

INTERAÇÃO FUNDAÇÃO-ESTRUTURA EM EDIFÍCIOS SOBRE SAPATAS

Marcos Vinicius Padovani Guerra¹, Maurício Martines Sales²
Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO
74605-220, Brasil

E-mail: ¹marcos_viniciuspg@mail.com, ²sales.mauricio@gmail.com

Palavras-chave: Solo-estrutura, recalques, reações de apoios, sapata.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos desafios atuais nos projetos de estruturas e de fundações de um edifício é a modelagem do comportamento do solo perante a estrutura. Geralmente a estrutura da fundação é calculada pelos engenheiros supondo os apoios indeslocáveis, apenas em 1% dos casos o solo é substituído por molas com constantes elásticas pré-determinadas. Porém na realidade, como os recalques dos pontos de fundações não são semelhantes, a diferença de deformação resultante na estrutura irá modificar os esforços internos e cargas nos pilares

A linha de pesquisa na engenharia responsável por estes estudos chama-se interação solo-estrutura (ISE). Há modelos existentes para a modelagem deste comportamento, porém há carência de um modelo integrando a área geotécnica com a estrutural e vice-versa.

Procurou-se no presente trabalho o desenvolvimento de um modelo integrando as duas áreas, assim desenvolveu-se uma rotina de cálculo de recalque de sapatas. Foi desenvolvida uma planilha no Microsoft Excel para o cálculo de recalques de sapatas. Nessa planilha, levou-se em consideração a interação entre todos os elementos de fundação, o que normalmente não é feito pelos projetos brasileiros. Paralelamente a planilha, o programa de cálculo TQS da TQS Informática Ltda, fornece para a planilha os esforços atuantes na estrutura. Através de um processo iterativo têm-se os recalques dos elementos de fundação.

Como já se sabe, uma fundação é o elemento estrutural responsável por transmitir os esforços da estrutura para o terreno, atendendo às condições de segurança e de economia. A sapata é um desses elementos, e é considerada uma fundação rasa por estar assentada a uma profundidade de até duas vezes a sua menor dimensão em planta. Por ser uma das alternativas mais baratas é sempre que possível adotada pelos escritórios de cálculo.

Ao longo do tempo os esforços da estrutura fazem com que ocorram movimentos da fundação, que podem gerar preocupações com a segurança estrutural do sistema como um todo, e até mesmo gerar problemas de conforto, como nos aspectos visual, com aparecimento de fissuras.

Essa preocupação com os recalques se faz tanto importante na área geotécnica como na área estrutural, e isto pode ser visto nas normas ligadas as mesmas, como: a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003), que refere-se aos limites para deformações excessivas para fissuras em estruturas de edificações; e a NBR 6122 (ABNT, 2010), que regulamenta os métodos de dimensionamento das fundações e mostra a preocupação para que haja o monitoramento de recalques em obras civis de importância. Além disso, há artigos com estudos com informações com o grau de aceitabilidade destas movimentações.

Além de realizar medições do recalque, faz-se necessário também trabalhar em modelos matemáticos, para cada tipo de fundação rasa ou profunda para previsão de recalques. E o objeto de estudo desse trabalho são os efeitos da Interação Solo-Estrutura de uma edificação sobre sapatas

2. FATORES QUE INFLUENCIAM A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

2.1. Influência do tempo e rigidez

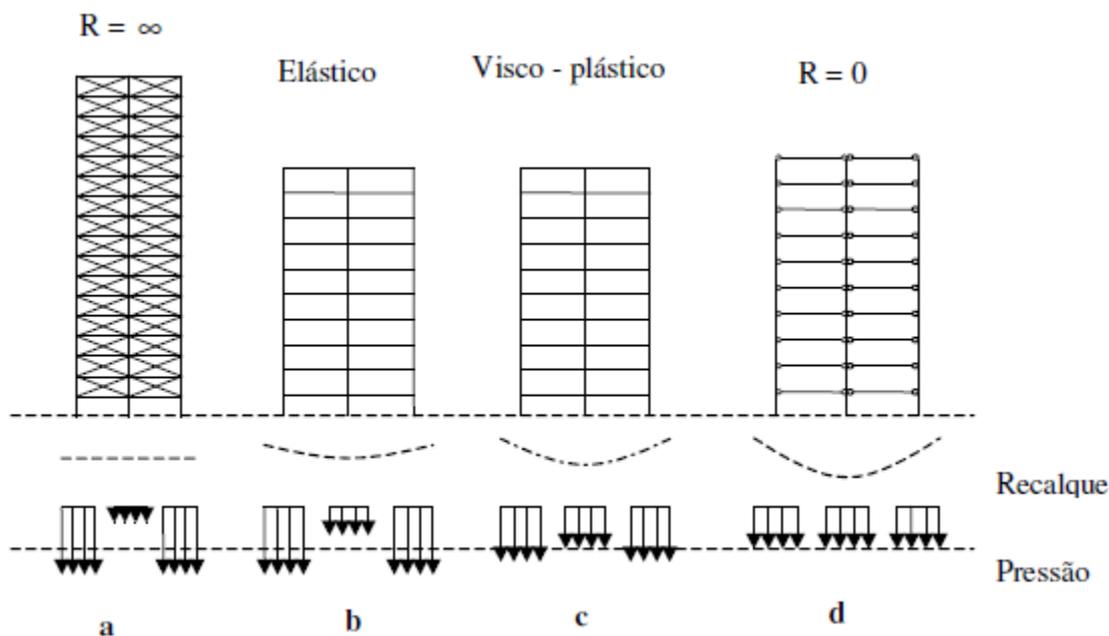


Figura 1 - Casos de interação solo – estrutura, Chamecki (1969), apud IWAMOTO (2000)

Chamecki (1969), apud IWAMOTO (2000) apresenta os seguintes casos possíveis:

Na Figura 1 estão representados 4 diferentes casos para consideração da interação solo-estrutura.

O caso “a” representa estruturas infinitamente rígidas com recalques uniformes. Devido à tendência do solo de deformar-se mais no centro que em sua periferia, assim as pressões de contato são menores no centro e máximas nos cantos externos. Esta distribuição de pressões assemelha-se ao caso de um corpo infinitamente rígido apoiado em meio elástico. Este comportamento é semelhante ao apresentado por edifícios muito altos e com o fechamento de paredes resistentes trabalhando em conjunto com a estrutura.

O caso “d” seria o oposto ao “a”, a estrutura não apresenta rigidez aos recalques diferenciais. Uma estrutura com essa configuração adaptar-se-ia perfeitamente às deformações do maciço de solo, desse modo, a distribuição de pressões de contato não se modificaria perante a progressão dos recalques.

Este modelo de comportamento pode ser estendido para estruturas isostáticas e edifícios compridos ao longo do eixo horizontal.

No caso “b” tem-se uma estrutura perfeitamente elástica. Nesse caso a rigidez do conjunto não depende da velocidade da progressão dos recalques, sendo rápidos ou lentos, não interferirão nos resultados. Os recalques diferenciais serão menores que os de rigidez nula (caso “d”) e a distribuição de pressões de contato variarão muito menos durante o processo de recalque. Esse comportamento é característico de estruturas de aço.

No caso “c” é apresentada uma estrutura visco-elástica, como a de concreto armado. Nesse caso a rigidez depende da velocidade de progressão de recalques diferenciais. Caso ocorram num curto período de tempo, a estrutura terá o comportamento elástico descrito em “b” mas se esta progressão for bastante lenta, a estrutura apresentará um comportamento como um líquido viscoso, tendendo ao caso “d”. Esta última modelagem deve-se ao fenômeno da fluência do concreto, essa é responsável pela redistribuição das tensões nas outras peças de concreto armado menos carregadas.

3. METODOLOGIA

Para a análise do comportamento solo-estrutura, foram feitas diversas iterações utilizando uma planilha de cálculo de recalques e rigidezes no Microsoft Excel e o programa de cálculo estrutural TQS da TQS Informática Ltda.

Primeiramente, é feito o processamento da estrutura (pórtico espacial) com apoios indeslocáveis através do programa TQS. Assim têm-se as cargas atuantes em cada pilar da estrutura, estas cargas serão usadas como dados de entrada nas planilhas para determinar as tensões atuantes nas sapatas.

A planilha de cálculo determina o recalque de uma sapata considerando a influência das outras sapatas da edificação. Essa planilha baseou-se na Teoria da Elasticidade e na solução de Fadum (1948), apud Poulos e Davis (1974). A planilha usa as cargas obtidas no TQS para calcular as tensões em todas as sapatas. Assim, é possível calcular os recalques considerando toda a geometria das fundações.

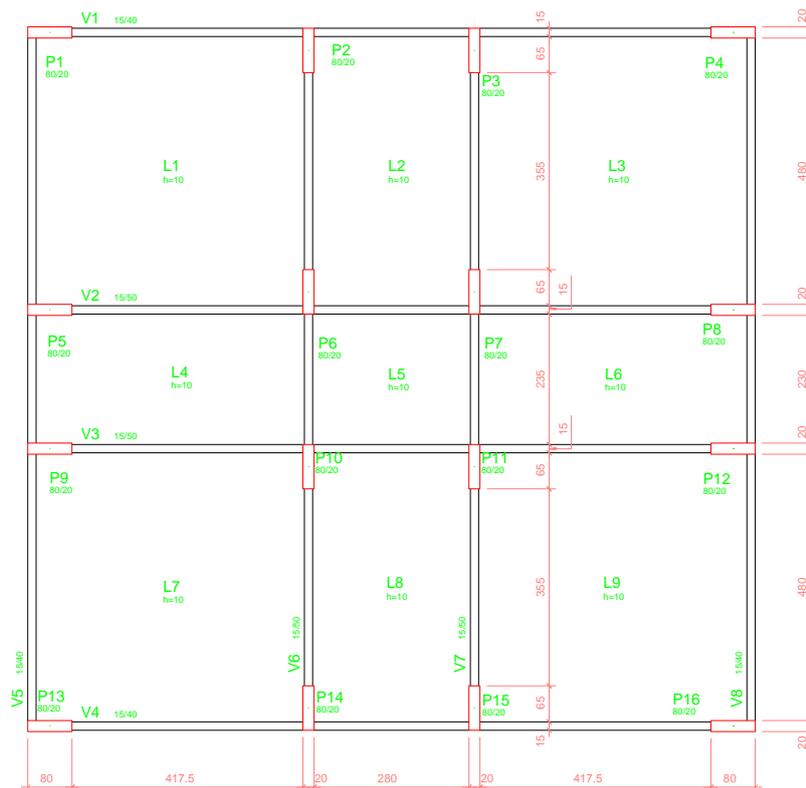


Figura 2 – Planta baixa do edifício adotado

Camada	ΔZ	Z_i	E_i
1	0,5	0,25	50,0
2	0,5	0,75	50,0
3	1	1,5	50,0
4	1	2,5	50,0
5	2	4	50,0
6	2	6	90,0
7	3	8,5	90,0
8	3	11,5	90,0
9	3	14,5	90,0
10	4	18	90,0

Figura 3 – Perfil do solo adotado.

Como observado na Figura 3, discriminou-se o solo em 10 camadas, sendo as primeiras de espessura menor que as últimas, devido a sua maior influência na sapata. Assim totalizou-se 20 metros de profundidade. Quanto ao módulo de elasticidade do solo foi-se adotado 50 MPa para os 5 primeiros metros e 90 MPa para os 15 restantes.

Segundo a solução de FADUM (1948), a tensão num ponto de profundidade z , localizado no canto de uma superfície retangular carregada é dado por:

$$\sigma_z = \frac{p}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{lb}{zR_3} + \frac{lbz}{R_3} \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right) \right] \quad (2.1)$$

Onde:

$$R_1 = (l^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

$$R_2 = (b^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$R_3 = (l^2 + b^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Tomando “ l ” como o comprimento, “ b ” a largura e “ z ” a profundidade da sapata, determinou-se os termos “ R_1 , R_2 e R_3 ”. De posse desses e da carga “ p ”, pode-se determinar a tensão σ_z do atuante no solo.

Um processo análogo ao apresentado foi feito para todas as outras sapatas a fim de calcular a influência destas no recalque da sapata em análise.

Finalmente, com a carga e o recalque total da sapata, calcula-se a rigidez. Estas rigidezes serão aplicadas nos nós dos pilares para a próxima iteração do TQS. Novas cargas serão geradas e, conseqüentemente, um novo ciclo de iteração. Os ciclos se repetem até que os recalques convirjam.

As análises foram feitas considerando um edifício com planta baixa com formato quadrangular consistindo de 15 pavimentos com 16 pilares, cada um apoiado sobre uma sapata. As sobrecargas utilizadas no TQS foram obtidas na NBR 6120, cargas para o cálculo de estruturas de edificações, sendo 200Kg/m² nas lajes e 586 Kg/m nas vigas, decorrente do peso próprio da alvenaria.

Através da planilha desenvolvida foram possíveis diversas análises do comportamento solo-estrutura. Foram feitos gráficos analisando a estabilização dos recalques de acordo com o número de iterações para todo o prédio e também para 1, 2, 5 e 10 pavimentos. Desse modo procurou-se simular o efeito do processo construtivo.

4. RESULTADOS

Para a análise do edifício aplicou-se o processo iterativo em apenas 4 sapatas, aqui identificadas por 1, 2, 5 e 6. Devido à simetria da estrutura, os resultados obtidos por estas análises podem ser estendidos para as 12 sapatas restante da estrutura.

Cada linha do gráfico refere-se a uma sapata. Há 5 gráficos mostrando o recalque versus o número de iterações para 5 situações: 1, 2, 5, 10 e 15 pavimentos executados.

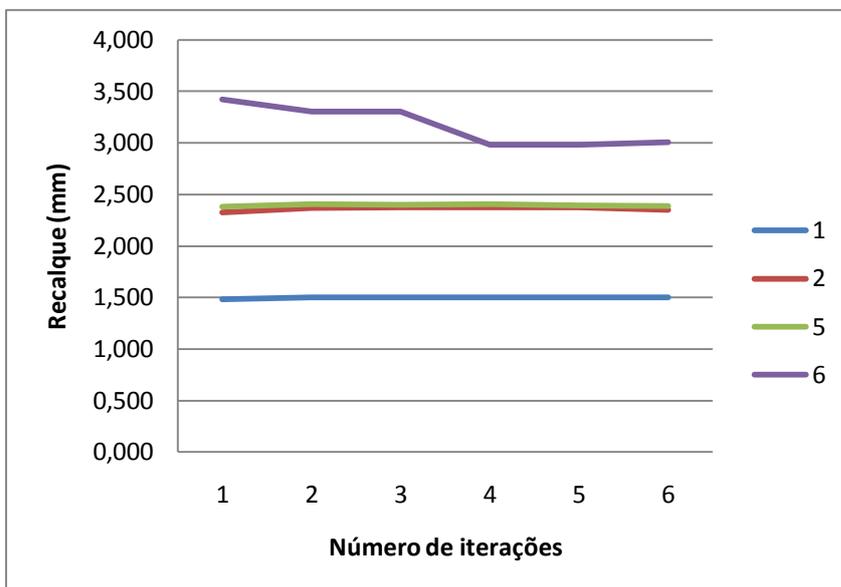


Figura 4 – Recalque dos pilares após a construção do primeiro pavimento.

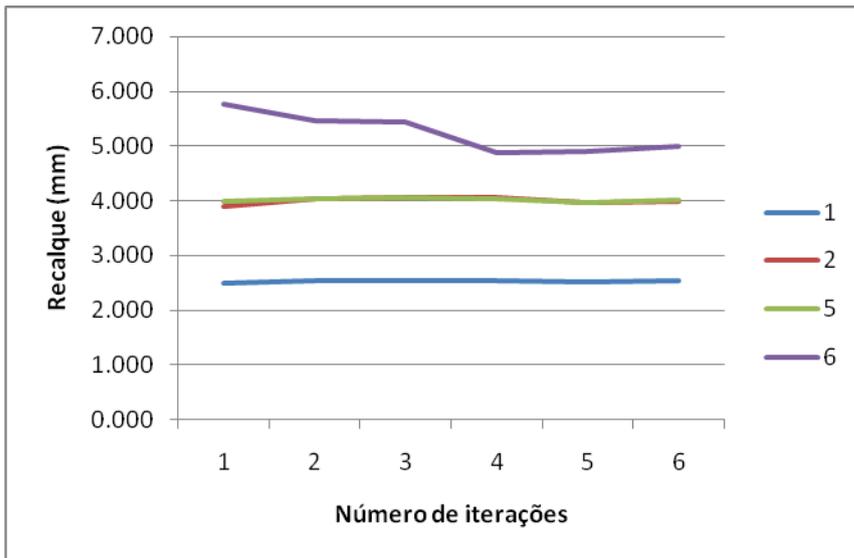


Figura 5 – Recalque dos pilares após a construção do segundo pavimento.

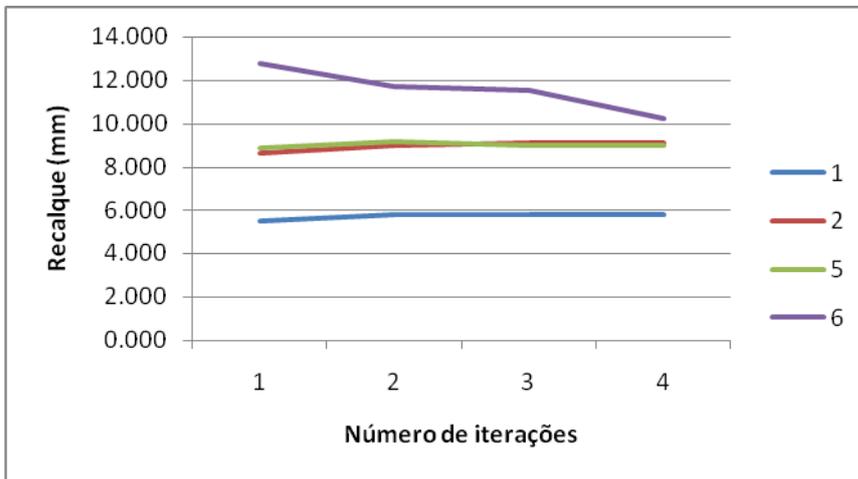


Figura 6 – Recalque dos pilares após a construção do quinto pavimento.

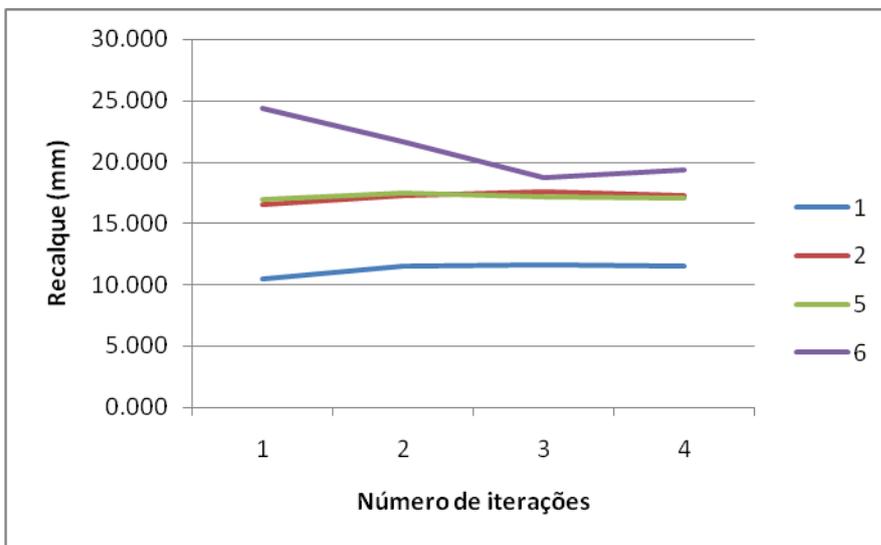


Figura 7 – Recalque dos pilares após a construção do décimo pavimento.

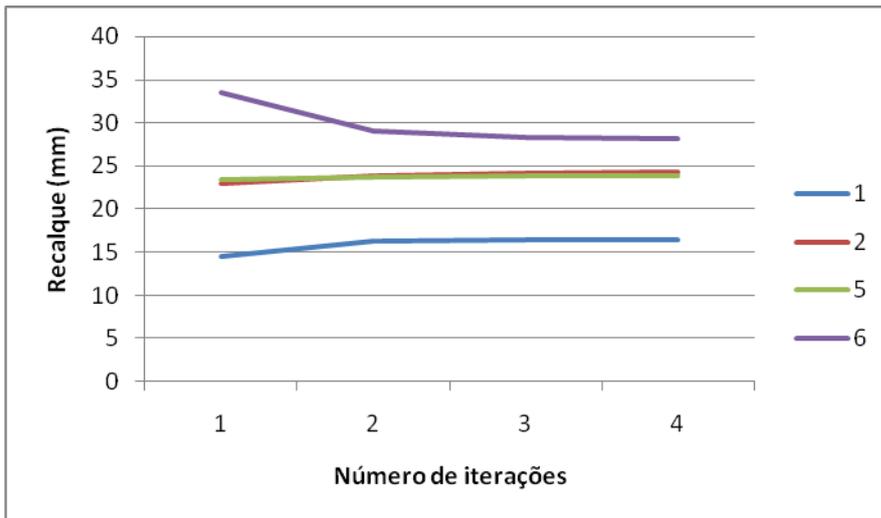


Figura 8 – Recalque dos pilares após a construção do décimo quinto pavimento.

Através da análise das Figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8 pode-se concluir que em geral três iterações bastaram para que os recalques fossem estabilizados. Quanto maior a rigidez da estrutura, mais facilmente os recalques se estabilizaram.

Segundo Gusmão e Gusmão Filho (1994), durante a construção à medida que novos pavimentos são executados, ocorre uma tendência à uniformização dos recalques devido ao aumento da rigidez da estrutura, sendo que esta rigidez não cresce linearmente com o número de pavimentos.

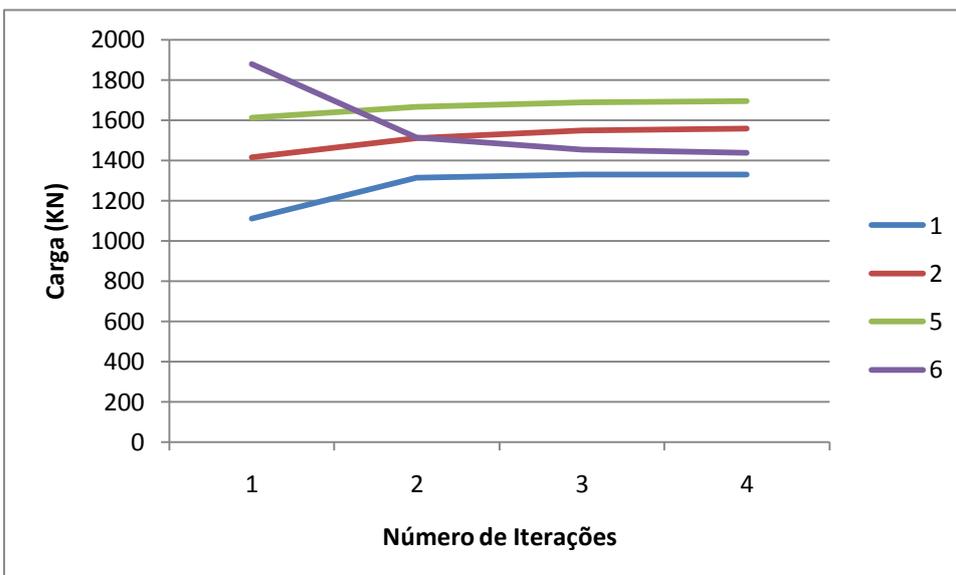


Figura 9 – Variação da carga nos pilares após a construção do décimo quinto pavimento.

Analisando-se a Figura 9, pode-se concluir que o pilar central tende a distribuir sua carga aos pilares da periferia. Sua diminuição de carga gera aumento em todos os outros, mostrando como as cargas do projeto de estruturas são mal distribuídas sem a consideração da interação solo-estrutura.

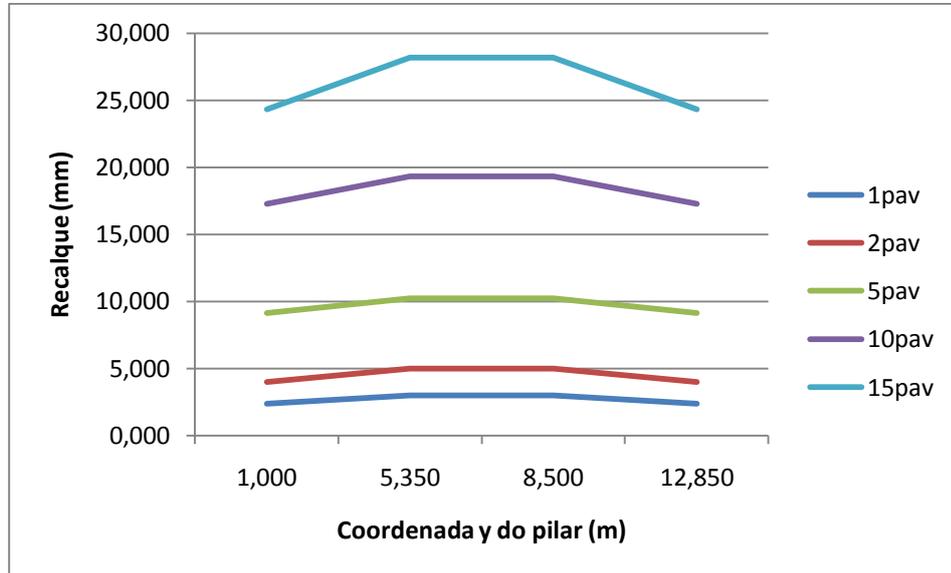


Figura 10 – Bacia de recalques.

Pode-se observar através do gráfico da Figura 10 que à medida que se aumenta a rigidez da estrutura os pilares centrais tendem a recalcar mais que os da periferia. Os recalques de um edifício são influenciados pela rigidez da estrutura, da fundação e do solo.

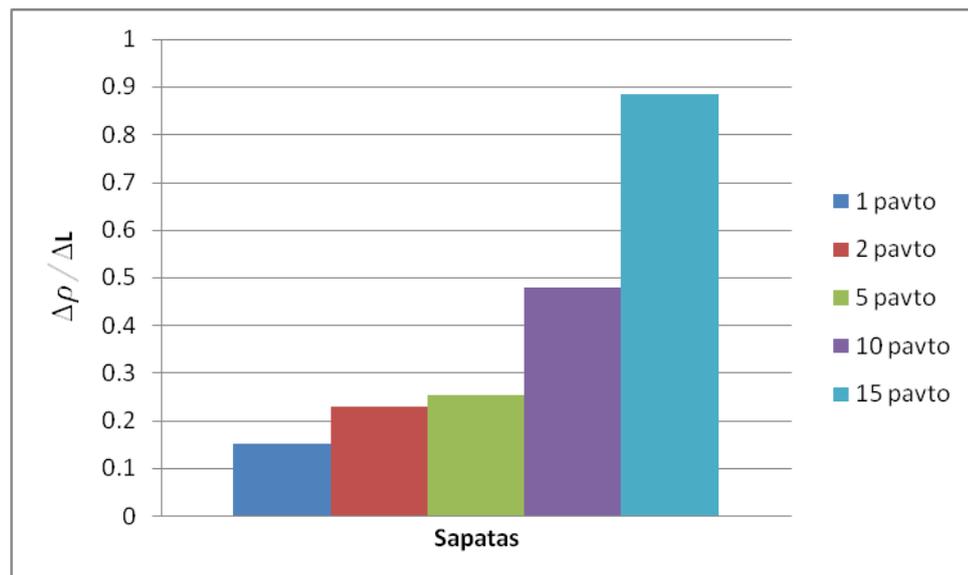


Figura 11 – Gráfico da variação do recalque pela distância entre os pilares (P2 e P6).

O gráfico da Figura 11 ratifica o que foi observado na Figura 10, a medida que a rigidez da estrutura aumenta, a diferença entre os recalques também aumenta.

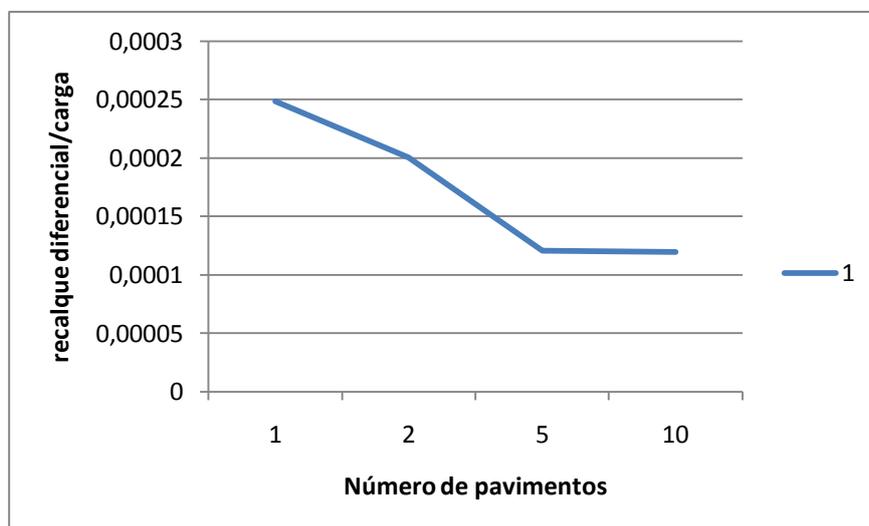


Figura 12 – Gráfico do recalque diferencial/carga no edifício para os pilares P6 e P2 versus o número de pavimentos executado.

O gráfico da Figura 12 mostra a tendência da taxa de crescimento do recalque diferencial de diminuir com a construção de novos pavimentos. Isso se deve ao aumento de rigidez da estrutura.

5. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado expõe que o procedimento adotado atualmente pelos escritórios de cálculo pode ser muito melhorado. Considerando-se os efeitos da Interação Solo-Estrutura, pode-se otimizar a distribuição dos esforços internos de um edifício.

O uso da Interação Solo-Estrutura provocou uma redução do recalque e da carga nos pilares centrais (6). Por outro lado, nos pilares de

canto, constatou-se uma elevação da carga e recalque a medida que avançavam as iterações.

Já o processo iterativo, onde se calcula para cada passo uma rigidez da fundação, já incorporando o efeito de influência das demais fundações, mostrou-se eficaz, uma vez que convergiu com poucos passos. Em geral foram necessárias apenas três iterações para a estabilização dos resultados.

Os recalques médios e diferenciais do edifício aumentam com o número de pavimentos, mas a taxa de crescimento do recalque diferencial reduz com o aumento da estrutura, ou seja, o aumento de pavimentos e correspondente acréscimo da rigidez da estrutura tende a reduzir o percentual do recalque diferencial entre os pilares de canto e centro do edifício

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

POULOS, H. G.; DAVIS E. H. **Elastic Solutions for Soil and Rock mechanics**. 1974

IWAMOTO, R. K. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. 2000.

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

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

TQS Informática Ltda. **TQS**, v.14.

Microsoft Corporation. **Microsoft Office Excel**, v. 2007.