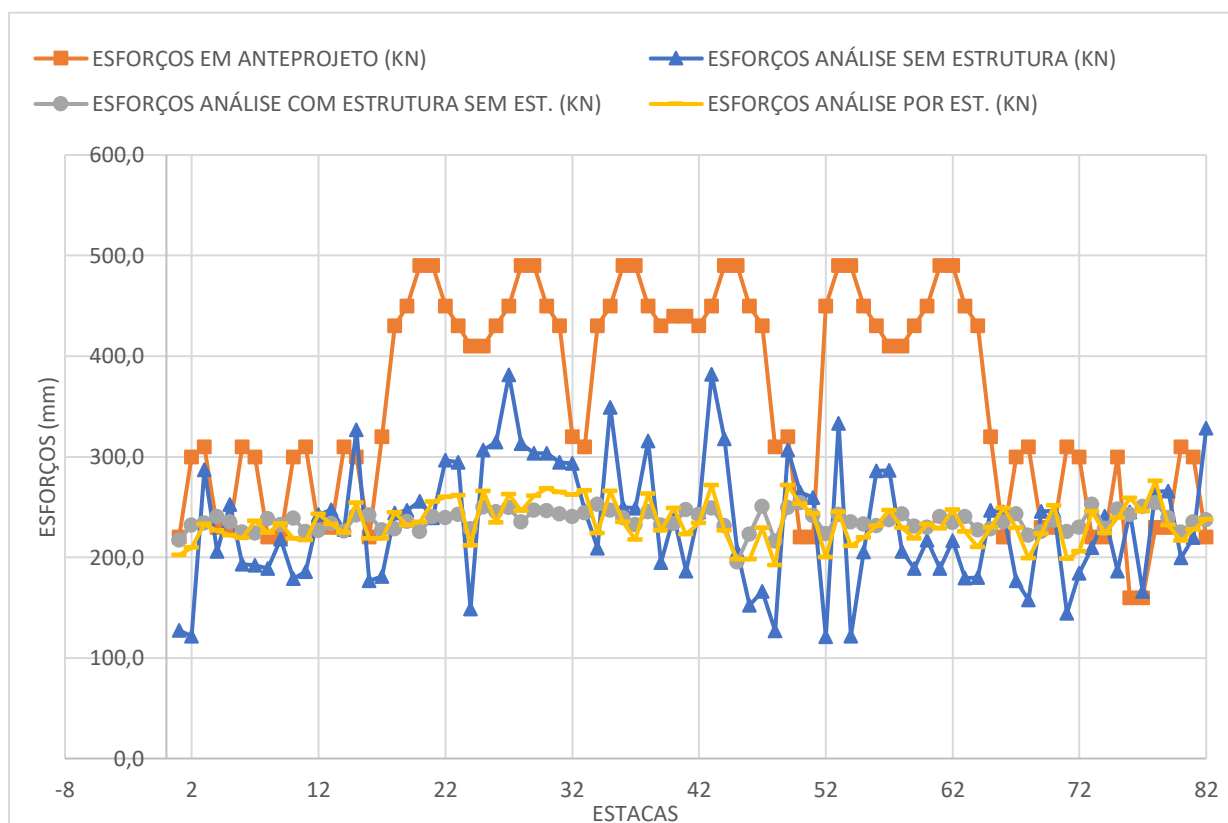
Os esforços nas estacas foram analisados de acordo com os três modelos numéricos criados no estudo e o anteprojeto de carga da fundação executada. Estão presentes na Tabela 43 do Apêndice B os valores de esforços resultantes, em KN (KiloNewton), os esforços são axiais (F_z) para as 82 estacas existentes no radier, para todos os casos de representação da estrutura.

Analisando os esforços para uma mesma estaca, existe uma grande tendencia a inversão de valores entre os casos. As estacas mais carregadas são aliviadas, já as estacas menos carregadas mostram-se acréscimos de tensão. As estacas com maiores esforços no modelo de projeto executivo pertencem ao centro do radier, sendo as com menores esforços localizados nas bordas.

Como exemplo, a estaca número 62 mostra uma variação de esforços de 490 KN a 247,3 KN. Essa redistribuição ocorre para boa parte das estacas pertencentes ao centro do radier, na mesma proporção. Já a estaca de número 77, tem seu esforço acrescido de 160 KN para 246 KN, este elemento pertence ao grupo de estacas mais externo ao centro.

Nota-se que o comportamento de maiores redistribuições em termos de magnitudes para as estacas pertencentes ao centro, tal fato comprova a tendência dos esforços se normalizarem com a influência da interação solo-estrutura. No Gráfico 43 é ilustrado bem esse comportamento de redistribuição de esforços das estacas entre os modelos.

Gráfico 43 - Relação entre as curvas de tensões nas estacas entre as análises



Fonte: O Autor (2021).

Possibilita-se com a Tabela 32 e Gráfico 44 a análise do comportamento entre todos os modelos em relação aos valores médios, mínimos, máximos e amplitude dos esforços pertencentes a cada caso. Observa-se que os valores de projeto se distanciam em todas as análises perante os modelos numéricos, pode-se comprovar a grande variação de esforços ao se analisar as amplitudes dos esforços, as cargas de projeto executivo mostram-se com uma grande variação, juntamente com a análise numérica que não considera a interação entre a fundação e a estrutura.

Já os esforços dos dois modelos que consideram a rigidez da estrutura apresentam amplitude de esforços menores. O modelo por estágios tem uma variação um pouco maior em relação ao modelo com estrutura sem estágio, tal fato acontece devido ao carregamento ser posto de maneira não instantânea, sendo a estrutura montada com locação variável, possibilitando assim uma maior diferença de tensão.

Os três modelos numéricos se comportaram de forma parecida em relação a média dos esforços, este comportamento reflete a aplicação de carga ser basicamente a mesma aplicada para todos os casos, sendo a tendência de mudança do comportamento entre os

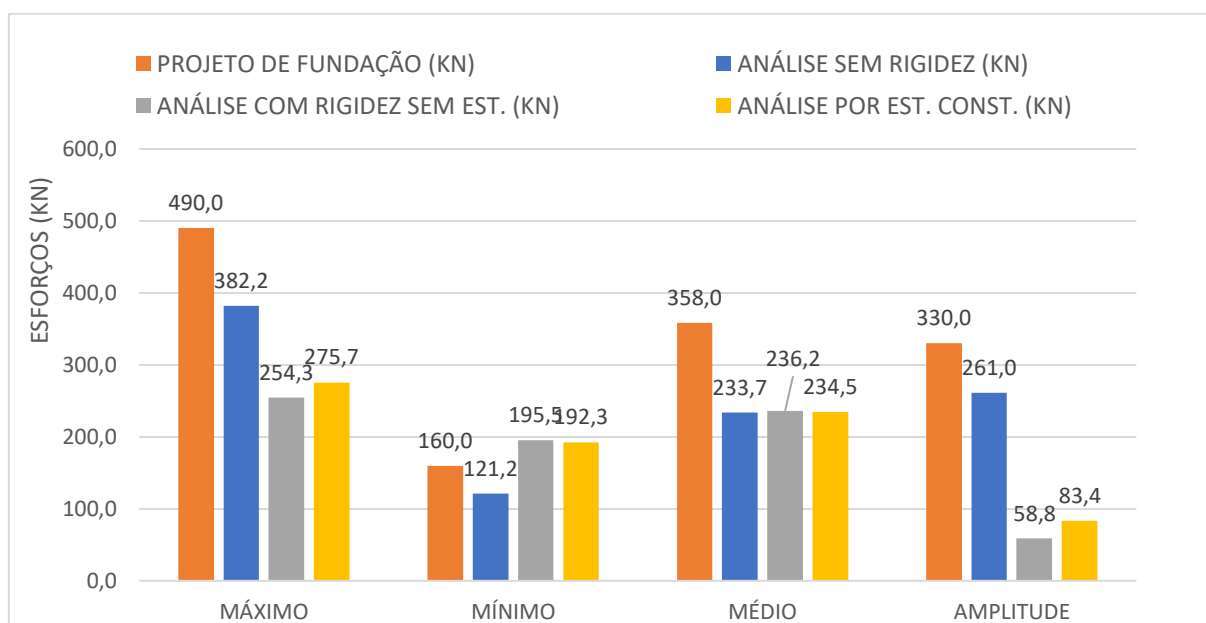
modelos, esta em relação a redistribuição do carregamento devido as rigidezes e a metodologia construtiva adotada para cada modelo, comprovando há divergência entre valores máximos e mínimos entre os casos.

Tabela 32 - Valores dos esforços mínimos, médios, máximos e amplitude para cada caso

RELAÇÃO ENTRE ESFORÇOS MAXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS, ENTRE OS MODELOS (KN)				
VALORES	PROJETO DE FUNDAÇÃO	ANÁLISE. SEM RIGIDEZ	ANÁLISE. COM RIGIDEZ SEM EST.	ANÁLISE POR EST. CONST.
MÁXIMO	490,0	382,2	254,3	275,7
MÍNIMO	160,0	121,2	195,5	192,3
MÉDIO	358,0	233,7	236,2	234,5
AMPLITUDE	330,0	261,0	58,8	83,4

Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 44 - Relação entre os esforços mínimos, médios, máximos e amplitude dos modelos



Fonte: O Autor (2021).

As próximas análises foram feitas em relação a variação de carga percentual de cada modelo em relação ao modelo por estágios, adotado como o mais realista entre os casos analisados, pois leva em consideração grande parte dos fatores que norteiam a interação solo-estrutura, sendo assim será a referência de variação percentual de todos os casos.

Está exposto na Tabela 44, presente no Apêndice B, os valores de variação percentual das cargas nas estacas de projeto executivo, modelo sem consideração de rigidez

da estrutura e análise numérica com rigidez da estrutura sem estágios construtivos, todos relacionados ao modelo de rigidez por estágios construtivos (mais realista).

Os dados de variam percentualmente entre os modelos e apontam que quanto maior a consideração de fatores em relação a interação das partes da estrutura (ISE), menor a variação de carga entre os modelos. A variação entre os modelos por estágios e o projetado para execução da obra chega a se diferenciar em 60 % na sua variação máxima, sendo a mínima com 1 %. O modelo sem rigidez da estrutura aponta também uma alta variação com máxima de 42%, já o modelo que considera a rigidez da estrutura apresenta uma menor variação com média de 12 %, representando sua variação máxima por estaca. Está presente na Tabela 33, os valores máximos, mínimos e médios para as variações percentuais de cada correlação.

Tabela 33 - Valores de variação de esforços mínimos, médios e máximos entre modelos

VALORES MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS PERCENTUAIS ENTRE MODELOS			
VALORES	ANTEPROJETO / ANÁLISE POR ESTÁGIOS	ANÁLISE SEM ESTRUTURA / ANÁLISE POR ESTÁGIOS	ANÁLISE COM ESTRUTURA / ANÁLISE POR ESTÁGIOS
MÍNIMA	1%	0%	0%
MÁXIMA	60%	42%	12%
MÉDIA	33%	15%	5%

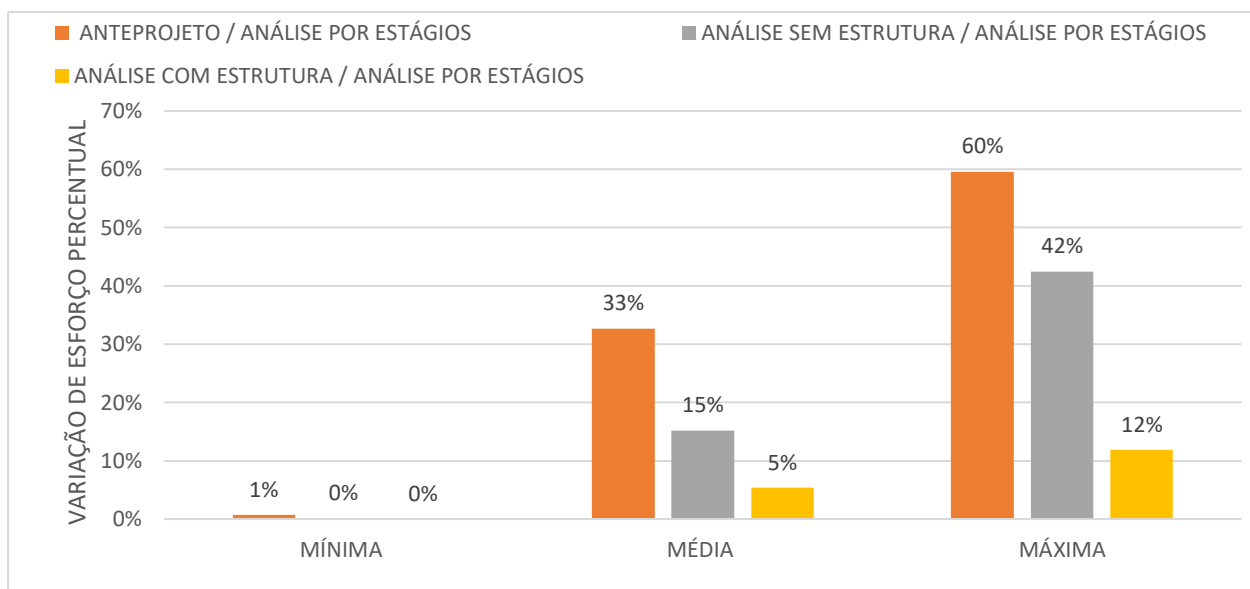
Fonte: O Autor (2021).

No geral, as variações de tensões dos casos estudados em relação ao modelo por estágios mostraram uma variação média de 34 % com relação aos esforços estimados em projeto, 15% para a análise numérica da fundação sem consideração da rigidez da estrutura e 5% de variação de esforços nas estacas em relação ao modelo com consideração da rigidez da estrutura sem estágios construtivos.

Importante destacar que se obteve valores baixos de variação percentual mínimas. Isso reflete que algumas estacas tiveram seus valores de esforços iguais ou próximos entre os modelos em estudo.

Apresenta-se no Gráfico 45 os valores mínimos, médios e máximos para cada caso relacionado, assim pode-se ter uma melhor visualização das variações de esforços entre cada análise de variação de esforços.

Gráfico 45 - Variação percentual de esforços, mínimo, médio e máximo entre os modelos



Fonte: O Autor (2021).

Essas análises refletem o percentual de influência de cada fator em relação a interação solo-estrutura. Lembra-se que o projeto de cargas na fundação do empreendimento analisado, não teve a consideração da ISE, assim não sendo considerado nenhum fator de interação relacionado como: rigidez solo-fundação, fundação-estrutura, estágios e métodos construtivos.

Os percentuais de variações de esforços nas estacas mostram valores médios de 33 %, 15% e 5%, tal fato mostra o quanto de variação de carga a estrutura de fundação pode sofrer se não for considerado a interação solo-estrutura. Em síntese a não consideração da rigidez do solo-superestrutura-infraestrutura e estágios construtivos, haveria uma redistribuição de esforços na estrutura de 1 % a 60 %, com média de 33 % de variação de carga, análise para o modelo de cargas do projeto executivo.

No modelo que não considera a rigidez da estrutura, existiria a possibilidade de variação de carga na estrutura de 0 a 42 %, com uma redistribuição média de 15 %. A influência dos estágios construtivos pode ser gerada com a relação entre o modelo com consideração da estrutura sem estágios construtivos e o modelo por estágios construtivos, mostrando uma variação de esforços na ordem de 0 a 12 % e redistribuição média de 5%, para toda a estrutura.

5.3.2 Resultados de recalques nas estacas

Anteriormente foi discutido o comportamento em relação as bordas do radier, pontos onde se encontravam os pinos de monitoramento, neste ponto, as análises serão feitas para as estacas.

Os valores dos deslocamentos das estacas, para os três modelos numéricos em estudo, sendo eles: análise numérica sem consideração da estrutura, análise numérica com consideração da estrutura sem estágios e análise numérica com rigidez por estágios, estão apresentados no Apêndice B, Tabela 42. Mais à frente os modelos serão comparados em relação as suas variações de recalques com os deslocamentos da análise numérica por estágios tomado como referência.

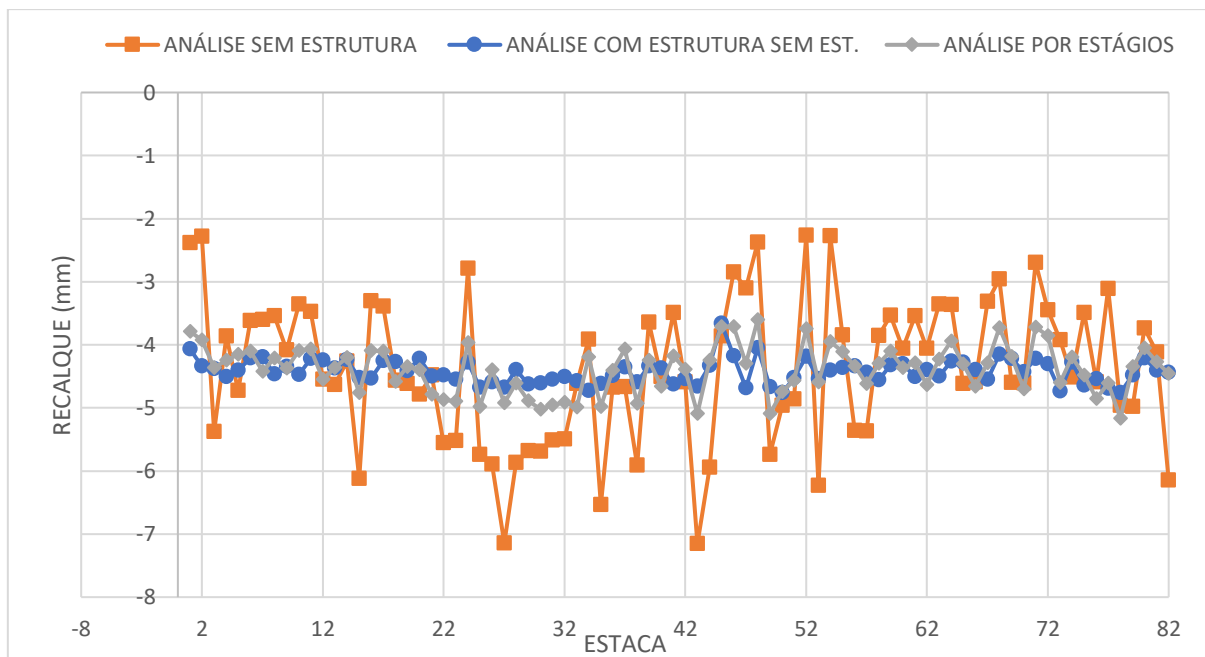
Os resultados dos recalques nas estacas correspondentes ao centro do radier são bem maiores que os presentes nas bordas, essa característica é bem observada na análise numérica sem rigidez da estrutura. A análise numérica com rigidez da estrutura tem seus recalques com valores bem estáveis sem muita variação, isso é consequência da rigidez da superestrutura que torna os recalques diferenciais menores.

Os deslocamentos no modelo por estágios também têm seus recalques diferenciais com baixa amplitude, mas os seus valores ainda se mostram maiores que os diferenciais do modelo com estrutura sem estágios, pois a construção por etapa traz esforços diferenciais possibilitando maiores distorções, mas os recalques diferenciais ainda são de baixa magnitude se comparados com modelos simplificados sem ISE. Esses comportamentos dos recalques nas estacas podem ser vistos no Gráfico 46, onde está presente o comportamento dos recalques nas estacas para cada análise numérica.

As curvas de recalques nas estacas, mostra-se com valores de amplitudes variáveis devido aos modelos numéricos considerados, mas uma característica comum entre todos os casos está relacionada ao ponto médio dos deslocamentos.

A apresenta-se na Tabela 34 e o Gráfico 47 os valores e comportamentos, respectivamente, dos recalques nas estacas em relação aos valores mínimos, médios, máximos e o recalque diferencial máximo de cada modelo.

Gráfico 46 - Comportamento das estacas entre modelos numéricos



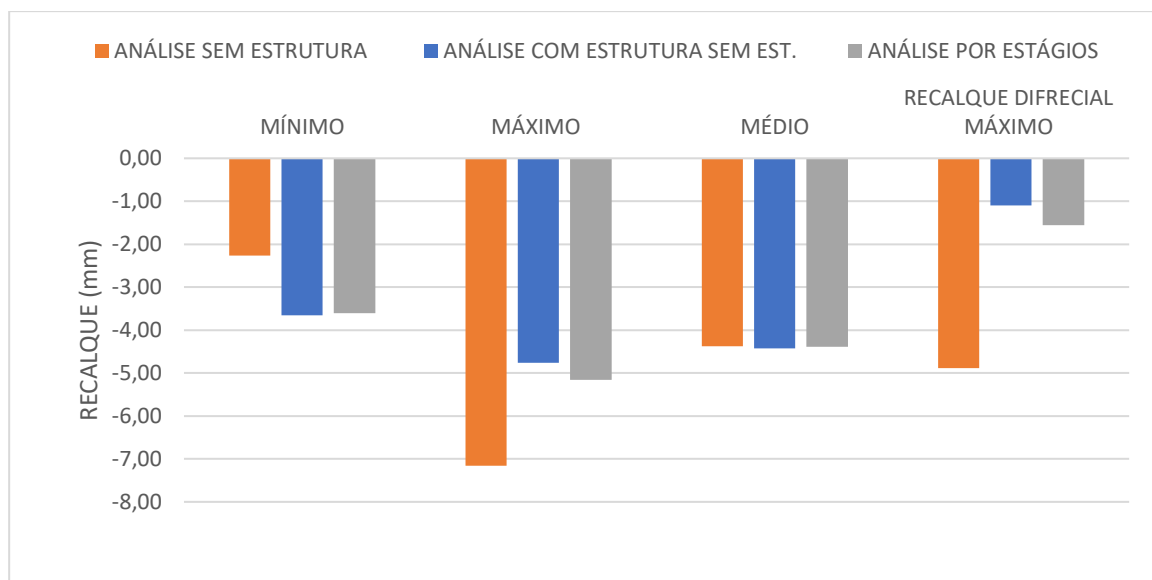
Fonte: O Autor (2021).

Tabela 34 - Valores de recalques mínimos, médios, máximos e diferencial máximo nas estacas

RECALQUES MÍNIMOS, MÉDIOS, MÁXIMOS E DIFERENCIAL NAS ESTACAS PARA MODELOS NUMERICOS			
ESTACAS	ANÁLISE SEM ESTRUTURA	ANÁLISE COM ESTRUTURA SEM ESTÁGIOS	ANÁLISE POR ESTÁGIOS
MÍNIMO	-2,27	-3,66	-3,60
MÁXIMO	-7,16	-4,76	-5,16
MÉDIO	-4,38	-4,42	-4,39
DIFERENCIAL MÁXIMO	-4,89	-1,10	-1,56

Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 47 - Relação entre recalques mínimos, médios, máximos e diferencial máximos nas estacas



Fonte: O Autor (2021).

Observa-se nos dados e ilustrações o quanto a consideração da rigidez da estrutura influencia nos recalques diferenciais, mudando o cenário de cargas da estrutura de fundação. Nota-se que quando se considera a interação solo-estrutura, existindo uma grande redistribuição de esforços que tendem a uniformizar os recalques.

Os valores de variação percentual de recalques para os modelos numéricos, que não considera a rigidez da estrutura e o que considera a rigidez da estrutura, em relação aos deslocamentos gerados no modelo mais realista com consideração da rigidez por estágios construtivos, encontra-se na Tabela 41 do Apêndice B. Os valores de variação percentuais de recalques máximos, mínimos e médios, estão apresentados na Tabela 35, revelam o comportamento da estrutura devido a consideração ou não dos fatores que regem a interação solo-estrutura.

Tabela 35 - Valores de variação percentual de recalques máximos, mínimos e médios entre os modelos

VARIAÇÃO DE RECALQUES EM PERCENTUAL ENTRE MODELOS NUMERICOS		
ESTACAS	ANÁLISE SEM RIGIDEZ DA ESTRUTURA / ANÁLISE POR ESTÁGIOS	ANÁLISE COM RIGIDEZ DA ESTRUTURA / ANÁLISE POR ESTÁGIOS
MÍNIMO	0%	0%
MÁXIMO	74%	14%
MÉDIO	20%	6%

Fonte: O Autor (2021).

As variações percentuais de recalque na estrutura de fundação representaram valores médios de 20% para a análise numérica sem consideração da rigidez da estrutura, com valor máximo de variação de 74% e mínimo de 0%. Nota-se com isso que a representação da interação solo-estrutura em projetos pode ter variações de recalques nessa ordem de grandeza, devido a consideração da rigidez da estrutura e estágios construtivos. Lembra-se que esse modelo, sem considerar a rigidez da superestrutura, ainda considera a rigidez relativa solo-fundação. Se os valores fossem comparados a um modelo de projeto convencional, os recalques diferenciais seriam ainda maiores.

Para o modelo que considera a interação solo-estrutura sem estágios construtivos, observou-se uma variação percentual média de recalque de 6 %, sendo a variação máxima de 14 % e a mínima de 0 %. Observa-se assim que a não consideração dos estágios construtivos pode acarretar variações de recalques em projetos na ordem de 0 a 14 %.

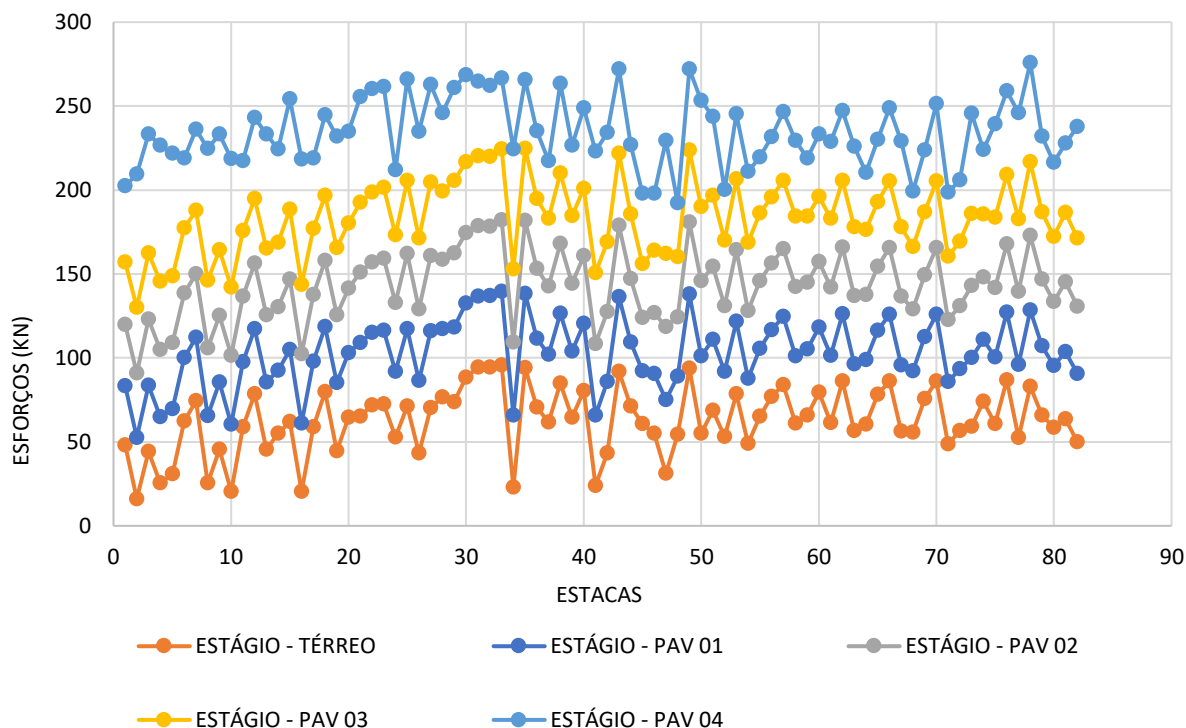
5.4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA FUNDAÇÃO PARA O MODELO POR ESTÁGIOS.

As próximas análises foram feitas em relação a análise numérica por estágios. Avaliado em relação a redistribuição de cargas com os avanços construtivos, se colocou os seus comportamentos como um estudo a parte, pois nenhum dos outros casos em estudo tem alguma etapa intermediária sobre seus esforços.

Está a mostra na Tabela 45 do Apêndice B, os valores de esforços para cinco etapas construtiva, correspondentes a cada pavimento terminado a estrutura, não se expôs todos os estágios construtivos pois seriam muitos, com valores de 21 estágios para as 82 estacas, assim as análises foram feitas por pavimento construído.

Nota-se que com o passar do número de pavimentos existe um acréscimo de carga observando cada estaca individualmente, com tudo isso, passa a não ser linear com o aumento do número de pavimentos. Ilustra-se no Gráfico 48 o comportamento de cada pavimento com a evolução construtiva em relação a seus esforços.

Gráfico 48 - Distribuição dos esforços nas estacas por estágios construtivos

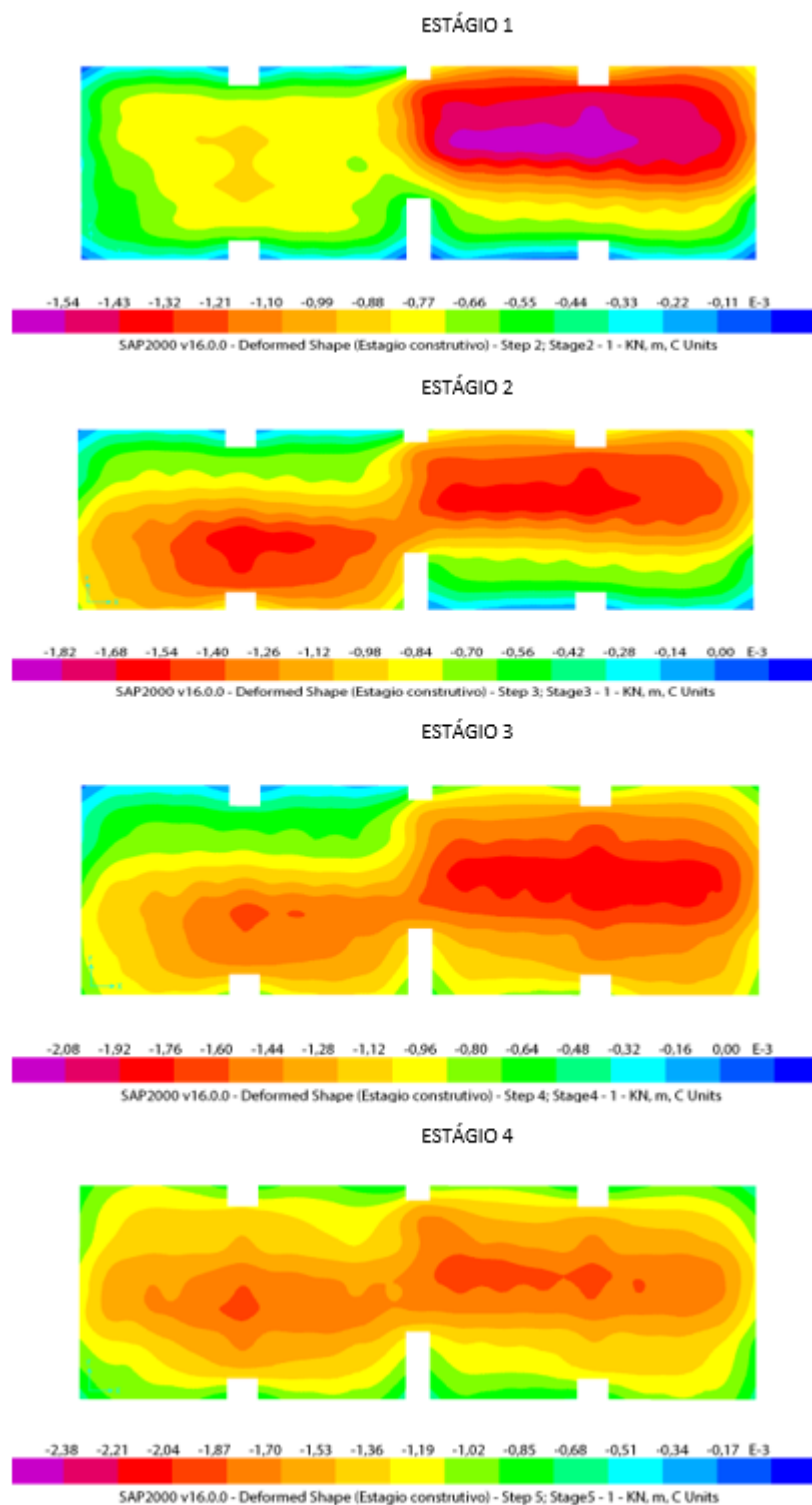


Fonte: O Autor (2021).

Observa-se que no quarto pavimento os esforços nas estacas passam até uma menor variação, colocando a teoria de estabilização dos valores de redistribuição com o avanço construtivo consequentemente aumento do número de pavimentos. Consegue-se notar a uniformização dos valores de esforços com as linhas de tendencias criadas para cada pavimento.

Enfatiza-se na Figura 43 os deslocamentos da estrutura de fundação, em relação aos estágios construtivos. As análises do comportamento nas ilustrações comprovam a importância da metodologia construtiva no desempenho do radier estaqueado. As imagens comprovam ainda o comportamento observado nos monitoramentos, credibilizando tanto a análise numérica quanto os levantamentos realizados campo.

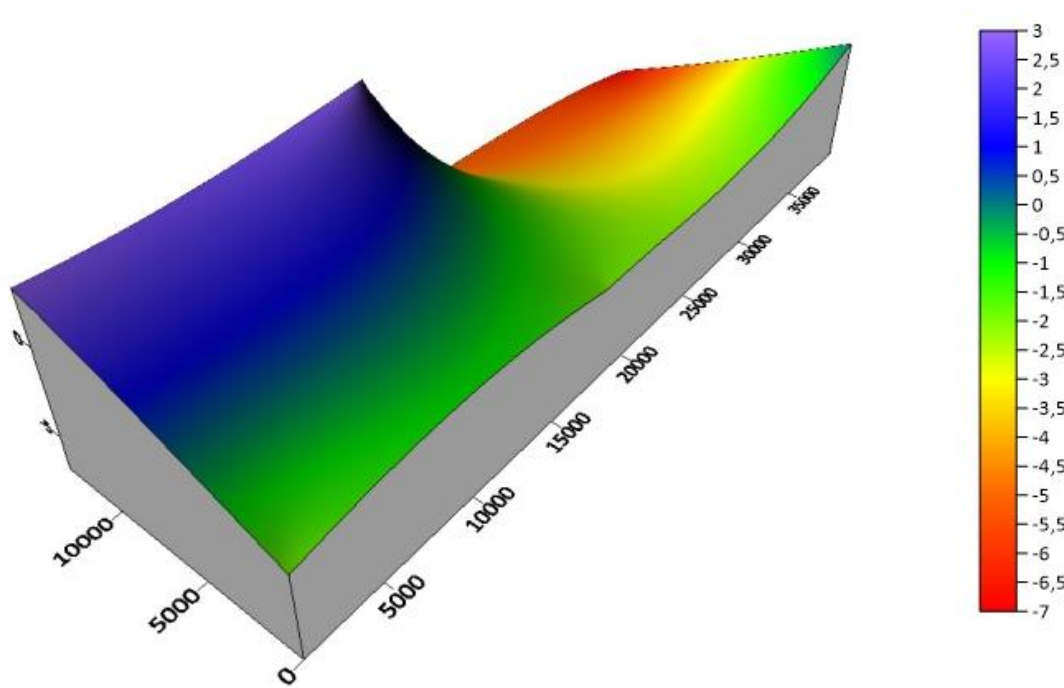
Figura 43 - Deslocamento da estrutura de fundação, em relação aos estágios construtivos.



Fonte: O Autor (2021).

Mostra-se na Figura 44 o comportamento da estrutura de fundação em 3D, exemplificando o desempenho da estrutura para o primeiro estágio construtivo, nota-se uma grande distorção da placa do radier devido ao processo construtivo adotado. Os valores de recalque são correspondentes aos dados do monitoramento em campo.

Figura 44: Comportamento da estrutura de fundação para o primeiro estágio construtivo.



Fonte: O Autor (2021).

5.4.1 Comportamento do radier estaqueado entre os modelos numéricos

Está presente na Tabela 36 as informações sobre o comportamento do radier estaqueado para cada análise numérica estudado. Os valores são em relação a transmissão de esforços de cada elemento da fundação (estaca ou radier) para o solo, em termos de porcentagem.

Tabela 36 - Avaliação do comportamento do radier estaqueado para cada análise numérica

COMPORTAMNETO DO RADIER ESTAQUEADO EM RELAÇÃO AS ANÁLISES NUMÉRICAS			
ANÁLISES	ANÁLISE SEM ESTRUTURA	ANÁLISE COM ESTRUTURA SEM EST.	ANÁLISE POR ESTÁGIOS CONST.
Total edificação	31723,955	30879,065	30879,065
% estacas	60,41%	62,73%	62,27%
% radier	39,59%	37,27%	37,73%

Fonte: O Autor (2021).

Para os três modelos criados se tem uma boa distribuição de carga para os elementos estaca e radier, mostrando um bom aproveitamento da estrutura de fundação em radier estaqueado.

Está proposto na Tabela 37 a atenção para a semelhanças entre as cargas gerados na análise numérica e os projetados pelo calculista estrutural, a relação se mostra com uma boa fidelidade ao projeto, mostrando uma variação de carga total menor que 5%.

Tabela 37 - Comparação entre as cargas criadas pelas análises numéricas e o projeto executivo

Total edificação (SAP)	30879,07
Total edificação (Proj.)	29360,00
Variação da carga (%)	4,92%

Fonte: O Autor (2021).

6 CONCLUSÃO

São apresentadas nesse capítulo as conclusões dos resultados obtidos no desenvolvimento dessa dissertação, sendo elas divididas em tópicos baseados nos principais objetivos. Ainda se apresenta as sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao desenvolvimento do trabalho.

6.1 MONITORAMENTO DA ESTRUTURA DE FUNDAÇÃO

A partir das medições de recalques em campo, foi possível acompanhar o comportamento da estrutura de fundação, principalmente com relação ao comportamento do radier. Os monitoramentos de recalques dos blocos 03 e 08, mostram comportamento semelhantes aos deslocamentos medidos, os recalques médios foram de -1,7 mm e -3,2mm, respectivamente.

Observando os deslocamentos no primeiro quadrante de concretagem foram os maiores recalques na ordem de -8 mm para o bloco 03, e -12 mm para o bloco 08. Tal fato se justifica a consequência do processo construtivo com execução parcial da edificação, pois as primeiras concretagens não existem nenhuma rigidez da estrutura.

O monitoramento por estágios, evidenciou em termos de deslocamento, a relação entre o número de pavimentos e a interação solo-estrutura, mostrando que com o aumento da rigidez da estrutura, as variações de recalque diminuem significativamente, com redução de recalques diferenciais máximos por pavimento variando de 13 mm para o térreo, a 3 mm no quinto pavimento.

Analisando a metodologia construtiva, a mesma mostrou-se crítica, ao quarto quadrante, que corresponde a última concretagem do pavimento e oposto a primeira. verificou-se o levantamento da placa do radier, observando-se distorções entre cotas positivas e negativas a estrutura. Mostra-se de grande relevância para o desempenho da estrutura em relação a distorções angulares e esforços adicionais ao processo construtivo, com isso é evidente a necessidade de avaliação e estudo em torno a evolução construtiva em projetos com execução parcial.

O monitoramento de recalques se apresenta como uma instrumentação muito importante para questões de segurança em relação ao desempenho da edificação durante e após seu término e controle tecnológico em obra, todas as análises anteriores sobre o comportamento da estrutura só foram possíveis graças o monitoramento realizado em campo.

6.2 ANÁLISES NUMÉRICAS

Em relação aos modelos construtivos, A primeira análise foi em relação ao comportamento da estrutura de fundação em relação aos deslocamentos entre os três modelos, observou-se que o modelo sem consideração da interação solo-estrutura, teve seus recalques diferenciais maiores em relação aos outros dois modelos, obtendo coeficiente de variação de recalque em 36%, enquanto os outros modelos com rigidez da estrutura tiveram variação de 5 % para o modelo por estágios e 2 % para o modelo com carregamento instantâneo.

Outra análise comprova a representatividade dos modelos numéricos criados, quando comparados os seus deslocamentos gerados no SAP 2000 com os deslocamentos monitorados em campo, as comparações foram semelhantes, em relação as medias dos estágios construtivos e sobre os deslocamentos finais da estrutura entre os casos. Os recalques previstos em anteprojeto executivo, resultando que seus valores se distanciaram muito, tanto dos recalques monitorados quanto dos estimados por modelos numéricos.

6.3 COMPORTAMENTO DAS ESTACAS COM E SEM ISE

Os esforços nas estacas, a redistribuição média dos esforços em porcentagem em comparação com a análise numérica por estágios (mais realista), houve redistribuição de esforços média de 33% na comparação com os esforços do anteprojeto, 15 % com a análise sem rigidez e 5% em relação as cargas da análise com rigidez da estrutura sem estágios.

Essas variações de porcentagem entre as análises, refletem o quanto cada fator da interação solo-estruturas representa para a redistribuição de esforços, esses fatores são: rigidez relativa entra solo-fundação, fundação-estrutura e estágios construtivos. A redistribuição de carga nas estacas devido a consideração solo-estrutura, teve como características de redução de esforços para as estacas centrais e acréscimos de cargas para os elementos externos.

As análises em relação aos comportamentos dos recalques nas estacas por consequência da consideração da interação solo estrutura, mostrou variações de recalque entre os três modelos. O modelo sem consideração da rigidez da estrutura, mostrou variações maiores em relação aos demais, com recalque diferencial máximo de 4,89 mm, no entanto os outros dois modelos com rigidez, com valores na ordem de 1,10 mm e 1,56 mm, tal fato comprova a influência da ISE na diminuição dos recalques diferenciais.

A avaliação da redistribuição de recalques em porcentagem, em relação a análise numérica por estágios, mostrou variação média para o modelo sem interação solo-estrutura de 20%, já com relação ao modelo com ISE sem estágios foi de 6%. A porcentagem de variação

entre os modelos representa a influência de cada fato considerado ou não, na análise de interação solo-estrutura.

As avaliações a respeito do comportamento das estacas com relação a consideração ou não da interação solo-estrutura, prova o quanto pode variar o estado de tensões e comportamento da estrutura, mostra-se a importância de se considerara a ISE mesmo para edifícios de até cinco pavimentos, onde a norma NBR 16055:2012, diz não ser obrigatório.

6.4 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

A retroanálise a respeito do módulo de elasticidade (E_s) e coeficientes de reação vertical (K_v) e mola (K_{mo}), mostraram-se menores comprados as estimativas geradas pelos métodos presentes na literatura com base no número de SPT, criando-se um coeficiente de variação entre os métodos, podendo-se assim ser aplicado a estimativas feitas apenas com base de ensaios a percussão. Os valores dos parâmetros encontrados para o maciço da região em estudo, pode servir de base de dados inicial para projetos e estudos da mesma localidade.

6.5 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para pesquisas futuras, acerca do tema, se tem:

- Realizar correlações estatísticas dos dados do monitoramento.
- Realizar estudo sobre a influência nos esforços da superestrutura com comportamento da placa de radier, quanto ao seu levantamento.
- Estudo da análise da redistribuição de cargas na estrutura de parede de concreto com e sem a consideração da interação solo-estrutura.
- Realizar estudos com representação do maciço de solo em meio contínuo.
- Estudo da interação solo-estrutura por estagio, com outra metodologia construtiva.

REFERÊNCIAS

- ANTONIAZZI, J. P. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- ALONSO, U. R. (1991). **Previsão e controle de fundações**, Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 142p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Parede de Concreto: Coletânea de ativos**. São Paulo, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010. 33 p.
- ARAÚJO, A. G. D. **Provas de Carga Estática com Carregamento Lateral em Estacas Escavadas Hélice Contínua e Cravadas Metálicas em Areia**. Natal, 2013. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte–UFRN, Natal, 2016. 221 p.
- AKINMUSURU, J. O. **The influence of a pile cap on bearing capacity of piles in sand**. 2013. Dissertação (Mestrado). University of Zaria Nigéria, Zaria, 1973.
- AKINMUSURU, J. O. (1980). **Interaction of piles and cap in piled footing**. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 106 (11); 1263-1268.
- BARBOSA, G. R. P. (2017). **Análise da influência dos parâmetros de deformabilidade do solo no comportamento estrutural de edificação com fundação tipo radier**/GustavoRoux Perazzo Barbosa – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2017.
- BRAGUIM, T. C. **Utilização de modelos de cálculo para projeto de edifícios de paredes de concreto armado moldadas no local**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- BRAGUIM, T. C.; BITTENCOURT, T.N.; (2014) **Design of reinforced concrete walls cast in place for the maximum normal stress of compression**. RIEM, Ibracon Structures and Materials Journal. 18:498-533. 2014.
- BARATA, F. E. **Recalques de edifícios sobre fundações diretas em terrenos de compressibilidade rápida e com consideração da rigidez da estrutura**. 1986. Tese de

concurso para professor Titular do Departamento de Construção Civil do Setor de Geomecânica da EEUFRJ, Rio de Janeiro, 1986.

BARROS, R. A. **Avaliação do comportamento de fundações em estaca hélice através de medidas de recalques**. Dissertação (Mestrado) – Campos dos Goytacazes– RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 118p. 2005.

BEZERRA, J. E. **Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações**. 2003, 193 p. Dissertação (Mestrado), Publicação nº G.DM-104/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF. 2003

BITTENCOURT, D. M. A. **Construção de uma Ferramenta Numérica para Análise de Radiers Estaqueados**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, p. 46-50, nov. 2012.

CÊSTA, G. A. **Porque utilizamos paredes de concreto**. In: CONCRETE SHOW. 2009, São Paulo. Anais. São Paulo: Parede de Concreto – velocidade com qualidade. 2009.

CORRÊA, M. R. S. **Aperfeiçoamento de modelos usualmente empregados no projeto de sistemas estruturais de edifícios**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

COLARES, G. M. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

DANTAS, P. J. **Avaliação de desempenho de radiers na região metropolitana do Recife**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

DANZIGER, F. A. B.; DANZIGER, B. R; CRISPEL, F. A. **A medida dos recalques desde o início da construção como um controle de qualidade das fundações**. In: IV SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 2000, São Paulo. Anais. São Paulo, v.1, p.191-202, 2000.

EL-MOSSALLAMY, Y. (2002). **Innovative Application of Piled Raft Foundation in stiffand soft subsoil**. Deep Foundations 2002, ASCE, Orlando, Florida: 426-440.

EL-MOSSALLAMY. Y. (2011). **Modelling the behaviour of piled raft applying Plaxis3D Foundation Version 2**. PLAXIS Practice: 10-13.

FONTE, A. O. C., PONTES FILHO, I., JUCÁ, J. T. F. (1994) **Interação solo-estrutura em edifícios altos**. In. X COBRAMSEG, Foz do Iguaçu, PR, Anais, v.1, p.239-46.

FARIAS, Rômulo da Silva. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto com a incorporação da interação solo-estrutura e das ações evolutivas**. 2018. 263p. Tese (Doutorado) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2018.

FREITAS, M. S. **Análise dos deslocamentos e dos momentos fletores nas fundações e nos pilares de pontes retas ortogonais em concreto armado considerando a interação solo estrutura**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

GARCIA, Jean Rodrigo. **Análise experimental e numérica de radiers estakeados executados em solo da região de Campinas/SP**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2015.

GONÇALVES, J. C. **Avaliação da influência dos recalques das fundações na variação de cargas dos pilares de um edifício**. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 126p. 2004

GOSHY, A. D. (1978) **Soil-foundation-structure interaction**. Journal of the Structural Division, ASCE. Vol. 104, p. 749-761, 1978.

GUSMÃO, A. D. **Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.

GUSMÃO, A. D. (1994) **Aspectos relevantes da interação solo-estrutura em edificação**. Solos e Rochas, São Paulo, v.17, p. 47-55, abr. 1994.

GUSMÃO, A. D., GUSMÃO FILHO, J. A. (1994) **Avaliação da influência da interação solo-estrutura em edificações**. X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, v.1, p. 67-74, 1994.

GUSMÃO FILHO, J. A. **Contribuição à prática de fundações: a experiência de Recife**. Tese (Professor Titular) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1995.

GUSMÃO, A. D. (2006) **Desempenho de fundações de edifícios**. In: Palestras XIII COBRAMSEG, Curitiba, pp 215-240.

GUSMÃO, A. D. (1994) **Aspectos relevantes da interação solo-estrutura em edificações**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, v.17 (1), p.47-55.

GUSMÃO, A. D., GUSMÃO FILHO, J. A. (1994) **Construction sequence effect on settlements of buildings**. In. XI ICSMFE, New Delhi, v.3, p.1803-1806; apud GUSMÃO (2006).

- GUSMÃO, A. D., CALADO JR., I. H. (2002) **Estudo dos efeitos da interação solo estrutura em uma edificação com fundação em terreno melhorado**. In. XII COBRAMSEG, São Paulo, SP, ABMS, Anais, v.3, p.1743-1752.
- GUSMÃO FILHO, J. A.; GUIMARÃES, L.J.N., (1997) **Limit Stiffness in soil structure interaction of buildings**. Proc. 14th int. conf. on soil mechs and found. Eng. Hamburg 2: 807-808. 1997.
- HARR, M. E. (1996) **Foundations of theoretical soil mechanics**. New York: MacGraw-Hill BookCo.1966.
- HERNÁNDEZ, J. M., Avant-Garde Constructions. Disponível em: <<http://www.jmhdezhdez.com/2011/03/copyright-jose-miguel-hernandez.html>>. Acesso em 17/09/2020.
- HERNÁNDEZ, J. M., Avant-Garde Constructions. Disponível em: <<http://www.jmhdezhdez.com/2011/04/burj-khalifa-dubai-supertall-som.html>>. Acesso em 17/09/2020.
- HORIKOSHI, K. & RANDOLPH, M. F. (1996). **Centrifuge Modelling of Piled Raft Foundations on Clay**. Geotechnique, 46(4): 741-752.
- I.S.E. - INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS (1989). **Soil-structure interaction** – The real behavior of structures. London, 120p.
- IWAMOTO, R. K. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 140p. 2000.
- JANDA, T., CUNHA, R. D., KUKLK, P., & ANJOS, G. D. (2009). **Three dimensional finite elemento analysis and back-analysis of CFA standard pile groups and piled rafts founded on tropical soil**. Soils and Rocks, 32(1): 3-18.
- JUSTUS, P. **Construção de casa entra na fôrma**. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,construcao-de-casa-entra-naforma,419450>>. Acesso em 06/10/2020.
- KATZENBACH, R.; ARSLAN, U.; MOORMANN, C. (2000). **Piled raft foundation Projects in Germany**. In: Hemsley, J. A. (editor). Design applications of Raft Foundations. 1st London: Thomas Telford Ltd. 2000. p. 323-391. ed.
- KISHIDA, H.; MEYERHOF, G. G. (1965) **Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sands**. Proc. 7th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v.11.

- LIMA, B.S. (2007). **Otimização de Fundações Estaqueadas**. Dissertação (Mestrado), Publicação G.DM-151A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118 p.
- LOPES, F. R; GUSMÃO, A. D. (1991). **On the influence of soil - structure interaction in the distribution of foundation loads and settlements**. X ECSMFE Deformation of Soil and Displacements of Structures, Vol II. Firenze – Itália. Apud COLARES, (2006).
- LIU, Y. P. et al. (2010) **Second-Order Analysis and Design of Wall-framed Structures Allowing for Imperfections**. Advances in Structural Engineering, v.13, n.3, p.513 – 524, jun. 2010.
- LOPES, F.R.; GUSMÃO, A.D. (1991) **On the influence of soil-structure interaction in the distribution of foundation loads and settlements**. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10, Firenze, 1991. Proceedings. Rotterdam, A. A. Balkema, v. 2, p. 505-9, 1991.
- LEONI, J. A. (2009) **Apunte de coeficiente de balastro**. Laboratorio de mecanica desuelos. Facultad de Ingenieria (U.N.L.P). Buenos Aires, Argentina.
- LUZ, G. (2012) **Comparação: metade parede de concreto, metade alvenaria estrutural**. Tecnologia do concreto armado em notícias. p.8-10, maio 2012.
- LU, Y.; LI, B.; XIONG, F.; GE, Q.; ZHAO, P.; LIU, Y. (2020). **Simple discrete models for dynamic structure-soil-structure interaction analysis**. Engineering Structures. v. 206, 2020. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/engstruct>. Acesso em 28/06/2020.
- MANDOLINI, A. (2003). **Design of pile draft foundations: Pratices and development**. In: Proceedings 4th international geotechnical seminar on deep Foundation on bored and auger piles. Rotterdam, p.59-80.
- MORAES, M.C. **Estruturas de Fundações**. São Paulo: MCGRAW-HILL, 1976.
- MEYERHOF, G. G. (1953) **Some Recent Foundation Research and its Application to Design**. Structural Engineer, Vol. 31, pp. 151-167; apud GUSMÃO (1994).
- MOTA, M. M. C. **Interação solo-estrutura em edifícios com fundação profunda: método numérico e resultados observados no campo**. 2009. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- NASCIMENTO NETO, J. A. **Investigação das solicitações de cisalhamento em edifícios de alvenaria estrutural submetidos a ações horizontais**. 1999. Dissertação Mestrado em 232 Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

- NUNES, V. Q. G. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- O'NEIL, M. W., CAPUTO, V., DE COCK, F., HARTIKANIEN, J. & METS, M. (1996) **Case histories of pile supported rafts.** Report for ISSMFE TC18, University of Houston, Texas.
- OLIVEIRA, M. S; ROCHA, F. M. A; FERREIRA, S. R. M; OLIVEIRA, J. T. R. (2016) **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.
- PETROBRÁS. **N-1848: Projeto de fundações de máquinas.** Brasil, 2010.
- PEREIRA, G. S. **Contribuição à análise de estruturas de contraventamento de edifícios em concreto armado.** 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- PEREIRA, A. C. O. **Estudo da influência da modelagem estrutural do núcleo nos painéis de contraventamento de edifícios altos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- POULOS, H. G. (2001) **Piled raft foundations: design and applications.** Géotechnique, França, v. 51, n. 2, p. 95-113, mar. 2001.
- POULOS, H. G. (2001). **“Methods of Analysis of Piled Raft Foundations”.** A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. Chairman: Prof. Dr. Ir W.F. Van Impe. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- POULOS, H. G. (1991) **Foundation economy via piled raft systems.** Keynote Paper of Piletalk International, Kuala Lumpur, v. 91, p. 97-106, mar. 1991.
- RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. (1991). **Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundação direta.** In: Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 25, Porto Alegre, 1991. Anais, v. 2, pp. 433-444.
- RINCON, E.R. **“Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento”.** 2016. Tese (Doutorado), Publicação G.TD-

119/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 237 p. 2016.

REIS, J. H. C. **Interação solo-estrutura de grupo de edifícios com fundações superficiais em argila mole.** São Carlos, 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 155p. 2000.

SAVARIS, Gustavo. **Monitoração de recalques de um edifício e avaliação da interação solo estrutura.** Campos dos Goytacazes, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2008.

SALES, M. M. **Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas.** Brasília, 2000, 229p. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pub. G.TD-002A/00. Brasília, DF. 2000.

SALOMÃO, Thiago Schroeder; FAGGION, Pedro Luis. **Monitoramento de recalques sofridos no Edifício The Royal Plaza.** II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2008.

SANTOS.Y. R. P. **Estudo da interação solo-estrutura de um caso de obra de edifícios com fundações em maciço rochoso.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SANTOS, M. G. C. **Análise Estrutural dos Efeitos da Deslocabilidade dos Apoios de Edifícios de Paredes de Concreto Moldadas no Local.** São Carlos, 2016. 271 p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, F. T., PIMENTEL, R. L., BARBOSA, N. P. (2003). **Análise de patologias em estruturas de edificações da cidade de João Pessoa.** 45º Congresso Brasileiro do Concreto.

SOARES, W. C. **Radier Estaqueado Com Estacas Hollow Auger Em Solo Arenoso.** 2011. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil. Recife, 2011. 340p.

SOUZA, R. A, REIS, J. H. C. (2008). **Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas.** Acta Sci. Technol. Maringá, v. 30, n. 2, p. 161-171, 2008.

SOUSA, L. C. M. **Estudo experimental do comportamento de sapatas assente em solo poroso reforçado.** 2003. Dissertação (Mestrado), Publicação G.DM-106A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2003. 133p.

SCARLAT, A.S. **Effect of soil deformability on rigidity: related aspects of multistory buildings analysis.** ACI Struct. J., Detroit, v. 90, n. 2, p.156-162, 1993.

- TEIXIERA, R. S. **Resistência ao cisalhamento de um solo compactado não saturado**, 1996. Dissertação (Mestrado), Departamento de Geotecnia, São Carlos, 1996. EESC/USP.161p.
- TERZAGHI, K. **Evaluation of coefficient of subgrade reaction**. Geotechnique, London, v. 5, n. 4, p. 297-326, 1955.
- TERZAGHI, K.; PECK, R.B. **Soil mechanics in engineering practice**. 1 ed. New York: John Wiley and Sons Co. 566p, 1948.
- TERZAGHI, K.; PECK, R.B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3 ed. New York: John Wiley and Sons Co. 549p, 1996.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. (2004). **Fundações**, volume 1. Nova Edição. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 226p.
- TESTONI, E. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto por meio de pórtico tridimensional sobre apoios elásticos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- YAGUI, T. **Estruturas constituídas de paredes delgadas com diafragmas transversais**. 1971. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1971.
- YAGUI, T. **Análise de estruturas de edifícios construídas de núcleo de concreto armado e pilares ou pendurais de aço (carregamento crítico de instabilidade)**. 1978. Tese (livredocência) – Universidade de Campinas, 1978.
- ZEEVAERT, L. (1957). **Compensated Friction-pile Foundation to Reduce the Settlement of Buildings on Highly Compressible Volcanic Clay of Mexico City**. Proc. 4 ICSMFE, London, V.2.
- ZEEVAERT, A (1957). *Behaviour of the Latin american Tower in Mexico City*. Geotéchnique, 8(3): 115-113.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS RECALQUES POR ESTÁGIOS

Tabela 38 - Resultado dos recalques para cada pino de monitoramento, bloco 03

PINOS	RECALQUES BLOCO 3 (mm)																				
	LEITURAS POR ESTÁGIOS DA OBRA																				
	EST 1	EST 2	EST 3	EST 4	EST 5	EST 6	EST 7	EST 8	EST 9	EST 10	EST 11	EST 12	EST 13	EST 14	EST 15	EST 16	EST 17	EST 18	EST 19	EST 20	EST 21
1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	2	1	1	0	-2	-1	0	0	0	0	0	0
2	0	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-4	-2	-1	-2	-2	-2
3	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-2	0	0	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2
4	0	-1	-1	0	-2	-1	-2	-2	-2	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-2	-1	-1	-1	-2	-2
5	0	0	0	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	0	1	1	1	-	3	3	3
6	0	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	1	1	-	1	3	3
7	0	-1	-1	-2	-4	-4	-5	-5	-6	-6	-6	-6	-5	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-5
8	0	-6	-6	-7	-5	-8	-7	-7	-7	-7	-7	-6	-7	-8	-7	-6	-7	-7	-7	-7	-7

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 39 - Resultado dos recalques para cada pino de monitoramento, bloco 08

PINOS	RECALQUES BLOCO 8 (mm)																				
	LEITURAS POR ESTÁGIOS DA OBRA																				
	EST 1	EST 2	EST 3	EST 4	EST 5	EST 6	EST 7	EST 8	EST 9	EST 10	EST 11	EST 12	EST 13	EST 14	EST 15	EST 16	EST 17	EST 18	EST 19	EST 20	EST 21
1	-	0	-1	-1	0	-1	0	0	-1	-1	0	-3	0	-1	0	0	1	1	1	1	1
2	-	0	-1	-1	-2	-2	-1	0	-2	-2	0	-3	-1	-3	-2	-3	-1	0	-2	-2	-2
3	-	-2	-2	-2	-3	-2	-1	-2	-3	-2	-1	-3	-2	-2	-4	-2	-2	-2	-3	-3	-3
4	-	-1	-2	0	-1	-3	-1	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-4	-1	-2	-2	-4	-1
5	-	1	2	-1	2	0	1	1	-1	0	1	0	1	-2	0	0	1	-1	-1	0	0
6	-	-1	-1	-1	-2	-3	-1	-2	-2	-2	0	-2	-3	-2	-2	-4	-2	-3	-3	-3	-3
7	-	-8	-8	-10	-9	-9	-10	-8	-9	-10	-9	-8	-9	-8	-10	-11	-9	-10	-10	-10	-11
8	-	-8	-9	-9	-9	-9	-10	-11	-12	-10	-10	-8	-9	-10	-10	-12	-9	-9	-9	-9	-9

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 40 - Valores de previsão de recalques para pinos a cada estágio construtivo

RECALQUES NOS PINOS, PARA ANÁLISE POR ESTÁGIOS CONSTRUTIVOS (mm)																					
PINOS	EST. 1	EST. 2	EST. 3	EST. 4	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST. 9	EST. 10	EST. 11	EST. 12	EST. 13	EST. 14	EST. 15	EST. 16	EST. 17	EST. 18	EST. 19	EST. 20	EST. 21
Pino 01	-0,4	-0,3	-0,3	-1,2	-1,1	-1,1	-1,1	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-2,7	-2,6	-2,7	-2,7	-3,5	-3,4	-3,5	-3,5	-4,3	-4,2
Pino 02	-0,2	-0,2	-0,2	-1	-0,9	-0,9	-1	-1,7	-1,6	-1,6	-1,7	-2,4	-2,3	-2,3	-2,5	-3,1	-3,1	-3,1	-3,3	-3,9	-3,8
Pino 3	-0,4	-0,4	-1,1	-1,2	-1,1	-1,1	-1,8	-1,9	-1,9	-1,9	-2,6	-2,8	-2,8	-2,7	-3,4	-3,6	-3,6	-3,5	-4,1	-4,4	-4,4
Pino 4	-0,4	-0,4	-1,1	-1	-1	-1	-1,8	-1,8	-1,8	-1,7	-2,5	-2,5	-2,6	-2,5	-3,3	-3,3	-3,4	-3,3	-4,1	-4,1	-4,2
Pino 05	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-1,7	-1,7	-1,7	-1,6	-2,4	-2,4	-2,5	-2,4	-3,2	-3,2	-3,3	-3,2	-4
Pino 06	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,9	-1,3	-1,3	-1,2	-1,7	-2,1	-2,1	-2	-2,5	-2,9	-2,9	-2,8	-3,3	-3,7	-3,6	-3,6	-4,1
Pino 07	-0,3	-0,8	-0,8	-0,8	-1,1	-1,6	-1,6	-1,6	-1,9	-2,4	-2,4	-2,4	-2,7	-3,2	-3,2	-3,2	-3,5	-4	-4	-3,9	-4,3
Pino 08	-0,2	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-1,6	-1,5	-1,5	-1,5	-2,4	-2,3	-2,3	-2,3	-3,2	-3,1	-3,1	-3,1	-4	-3,8	-3,9	-4
RECALQUE MÉDIA	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-1	-1,2	-1,4	-1,6	-1,8	-2	-2,2	-2,3	-2,5	-2,7	-2,9	-3,1	-3,3	-3,5	-3,7	-3,9	-4,1
RECALQUE MÍNIMO	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-1,5	-1,6	-1,7	-1,6	-2,3	-2,3	-2,5	-2,4	-3,1	-3,1	-3,3	-3,2	-3,8
RECALQUE MÁXIMO	-0,4	-0,8	-1,1	-1,2	-1,1	-1,6	-1,8	-1,9	-1,9	-2,4	-2,6	-2,8	-2,8	-3,2	-3,4	-3,6	-3,6	-4	-4,1	-4,4	-4,4
RECALQUE DIFERENCIAL MÁXIMO	0,2	0,7	1	1	0,4	0,7	0,9	1,1	0,4	0,8	0,9	1,1	0,4	0,9	0,9	1,2	0,5	0,9	0,9	1,2	0,6

Fonte: O Autor (2021).

APÊNDICE B – RESULTADOS DAS REDISTRIBUIÇÕES DE ESFORÇOS E RECALQUES

Tabela 41 - Variação de recalques entre as análises numéricas para cada estaca

VARIAÇÃO DE RECALQUES EM PERCENTUAL ENTRE ANÁLISES NUMERICAS		
ESTACAS	ANÁLISE SEM RIGIDEZ DA ESTRUTURA / MOD. POR ESTÁGIOS	ANÁLISE SEM RIGIDEZ DA ESTRUTURA / MOD. POR ESTÁGIOS
1	59%	7%
2	72%	11%
3	23%	0%
4	10%	6%
5	14%	6%
6	13%	3%
7	23%	6%
8	19%	6%
9	7%	0%
10	22%	9%
11	17%	4%
12	0%	7%
13	6%	0%
14	2%	1%
15	29%	5%
16	24%	11%
17	21%	4%
18	0%	7%
19	6%	2%
20	9%	4%
21	7%	6%
22	14%	9%
23	13%	8%
24	42%	8%
25	15%	6%
26	34%	4%
27	45%	5%
28	27%	5%
29	16%	6%
30	13%	9%
31	11%	9%
32	12%	9%
33	8%	9%
34	7%	13%
35	31%	8%
36	6%	2%
37	15%	7%
38	20%	7%
39	16%	2%
40	3%	7%
41	20%	11%
42	5%	3%
43	41%	9%
44	40%	2%
45	4%	1%

46	30%	13%
47	38%	9%
48	52%	12%
49	13%	9%
50	5%	0%
51	7%	1%
52	65%	12%
53	36%	1%
54	74%	11%
55	7%	6%
56	24%	0%
57	16%	4%
58	11%	6%
59	16%	5%
60	7%	1%
61	21%	5%
62	14%	5%
63	26%	6%
64	17%	8%
65	7%	1%
66	1%	6%
67	30%	6%
68	26%	11%
69	10%	1%
70	2%	6%
71	38%	14%
72	12%	12%
73	17%	3%
74	8%	2%
75	28%	4%
76	6%	7%
77	48%	2%
78	4%	8%
79	15%	3%
80	8%	4%
81	4%	3%
82	38%	0%
MÍNIMO	0%	0%
MÁXIMO	74%	14%
MÉDIO	20%	6%

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 42 - Valores de recalque nas estacas correspondentes as análises numéricas

RECALQUES NAS ESTACAS PARA ANÁLISES NUMERICAS			
ESTACAS	ANÁLISE SEM ESTRUTURA	ANÁLISE COM ESTRUTURA SEM EST.	ANÁLISE POR ESTÁGIOS
1	-2,383	-4,066	-3,789
2	-2,28	-4,341	-3,921
3	-5,374	-4,379	-4,367
4	-3,86	-4,504	-4,242
5	-4,726	-4,406	-4,154
6	-3,617	-4,213	-4,103
7	-3,603	-4,19	-4,423
8	-3,542	-4,467	-4,208
9	-4,084	-4,349	-4,369
10	-3,354	-4,474	-4,096
11	-3,479	-4,22	-4,069
12	-4,545	-4,247	-4,552
13	-4,63	-4,375	-4,364
14	-4,264	-4,235	-4,199
15	-6,118	-4,527	-4,758
16	-3,31	-4,533	-4,09
17	-3,388	-4,256	-4,098
18	-4,569	-4,274	-4,579
19	-4,62	-4,417	-4,343
20	-4,788	-4,221	-4,399
21	-4,484	-4,5	-4,784
22	-5,555	-4,48	-4,871
23	-5,519	-4,546	-4,898
24	-2,788	-4,278	-3,967
25	-5,745	-4,678	-4,981
26	-5,893	-4,59	-4,397
27	-7,145	-4,675	-4,921
28	-5,866	-4,398	-4,606
29	-5,679	-4,622	-4,885
30	-5,687	-4,607	-5,026
31	-5,512	-4,552	-4,958
32	-5,499	-4,507	-4,909
33	-4,616	-4,572	-4,99
34	-3,916	-4,726	-4,198
35	-6,535	-4,618	-4,977
36	-4,678	-4,487	-4,405
37	-4,666	-4,358	-4,07
38	-5,908	-4,593	-4,931
39	-3,646	-4,34	-4,245
40	-4,508	-4,371	-4,658
41	-3,488	-4,629	-4,179
42	-4,591	-4,537	-4,386
43	-7,156	-4,661	-5,092
44	-5,948	-4,333	-4,246
45	-3,866	-3,661	-3,709
46	-2,852	-4,175	-3,708
47	-3,107	-4,688	-4,298
48	-2,373	-4,046	-3,601
49	-5,743	-4,67	-5,093
50	-4,963	-4,762	-4,742

51	-4,863	-4,52	-4,563
52	-2,269	-4,189	-3,747
53	-6,235	-4,541	-4,592
54	-2,275	-4,404	-3,952
55	-3,851	-4,367	-4,11
56	-5,36	-4,337	-4,337
57	-5,369	-4,443	-4,618
58	-3,859	-4,556	-4,295
59	-3,536	-4,322	-4,098
60	-4,061	-4,303	-4,365
61	-3,54	-4,505	-4,287
62	-4,057	-4,395	-4,63
63	-3,356	-4,497	-4,228
64	-3,367	-4,258	-3,94
65	-4,617	-4,277	-4,306
66	-4,594	-4,4	-4,658
67	-3,312	-4,549	-4,29
68	-2,957	-4,155	-3,729
69	-4,598	-4,223	-4,188
70	-4,611	-4,432	-4,705
71	-2,7	-4,22	-3,718
72	-3,449	-4,301	-3,857
73	-3,927	-4,732	-4,601
74	-4,514	-4,282	-4,197
75	-3,49	-4,639	-4,481
76	-4,594	-4,544	-4,851
77	-3,109	-4,69	-4,606
78	-4,966	-4,76	-5,163
79	-4,977	-4,481	-4,346
80	-3,737	-4,213	-4,052
81	-4,115	-4,405	-4,266
82	-6,148	-4,442	-4,452

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 43 - Valores de esforços axiais para as estacas

VALORES DE ESFORÇOS GERADOS ENTRE ANALISES NUMERICAS E ANTEPROJETO				
ESTACAS	ESFORÇOS ANTEPROJETO (KN)	ESFORÇOS MOD SEM ESTRUTURA (KN)	ESFORÇOS MOD. COM ESTRUTURA SEM EST. (KN)	ESFORÇOS MOD. POR EST. (KN)
1	220,0	127,3	217,2	202,3
2	300,0	121,8	231,8	209,4
3	310,0	287,0	233,8	233,2
4	230,0	206,1	240,5	226,5
5	230,0	252,4	235,3	221,8
6	310,0	193,2	225,0	219,1
7	300,0	192,4	223,8	236,2
8	220,0	189,2	238,5	224,7
9	220,0	218,1	232,2	233,3
10	300,0	179,1	238,9	218,7
11	310,0	185,8	225,3	217,3
12	230,0	242,7	226,8	243,1
13	230,0	247,2	233,6	233,1
14	310,0	227,7	226,1	224,2
15	300,0	326,7	241,8	254,1
16	220,0	176,8	242,0	218,4
17	320,0	180,9	227,3	218,8
18	430,0	244,0	228,2	244,5
19	450,0	246,7	235,9	231,9
20	490,0	255,7	225,4	234,9
21	490,0	239,4	240,3	255,5
22	450,0	296,7	239,3	260,1
23	430,0	294,7	242,7	261,6
24	410,0	148,9	228,5	211,9
25	410,0	306,8	249,8	266,0
26	430,0	314,7	245,1	234,8
27	450,0	381,6	249,6	262,8
28	490,0	313,3	234,9	246,0
29	490,0	303,3	246,9	260,9
30	450,0	303,7	246,0	268,4
31	430,0	294,3	243,1	264,8
32	320,0	293,6	240,7	262,1
33	310,0	246,5	244,2	266,5
34	430,0	209,1	252,4	224,2
35	450,0	349,0	246,6	265,8
36	490,0	249,8	239,6	235,2
37	490,0	249,2	232,7	217,4
38	450,0	315,5	245,3	263,3
39	430,0	194,7	231,7	226,7
40	440,0	240,7	233,4	248,7
41	440,0	186,3	247,2	223,1
42	430,0	245,2	242,3	234,2
43	450,0	382,2	248,9	271,9
44	490,0	317,7	231,4	226,8
45	490,0	206,5	195,5	198,1
46	450,0	152,3	222,9	198,0
47	430,0	165,9	250,4	229,5
48	310,0	126,7	216,1	192,3
49	320,0	306,7	249,4	272,0
50	220,0	265,0	254,3	253,2

51	220,0	259,7	241,4	243,7
52	450,0	121,2	223,7	200,1
53	490,0	333,0	242,5	245,2
54	490,0	121,5	235,2	211,1
55	450,0	205,7	233,2	219,5
56	430,0	286,3	231,6	231,6
57	410,0	286,7	237,3	246,6
58	410,0	206,1	243,3	229,4
59	430,0	188,8	230,8	218,8
60	450,0	216,9	229,8	233,1
61	490,0	189,0	240,6	228,9
62	490,0	216,6	234,7	247,3
63	450,0	179,2	240,2	225,8
64	430,0	179,8	227,4	210,4
65	320,0	246,6	228,4	230,0
66	220,0	245,3	235,0	248,7
67	300,0	176,9	242,9	229,1
68	310,0	157,9	221,9	199,1
69	230,0	245,5	225,5	223,6
70	230,0	246,3	236,7	251,3
71	310,0	144,2	225,3	198,6
72	300,0	184,2	229,7	206,0
73	220,0	209,7	252,7	245,7
74	220,0	241,1	228,7	224,1
75	300,0	186,3	247,7	239,3
76	160,0	245,3	242,7	259,1
77	160,0	166,0	250,4	246,0
78	230,0	265,2	254,2	275,7
79	230,0	265,8	239,3	232,1
80	310,0	199,6	225,0	216,4
81	300,0	219,7	235,3	227,8
82	220,0	328,3	237,2	237,8

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 44 - Valores de variações percentuais de esforços entre modelos

VARIAÇÃO DE ESFORÇOS PERCENTUAL ENTRE ANÁLISES NUMERICAS E ANTEPROJETO			
ESTACAS	ANTEPROJETO / ANÁLISE POR ESTÁGIOS	MOD. NUM. SEM ESTRUTURA / ANÁLISE POR ESTÁGIOS	MOD. NUM. COM ESTRUTURA / ANÁLISE POR ESTÁGIOS
1	8%	37%	7%
2	30%	42%	10%
3	25%	19%	0%
4	2%	9%	6%
5	4%	12%	6%
6	29%	12%	3%
7	21%	19%	5%
8	2%	16%	6%
9	6%	7%	0%
10	27%	18%	8%
11	30%	15%	4%
12	5%	0%	7%
13	1%	6%	0%
14	28%	2%	1%
15	15%	22%	5%
16	1%	19%	10%
17	32%	17%	4%
18	43%	0%	7%
19	48%	6%	2%
20	52%	8%	4%
21	48%	6%	6%
22	42%	12%	8%
23	39%	11%	7%
24	48%	30%	7%
25	35%	13%	6%
26	45%	25%	4%
27	42%	31%	5%
28	50%	21%	5%
29	47%	14%	5%
30	40%	12%	8%
31	38%	10%	8%
32	18%	11%	8%
33	14%	7%	8%
34	48%	7%	11%
35	41%	24%	7%
36	52%	6%	2%
37	56%	13%	7%
38	41%	17%	7%
39	47%	14%	2%
40	43%	3%	6%
41	49%	17%	10%
42	46%	4%	3%
43	40%	29%	8%
44	54%	29%	2%
45	60%	4%	1%
46	56%	23%	11%
47	47%	28%	8%
48	38%	34%	11%

49	15%	11%	8%
50	13%	4%	0%
51	10%	6%	1%
52	56%	39%	11%
53	50%	26%	1%
54	57%	42%	10%
55	51%	6%	6%
56	46%	19%	0%
57	40%	14%	4%
58	44%	10%	6%
59	49%	14%	5%
60	48%	7%	1%
61	53%	17%	5%
62	50%	12%	5%
63	50%	21%	6%
64	51%	15%	7%
65	28%	7%	1%
66	12%	1%	6%
67	24%	23%	6%
68	36%	21%	10%
69	3%	9%	1%
70	8%	2%	6%
71	36%	27%	12%
72	31%	11%	10%
73	10%	15%	3%
74	2%	7%	2%
75	20%	22%	3%
76	38%	5%	6%
77	35%	32%	2%
78	17%	4%	8%
79	1%	13%	3%
80	30%	8%	4%
81	24%	4%	3%
82	7%	28%	0%

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 45 - Valores de esforços nas estacas por estágios construtivos

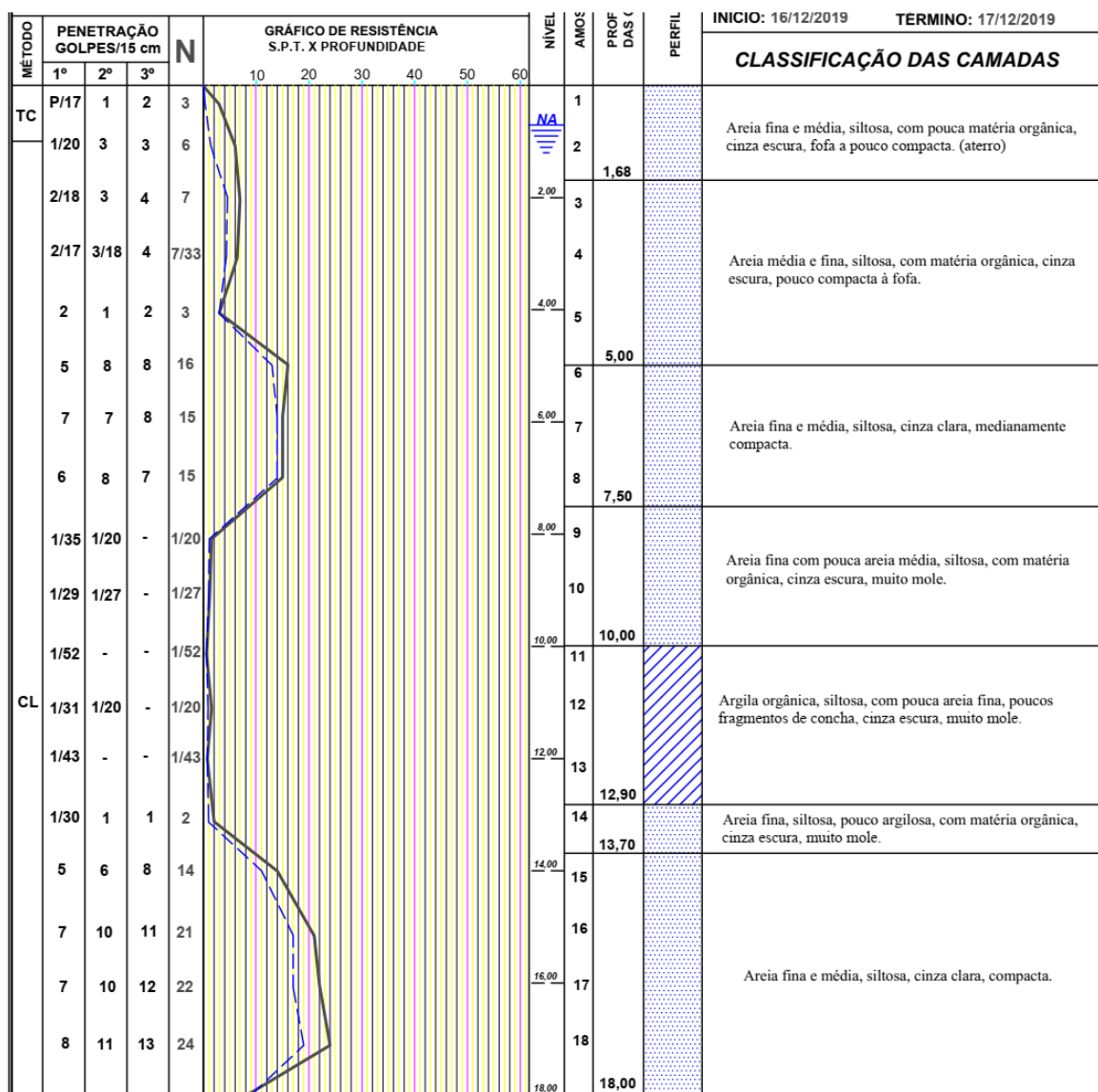
ESFORÇOS NAS ESTACAS PARA ANÁLISE POR ESTÁGIOS CONSTRUTIVOS (KN)					
ESTACAS	ESTÁGIO - TÉRREO	ESTÁGIO - PAV 01	ESTÁGIO - PAV 02	ESTÁGIO - PAV 03	ESTÁGIO - PAV 04
1	48,1	83,3	119,7	156,9	202,3
2	16,1	52,6	90,8	129,9	209,4
3	44,2	83,7	122,9	162,5	233,2
4	25,6	64,7	104,9	145,7	226,5
5	30,9	69,7	108,9	148,8	221,8
6	62,4	100,1	138,6	177,2	219,1
7	74,5	112,1	149,8	187,7	236,2
8	25,4	65,4	105,7	146,3	224,7
9	45,6	85,6	125,1	164,4	233,3
10	20,5	60,5	101,2	142,1	218,7
11	58,8	97,6	136,8	175,7	217,3
12	78,6	117,4	156,2	194,8	243,1
13	45,4	85,6	125,5	165,2	233,1
14	54,9	92,3	130,3	168,8	224,2
15	62,0	104,9	146,7	188,4	254,1
16	20,5	61,0	102,3	143,8	218,4
17	58,7	97,8	137,5	176,9	218,8
18	79,7	118,7	157,8	196,8	244,5
19	44,6	85,1	125,4	165,6	231,9
20	64,4	103,0	141,4	180,0	234,9
21	65,2	108,9	151,0	192,5	255,5
22	71,8	115,2	157,1	198,6	260,1
23	72,4	116,4	159,2	201,3	261,6
24	52,7	91,8	132,9	173,2	211,9
25	71,2	117,2	161,9	205,7	266,0
26	43,4	86,4	129,0	171,2	234,8
27	70,3	116,0	160,8	204,6	262,8
28	76,7	117,2	158,5	199,1	246,0
29	73,7	118,4	162,5	205,7	260,9
30	88,3	132,4	174,6	216,7	268,4
31	94,3	136,8	178,5	220,0	264,8
32	94,5	136,8	178,4	219,7	262,1
33	95,8	139,6	182,2	224,5	266,5
34	22,9	65,8	109,3	152,8	224,2
35	94,1	138,3	181,7	224,7	265,8
36	70,6	111,6	153,1	194,7	235,2
37	61,5	102,1	142,7	183,2	217,4
38	85,0	126,5	168,2	209,9	263,3
39	64,4	103,8	144,4	184,6	226,7
40	80,4	120,3	160,7	200,7	248,7
41	24,0	65,9	108,3	150,7	223,1
42	43,4	85,8	127,6	169,1	234,2
43	92,0	136,3	179,0	221,8	271,9
44	71,3	109,4	147,1	185,5	226,8
45	60,8	92,1	124,0	156,2	198,1
46	54,9	90,5	126,9	164,0	198,0
47	31,1	75,0	118,7	162,1	229,5
48	54,3	89,0	124,3	160,2	192,3
49	93,6	137,9	180,9	223,8	272,0
50	55,1	100,9	145,7	189,9	253,2

51	68,7	111,0	154,4	196,8	243,7
52	53,1	91,8	130,9	170,0	200,1
53	78,5	121,6	164,3	206,7	245,2
54	48,9	87,7	128,0	168,6	211,1
55	65,3	105,4	145,7	186,1	219,5
56	77,0	116,5	156,2	195,9	231,6
57	84,1	124,5	165,0	205,6	246,6
58	60,9	101,0	142,4	184,2	229,4
59	65,9	105,3	144,8	184,4	218,8
60	79,6	118,3	157,1	196,0	233,1
61	61,5	101,3	142,0	183,0	228,9
62	86,3	126,2	166,0	205,7	247,3
63	56,5	96,2	136,9	177,9	225,8
64	60,3	98,9	137,6	176,2	210,4
65	78,1	116,2	154,4	192,7	230,0
66	86,1	125,8	165,6	205,4	248,7
67	56,3	95,8	136,7	177,9	229,1
68	55,6	92,1	129,0	166,3	199,1
69	75,8	112,4	149,4	186,7	223,6
70	86,3	125,8	165,5	205,4	251,3
71	48,5	85,8	122,7	160,6	198,6
72	56,5	93,5	131,0	169,4	206,0
73	59,0	100,2	142,9	185,9	245,7
74	74,2	110,9	147,9	185,6	224,1
75	60,7	100,4	141,8	183,7	239,3
76	86,7	127,1	167,9	208,9	259,1
77	52,5	96,1	139,5	182,8	246,0
78	83,1	128,5	172,8	216,7	275,7
79	65,9	107,0	146,7	187,0	232,1
80	58,4	95,4	133,5	172,1	216,4
81	63,6	103,6	145,3	186,5	227,8
82	50,1	90,6	130,7	171,4	237,8

Fonte: O Autor (2021).

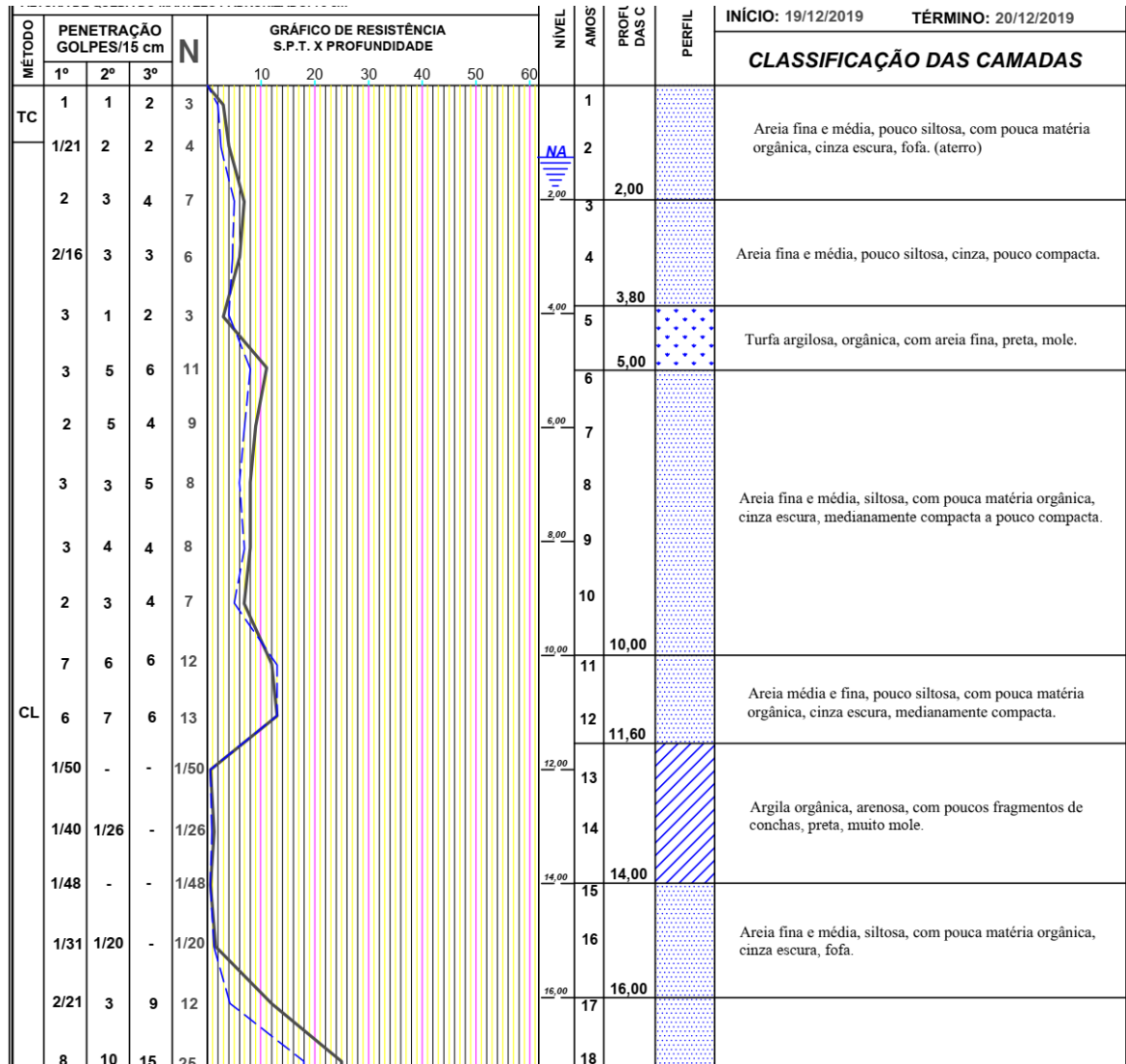
ANEXO A – INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.

Figura 45 - Perfil de geotécnico individual – SPT- 01



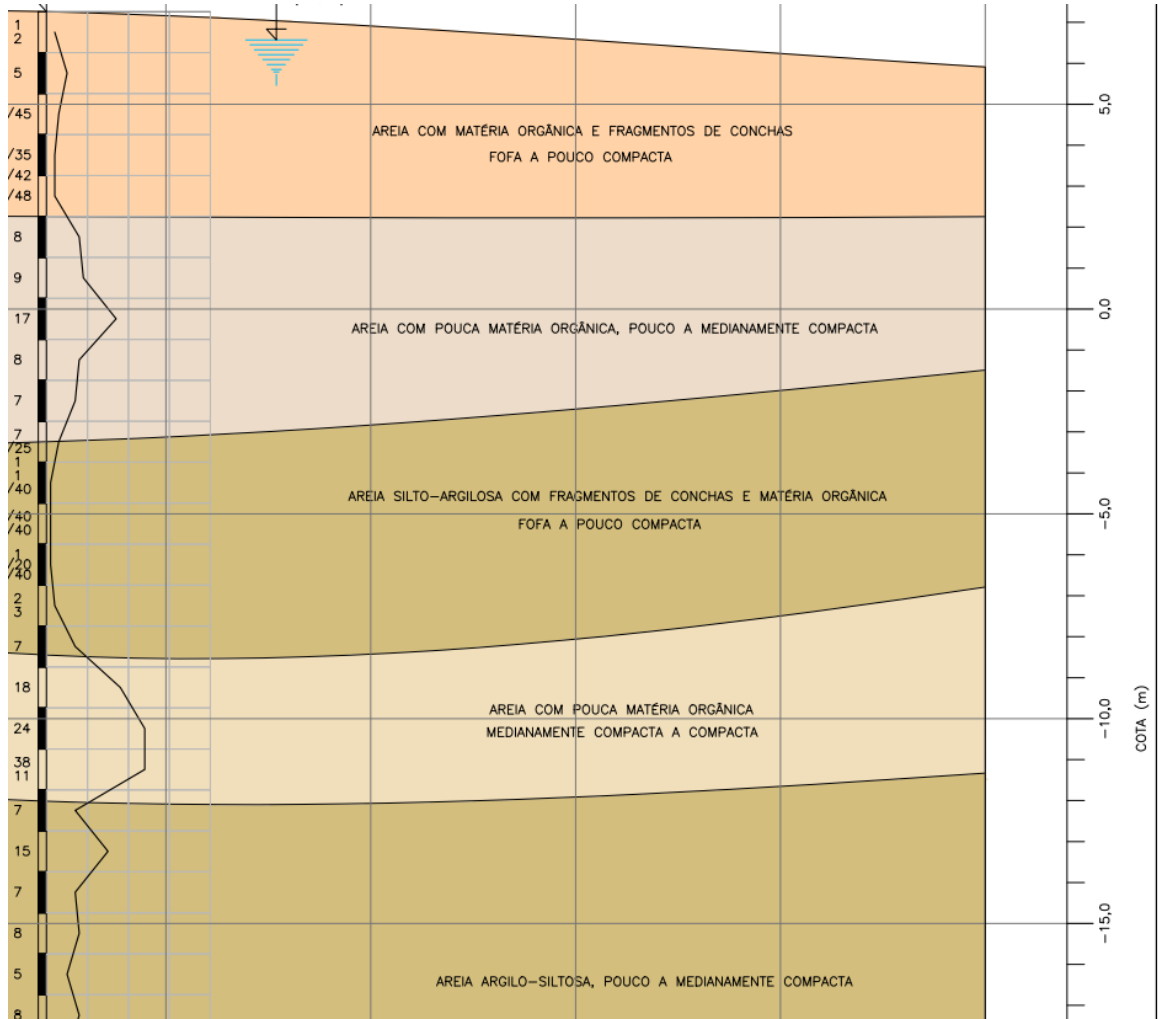
Fonte: Construtora (2021).

Figura 46 - Perfil de geotécnico individual – SPT- 02



Fonte: Construtora (2021).

Figura 47 - Perfil geotécnico longitudinal característico



Fonte: Construtora (2021).