

ANÁLISE DE INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM UM EDIFÍCIO DE PEQUENO PORTE

¹Erick Caetano de Oliveira Bastos, ² Bruno Lúcio Moura da Silva

¹Aluno Graduação de Engenharia Civil UNIG, ² Professor Engenharia Civil Faculdade de Ciências Exatas e tecnológicas, Universidade Iguaçu – UNIG, Av. Abílio Augusto Távora, 2134 -Jardim Nova Era, 26275-580, Nova Iguaçu –RJ

¹erickcaetano@live.com, ²blms.eng.civil@gmail.com

Resumo - *A análise de interação solo-estrutura (ISE) é de grande importância na previsão do comportamento do conjunto solo-estrutura, avaliando se a movimentação relativa a estrutura e o solo será considerada a curto, médio ou longo prazo e qual os efeitos esperados na estrutura. Neste trabalho é realizado um estudo de um modelo estrutural de um edifício multifamiliar de dois pavimentos, suas fundações e considerações de projeto. Em seguida realiza-se o cálculo dos recalques decorrentes da carga aplicada pelas fundações através do método de Barata utilizando 3 sondagens SPT (Standard Penetration Test). Realiza-se a análise ISE pelo método de Winkler, utilizando o software SAP2000, substituindo os apoios indelocáveis adotados no modelo estrutural, por molas de coeficiente k representando o solo e realizando iterações até alcançar a convergência de 95% entre o recalque teórico calculado por Barata e o recalque fornecido pela análise ISE. Com a análise ISE concluída, é gerado o relatório de momentos de duas seções do edifício, com objetivo de comparar à estrutura anterior à análise ISE. Ao fim do presente trabalho apresenta-se as considerações finais sobre o mesmo, sobre a importância da análise ISE em edifícios de pequeno porte.*

(Palavras chave: Interação Solo-Estrutura, Recalque, Análise estrutural.)

Abstract - The analysis of soil-structure interaction is important to predict the behavior of the structure, evaluating if the movement of the structure and the soil should be considered in the medium and long term. In this work is made a study of the structural model of a multifamily building with two floors, its foundations and design considerations. Afterwards, the calculation of the settlement resulting from the load applied by the foundations is carried out using the Barata method. The ISE analysis is performed using the SAP2000 software, replacing the fixed supports adopted in the structural model by springs of coefficient “ k ” representing the soil and performing several iterations until reaching the convergence of 99% between the theoretical settlement calculated with the Barata method and the settlement values provided by the ISE analysis. With ISE analysis completed, the report of moments of two sections of the building is generated, aiming to compare to the structure before the ISE analysis. At the end of the present paper, we present the final considerations about the importance of ISE analysis applied to small buildings.

(Key-words: Soil-Structure Interaction, Settlements, Structural analysis.)

1 Introdução

Na engenharia civil, a utilização de *softwares* não é mais um diferencial, é uma exigência. Há todo momento são atualizados processos de projeto e execução em todas as áreas de atuação da engenharia civil. Para tornar o processo de projetar e construir mais seguro e eficiente, é necessário a constante atualização de dados empíricos e metodologias de projeto, principalmente na área estrutural.

O projeto de uma obra, seja de um edifício de pequeno ou grande porte, contempla diversas áreas dentro da engenharia civil, como: arquitetura, análise estrutural, instalações hidrossanitárias, instalações elétricas, entre outras. A análise estrutural é o tema mais importante no presente trabalho, com ela pretende-se, com base na interação solo-estrutura, interpretar o comportamento real da estrutura, no caso, uma residência multifamiliar.

Apesar do projeto estrutural ser um item de baixo custo no escopo geral de um empreendimento, seu resultado é essencial para o início do processo de execução e para a compatibilização dos demais projetos. Dessa forma, análises mais complexas ou demoradas são tomadas como opcionais ou desnecessárias, diminuindo a confiabilidade do projeto. Esta área da engenharia, principalmente em edificações residenciais de pequeno porte,

tem sua complexidade desconhecida pelo usuário final, resultando em tais análises sendo vistas como gasto desnecessário ao invés de investimento. Por consequência da relação projeto-execução, em que o projeto de fundações é o último a ser realizado e é o primeiro a ser executado, prolongar o desenvolvimento do projeto significa prolongar o tempo do empreendimento, afetando diretamente o custo do mesmo.

Diante de tal realidade, o estudo da interação solo-estrutura tem grande importância na antecipação e prevenção de diversas patologias ou danos estruturais, que podem não afetar apenas a estética do edifício, como também sua funcionalidade. A infraestrutura é geralmente tratada como uma estrutura à parte da superestrutura, desta forma, a superestrutura descarrega nas fundações, consideradas indeslocáveis, e a fundação distribui esforços ao solo. Este modelo não contempla a variação das solicitações decorrentes da deformação da estrutura, causada pelos recalques. Esta redistribuição pode ter um grande impacto na maneira como os esforços se comportam, causando danos ou ainda o colapso de toda a estrutura.

Este tipo de análise é indicado por norma para edificações de grande porte ou grande complexidade, como instalações industriais, o que faz com que seja pouco utilizada em edificações de pequeno porte, tema do estudo deste trabalho.

Este trabalho visa esclarecer o uso de tal análise em uma edificação residencial de pequeno porte, demonstrando as etapas de cálculo e os procedimentos computacionais adotados.

2 Metodologia

Para realizar este trabalho utilizou-se o software CYPECAD, no qual o modelo estrutural foi realizado, juntamente com os relatórios de investigação geotécnica para obtenção dos dados iniciais. O software SAP2000 será utilizado para realização da interação solo-estrutura; revisão literária através de livros, monografias e normas técnicas.

Para realizar os estudos e cálculos deste trabalho utilizou-se o projeto estrutural de um edifício localizado à Rua Guilherme 196, Moquetá - Nova Iguaçu, Construído no ano de 2013 pela Teplani Engenharia Ltda. Edificado em um terreno com 349,41 m² de área, o edifício possui 2 blocos, cada bloco possui 2 residências unifamiliares com 2 pavimentos, totalizando 4 residências.

O projeto estrutural do edifício de estudo possui 4 níveis, sendo eles: fundação, cintas, teto 01 e cobertura. Elaborado no software CYPECAD versão 2014, comercializado pela MULTIPLUS, o projeto utiliza concreto C20, Aço CA-50 e CA-60, os recursos para detalhamento e dimensionamento estão de acordo com as normas brasileiras de concreto armado (NBR 6118), fundações (NBR 6122), carregamentos (NBR 6120), barras (NBR 7480), ventos (NBR 6123), ações e combinações (NBR 8681).

Foi elaborado com a hipótese de apoios indeslocáveis, que analisa o comportamento estrutural considerando que os apoios (sapatas) não sofrem nenhuma translação ou rotação.

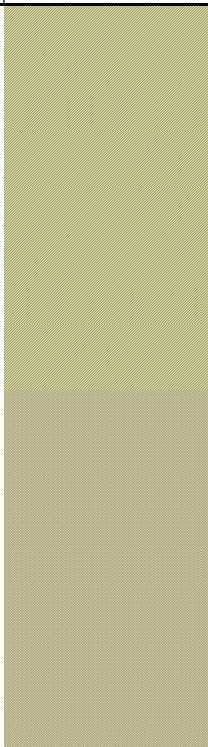
O projeto é composto de duas estruturas independentes, um para duas residências localizadas nos fundos do terreno, e o outro para as duas residências localizadas na frente do terreno.

No presente trabalho se analisa somente a estrutura frontal, não levando em conta a interação existente com as fundações da estrutura dos fundos. O projeto possui 16 sapatas piramidais, com suas dimensões descritas na **Tabela 3**.

2.1 Investigação geotécnica

Foram realizadas 3 sondagens a percussão no terreno, sua locação no terreno foi estabelecida de acordo com a norma NBR 8036, na estrutura estudada, há influência considerável apenas das sondagens SP01 e SP02. O relatório de investigação geotécnica consta na **Tabela 1** e **Tabela 2**.

Tabela 2**Tabela 1:** Dados da sondagem SP01.

Sondagem 01						
	Nº de golpes (30cm finais)		Representação gráfica	Coeficiente de Buisman	K	Módulo de elasticidade
Profundidade (m)		Tipo de solo				Ez
1	4	Areia fina, argilosa de cor cinza claro. (Pouco compacta a compacta)		2,00	519,93	4159,44
2	17			2,00	519,93	17677,62
3	20			2,00	519,93	20797,20
4	28			2,00	519,93	29116,08
5	32			2,00	519,93	33275,52
6	38			2,00	519,93	39514,68
7	37			2,00	519,93	38474,82
8	37			2,00	519,93	38474,82
9	42	Argila arenosa de cor marrom claro amarelado. (Dura)		2,85	470,88	56364,34
10	38			2,85	470,88	50996,30
11	35			2,85	470,88	46970,28
12	37			2,85	470,88	49654,30
13	36			2,85	470,88	48312,29
14	40			2,85	470,88	53680,32
15	40			2,85	470,88	53680,32
16	-			-	-	-

Fonte: O autor. (2018)

Tabela 2: Dados da sondagem SP02.

Sondagem 02						
Profundidade (m)	Nº de golpes (30cm finais)	Tipo de solo	Representação gráfica	Coeficiente de Buisman	K	Módulo de elasticidade Ez
1	8	Areia fina, argilosa de cor cinza claro. (Pouco compacta)		2,00	519,93	8318,88
2	15			2,00	519,93	15597,90
3	23	Argila siltosa de cor cinza claro com		5,20	245,25	29331,90
4	23	veios marrom claro. (Rija		5,20	245,25	29331,90
5	35	a dura)		5,20	245,25	44635,50
6	32	Argila arenosa de cor variegada com pedregulhos. (Dura)		2,85	470,88	42944,26
7	33			2,85	470,88	44286,26
8	35			2,85	470,88	46970,28
9	40			2,85	470,88	53680,32
10	30	Areia fina, siltosa de cor marrom claro com pedregulhos. (Compacta)		1,20	519,93	18717,48
11	34			1,20	519,93	21213,14
12	32			1,20	519,93	19965,31
13	29			1,20	519,93	18093,56
14	33			1,20	519,93	20589,23
15	33			1,20	519,93	20589,23
16	-			-	-	-

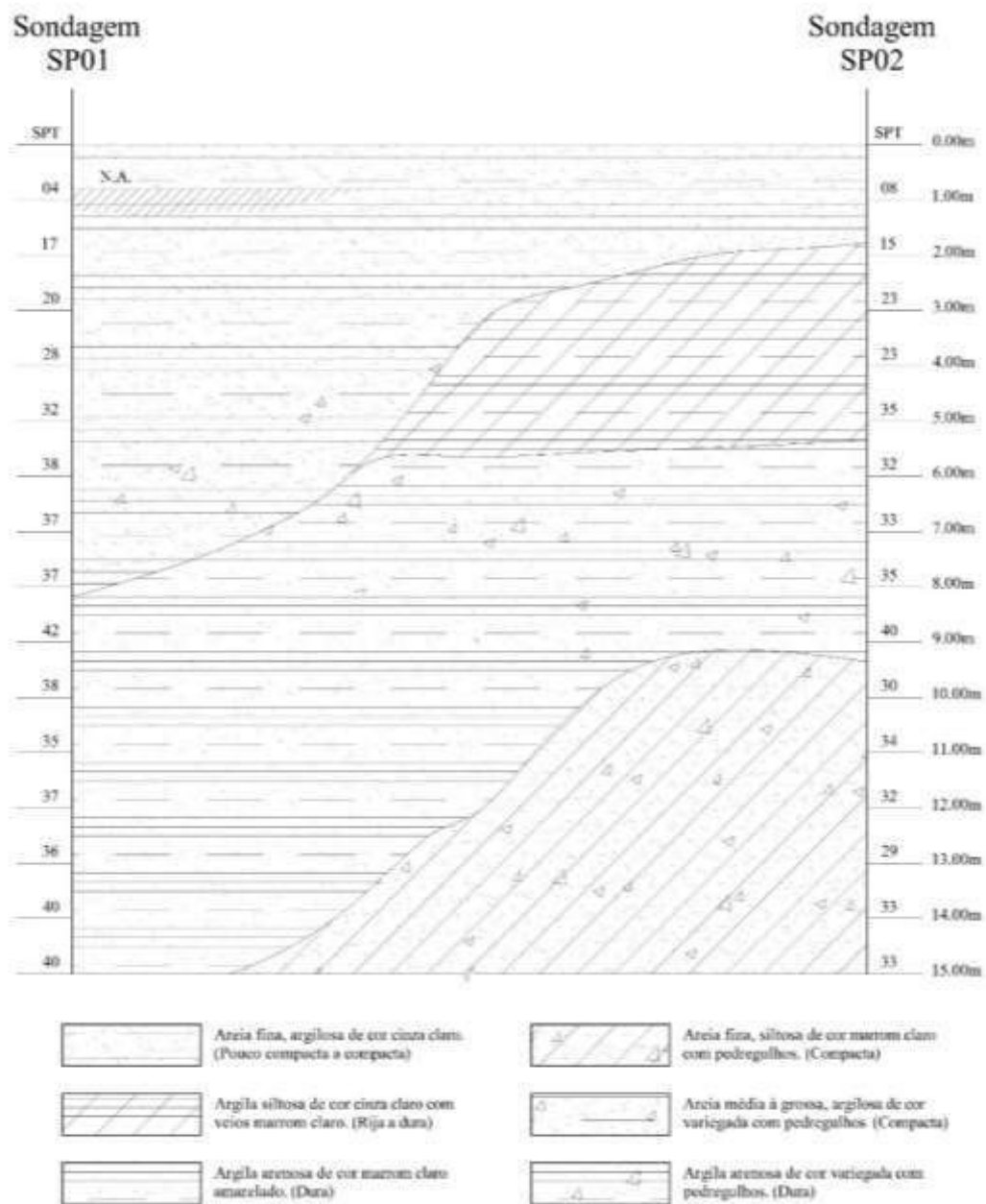
Fonte: O Autor. (2018)

A última coluna lista os valores do módulo de elasticidade do solo, calculado através da equação:

$$E_z = aKN \quad (1)$$

Para analisar melhor a formação do solo a ser estudado foi traçado o perfil transversal do solo entre as sondagens SP01 e SP02, estimando as transições existentes, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16: Perfil geotécnico do solo de fundação.



Fonte: O Autor. (2018)

Mapa de cargas

O mapa de cargas original foi obtido diretamente do modelo computacional do CYPECAD, e um resumo contendo apenas cargas axiais encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3: Cargas axiais nas sapatas.

Número da sapata	Dimensões (cm)		Cargas axiais (toneladas)			
	B	L	Peso Próprio	Carga perm.	Sobrecarga	Q _{Total}
13	55	100	8,25	0,65	0,91	9,81
14	75	100	10,21	1,02	1,49	12,72
15	75	100	10,23	1,02	1,51	12,76
16	55	100	8,24	0,65	0,92	9,81
17	60	120	9,83	1,12	1,45	12,4
18	95	140	17,65	2,75	4,07	24,47
19	95	140	17,83	2,78	4,14	24,75
20	60	120	9,86	1,14	1,46	12,46
21	60	120	9,51	1,00	1,64	12,15
22	75	110	11,56	1,22	1,94	14,72
23	75	110	11,51	1,20	1,91	14,62
24	60	120	9,50	1,00	1,64	12,14
29	75	90	5,86	0,33	0,65	6,84
30	75	105	3,30	0,01	0,01	3,32
31	75	105	3,30	0,01	0,01	3,32
32	75	90	5,51	0,32	0,64	6,47

Fonte: O Autor. (2018)

Adotou-se para o cálculo dos recalques apenas as cargas axiais.

2.2 Interação Solo-Estrutura

O Software utilizado para elaboração e cálculo da estrutura foi o CYPECAD versão 2014, comercializado pela © 2018 MULTIPLUS Softwares Técnicos. O software utilizado para realização da interação foi o software CSI SAP2000 versão 2017, desenvolvido para análise estrutural e dinâmica, linear e não-linear por elementos finitos, também comercializado pela © 2018 MULTIPLUS Softwares Técnicos.

A mudança do software se deve à ausência de tal análise pelo CYPECAD, criando a necessidade de transferência de dados entre os sistemas. O arquivo de exportação gerado pelo CYPECAD possui extensão .IFC, este arquivo quando importado para o SAP2000 não representava o modelo de forma adequada. A solução adotada foi a remodelação do modelo estrutural dentro do sistema do software SAP2000, recriando as situações de carregamento e engastes do modelo original. Desta forma, foi recriado o mapa de cargas do projeto e, apesar de possuir valores similares, os mesmos são compatíveis com o modelo original.

Para o cálculo do recalque utilizou-se o método de Barata, através da equação 2:

$$\Delta_h = \lambda c_{\Delta} \frac{p}{E_z} B(1 - \mu^2) \quad (2)$$

O valor do módulo de elasticidade do solo E_z foi extraído tomando-se a média dos valores apresentados na Tabela 1 e Tabela 2; os valores considerados são os contidos na região delimitada pelo bulbo tensões. A profundidade do bulbo de tensões é calculada pela equação:

$$H = \alpha \times B \quad (3).$$

Onde H é a profundidade do bulbo, B é a menor dimensão da sapata e α é o fator profundidade do bulbo. Ao resultado da Equação 3 soma-se a profundidade de assentamento da fundação, estimado em 2m.

Os resultados da estimativa estão dispostos na **Tabela 4**.

Tabela 4: Valores obtidos para a estimativa de recalques.

Número da sapata	Bulbo de pressões			Fator de forma	C. de Mindlin	SP01	SP02	Recalques (mm)	
	L/B	α	H (m)					SP01	SP02
				$C\Delta$	λ	E_{z1}	E_{z2}	Δ_{h1}	Δ_{h2}
13	1,8	2,8	4,1	1,15	0,58	21.005	25.443	1,5	1,3
14	1,3	2,3	4,3	0,98	0,59	21.005	25.443	2,3	1,9
15	1,3	2,3	4,3	0,98	0,59	21.005	25.443	2,4	1,9
16	1,8	2,8	4,1	1,15	0,58	21.005	25.443	1,5	1,3
17	2,0	3,0	4,3	1,20	0,59	21.005	25.443	2,2	1,8
18	1,5	2,5	4,9	1,05	0,62	21.005	25.443	6,4	5,3
19	1,5	2,5	4,9	1,05	0,62	21.005	25.443	6,5	5,4
20	2,0	3,0	4,3	1,20	0,59	21.005	25.443	2,2	1,9
21	2,0	3,0	4,3	1,20	0,59	21.005	25.443	2,2	1,8
22	1,5	2,5	4,4	1,05	0,59	21.005	25.443	2,9	2,4
23	1,5	2,5	4,4	1,05	0,59	21.005	25.443	2,9	2,4
24	2,0	3,0	4,3	1,20	0,59	21.005	25.443	2,2	1,8
29	1,2	2,2	4,2	0,92	0,58	21.005	25.443	1,2	1,0
30	1,4	2,4	4,3	1,01	0,59	21.005	25.443	0,6	0,5
31	1,4	2,4	4,3	1,01	0,59	21.005	25.443	0,6	0,5
32	1,2	2,2	4,2	0,92	0,58	21.005	25.443	1,1	0,9

Fonte: O Autor (2018).

Para os cálculos adiante neste trabalho, adotou-se os valores de recalque referentes à sondagem 01, por proporcionarem os valores mais desfavoráveis à estrutura.

O coeficiente de rigidez do solo foi calculado utilizando a equação 4:

$$k = \frac{p}{\Delta_h} \quad (4)$$

Onde k é o coeficiente de rigidez do solo, p é a carga axial, e Δ_h o recalque teórico.

As cargas consideradas no cálculo do coeficiente de rigidez foram obtidas do modelo elaborado no SAP2000, e estão dispostas na **Tabela 5**.

Tabela 5: Cargas axiais e coeficiente de rigidez do solo.

Número da sapata	Reações iniciais (tnf)		Recalques (mm)	k (kN/m)
	CYPECAD	SAP2000	Δ_h teórico	
13	9,81	10,69	1,53	69.952
14	12,72	14,81	2,34	63.162
15	12,76	14,77	2,35	62.809
16	9,81	10,66	1,53	69.743
17	12,40	14,42	2,24	64.432
18	24,47	26,87	6,45	41.670
19	24,75	26,82	6,52	41.126
20	12,46	14,38	2,25	63.919
21	12,15	13,35	2,19	60.872
22	14,72	17,38	2,91	59.749
23	14,62	17,39	2,89	60.187
24	12,14	13,37	2,19	61.024
29	6,84	8,43	1,16	72.760
30	3,32	4,24	0,63	67.098
31	3,32	4,23	0,63	66.974
32	6,47	8,49	1,10	77.497

Fonte: O Autor (2018)

Na **Tabela 5** encontram-se os valores de cargas totais para o modelo elaborado no CYPECAD e os valores de cargas totais do remodelamento em SAP2000, dispostos nas colunas 2 e 3 respectivamente. Na quarta coluna estão os valores do recalque teórico, e na quinta coluna os valores da rigidez do solo, calculados através da Equação 4.

2.4 Etapas de interação

O procedimento para realização da análise se baseia em cinco etapas, que são repetidas até se obter o valor convergente de recalque, são elas:

- Configuração dos coeficientes de mola nos apoios;
- Realização do cálculo de reações e deslocamentos;
- Exportação dos dados resultantes de deslocamento e cargas nos apoios;
- Análise da convergência dos recalques;
- Cálculo dos novos coeficientes de mola.

A configuração dos coeficientes de rigidez é feita considerando o deslocamento vertical com mola, e os deslocamentos transversais travados, tornando o deslocamento lateral nulo. Esta configuração foi realizada de forma manual em cada ciclo de interação.

A exportação dos dados foi efetuada em forma de tabela para o Excel, onde se realizou as etapas seguintes. A análise de convergência analisa se os deslocamentos verticais produzidos pela estrutura estão próximos do recalque teórico calculado, o fator de convergência alcançado foi de 98% em todos os apoios, esse fator se obtém dividindo-se o valor do recalque teórico pelo valor calculado na interação.

Nas etapas em que o fator ainda não havia sido alcançado, é calculado um novo coeficiente de rigidez, utilizando as novas reações de apoio, e repete-se a primeira etapa.

No total foram realizadas 7 interações, estes dados estão disponíveis nas Tabelas 6, 7, 8 e 9.

Tabela 6: Dados da Interação 01 e Interação 02.

Iteração 01				Iteração 02			
Reações (tnf)	Δ_{i01}	$\Delta\%$	k_{i01}	Reações (tnf)	Δ_{i02}	$\Delta\%$	k_{i02}
10,48	1,60	105%	68.587	10,38	1,48	97%	67.921
15,67	2,83	121%	66.859	16,10	2,36	101%	68.695
15,64	2,83	120%	66.493	16,07	2,37	101%	68.315
10,44	1,60	104%	68.336	10,33	1,48	97%	67.565
13,75	2,44	109%	61.442	13,82	2,21	99%	61.746
21,84	5,64	88%	33.874	20,31	5,88	91%	31.507
21,81	5,64	86%	33.439	20,15	5,91	91%	30.890
13,71	2,43	108%	60.948	13,72	2,21	98%	60.989
13,53	2,40	109%	61.675	13,41	2,13	97%	61.146
19,19	3,72	128%	65.991	19,89	2,96	102%	68.401
19,20	3,72	129%	66.456	19,94	2,94	102%	69.029
13,55	2,40	109%	61.809	13,44	2,13	97%	61.304
9,04	1,50	130%	78.028	9,09	1,14	99%	78.437
6,67	1,25	197%	105.582	7,20	0,67	106%	113.905
6,67	1,24	197%	105.529	7,18	0,67	106%	113.707
9,11	1,51	138%	83.114	9,27	1,09	100%	84.612

Fonte: O Autor (2018).

Tabela 7: Dados da Interação 03 e Interação 04.

Iteração 03				Iteração 04			
Reações (tnf)	Δ_{i03}	$\Delta\%$	k_{i03}	Reações (tnf)	Δ_{i04}	$\Delta\%$	k_{i04}
10,37	1,50	98%	67.827	10,35	1,50	98%	67.713
16,14	2,30	98%	68.840	16,27	2,32	99%	69.415
16,20	2,33	99%	68.890	16,30	2,32	99%	69.331
10,30	1,50	98%	67.414	10,28	1,50	98%	67.286
13,83	2,20	98%	61.792	13,87	2,20	98%	61.974
20,51	5,83	90%	31.813	19,90	6,13	95%	30.859
19,37	6,15	94%	29.704	19,15	6,32	97%	29.369
13,77	2,21	98%	61.226	13,79	2,21	98%	61.303
13,38	2,15	98%	60.983	13,37	2,15	98%	60.930
19,93	2,86	98%	68.530	20,14	2,88	99%	69.245
20,18	2,87	99%	69.843	20,33	2,85	99%	70.381
13,41	2,15	98%	61.206	13,39	2,15	98%	61.093
9,05	1,13	98%	78.115	9,06	1,14	98%	78.191
7,21	0,62	98%	114.123	7,36	0,63	100%	116.537
7,34	0,63	100%	116.105	7,43	0,63	99%	117.619
9,31	1,08	98%	84.957	9,30	1,07	98%	84.858

Fonte: O Autor (2018).

Tabela 8: Dados da Interação 05 e Interação 06.

Iteração 05				Iteração 06			
Reações (tnf)	Δ_{i05}	$\Delta\%$	k_{i05}	Reações (tnf)	Δ_{i06}	$\Delta\%$	k_{i06}
10,34	1,50	98%	67.654	10,34	1,50	98%	67.628
16,33	2,31	98%	69.668	16,36	2,30	98%	69.776
16,34	2,31	98%	69.483	16,35	2,31	98%	69.535
10,28	1,50	98%	67.244	10,27	1,50	98%	67.229
13,90	2,20	98%	62.081	13,91	2,20	98%	62.136
19,64	6,24	97%	30.457	19,52	6,29	97%	30.279
19,09	6,37	98%	29.271	19,08	6,39	98%	29.251
13,80	2,21	98%	61.344	13,80	2,21	98%	61.360
13,35	2,15	98%	60.883	13,35	2,15	98%	60.859
20,24	2,87	99%	69.574	20,28	2,86	98%	69.719
20,38	2,84	98%	70.554	20,40	2,84	98%	70.608
13,38	2,15	98%	61.046	13,38	2,15	98%	61.028
9,06	1,14	98%	78.185	9,06	1,14	98%	78.176
7,43	0,62	99%	117.540	7,45	0,62	98%	117.966
7,46	0,62	98%	118.130	7,48	0,62	98%	118.304
9,29	1,07	98%	84.777	9,28	1,07	98%	84.734

Fonte: O Autor (2018).**Tabela 9:** Dados da Interação 07.

Iteração 07			
Reações (tnf)	Δ_{i07}	$\Delta\%$	k_{i07}
10,33	1,50	98%	67.616
16,37	2,30	98%	69.823
16,36	2,31	98%	69.552
10,27	1,50	98%	67.224
13,92	2,20	98%	62.163
19,47	6,31	98%	30.197
19,08	6,40	98%	29.253
13,80	2,21	98%	61.365
13,35	2,15	98%	60.848
20,30	2,85	98%	69.783
20,40	2,83	98%	70.623
13,37	2,15	98%	61.022
9,05	1,14	98%	78.172
7,47	0,62	98%	118.154
7,48	0,62	98%	118.358
9,28	1,07	98%	84.712

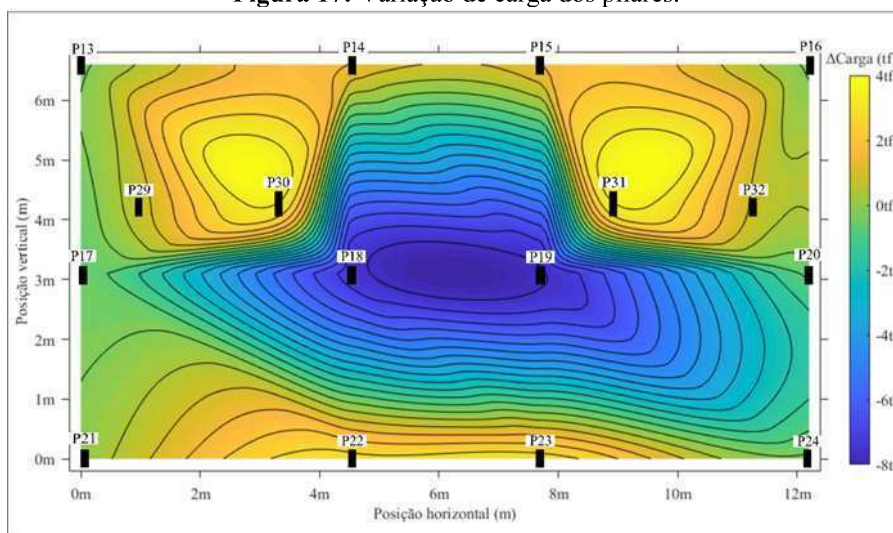
Fonte: O Autor (2018).

Resultados

Após a realização das interações, obteve-se novos valores para as reações de apoio e novos diagramas de momento nas vigas.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra a variação de carga entre pilares decorrente do deslocamento dos apoios, nesta imagem a cor azul representa o alívio de carga, ou seja, pilares contidos nesta área tiveram parte de sua carga redistribuída a outros pilares, e a cor amarela representa acréscimo de carga, ou seja, pilares contidos na região amarela tiveram sua carga aumentada devido à transferência de parte da carga de outros pilares para estes. Os valores referentes às cores estão contidos na legenda, indo de -8tnf à 4tnf.

Figura 17: Variação de carga dos pilares.



A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foi elaborada no software MATLAB, através dos valores contidos na

Tabela 10, utilizando interpolação cúbica. Também representado na imagem estão isolinhas distanciadas

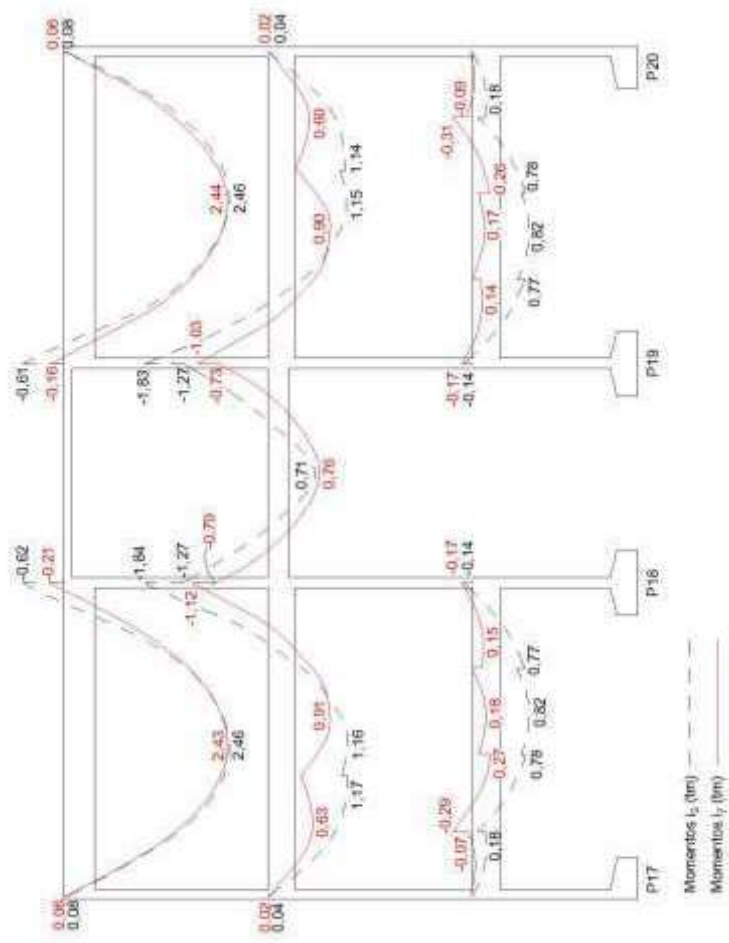
de 0,5 tnf.

Tabela 10: Transferência de cargas e posição dos pilares.

Número da sapata	Reações (tnf)		Δcargas (tnf)	Posição do eixo das sapatas (m)	
	I ₀	I ₇		Horizontal	Vertical
13	10,69	10,33	-0,36	0,00	6,65
14	14,81	16,37	1,56	4,54	6,65
15	14,77	16,36	1,59	7,72	6,65
16	10,66	10,27	-0,39	12,25	6,65
17	14,42	13,92	-0,51	0,00	3,10
18	26,87	19,47	-7,40	4,54	3,10
19	26,82	19,08	-7,74	7,72	3,10
20	14,38	13,80	-0,57	12,25	3,10
21	13,35	13,35	-0,01	0,00	0,00
22	17,38	20,30	2,92	4,54	0,00
23	17,39	20,40	3,01	7,72	0,00
24	13,37	13,37	0,00	12,25	0,00
29	8,43	9,05	0,63	0,92	4,25
30	4,24	7,47	3,23	3,29	4,25
31	4,23	7,48	3,25	8,96	4,25
32	8,49	9,28	0,79	11,33	4,25

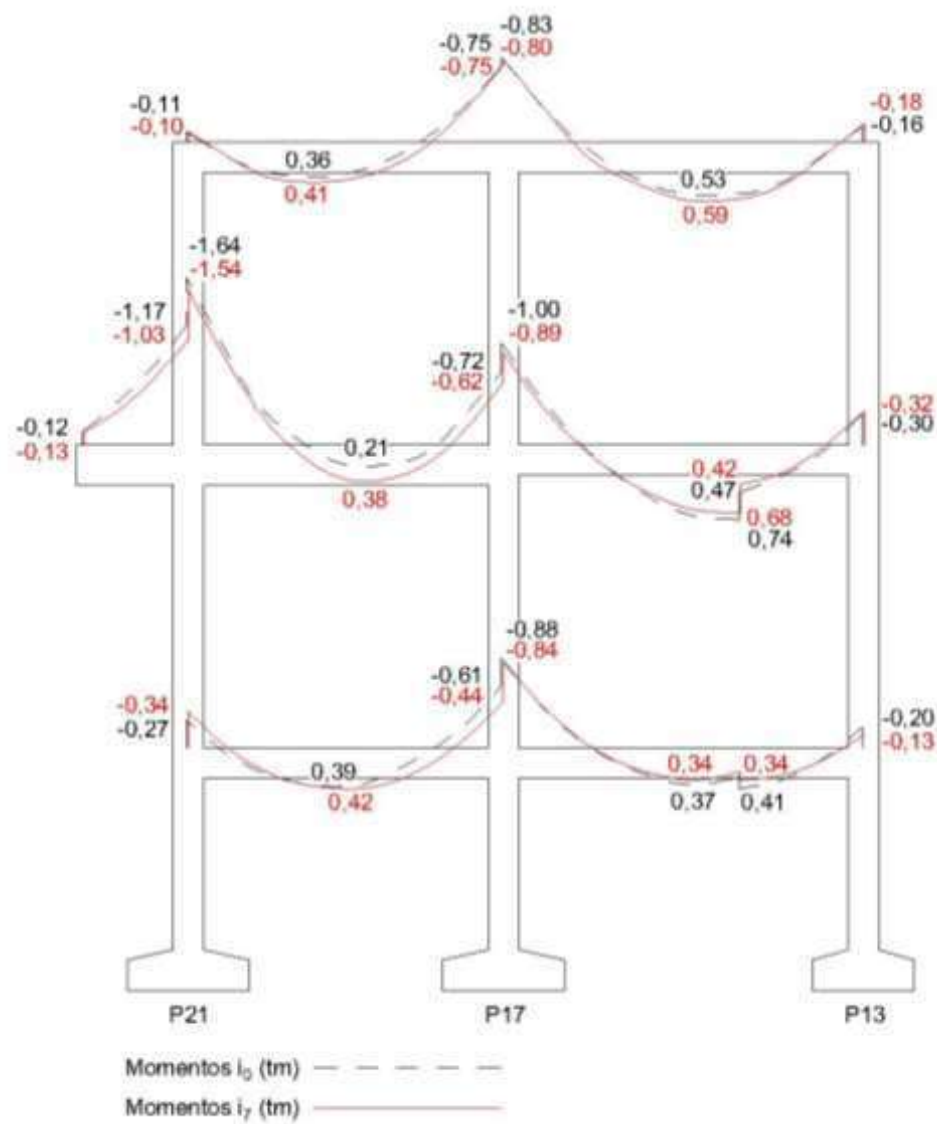
Fonte: O autor (2018).

Figura 17: Diagramas de momento fletor da seção longitudinal antes e após a ISE. (tm)



Fonte: O Autor (2018).

Figura 18: Diagramas de momento fletor da seção transversal antes e após a ISE. (tm)



Fonte: O autor (2018).

As Figuras

Figura 17 e Figura 19 representam os momentos fletores das vigas no modelo do SAP2000, nas seções transversal e longitudinal. Os momentos fletores após a ISE (Momentos I_7) estão representados em vermelho, e os momentos antes da ISE (Momentos I_0) estão em preto com linha tracejada.

Nestas figuras é possível analisar as alterações no comportamento das vigas, principalmente na seção longitudinal dos níveis subsolo e térreo, onde esta alteração é mais acentuada.

No nível do térreo há a diminuição da amplitude dos momentos, e no nível do subsolo há um deslocamento, gerando momento negativo até então inexistente.

Esta alteração de comportamento das vigas se deve principalmente à transferência de carga ocorrida, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Nesta é notável a transferência de parte das cargas dos pilares 18 e 19 para os pilares próximos, sendo pouco afetados pela transferência os pilares de periferia, como os pertencentes à seção transversal (

Figura 17).

Esta transferência de carga é da ordem de 8 toneladas, representando uma redução de 28% da carga no pilar 18, e 29% no pilar 19. Já nos pilares P30 e P31, houve um acréscimo de carga da ordem de 3 toneladas, representando um aumento de 76% e 77% da carga respectivamente.

Nos casos onde há diminuição de carga os pilares estão dimensionados a favor da segurança, enquanto nos casos onde há aumento de cargas, os pilares estarão contra a segurança, devendo-se analisar se os fatores de segurança atendem à estas solicitações sem trazer riscos à estrutura.

Conclusão

Apesar do modelo estrutural estar completo, a realização da análise se fez inviável dentro do software de origem, CYPECAD, gerando a necessidade de uma remodelação da estrutura em um software apropriado para tal, o SAP2000.

Em seguida realizou-se a estimativa dos deslocamentos das fundações e, para tal, utilizou-se do método Barata para estimativas de recalque, que leva diversos fatores da fundação e do solo em consideração. Os recalques foram calculados em relação às duas sondagens pertinentes à área sendo estudada, selecionando os dados menos favoráveis à segurança para o prosseguimento da análise.

Com o cálculo dos recalques e o mapa de cargas das fundações, se fez possível a estimativa dos coeficientes de mola, pelo modelo de Winkler, considerando o solo como um meio elástico. Os dados dos coeficientes foram inseridos no SAP2000 substituindo o apoio indeslocável na direção vertical, mantendo fixo os deslocamentos horizontais.

O processo de interação demanda uma repetição de procedimentos, incluindo exportação de dados, recálculo de coeficientes, importação manual de dados, realização de nova análise, entre outros. A convergência entre os valores do recalque teórico e o recalque de interação foram o referencial para o fim da análise, que se deu quando todos os recalques de interação convergiram em 98% com os recalques teóricos.

Após finalizada a fase de repetição, iniciou-se a fase de análise dos resultados, onde se exportou os valores das reações nos apoios, diagramas de esforços nas barras do modelo correspondentes às seções do modelo original. E com intuito de facilitar a análise dos dados gerou-se um diagrama em cores, com a variação de carga dos apoios, exibindo de maneira visual a transferência indireta de carga entre os apoios da estrutura.

Através dos dados de reações dos apoios, é possível perceber que as sapatas mais ao centro e mais carregadas perdem parte de sua carga, enquanto as sapatas próximas a estas recebem um aumento de carga. As sapatas periféricas, foram pouco afetadas pela redistribuição das cargas. Notou-se também uma variação considerável nos esforços internos das vigas próximas aos pilares mais afetados pela redistribuição.

A interação solo-estrutura ocorre em qualquer estrutura assente em um maciço de solo, seja este composto por areia ou argila. A necessidade de analisar esta interação deve ser avaliada pelo responsável do projeto de fundações, considerando a estrutura a ser projetada e o solo de fundação.

O estudo de caso, um edifício multifamiliar de dois pavimentos, não representa um modelo para avaliação de interação solo-estrutura para edifícios maiores, ou em solos diferentes, ele apenas acrescenta à literatura os dados do mesmo, e sobre estes dados, diversas conclusões podem ser extraídas.

O terreno apresentar, em geral, perfil com solo arenoso e compacto, mais o edifício ser de pequeno porte, faz com que a análise efetuada pudesse ser vista como dispensável; situação contraindicada visto as variações de carga, onde determinadas sapatas tiveram um aumento de 78% de sua carga original.

Como contribuição, pode-se acrescentar a esta pesquisa a interpolação dos valores das sondagens para cada sapata isolada, aproximando ainda mais o modelo teórico da estrutura real. Uma continuação interessante, também, seria ainda a avaliação de possíveis danos à estrutura, limites de inclinação e patologias. Este trabalho

visa esclarecer e exemplificar a interação solo-estrutura, contribuindo para o conhecimento da mesma para aqueles que se interessarem no assunto, assim como o autor deste trabalho.

O diagrama de momento fletor referente ao processo da interação solo-estrutura, que é uma estimativa mais próxima da realidade do comportamento da estrutura, apresenta, para este trabalho, uma variação em torno de 10% na avaliação geral dos diagramas.

Como os recalques estimados são de compressibilidade rápida, há uma forte influência das características da resistência do solo, em especial o módulo de elasticidade E_z , que pode variar muito ao longo da profundidade do bulbo de pressão. Com as sondagens apresentando um solo abaixo das sapatas com N_{SPT} médio em torno de 30, os recalques foram pequenos, sem gerar grandes deformações e mudanças nos esforços internos da estrutura. As pequenas mudanças no diagrama de momento fletor deste estudo de caso gera um alerta geral: se o solo for de baixa resistência haverá maiores alterações nos diagramas.

Duas situações serão possíveis numa interação solo-estrutura para o caso de solo de baixa resistência; primeiro, os diagramas poderão deslocar-se para próximo dos apoios, no caso das vigas, ou o aumento do momento fletor nas vigas e nos pilares, podendo também, surgir um aumento na compressão de alguns pilares. Estas alterações podem gerar, num caso menos grave, um excesso na abertura de fissuras em superestruturas de concreto e o surgimento de fissuras em 45° próximo a ligações viga-pilar. Em segundo, o aumento dos momentos fletores podem levar os elementos estruturais para o estado limite último; sua ruína.

Por fim, este trabalho contribui para elucidar a necessidade de conhecer bem o solo aonde se deseja construir, conhecendo suas características físicas e de resistência. Observou-se que quanto mais compressível o solo, mais a estrutura estará suscetível às deformações nela imposta. O solo é um componente de suma importância no projeto estrutural, talvez o mais importante. A devida investigação geotécnica e análise de comportamento devem ser realizadas para melhor garantir a segurança, durabilidade e viabilidade das construções.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro. 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento do solo para fundações de edifícios. Rio de Janeiro. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro. 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: Solo - Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT - Metodo de Ensaio. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas: Procedimento. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado: especificação. Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro. 2010.