

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



## Análise dos Efeitos da Interação Solo-Estrutura em Uma Edificação de Médio Porte Localizada no Distrito Federal

Gabriel dos Santos Bonfim de Sousa

Engenheiro Civil, UniCEUB, Brasília, Brasil, [gabriel.bonfim@sempreceub.com](mailto:gabriel.bonfim@sempreceub.com)

Gabriela de Athayde Duboc Bahia

Engenheira Civil, UniCEUB, Brasília, Brasil, [gabriela.bahia@ceub.edu.br](mailto:gabriela.bahia@ceub.edu.br)

Lucas Fernandes Dantas

Estudante, UniCEUB, Brasília, Brasil, [lucas.dantas@sempreceub.com](mailto:lucas.dantas@sempreceub.com)

Shirley Vieira da Silva

Estudante, UniCEUB, Brasília, Brasil, [shirley.vieira@sempreceub.com](mailto:shirley.vieira@sempreceub.com)

**RESUMO:** A atual concepção de projetos estruturais e de fundações é repleta de simplificações que facilitam o exercício da profissão do engenheiro civil calculista. Entretanto, não considerar o relacionamento interdependente entre todas as partes do sistema conduz a resultados que se afastam do comportamento real da obra. Por isso, este artigo tem como objetivo analisar os efeitos da interação solo-estrutura em uma edificação de médio porte localizada no Distrito Federal. Para este fim, foi realizada uma comparação entre duas situações distintas, onde, primeiramente, a estrutura foi processada considerando seus apoios engastados, restringindo qualquer tipo de deslocamento nas fundações, e em seguida, realizaram-se novos processamentos iterativos após a flexibilização dos seus apoios. Entre as ferramentas utilizadas, estão o *software* Eberick 2108, responsável por fornecer, através de análises estáticas lineares, os esforços por meio da planta de carga do edifício e uma planilha eletrônica desenvolvida no *software* Microsoft Office Excel, para o cálculo das tensões induzidas no solo, dos recalques estimados e dos coeficientes de reação vertical do solo. Os resultados dessa comparação evidenciaram a importância da ISE no desenvolvimento de um projeto estrutural, ao se observar uma redistribuição significativa das reações de apoio, registrando uma tendência de migração de cargas verticais entre os elementos, como também alterações nos valores dos recalques estimados dos pilares, constatando imprecisões na atual condição de concepção de projetos estruturais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Interação Solo-Estrutura, Fundações Superficiais, Deslocamentos Verticais.

**ABSTRACT:** Nowadays the concept of foundation and structures design is full of simplifications to facilitate the civil engineer profession. However, not taking into account the interdependent relation between all parts of the system leads to results that are far from the real behavior of the construction. Therefore, the objective of the present article is to analyze the effects of the soil-structure interaction in a middle-sized building located at Distrito Federal. To this end, it was compared two different situations, where, first, the structure was processed considering its supports fixed, restricting any displacement at its foundation, and then, it was used iterative processing considering its supports flexible. Among the tools used, the Eberick software responsible to provide, through linear static analysis, the stresses with the loading plant of the building, and a spreadsheet developed using Microsoft Office Excel to determinate the induced stresses in the soil, the estimated settling and the vertical reaction coefficient of soil. The results of this comparison showed the importance of the SSI when developing a structural project, observing a significant redistribution of the support reactions, presenting a trend of migration of vertical loads between the elements, as well as alteration in the values of the estimated settlement of the columns, verifying imprecisions at the current condition of conception of structural design.

**KEYWORDS:** Soil-Structure Interaction, Superficial Foundations, Vertical Displacement.



## 1 Introdução

Na construção civil, os elementos de fundação de uma edificação têm por objetivo transmitir as cargas da estrutura para as camadas de solo, sobre as quais estão apoiados. Constituinte uma relação de interdependência entre as partes do sistema estrutural, conhecida como interação solo-estrutura (ISE).

Devido a complexidade do processo de estimativa de algumas variáveis, o método convencional adotado por engenheiros projetistas adere determinadas simplificações, que acabam por caracterizar uma reprodução incorreta do real comportamento físico das edificações. Entretanto, com o avanço da tecnologia e com o desenvolvimento de *softwares* computacionais e pesquisas acadêmicas, já é possível adotar as relações condicionadas pela interação solo-estrutura no cálculo de análises estruturais, permitindo a obtenção de avaliações mais precisas próximas à situação real.

Dessa forma, esse artigo apresenta o objetivo de analisar os efeitos da flexibilização dos apoios no comportamento de uma edificação residencial de médio porte localizada no Distrito Federal, por meio da consideração da interação solo-estrutura e apontar as discrepâncias entre o método convencional e o método de cálculo proposto.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Recalques de Fundações

Velloso & Lopes (2011) afirmam que em função das solicitações a que os elementos de fundação são submetidos, todos esses elementos sofrem deslocamentos, sejam eles verticais (recalques), horizontais ou rotacionais. Esses deslocamentos são diretamente influenciados pelo solo e pela estrutura, ou seja, são resultados da interação solo-estrutura.

Destaca-se que, de acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019), os recalques são considerados os movimentos verticais descendentes de um elemento de fundação enquanto os levantamentos são os movimentos ascendentes.

#### 2.1.1 Recalques em Elementos de Fundações Superficiais

De acordo com Velloso & Lopes (2011) os tipos de recalque se distinguem conforme o tempo em que se processam. Quando ocorre imediatamente após o carregamento é chamado de recalque imediato, indicado como  $w_i$ . Analogamente, a parcela que ocorre com o tempo é representada por  $w_t$ . Dessa maneira, tem-se que o recalque total ou final pode ser representado pela equação 1.

$$w_f = w_i + w_t \quad (1)$$

Consequência do adensamento (redução do índice de vazios resultante da migração da água dos poros) e de fenômenos viscosos (*creep*), o chamado recalque no tempo nada mais é que aquele que se processa com o tempo. Em certos casos, o *creep*, também tratado como “adensamento secundário”, recebe o nome de fluência. Esse tipo de recalque é definido pela equação 2.

$$w_t = w_a + w_v \quad (2)$$

Onde:

$w_a$  = Parcela devida ao adensamento;

$w_v$  = Parcela devida aos fenômenos viscosos.

### 2.2 Métodos de Previsão de Recalques

De acordo com Medeiros (2013), podem-se separar os métodos de previsão de recalque em três grupos:



- **Métodos Racionais:** Combinam-se parâmetros de deformabilidade, obtidos em laboratório ou *in situ* (ensaio pressiométrico e de placa), a modelos teoricamente exatos, para a previsão de recalques.
- **Métodos Semi Empíricos:** Combinam-se modelos de previsão de recalques teoricamente exatos aos parâmetros de deformabilidade – resultados de correlações com ensaios *in situ* de penetração (CPT ou SPT).
- **Métodos empíricos:** São utilizadas tabelas de valores típicos de tensões admissíveis para diferentes solos. Essas tensões estão associadas a recalques usualmente aceitos em estruturas convencionais.

### 2.3 Tensões induzidas por área retangular uniformemente carregada – Método de Newmark

Das & Sobhan (2015) afirmam que a previsão do aumento da tensão vertical causado por área retangular uniformemente carregada tem como hipóteses: a carga é aplicada na superfície do solo, a área carregada é flexível, o meio de solo é homogêneo, elástico, isotrópico e estende-se a uma grande profundidade.

Dentre as formulações para o cálculo de tensões resultantes está a de Newmark (1935 apud Teixeira; Godoy, 1998), que representa uma das formas de se obter a tensão vertical transmitida a um ponto no meio elástico decorrente de placas carregadas, por meio da integração da equação de Boussinesq e admitindo-se que a área uniformemente carregada com uma pressão  $q$  seja infinitamente flexível.

Para o seu cálculo podem-se utilizar tabelas e ábacos que permitem determinar o fator de influência ( $I_0$ ). Como a solução de Newmark determina a tensão induzida no canto de um carregamento retangular, para que seja possível a obtenção da tensão induzida no centro da placa, faz-se necessária que a divisão do retângulo coincida com o centro da placa analisada. Dessa forma, multiplica-se o fator de influência correspondente a cada subdivisão retangular para obter o fator de influência equivalente para o centro do retângulo.

### 2.4 Procedimento de Steinbrenner (1934)

Dispondo-se do valor do aumento da tensão vertical, a uma determinada profundidade, decorrente de um carregamento na superfície, torna-se possível estimar o recalque para cada elemento de fundação, por meio do procedimento de Steinbrenner (1934 apud ANTONIAZZI, 2011). Esse procedimento define que o encurtamento total do maciço é igual à soma dos encurtamentos de todas as camadas (equação 3).

$$W = \sigma_z \cdot h_1 / E_1 \quad (3)$$

Sendo:

$W$  = recalque da camada de solo analisada;

$\sigma_z$  = acréscimo de tensão na camada;

$h_1$  = espessura da camada;

$E_1$  = módulo de elasticidade do solo que compõe a camada.

O módulo de elasticidade pode ser obtido por meio da correlação empírica com o índice de resistência à penetração da sondagem, a exemplo do proposto por Teixeira & Godoy (1998), como sugere a equação 4.

$$E_s = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT} \quad (4)$$

Sendo:

$\alpha$  = fator de correlação do módulo de elasticidade ( $E_s$ ) com a resistência de ponta do cone;

$K$  = coeficiente de correlação entre a resistência de ponta de cone e o índice de resistência à penetração ( $N_{spt}$ ).

Sendo que o fator  $\alpha$  e o coeficiente  $K$  dependem do tipo de solo e podem ser obtidos por meio de tabelas (Teixeira & Godoy, 1998).

Destaca-se que por se tratar de um método de cálculo para sapatas flexíveis, no caso de elementos rígidos deve-se adotar um fator de correção, multiplicando o valor de recalque obtido na equação 3 por um valor entre 0,8 e 0,85 (PERLOFF, 1975 apud VELLOSO; LOPES, 1998).

## 2.5 Interação Solo-Estrutura (ISE)

O processo de cálculo convencional das edificações é realizada considerando a estrutura com apoios indesejáveis para obtenção dos esforços e para a obtenção dos recalques considerando a carga total sendo aplicada de uma só vez.

Conforme Iglesia (2016), várias são as causas que justificam a utilização do procedimento padrão de cálculo atual, que não leva em consideração a interação solo-estrutura.

- **Dificuldade de cálculo:** Tem-se que o dimensionamento da fundação depende dos esforços resultantes da estrutura e das propriedades específicas de cada solo e os esforços da estrutura dependem dos deslocamentos das fundações.

- **Modelos de cálculo complexos:** Nem sempre está disponível nos programas de dimensionamento, a possibilidade de construção de um modelo complexo de cálculo que envolva a relação entre as combinações de barras e placas dos edifícios com um meio “contínuo”, muitas vezes estratificado, a exemplo do solo.

- **Comportamento do solo:** Ao contrário das simplificações, o solo apresenta uma resposta não linear, principalmente quando se trata de níveis baixos de esforços, que, no tempo, se modifica de forma importante.

- **Falta de informações suficientemente confiáveis sobre o solo:** O solo apresenta propriedades mecânicas e físicas bastante variáveis no tempo e de difícil determinação.

Iwamoto (2000), Colares (2006), Mota (2009) e Antoniazzi (2011) relatam em suas obras a relação entre a ISE, a rigidez relativa a estrutura-solo, o número de pavimentos da edificação, o processo construtivo e a ocorrência de edificações vizinhas como fatores intervenientes no mecanismo da ISE.

## 3 Metodologia

Tem-se como objeto de estudo, o emprego e a análise dos efeitos do método de interação solo-estrutura em uma edificação residencial, de médio porte, localizada em Brasília. O edifício é composto por 1 (um) compartimento para reservatórios inferiores, 2 (dois) subsolos, térreo, 6 (seis) pavimentos tipo, cobertura de lazer, cobertura técnica, reservatório elevado e fundações superficiais, do tipo sapata.

O perfil estratigráfico do local foi obtido por meio de 8 (oito) furos de sondagem à percussão, que foram executados em março de 2012, ao fim da época chuvosa. Nesta região, constatou-se a predominância de uma camada uniforme de silte arenoso na cota das 58 (cinquenta e oito) sapatas da fundação, que foram assentadas a uma profundidade entre 1,5 e 3,2 metros em relação ao segundo subsolo, com  $N_{spt}$  variando de 8 a 57 golpes. Houve necessidade de rebaixamento do lençol freático, pois este se encontrava na cota de 1,5 metro.

Para as análises foi feita a divisão das sapatas em 3 (três) grupos (FS3, FS5 e FS6 de acordo com as sondagens mais representativas), conforme a área de influência dos furos realizados na área de construção da torre do edifício em análise, conforme figura 1.

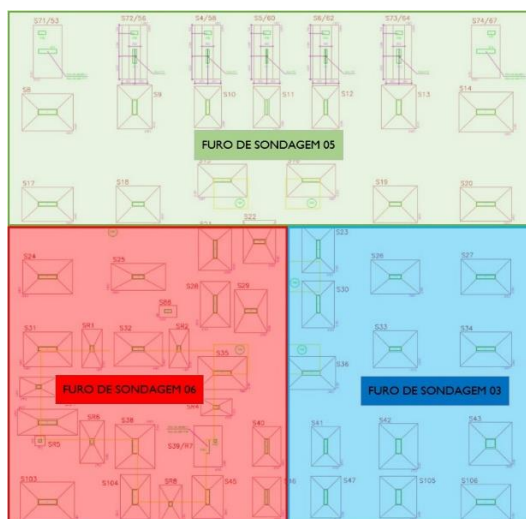


Figura 1. Divisão das sapatas em 3 grupos conforme sondagem

### 3.1 Etapas e Procedimentos de Cálculo

A priori, calculou-se a estrutura da edificação considerando seus apoios indeslocáveis (engastados nas fundações), por meio de uma análise estática linear processada no *software* Eberick 2018, obtendo, assim, as reações de apoio ( $F_z$  máximo) para cada pilar. Em seguida, essas reações foram utilizadas para o cálculo da estimativa de recalques, por meio de uma planilha eletrônica desenvolvida no Microsoft Office Excel.

Os cálculos da planilha foram desenvolvidos utilizando o método de acréscimo de tensões de Newmark (1935) associado ao procedimento de Steinbrenner (1934) para a determinação das tensões induzidas no solo decorrentes do carregamento de cada sapata e o valor do recalque estimado para cada elemento, respectivamente.

Posteriormente, foi possível calcular o coeficiente de reação vertical ( $k_v$ ), para cada sapata, dispondo-se do recalque calculado no passo anterior e da força solicitante ( $F_z$  máximo) de cada elemento. De posse desses coeficientes, alterou-se o sistema estrutural da edificação analisada no *software* Eberick. Para tanto, modificou-se as condições de apoio das bases de cada pilar nas fundações, passando estes vínculos a uma condição de deslocáveis no sentido vertical (sentido do recalque) e não mais indeslocáveis (engastados), com um valor de coeficiente particularmente calculado para cada pilar de fundação.

Após alimentar o *software* Eberick com os valores dos coeficientes de reação vertical encontrados na etapa anterior, realizou-se um novo processamento da estrutura (análise estática linear), o qual resultou em uma nova configuração e redistribuição de esforços nos elementos estruturais. Com a nova planta de cargas, tornou-se possível realimentar a planilha de cálculo no Microsoft Office Excel, obtendo-se, conseqüentemente, novos valores para os recalques, seguindo a lógica de cálculo anteriormente já citada. O procedimento descrito foi repetido, definindo-se cada repetição como uma iteração realizada.

Dessa forma, após a convergência dos resultados (3 iterações) foi realizado um comparativo entre os esforços verticais e recalques obtidos utilizando o método convencional de cálculo, ou seja, considerando os apoios engastados, e o método considerando a ISE, de modo a apontar a divergência entre os resultados.

## 4 Análise dos Resultados

As figuras 2, 3 e 4 apresentam os registros de variação de carga vertical ( $F_z$ ) da análise iterativa com a análise convencional para os pilares do grupo FS3, FS5 e FS6, respectivamente.

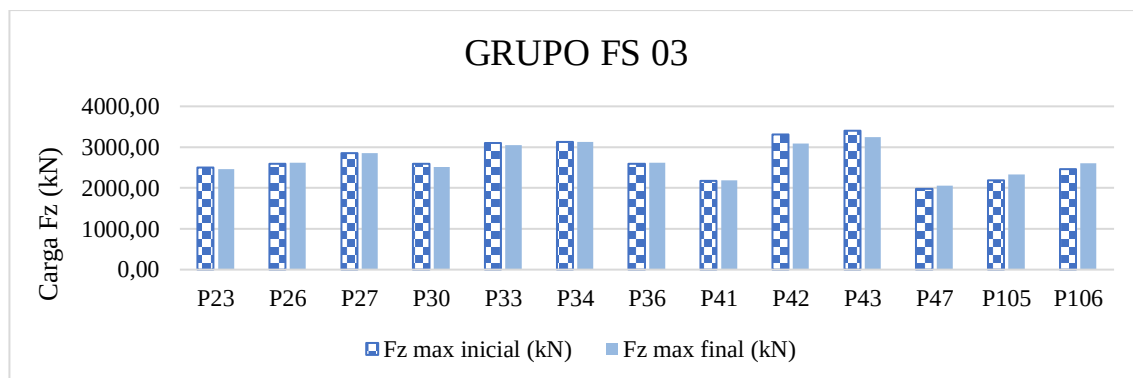


Figura 2. Variação de carga para o grupo FS3

Na figura 2 observou-se que sete pilares analisados (P26, P27, P36, P41, P47, P105 e P106) apresentaram um acréscimo de carga médio de 64,6 kN (2,83%), sendo o pilar P105 o que registrou maior variação individual em termos percentuais, atingindo 6,91%. Os demais pilares apresentaram um alívio de carga médio correspondente a 92,8 kN (2,99%), sendo o pilar P42 o que apresentou maior variação, de 6,66%.

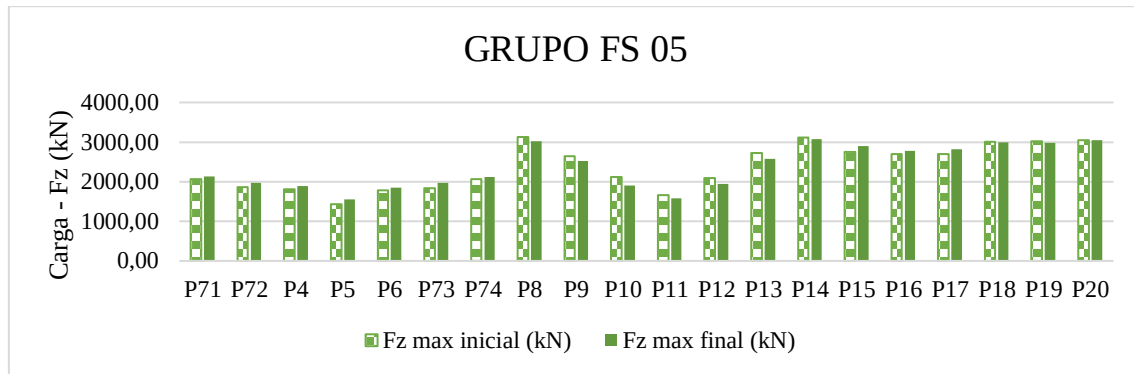


Figura 3. Variação de carga para o grupo FS5

Observa-se na figura 3 um acréscimo médio de carga de 97,3 kN (4,8%) em dez dos vinte pilares analisados (P71, P72, P4, P5, P6, P73, P74, P15, P16 e P17), sendo o pilar P5 o que atingiu uma variação individual máxima de 8,45%. Os demais pilares apresentaram um alívio médio de 91,4 kN (3,87%), sendo o pilar P10 o que apresentou maior variação individual, de 9,79%.

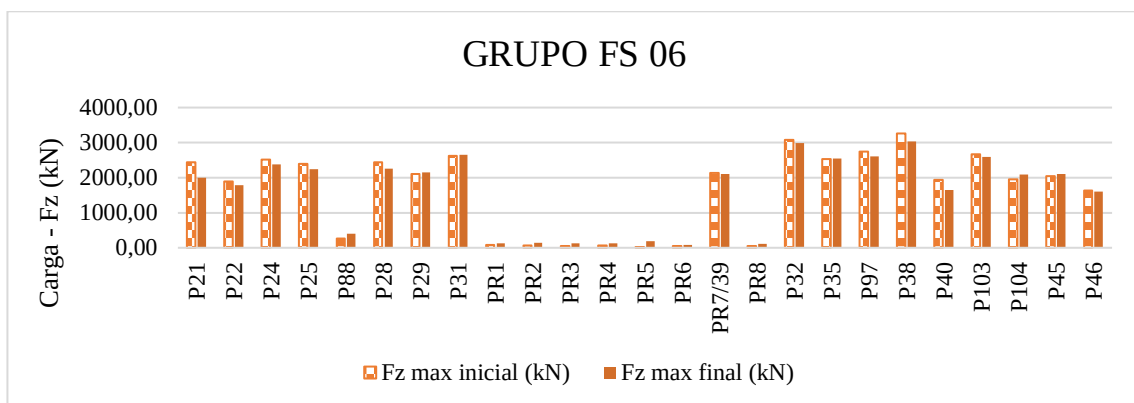


Figura 4. Variação de carga para o grupo FS6

Na figura 4 observou-se um acréscimo médio de carga correspondente a 64,3 kN (57,13%) para doze pilares analisados (P88, P29, P31, PR1, PR2, PR3, PR4, PR6, PR8, P35, P104 e P45). O pilar PR5 foi excluído da análise média, pois apresentou um acréscimo de carga elevado, correspondendo a uma variação individual máxima de 640% (variando de 24,5kN para 181,3 kN). Para os outros doze pilares analisados houve um alívio de cargas média correspondente a 164,6 kN (6,59%), sendo o pilar que sofreu o maior alívio o P21 com 18,03% de variação.

As figuras 5, 6 e 7 apresentam os resultados de variação de recalque para os elementos do grupo FS3, FS5 e FS6, respectivamente.

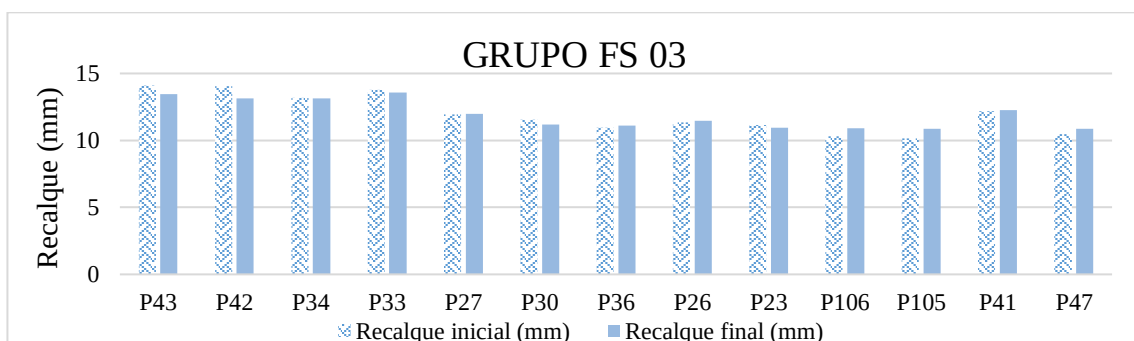


Figura 5. Variação de recalque para o grupo FS3



Na figura 5 observou-se que dos treze pilares analisados, sete (P26, P27, P36, P41, P47, P105 e P106) apresentaram uma variação positiva nos valores estimados de recalque, com uma variação média de 0,3 mm (2,83%), sendo o pilar P105 com maior variação individual, atingindo 6,91% (0,7 mm). Nos outros seis pilares (P23, P30, P33, P34, P42 e P43) a variação foi negativa, registrando média de -0,4 mm (2,99%), sendo o pilar P42 o responsável pela maior variação, correspondente a 6,66 % (-0,94 mm).

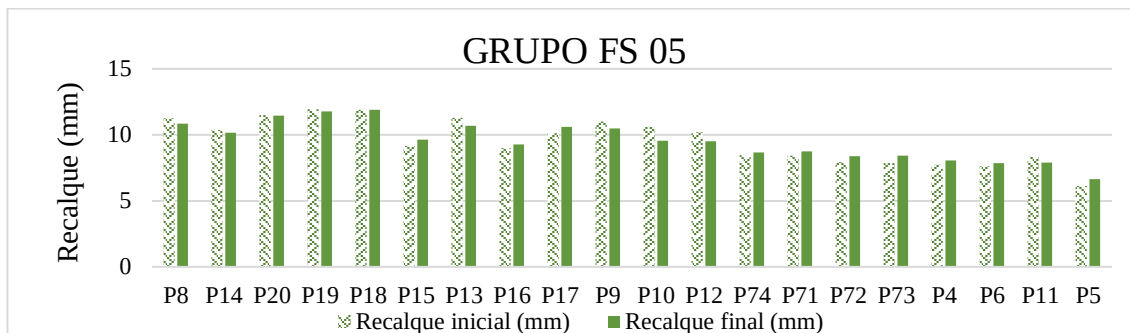


Figura 6. Variação de recalque para o grupo FS5

Observa-se na figura 6 que houve uma variação positiva na estimativa de recalques para dez pilares analisados (P71, P72, P4, P5, P6, P73, P74, P15, P16 e P17) com média de 0,39 mm (4,8%), com o P5 apresentando variação individual máxima de 8,45% (0,52 mm). Os outros dez pilares apresentaram uma variação negativa com média de -0,40 mm (3,87%) com variação individual máxima de -1,04 mm (9,79%) para o pilar P10.

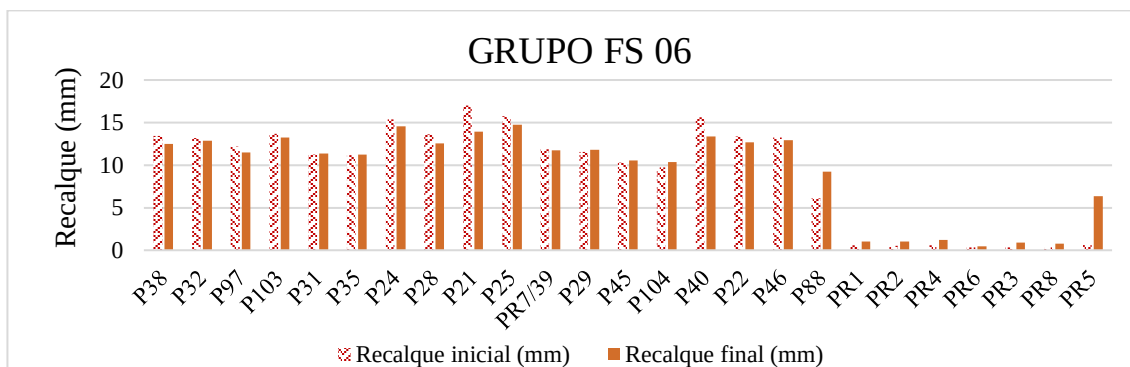


Figura 7. Variação de recalque para o grupo FS6

Conforme figura 7, observou-se uma variação média positiva de 0,98 mm (101,97%) para treze pilares analisados (P31, P35, P29, P45, P104, P88, PR1, PR2, PR4, PR6, PR3, PR8 e PR5), sendo o pilar PR5 o que apresentou maior variação individual correspondente a 740% (5,74 mm). Para os demais pilares foi observada uma variação média negativa também de -0,98 mm (6,59%), sendo o pilar P21 o que apresentou maior variação individual negativa, correspondente a 81,97% (-3,07 mm).

#### 4.1 Análise Global dos Resultados

Considerando todos os resultados apresentados foi possível observar que quando considerada a interação solo-estrutura existe um processo migratório de carga dos elementos mais carregados para os menos carregados, quando comparado com a análise convencional. Isso foi observado pelo fato de que entre os quinze pilares de maior carga vertical inicial ( $F_z$ ), antes da consideração da ISE, trezes deles foram suavizados após as análises, registrando um alívio de carga médio correspondente a 86,67%. Enquanto dos quinze pilares de menor carga vertical inicial ( $F_z$ ) foi registrado um acréscimo de carga médio de mesma variação percentual.

De forma geral, para os resultados de recalque analisados, observou uma tendência de diminuição na deformada de recalques do prédio, porém esse efeito foi pouco pronunciado, apresentando uma variação média correspondente a 0,03% (-0,002 mm).



## 5 Considerações Finais

Por meio dos resultados obtidos pelo estudo foi possível concluir que o processo migratório de cargas tendeu a obedecer a um padrão que se caracterizou pela suavização dos pilares inicialmente mais carregados (atingindo uma alívio de cargas médio correspondente a 86,67%) e pelo acréscimo de carga nos pilares inicialmente menos solicitados (também correspondente a 86,67%).

No caso dos recalques, foi observada uma tendência de diminuição na sua deformada, porém esse efeito foi pouco evidenciado, atingindo variação média correspondente a 0,03% (-0,002 mm). Isso pode ter ocorrido devido ao porte da edificação analisada ser considerado médio, com apenas 6 (seis) pavimentos, sendo este efeito mais pronunciado a partir do quinto pavimento, de acordo com as referências bibliográficas consagradas.

Dessa forma, fica constatado que o modelo padrão de análise convencional das estruturas conduz a resultados que não condizem com o real comportamento das edificações, já que negligencia a relação de interdependência entre estrutura, solo e fundação.

Em suma, conclui-se que não somente a ISE, mas também a interação entre engenheiros estruturais e geotécnicos deve fazer parte da boa prática da engenharia para o dimensionamento de edificações, de forma a mitigar problemas e garantir maior segurança aos usuários.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Antoniazzi, J. P. (2011) *Interação Solo-Estrutura de Edifícios com Fundações Superficiais*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 139 p.
- Colares, G. M. (2006) *Programa para Análise da Interação Solo-Estrutura no Projeto de Edifícios*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 83 p.
- Das, B. M.; Sobhan, K. (2015) *Fundamentos da Engenharia Geotécnica*, São Paulo: Cengage Learning, 8 ed, 612 p.
- Iglesias, S. M. (2016) *A Interação Solo-Estrutura e sua Aplicação na Análise de Estruturas de Edifícios*, AltoQi, [s. 1.] [s. d.], E-book.
- Iwamoto, R. K. (2000) *Alguns Aspectos dos Efeitos da Interação Solo-Estrutura em Edifícios de Múltiplos Andares com Fundação Profunda*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 157 p.
- Medeiros, P. M. (2013) *Avaliação da Previsão do Comportamento Geotécnico de Fundações Superficiais Assentes em Subsolos Arenosos de Baixa Compacidade em Fortaleza a partir de Ensaios de Placa*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, p.176.
- Mota, M. M. C. (2009) *Interação Solo-Estrutura em Edifícios com Fundação Profunda: Método Numérico e Resultados Observados no Campo*, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 222 p.
- Teixeira, A. H.; Godoy, N. S. (1998) *Análise, Projetos e Execução de Fundações Rasas*, In: HACHICH, V et al. (Eds), *Fundações: Teoria e Prática*, 2 ed., Pini, São Paulo, 758 p.
- Velloso, D. A.; Lopes, F. R. (1998) *Concepção de Obras de Fundações*, In: HACHICH, V et al (Eds), *Fundações: Teoria e Prática*, 2 ed., Pini, São Paulo, 758 p.
- Velloso, D. A.; Lopes, F. R. (2011) *Fundações: Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais*, 2ed, v. 1, Oficina de Texto, 240 p.