

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Dimensionamento de fundações radier considerando o efeito dos recalques medidos

Luiz Fernando Anchar Lopes

Pesquisador, Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Estruturas, Maringá, Brasil,
luiz.anchar@hotmail.com

Larissa de Brum Passini

Professora Adjunta, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, larissapassini@hotmail.com

RESUMO: A interação solo-estrutura é uma ferramenta utilizada para entender a modificação dos esforços devido a deslocamentos. Esta deve ser utilizada na fase de projetos para realizar um correto dimensionamento da estrutura. O recalque é a principal fonte de deslocamento em uma edificação e usualmente não é levado em conta no dimensionamento das estruturas, seja pela falta de entendimento da sua influência ou pela falta de conhecimento de como fazê-lo. Os projetos para edificações são feitos de forma que o projetista estrutural envia uma planta de cargas para o engenheiro geotécnico que faz o dimensionamento das fundações que calcula os recalques e as distorções angulares e os compara com valores limites não levando em conta a interação desses recalques com a estrutura. A interação solo-estrutura também pode ser utilizada após a execução da obra com a simulação do comportamento devido aos recalques medidos que permite verificar se o dimensionamento estrutural é capaz de atender à situação real onde os recalques ocorrem e modificam a distribuição dos esforços internos. Neste trabalho foi realizada uma simulação computacional de dez fundações em radier de edificações rígidas com a aplicação dos recalques medidos para observar a mudança no panorama de esforços, que aumentaram em média 24,5% em alguns pontos da fundação.

PALAVRAS-CHAVE: Interação solo-estrutura, radier, recalques medidos

ABSTRACT: Soil-structure interaction is used to understand solicitation modification under displacements, should to be used in design stage to achieve structure correct design. Although settlements are the main source of building displacements they are not taking into account in structural projects either for lack of understanding its consequences or lack of knowledge of how to do it. Structural designers send design load to geotechnical engineer, who makes design foundation, settlements and angular distortion calculation doing the comparison with standard values. Soil-Structure interaction is also used after building construction simulating the structure behavior through measure settlements that allows to verify if structural design attend field request after settlement occur modifying solicitation. Ten raft foundation simulations was done applying measure settlements to observe solicitation changes, that increases 24,5% in some points of the foundation.

KEYWORDS: Soil-structure interaction, raft foundation, measure settlements.

1 Introdução

A interação solo-estrutura é estudada há vários anos buscando entender e quantificar a influência de deslocamentos nos esforços internos das estruturas. Sabe-se que diversos fatores influenciam nessa análise, sendo os mais preponderantes a rigidez da estrutura e a magnitude dos deslocamentos diferenciais.

Toda estrutura apresenta deslocamentos e a engenharia civil convive com esse fato. Esses deslocamentos são provenientes da ação do vento, impactos, encurtamentos e/ou alongamentos das peças estruturais e dos recalques da fundação, que são objetos de estudo desse trabalho. Quando os deslocamentos acontecem de maneira uniforme não causam problemas à estrutura, quando ocorrem de maneira não uniforme causam distorções nos elementos que ficam submetidos a deslocamentos maiores e menores em diferentes pontos da estrutura. Os deslocamentos não uniformes que decorrem dos recalques são chamados de recalques diferenciais. A distorção entre dois pontos que sofrem recalques diferenciais é chamada de distorção angular.



Medir recalques em uma estrutura não é algo usual devido às questões culturais e financeiras. A NBR 6122:2019 recomenda que sejam feitas medições de recalque em alguns casos específicos: edificações maiores que 50m de altura, estruturas com cargas variáveis (silos), relação altura/base maior que 4,0 e estruturas não convencionais, devido a isso a maioria das edificações não tem seus deslocamentos de fundação conhecidos. Esses fatos fazem com que a fique prejudicada a análise do efeito que esses deslocamentos de fundação causam.

De acordo com Haberfield (2017), análises de interação solo-estrutura bem feitas proporcionam projetos mais prudentes, robustos e econômicos para as mais diversas estruturas, como torres altas, edifícios históricos, sistemas de contenção e suportes de escavação, túneis, represas e pontes.

A maior parte da base de dados sobre deslocamentos de edificações convencionais vem de motivações acadêmicas, após surgir algum problema que necessite de monitoramento constante ou quando os incorporadores entendem a necessidade de monitorar para prevenir problemas e até otimizar seus projetos. Como as normas de dimensionamento estrutural são conservadoras as medições em casos de problemas estruturais são escassas. Os monitoramentos do ponto de vista acadêmicos tem sempre o controle de algumas variáveis e o uso da melhor técnica, o que não ocorre na prática em obras. A medição de recalques feita com a motivação partindo dos incorporadores trás dados com todas as variáveis possíveis de campo e com pouco controle.

Independente da base, os dados de medições de recalque são importantes e devem receber análises aprofundadas. A mera verificação de recalques máximos e mínimos causa uma subutilização dos dados e um desperdício de recursos. Através dos dados de recalque podem ser feitas análises estatísticas, análises qualitativas e quantitativas, análises de confiabilidade e retro-análises das edificações.

Este trabalho buscou contribuir para a análise dos recalques medidos em edificações rígidas, simulando os deslocamentos medidos em alguns pontos da edificação e avaliando a mudança do panorama de solicitações como consequência desses recalques.

2 Interação Solo-Estrutura

As primeiras análises de interação solo-estrutura datam da década de 50, que de acordo com Gusmão (1990). Mayerhof realizou em 1953 considerações de modelos elásticos tanto para o solo quanto para a estrutura e desde então diversos autores tem feito contribuições na busca de uma definição metodológica que faça com que as análises sejam condizentes com o que ocorre na edificação. Essa abordagem é considerada uma das primeiras a tentar quebrar os paradigmas da engenharia civil de estruturas sobre apoios rígidos.

Poulos (1975), apresenta um aprimoramento da proposta de Chamecki que propôs um processo iterativo que inicia com a apropriação dos esforços considerando a base da estrutura indeslocável, coloca-se apoios elásticos na estrutura e aplica-se a carga repetindo o processo até que os valores de carga e coeficiente de reação dos apoios converjam, utilizando uma solução matricial onde o a fundação e o terreno são tratados como um único sistema.

King (1977), utilizou os primeiros modelos de elementos finitos para análise de fundações com foco em radiers. Seu trabalho ainda apresenta discussões sobre modelos tensão-deformação para o solo, não se atendo apenas ao modelo elástico linear.

Trabalhos recentes utilizam algumas metodologias para avaliar edificações, seja em fase de projeto ou para analisar o desempenho de edificações existentes. Dentre eles destacam-se os trabalhos de Gusmão (1990), Danzinger *et al.* (2005), Souza e Reis (2008) e Antoniazzi (2011).

Gusmão (1990) realizou uma análise utilizando a metodologia de Poulos (1975) para elencar e quantificar a influência de vários fatores na interação solo-estrutura. O autor avaliou a rigidez do terreno, número de pavimentos da edificação, efeito dos primeiros pavimentos, presença de cintas, efeito tridimensional de pórtico e forma em planta da edificação. Ainda foram realizadas análises para entender a redistribuição de cargas nos pilares e a tendência de uniformização de recalques.

Danzinger *et al.* (2005), através da análise de uma obra na cidade do Rio de Janeiro que teve seus recalques monitorados, observaram que a consideração da Interação Solo-Estrutura modifica significativamente o desempenho de uma estrutura. Foi feita a análise de trinta e seis pilares dessa obra, o quais tiveram monitoramento de recalques em sete visitas durante a fase de construção. Esses valores foram

comparados com simulações com o uso de MEF e observou-se uma maior distribuição ocorreu durante o início dos dois primeiros pisos da edificação nas etapas zero e um o que se confirmou com as análises computacionais. Ainda observou-se que para os pilares centrais houve um acréscimo de carga de 60% e para os pilares de periferia de 70%.

Antoniazzi (2011) aplicou o conceito de Interação Solo-Estrutura, o qual proporciona a observação de uma suavização na deformada de recalques devido à redistribuição dos esforços causando uma diminuição dos recalques totais e diferenciais. Isso foi observado através da análise de pórticos planos e pórticos espaciais com a consideração da função de etapas concluídas no *software* CAD/TQS. O autor analisou um edifício real que apresentou um acréscimo máximo de 47,62% e médio de 20,29% nos momentos fletores de pilares.

3 Dimensionamento de Fundações Radier

Milovic e Djogo (1997) apresentam uma metodologia que permite obter os esforços em qualquer ponto de um radier considerando o maciço de solos um espaço semi-infinito com propriedades elásticas e isotrópicas. Essa metodologia consiste em discretizar o radier colocando linhas paralelas na direção x e na direção y com distâncias iguais entre si, conforme a Figura 1.

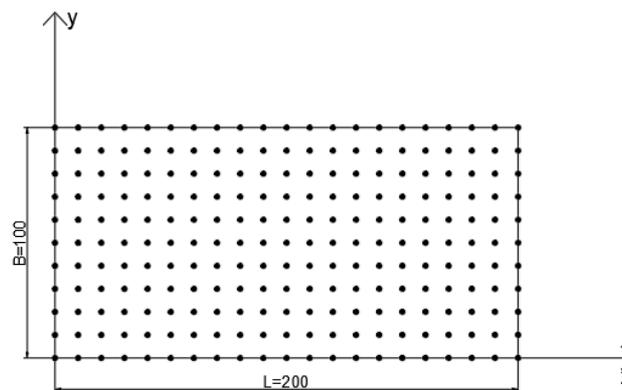


Figura 1. Discretização de um radier (Milovic e Djogo, 1997)

Por essa formulação teórica, a deflexão de um radier solicitado por um vetor $p(x,y)$ pode ser dada pela equação 1.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p(x,y) - q(x,y)}{D} \quad (1)$$

Sendo $w(x,y)$ uma função conhecida do deslocamento vertical no centro da placa e q é uma função não conhecida das reações de apoio. A rigidez à flexão da placa do radier (D) é dada pela equação 2, sendo h a espessura da placa.

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (2)$$

Pela matriz da equação 3 é possível obter um sistema de equações algébricas.

$$[A] \cdot \{w\} = \frac{\lambda_x^4}{r^2 \cdot D} \cdot [\{p\} - \{q\}] \quad (3)$$

Sendo $[A]$ a matriz dos coeficientes do sistema linear das equações, $\{w\}$ é uma matriz unidimensional de deslocamentos verticais, $\{p\}$ é uma matriz unidimensional de forças nodais aplicadas e $\{q\}$ uma matriz

unidimensional de reações. A relação entre os vetores $\{w\}$ e $\{q\}$ podem ser dados pela relação da equação 4 onde $[F]$ é uma matriz de deslocamentos em um ponto da placa.

$$\{w\} = [F] \cdot \{q\} \quad (4)$$

Com isso através da equação 4 é possível calcular os recalques e as reações de apoio em todos os pontos do radier e assim calcular todas as forças nodais, momentos fletores e torque.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada a metodologia de Milovic e Djogo (1997) através do *software* ROBOT/Autodesk na versão estudante. A variável deslocamento é conhecida pois foi medida em campo, portanto são conhecidas as variáveis de força após a aplicação dos deslocamentos.

3 Estudo de Caso

As dez edificações analisadas estão localizadas na Região Metropolitana de Recife e têm sua estrutura em paredes de concreto moldadas no local com fundação em radier (Figura 2) que fazem parte de um complexo com 64 edificações com planta similar em oito pavimentos que estão inseridas em um conjunto habitacional.



Figura 2. Edificações analisadas

O processo construtivo tem como peculiaridade a velocidade de execução, levando em média dezoito dias desde o início da fundação até a concretagem da platibanda de cobertura. A parte estrutural corresponde a 80% do peso total considerado, com isso tem-se uma alta velocidade de carregamento sobre o solo, o que não é convencional em edificações.

O radier estudado tem dimensões de 16,35m x 16,70m e espessura de 0,30m com protensão e 0,50m sem o sistema de protensão.

A tipologia construtiva estudada tem uma velocidade de execução maior que a observada em edificações convencionais e isso gera um adensamento primário do maciço de forma extremamente rápida, uma vez que o lençol freático está bem abaixo da cota de assentamento. Foram realizadas duas sondagens do tipo SPT sob cada fundação. As Figuras 3 e 4 apresentam a estratigrafia do solo, bem como o posicionamento das edificações e os resultados das sondagens SPT realizadas.

O grupo de edificações da Figura 3 apresenta a primeira camada de silte argiloso, a segunda camada de silte areno-argiloso, a terceira camada de argila siltosa, a quarta camada de areia siltosa e a última camada em silte areno-argiloso. As cotas de topo em metros na ordem das sondagens são: 71,74, 71,65, 72,53, 72,88, 72,81, 72,33, 72,23, 73,49. As profundidades máximas em metros na ordem das sondagens são: 7,30, 10,25, 9,31, 10,38, 6,23, 8,40, 10,23, 9,33. A maioria das sondagens apresentaram final de sondagem seco.

O grupo de edificações da Figura 4 tem uma primeira camada espessa e composta por silte areno-argiloso, a segunda por silte arenoso, a terceira por areia siltosa e a quarta por silte argiloso. As cotas de topo em metros na ordem das sondagens são: 69,64, 69,31, 68,89, 68,40, 68,58, 68,01, 68,57, 68,53, 68,25, 68,50, 68,30, 68,40. As profundidades máximas em metros na ordem das sondagens são: 7,16, 8,16, 8,01, 8,17, 10,05, 10,21, 7,57, 7,05, 7,02, 7,18, 13,02, 8,33.

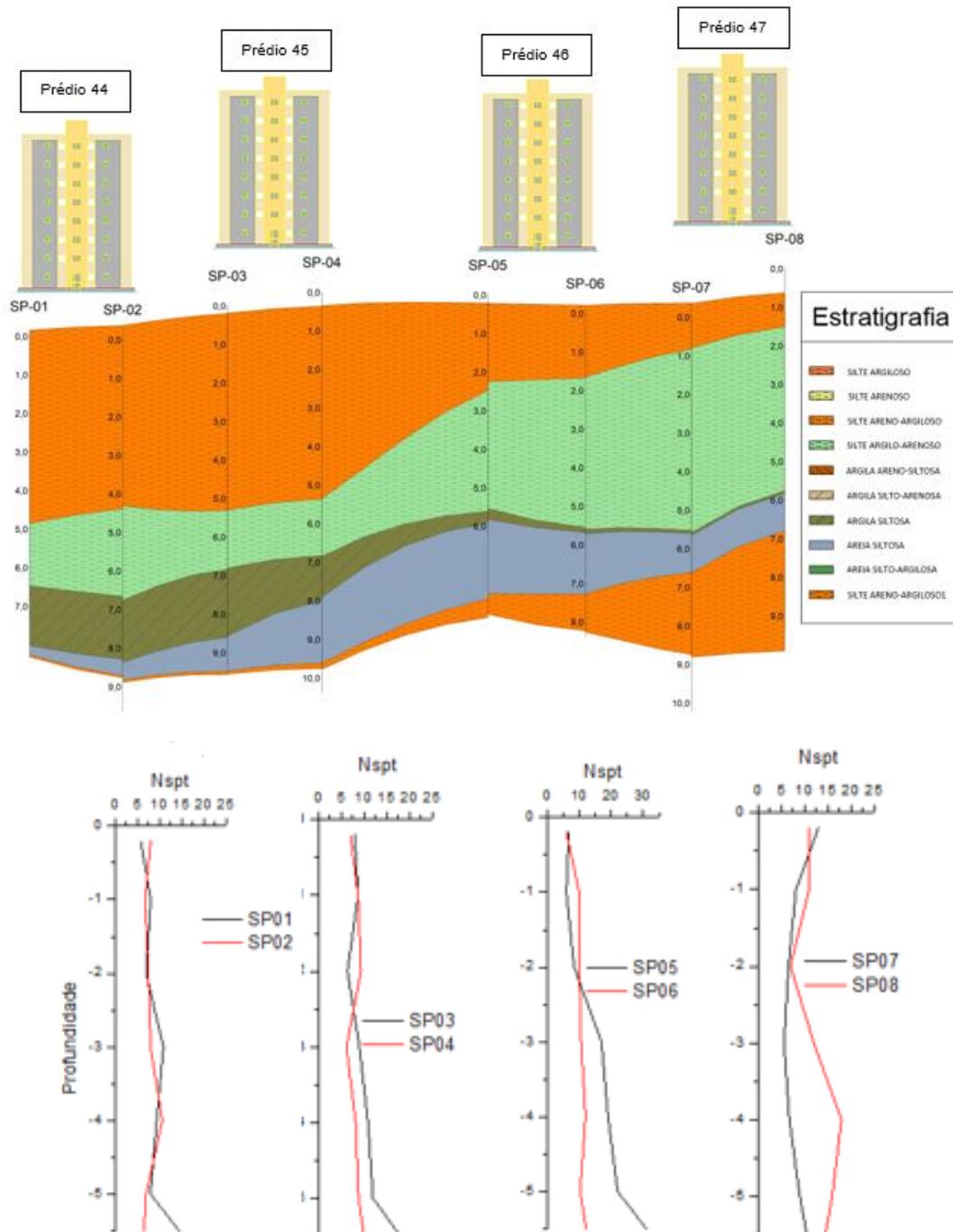


Figura 3. Estratigrafia e SPT (Lopes, 2019)

As cargas provenientes da estrutura foram aplicadas sobre o radier, e os coeficientes de mola foram iterados até que houvesse a aproximação entre os valores de recalque medidos e os valores de recalque calculados pela equação 5 proposta por Perloff (1975) onde q é a tensão média aplicada, B é a base, ν é o coeficiente de poisson, E_s é o módulo de elasticidade do solo e I_s é um fator de forma da fundação.

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

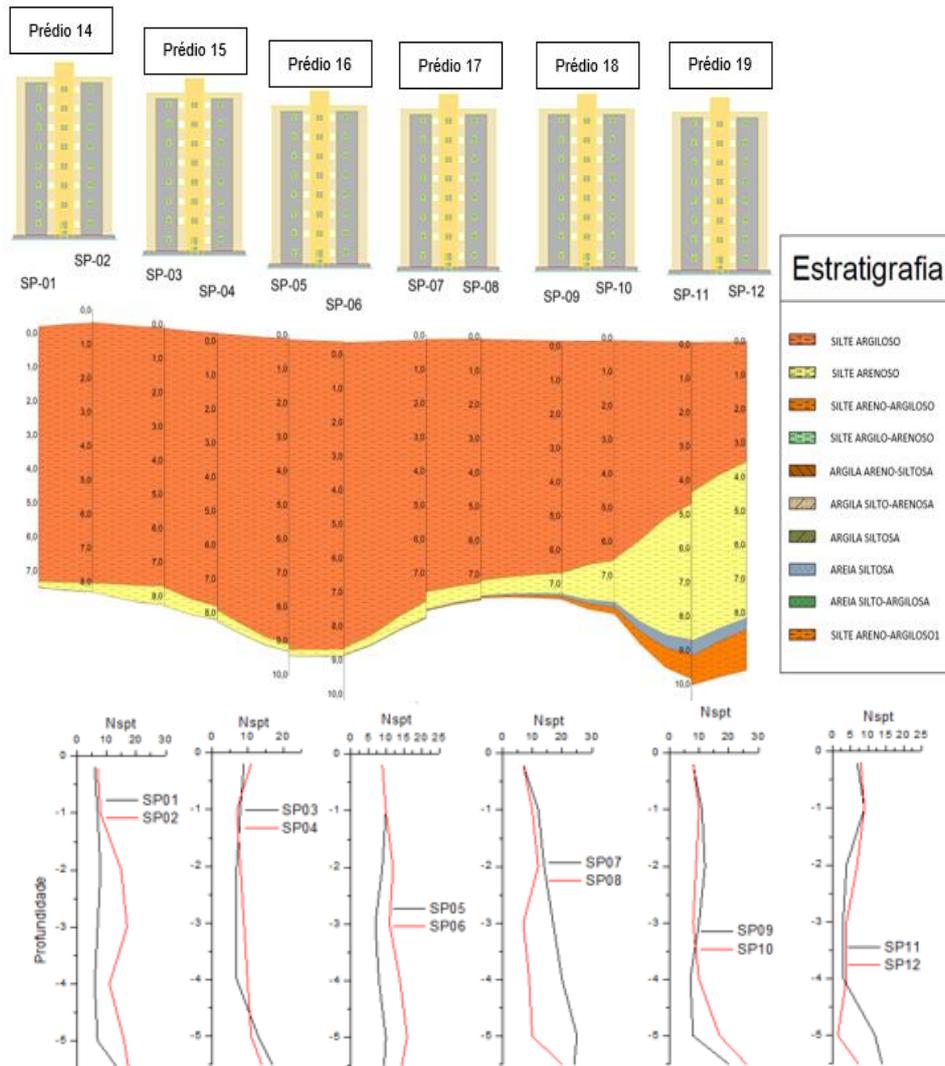


Figura 4. Estratigrafia e SPT (Lopes, 2019)

Os deslocamentos foram medidos em cada uma das edificações com o uso de dez pinos fixados na periferia da estrutura (Figura 5a) no pavimento térreo. A medição dos recalques foi feita em média quatro vezes durante a etapa de construção para cada edificação utilizando estação total e diversos pontos de coordenada conhecida espalhados pelo local da obra como referência indeslocável.

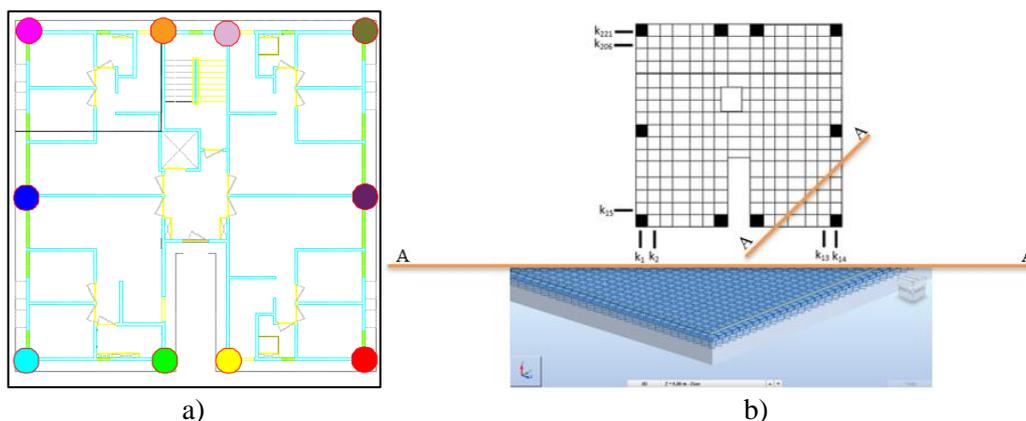


Figura 5. Distribuição dos pontos de medição de recalque e discretização do radier (Lopes, 2019)



A Tabela 1 apresenta os dados resumidos de recalque e distorção angular da última das quatro medições realizada em cada edificação. Esses valores foram utilizados nas simulações numéricas para entendimento da mudança de esforços.

Identificação	Recalque (mm)		Distorção Angular (10^{-5})		
	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Média
14	28,05	19,13	76,00	0,35	30,00
15	10,68	5,50	40,60	0,16	20,00
16	18,14	9,20	52,10	0,70	30,00
17	9,84	6,51	30,60	0,32	10,00
18	15,40	8,51	33,60	0,031	20,00
19	17,89	10,36	69,60	10,40	40,00
44	38,24	31,17	61,30	0,18	30,00
45	41,51	6,25	239,3	154,0	100,0
46	19,39	4,05	96,10	0,070	40,0
47	20,04	3,86	90,30	0,031	50,0

Tabela 1. Recalques e Distorções medidos na obra

As análises de modificação no panorama de tensões foram feitas utilizando o *software* ROBOT/Autodesk versão estudante. O radier foi discretizado em elementos de 0,10 m de lado e a cada nó foi atribuído um coeficiente de mola. As molas foram divididas em grupos de 1x1m (k_{ij}), com o centro de cada grupo coincidente com um ponto de medição de recalque (Indicados com hachura preta na Figura 5b).

4 Resultados e Conclusões

A aplicação dos esforços estimado através do software ocasiona o deslocamento dos pontos da placa analisada. Esses deslocamentos, quando igualados aos recalques proporcionam um panorama similar ao que ocorre na estrutura real devido à modificação do panorama de tensões. Esse fenômeno é conhecido como Interação Solo-Estrutura (ISE), que pode ser captada mais facilmente com o auxílio de um *software* e para este estudo estão expressas na Tabela 2.

Ident.	Tensão sem ISE em MPa/m		Tensão com ISE em MPa/m	
	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima
14	1,31	-0,27	1,631	-0,490
15	1,31	-0,27	1,582	-0,082
16	1,31	-0,27	1,454	-0,004
17	1,31	-0,27	1,456	-0,621
18	1,31	-0,27	1,402	-0,057
19	1,31	-0,27	1,343	-0,146
44	1,31	-0,27	1,345	-0,449
45	1,31	-0,27	1,367	-0,299
46	1,31	-0,27	1,384	-0,539
47	1,31	-0,27	1,302	-0,393

Tabela 2. Análises dos esforços

Através da Tabela 2 é possível observar que o maior aumento de tensão ocorreu na edificação 14, essa mudança com a consideração dos recalques ocasionou um aumento máximo de 24,50% nas máximas tensões na fundação que não foram levadas em conta no dimensionamento da fundação.



As análises realizadas nesse trabalho com a consideração da ISE proporcionaram a verificação junto a literatura da importância de levá-la em conta. A mudança dos esforços pode ocasionar modificações relevantes que possam extrapolar os fatores de segurança e colocar em risco a estrutura e seus ocupantes.

Projetar sem o uso da ISE é menos custoso e mais rotineiramente utilizado. Esse trabalho demonstra que mesmo em estruturas com maior rigidez ocorrem modificações nos esforços que devem ser absorvidos pelos elementos estruturais. Isso deve ser levado em conta na fase de projetos e na fase de pós construção para verificação das premissas adotadas e tomar as devidas medidas para mitigar problemas quando necessário.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122:2019. Projeto e execução de fundações.
- ANTONIAZZI, J. P. Interação Solo-Estrutura de Edifícios com Fundações Superficiais. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 139. 2011.
- DANZINGER, B. R.; CARVALHO, E. M. L.; COSTA, R. V.; DANZINGER, F. A.B. Estudo de caso de obra com análise da interação solo estrutura. Porto: Revista de Engenharia da Universidade do Minho. 2005.
- GUSMÃO, A. D. Estudo da Interação Solo-Estrutura e sua Influência em Recalques de Edificações. (Dissertação de Mestrado). COPPE. Rio de Janeiro, 1990.
- HABERFIELD, C. Practical application of soil structure interaction analysis. Proceedings of 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul. 2017.
- KING, G. J. W. An Introduction to Superstructure-Raft-Soil Interaction. I International Symposium on Soil-Structure Interaction. Roorkee. V. 1. pp. 453-466. 1977.
- LOPES, L., F., A. Aplicação da Teoria de Confiabilidade na Verificação do Estado Limite de Serviço de Edifícios Construídos em Parede de Concreto com Fundação em Radier. (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual de Maringá. Maringá. 2019.
- MILOVIC, D. M.; DJOGO, M. B. Rectangular raft of any rigidity on the layer of limited thickness. 14th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Hamburgo. 1997
- POULOS, H. G; Settlement Analysis of Structural Foundation Systems. IV South-East Asian Conference on Soil Engineering. Kuala Lumpur, Malasia. p. 52-62. 1975a.
- SOUZA, R. A. D.; REIS, J. H. C. D. Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundação rasa. Acta Scientiarum Technology, Maringá, 30, n. 2, 161-171.2008.