

INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM UM EDIFÍCIO SOBRE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

Juliano Nunes Barbosa da Silva ¹; Vinicius Costa Correia ²

RESUMO: Grande parte dos projetos estruturais são desenvolvidos com a hipótese de apoio rígido, no entanto, na realidade a estrutura está apoiada sobre um maciço de solo que sofre deformação, alterando os esforços e deslocamentos gerados na estrutura. Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo comparar os esforços e deslocamentos gerados em um edifício com 10 pavimentos apoiado em fundações rasas, em um modelo sobre apoio rígido e outro sobre apoio flexível, além de analisar a influência de solos com diferentes resistências, a fim de verificar o solo mais sensível a alterações. A análise estrutural foi realizada no software Eberick V10, da AltoQi®. Para o cálculo dos coeficientes de mola, responsáveis por simular o comportamento do solo, foi desenvolvida uma planilha com linguagem Visual Basic (VB) pela plataforma Microsoft Excel, a fim de acelerar a obtenção dos resultados. Os resultados mostraram que a consideração da interação solo-estrutura tem influência significativa nos deslocamentos e esforços internos gerados na estrutura. As mudanças dos resultados ficaram mais evidentes nos pavimentos próximos a fundação, isto ocorre devido ao aumento da rigidez da estrutura com o aumento do número de pavimentos. Verificou-se que o solo com menor resistência e menor coeficiente de reação tende a sofrer maiores mudanças em seus resultados. Conclui-se que o desprezo da consideração da deformação do solo em um projeto estrutural pode levar a resultados longe da realidade, gerando problemas de segurança e estabilidade da estrutura.

Palavras-Chave: Interação solo-estrutura; Projeto estrutural; Fundações rasas.

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos projetos estruturais concebidos consideram a estrutura sobre apoio indelocável, isto é, os projetistas não consideram a influência da deformação do solo nos esforços e deslocamentos da estrutura. Isto ocorre devido à falta de contato entre o engenheiro estrutural e o engenheiro de fundação, como também em virtude do conhecimento disseminado de ambos. Segundo Iwamoto (2000), a escolha do sistema de referência é uma das principais diferenças entre os projetos. Assim, em um mesmo referencial, enquanto o engenheiro estrutural tem sua atenção para cima, o engenheiro de fundação somente volta sua atenção para baixo, justificando a falta de interação entre os profissionais.

Para Souza e Reis (2008), o modelo sobre apoio rígido pode conduzir à resultados totalmente diferentes da realidade física. Na verdade, um edifício é formado pela superestrutura, infraestrutura e o maciço de solo, e a interferência destes denomina o

¹ Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão
Email: juliano.silva@delmiro.ufal.br

² Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão
Email: vinicius.correia@delmiro.ufal.br

fenômeno interação solo-estrutura (ISE). Esta hipótese torna os resultados mais próximos da realidade, pois haverá consideração dos deslocamentos verticais devido à deformação do solo, alterando os esforços e deslocamentos da estrutura.

Segundo Mendes (2016), o solo pode ser definido como um material elástico linear, elástico não-linear ou elastoplástico. Velloso e Lopes (2012) citam que normalmente não se considera a não linearidade do solo em projetos estruturais usuais. Nesse contexto, considerando regime linear elástico é possível aplicar o modelo ou hipótese de Winkler, que consiste na substituição do solo por um conjunto de molas com resposta linear e independentes entre si, considerando somente as deformações ocorridas nas fundações.

A hipótese de Winkler é apresentado por Aoki e Cintra³ (2004, apud Mota, 2009), e consiste de uma adaptação do modelo de Chamecki. Estes sugerem obter as reações de apoio de um edifício sobre apoios rígidos, estimar os recalques da estrutura e calcular os coeficientes de mola para cada elemento de fundação, e em seguida substituir os apoios fixos pelos coeficientes de mola. Com as molas sob a estrutura são calculadas novas reações de apoio, recalques e coeficientes de mola em um processo iterativo que chega ao fim após haver convergência entre os coeficientes de mola ou entre as reações de apoio.

Dessa maneira, este trabalho tem por objetivo analisar a interferência da ISE em um edifício comercial, a fim de comparar os esforços e deslocamentos entre o modelo sobre apoio flexível e o modelo sobre apoio rígido, além de analisar a influência da deformação de solos com diferentes resistências.

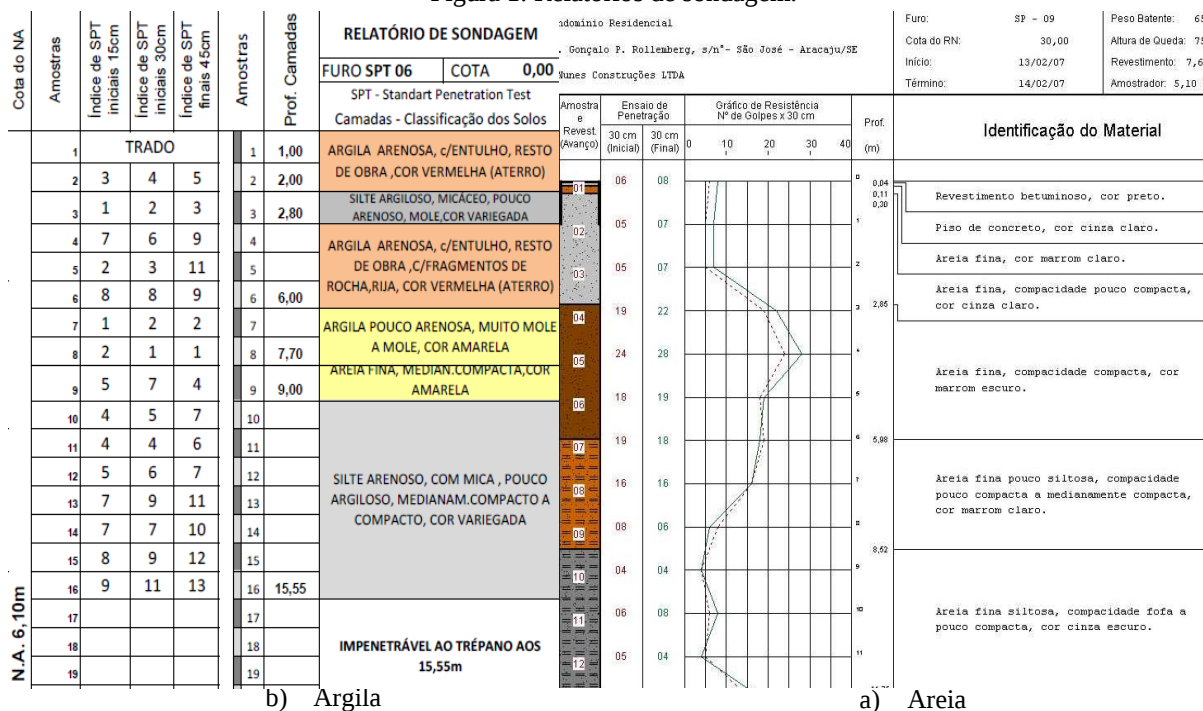
2 METODOLOGIA

Para uma melhor análise da influência do maciço de solo em um projeto estrutural foi modelado um edifício comercial de 10 pavimentos apoiado em fundações do tipo sapatas, com análise estrutural realizada no software EBERICK V10®, da AltoQi. A estrutura foi calculada considerando um concreto de 30 MPa e classe de agressividade ambiental II. As ações permanentes foram estimadas pelo peso do revestimento e piso de 1 kN/m² e pelo peso próprio do concreto e alvenaria. Para as ações variáveis foi considerado uma sobrecarga de 2

³ AOKI, N.; CINTRA, J. C. (2004). **Notas de aula da disciplina SGS-404 Fundações** – EESC-USP, Departamento de Geotecnia, EESC, USP, São Carlos.

KN/m² e para a cobertura 0,5 KN/m². Para ações variáveis devido ao vento utilizou-se dados de previsão para a cidade de Aracaju, capital do estado do Sergipe, na qual a NBR 6123 (1988) prescreve 30 m/s para a velocidade do vento nessa região. Para o maciço de solo foram considerados os relatórios de sondagem, conforme a Figura 1.

Figura 1: Relatórios de sondagem.



Além da comparação entre o modelo sobre apoio rígido e flexível, também foram feitos comparativos entre os modelos assentes sobre argila e areia, a fim de verificar o tipo de solo mais sensível à influência da interação solo-estrutura. Foram realizados comparativos entre as cargas, momentos fletores e deslocamentos gerados nos elementos estruturais. Para o cálculo dos recalques e coeficientes de mola foi elaborado uma planilha utilizando linguagem Visual Basic (VB) pela plataforma Microsoft Excel. As equações utilizadas que tornaram o cálculo dos coeficientes de mola possível foram baseadas na hipótese de Winkler, conforme as expressões a seguir que permitem calcular os deslocamentos horizontais, verticais e a rotação.

$$\rho = \frac{F}{K_{mv}} = \frac{F}{K_v A_f} \quad (\text{Equação 01})$$

$$v = \frac{H}{K_{mh}} = \frac{H}{K_h A_f} \quad (\text{Equação 02})$$

$$\varphi = \frac{M}{K_{m\theta}} = \frac{M}{K_\theta I_f} \quad (\text{Equação 03})$$

Em que:

$A_f \rightarrow$ área de influência da sapata;

$K_v \rightarrow$ módulo de reação vertical do solo;

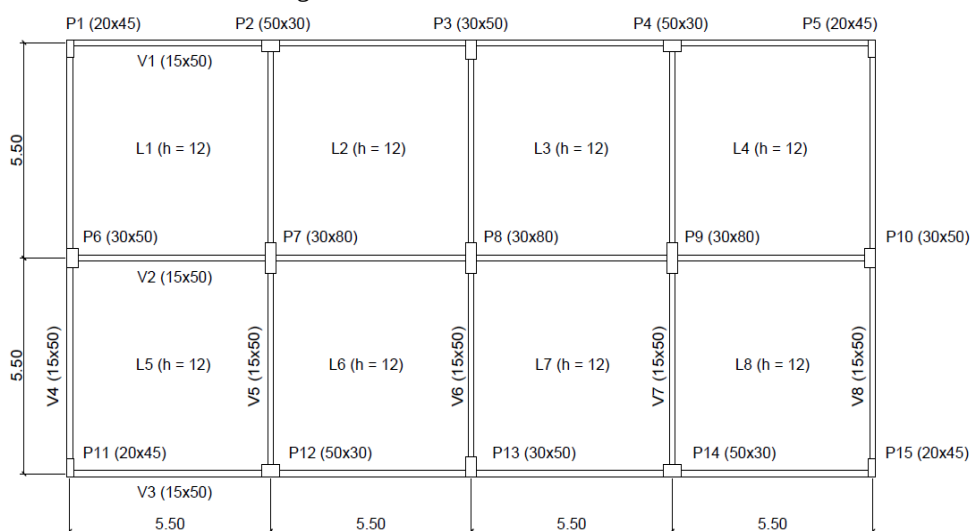
$K_{mv} \rightarrow$ coeficiente de mola vertical;

$K_{mh} \rightarrow$ coeficiente de mola horizontal;

$K_{m\theta} \rightarrow$ coeficiente de mola a rotação.

Neste trabalho, seguindo recomendações de Souza e Reis (2008), os módulos de reação do solo serão iguais, pois caso contrário, demandaria de cálculos complexos que não serão abordados neste trabalho. A Figura 2 mostra a planta de forma do edifício analisado. A análise dos resultados foi realizada no pórtico transversal formado pelos pilares P3, P8 e P13 e unidos pela viga V6. As dimensões dos elementos estruturais resultaram de um pré-dimensionamento.

Figura 2: Planta de forma do edifício.



Fonte: Autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Posteriormente ao cálculo da tensão admissível de 0,33 MPa e 0,2 MPa para os solos compostos por areia e argila, respectivamente, determinada conforme relatórios de sondagem (Figura 1), foi feita a análise estrutural em um modelo de 10 pavimentos, a fim de obter os esforços na fundação, para assim, determinar os recalques e coeficientes de mola. Os processos iterativos, tanto para areia como para argila, levaram à convergência dos esforços internos após 3 iterações. A Tabela 1 mostra os resultados encontrados na última iteração para os dois casos propostos. Devido à simetria do edifício, os pilares P3 e P13 apresentam os mesmos esforços, dessa maneira, só foram analisados os esforços nos pilares P3 e P8, assim como na viga V6.

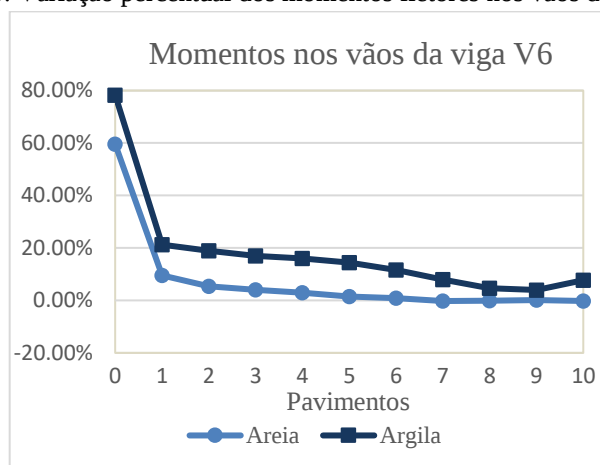
Tabela 1: Resultados na fundação do edifício após a ISE.

Solo	Sapatas	Nk (KN)	Dimensões (m)	Kv (KN/m)	K θ x (KN.m/rad)	K θ y (KN.m/rad)
Argila	S3	1766,4	3,4 x 3,6	83280,88	89943,35	80227,24
	S8	2634,9	4,0 x 4,5	111042,23	187383,76	148056,30
Areia	S3	1673,2	2,4 x 2,6	151310,51	85238,25	72629,04
	S8	2791	3,0 x 3,5	307734,39	314145,53	230800,8

Fonte: Autor.

A Figura 3 mostra o comparativo percentual dos momentos fletores gerados nos vãos da viga V6 em todos os pavimentos do edifício comercial fixando os resultados da hipótese sobre apoio rígido. Os resultados nos vãos da viga V6 evidenciaram grandes diferenças percentuais nos pavimentos próximos à fundação, ampliando seu valor em 78,30% e 59,55% nos modelos assentes sobre argila e areia, respectivamente. Isto ocorreu devido ao aumento de rigidez da estrutura com o aumento do número de pavimentos. Vale destacar que em todos os pavimentos o solo composto por argila obteve diferenças percentuais mais discrepantes quando comparado ao modelo assente sobre areia. Esta diferença nos percentuais dos momentos fletores ocorre devido ao menor coeficiente de reação obtido no apoio sobre argila, provocando uma maior redistribuição dos esforços.

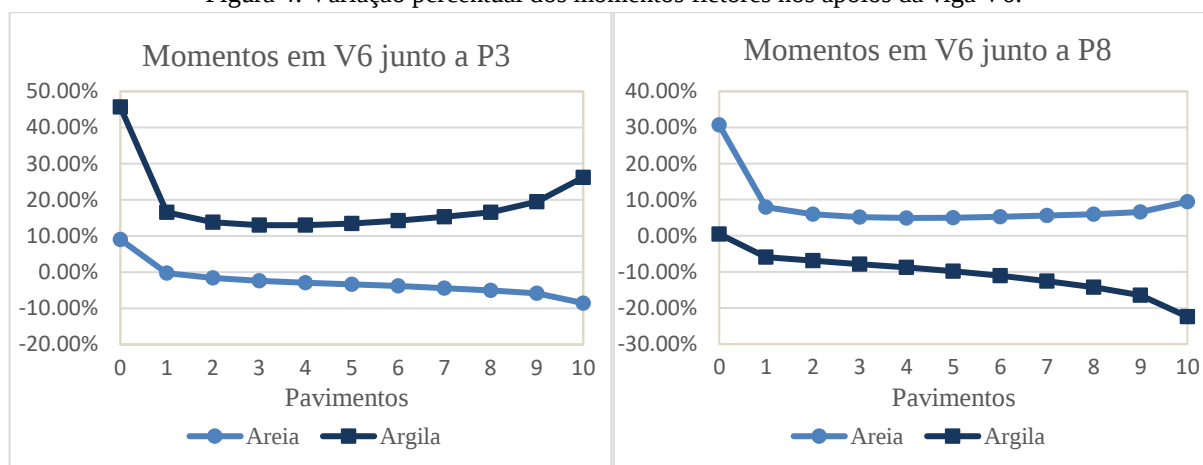
Figura 3: Variação percentual dos momentos fletores nos vãos da viga V6.



Fonte: Autor.

Na Figura 4, como já esperado, os resultados dos momentos fletores nos apoios da viga V6 revelaram maiores diferenças percentuais no modelo apoiado sobre argila, exceto nos primeiros pavimentos da região junto ao pilar P8, na qual houve mudanças mais evidentes no modelo assente sobre areia, possivelmente em virtude dos seus poucos coeficientes de mola superiores, conforme mostra a Tabela 1. Vale ressaltar que o modelo assente sobre argila revelou acréscimos nos momentos fletores da viga junto ao pilar P3 e alívios na região junto ao pilar P8, em contrapartida, quando apoiado sobre areia os momentos fletores sofreram acréscimos e alívios na viga junto aos pilares P8 e P3, respectivamente. Isto acontece devido à redistribuição dos esforços decorrente da deformabilidade do solo.

Figura 4: Variação percentual dos momentos fletores nos apoios da viga V6.

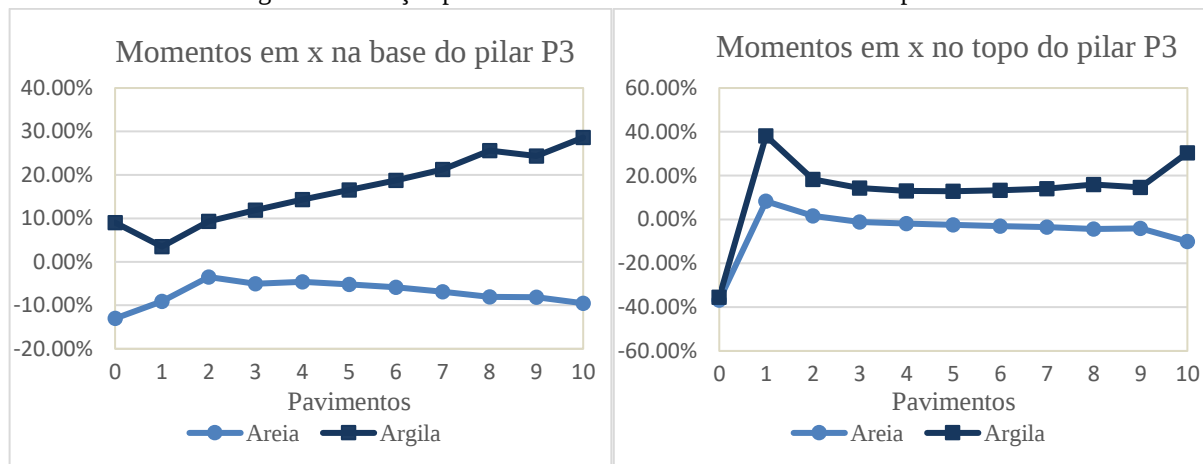


Fonte: Autor.

Na Figura 5, os momentos fletores na direção X gerados na base e no topo do pilar P3 revelam maiores mudanças nos primeiros e últimos pavimentos, resultando em um alívio máximo no topo do pilar de 36,80% e 35,43% na fundação no modelo assente sobre areia e

argila, respectivamente. Isto decorre da redistribuição dos esforços devido ao coeficiente de mola de rotação, tornando a estrutura mais sensível a alterações dos momentos fletores.

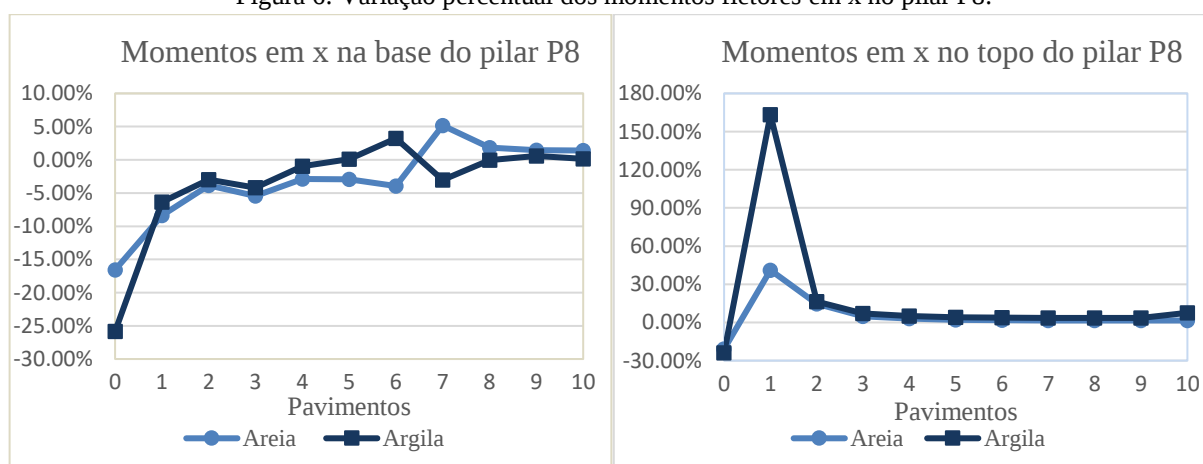
Figura 5: Variação percentual dos momentos fletores em x no pilar P3.



Fonte: Autor.

Na Figura 6, os resultados mostram maiores mudanças dos momentos fletores na direção X gerados nos pavimentos próximos à fundação devido à menor rigidez nestes membros, com acréscimos de 163,22% para o modelo assente sobre argila. Resultados similares foram obtidos por Holanda Junior (1998, p.82). Todavia, no restante dos pavimentos, tanto na base como no topo do pilar, as diferenças percentuais dos momentos fletores foram mínimas, pois, como já comentado, a rigidez da estrutura aumenta conforme se constrói um novo pavimento.

Figura 6: Variação percentual dos momentos fletores em x no pilar P8.

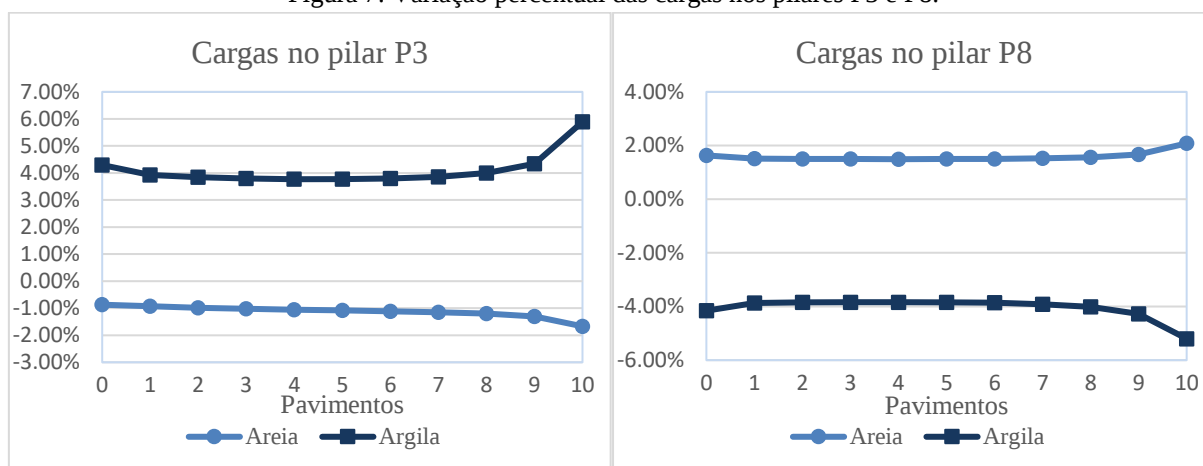


Fonte: Autor.

Em contrapartida, as cargas nos pilares P3 e P8 revelaram pouca alteração, conforme a Figura 7. Em apoios sobre argila e areia houve uniformização das diferenças percentuais ao longo dos pavimentos, com leve variação no último pavimento. Esta tendência também foi

obtida por Pavan et al. (2014, p.281). Esta baixa variação decorre da uniformização dos recalques das sapatas, havendo pouca transferência das cargas dos pilares vizinhos. Os resultados das cargas nos pilares P3 e P8 no modelo assente sobre argila mostraram em média acréscimos e alívios de 4%, por outro lado, quando apoiado sobre areia houve em média alívios de 1% e acréscimos de 1,5% nos pilares P3 e P8, respectivamente, justificando mais uma vez a influência da resistência do solo nas alterações dos resultados devido a ISE.

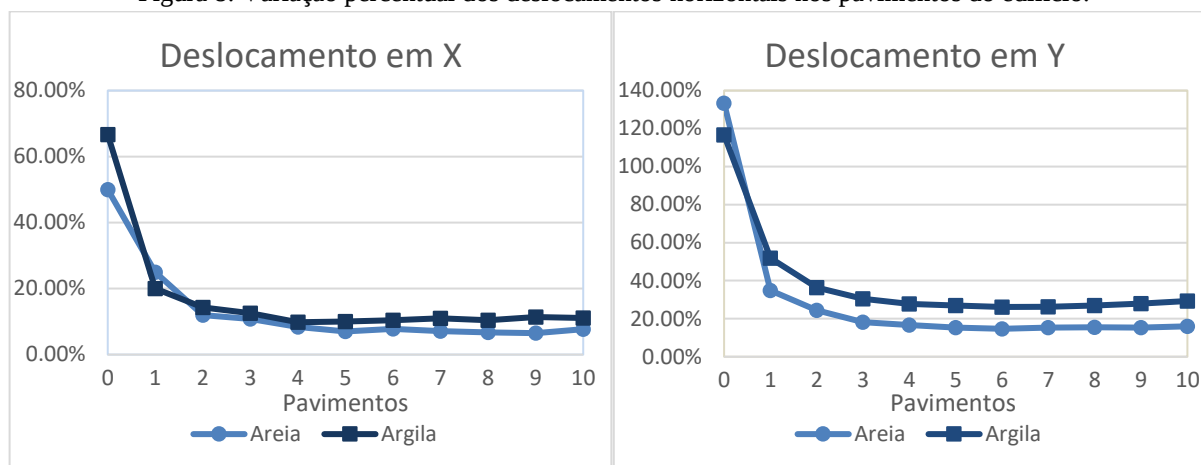
Figura 7: Variação percentual das cargas nos pilares P3 e P8.



Fonte: Autor.

A Figura 8 tem o intuito de mostrar os deslocamentos horizontais nas direções X e Y dos pavimentos do edifício comercial. Estes foram mais sensíveis às mudanças nos primeiros pavimentos devido ao aumento da rigidez da estrutura ao passo que se modela um novo pavimento, com alterações percentuais máximas na direção Y de 133,33% e 116,67% para apoios sobre areia e argila, respectivamente. Vale ressaltar que as variações percentuais dos deslocamentos na direção Y foram superiores aos deslocamentos da direção X, isso decorre da menor rigidez da estrutura nesta direção.

Figura 8: Variação percentual dos deslocamentos horizontais nos pavimentos do edifício.



Fonte: Autor.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou a influência da interação solo-estrutura em um projeto estrutural de um edifício sobre apoio de sapatas. A análise estrutural foi feita por meio do software EBERICK V10 da AltoQi®. Os esforços obtidos através do programa foram utilizados como dados de entrada em uma planilha com linguagem Visual Basic (VB) pela plataforma do Excel, a fim de obter os coeficientes de mola, que posteriormente foram inseridos no programa para substituir os apoios fixos com o propósito de realizar uma nova análise estrutural. Este método é iterativo e chegou ao fim após a convergência entre as reações de apoio. Foram comparados os esforços e os deslocamentos gerados na estrutura entre a hipótese sobre apoio fixo e os modelos sobre apoio flexível, além de verificar a influência da resistência do solo nas análises.

No que se refere à resistência dos solos, comprovou-se que solos com menor resistência e menor coeficiente de reação tendem a sofrer maiores mudanças em seus resultados quando comparado ao modelo sobre apoio rígido. Além disso, estas mudanças foram mais evidentes nos membros próximos à fundação, isso ocorre devido ao aumento da rigidez da estrutura com o aumento do número de pavimentos. Os momentos fletores gerados nas vigas e pilares e os deslocamentos horizontais do edifício sofreram maiores mudanças quando comparado às cargas nos pilares, isto aconteceu em virtude da consideração do coeficiente de mola de rotação, provocando maiores discrepâncias nestes resultados. Diante disso, é perceptível a importância da consideração da interação solo-estrutura em um projeto

estrutural, necessitando de uma maior proximidade e relação entre o engenheiro estrutural e o engenheiro de fundação. Conclui-se que o desprezo da deformação do solo sob a estrutura pode conduzir a esforços e deslocamentos longe da realidade, gerando problemas na segurança e estabilidade das edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações**. Rio de Janeiro, 1988. 66p.

HOLANDA JÚNIOR, O. G. **Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas**. USP, São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998. 180p.

IWAMOTO, R. K. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. USP, São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000. 140p.

MENDES, E. J. **Análise de edifícios considerando a interação solo-estrutura**. UFSC, Florianópolis, SC. Monografia (Graduação em Engenheiro Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016. 153p.

MOTA, M. M. C. **Interação solo-estrutura em edifícios com fundação profunda: método numérico e resultados observados no campo**. USP, São Carlos, SP. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009. 221p.

PAVAN, R. C.; COSTELLA, M. F.; GUARNIERI, G. Interação solo-estrutura para sistemas estruturais reticulados sobre fundações rasas. **IBRACON**. São Paulo, v.7, n.2, p.260-285, 2014.

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

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: Critérios de projeto – Investigação do subsolo – Fundações superficiais**. Volume 1. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2012. 226p.