

Interação Solo – Estrutura para um Edifício sobre Radier em Argila Mole

Higor Yuri Martins

UFMG, Belo Horizonte, Brasil, higoryuri@yahoo.com.br

Crysthian Purcino Bernades Azevedo

UFMG, Belo Horizonte, Brasil, purcino@etg.ufmg.br

RESUMO: O presente artigo trata da análise da interação solo-estrutura para um edifício que utiliza como sistema construtivo paredes e lajes de concreto moldados “*in loco*” sobre radier em argila mole e a comparação de correlações encontradas na literatura para a representação do maciço de solo a partir do modelo proposto por Winkler, em que o maciço de solo é representado por um conjunto de molas. A interação solo-estrutura avalia como a deformabilidade do solo impõe à estrutura um fluxo de carregamento diferente da hipótese de apoios indelocáveis alterando assim os esforços atuantes nos elementos estruturais e nas reações do solo, ou seja, o comportamento, a segurança e durabilidade da estrutura dependem do sistema estrutura-macício de solo. Foi realizada uma modelagem numérica e análise estrutural via método dos elementos finitos do edifício, considerando os dados reais do empreendimento, como arquitetura, sondagem e etc. A título de comparação admitiu-se uma hipótese de apoios indeslocáveis e outra hipótese com a consideração da interação solo-estrutura, utilizando-se do modelo de Winkler comparando os resultados apresentados para três correlações encontradas na literatura especializada. Para cada hipótese comparou-se o comportamento do fluxo de tensões em cada parede do pavimento mais carregado (primeiro pavimento). Os resultados obtidos nesse estudo confirmam a importância da consideração da interação solo-estrutura (ISE), ainda que a partir de modelos simplificados em substituição a hipótese de apoios indeslocáveis, pois a ISE fornece uma análise estrutural mais realista. Também foi possível observar a equivalência das correlações analisadas nesse estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Interação Solo-Estrutura, Modelo de Winkler, Fluxo de Esforços.

1 INTRODUÇÃO

Há várias décadas, os projetos de edifícios são calculados admitindo-se a hipótese de que as fundações estão apoiadas sobre vínculos indeslocáveis, ou seja, estruturas fixas na base trabalhando de forma independente da resposta da deformabilidade do solo aos carregamentos transmitidos pelo elemento de fundação. Porém, na realidade, estas fundações devido à deformabilidade do solo impõe à estrutura um fluxo de carregamento diferente da hipótese de apoios indeslocáveis, alterando os esforços atuantes nos elementos estruturais e nas reações do solo. Portanto o comportamento da estrutura depende do sistema estrutura-macício de solo,

sendo que as fundações são parte integrantes da estrutura e o comportamento desse conjunto inseparável denomina-se interação solo-estrutura (ISE).

A análise da interação entre os elementos estruturais e o solo de fundação nas edificações, geralmente tem sido considerada como irrelevante ou desconsideradas por desconhecimento do grau de importância do assunto.

O procedimento correto para a condução de uma análise mais ajustada à realidade física que considera a deformação do solo e permite a avaliação mais correta dos efeitos da redistribuição de esforços nos elementos estruturais é a adoção da análise da ISE.

2 OBJETIVOS

O presente estudo propõe realizar um estudo de caso sobre o comportamento da ISE em um edifício de quatro pavimentos que utiliza como sistema construtivo paredes e lajes em concreto moldados “*in loco*” sobre uma fundação do tipo radier em argila mole e também comparar os resultados obtidos através de diferentes correlações encontradas na literatura especializada para o coeficiente de mola.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Interação Solo-Estrutura

Gusmão (1990), caracteriza a ISE como sendo uma redistribuição dos esforços na estrutura, com tendência à uniformização dos recalques diferenciais.

Segundo Holanda Junior (1998), quando o solo está submetido ao carregamento de uma edificação ele não se comporta conforme previsto nos projetos, na realidade, este sofre deformações. Esta perturbação provoca mudança no fluxo de cargas da estrutura. Devido a essa redistribuição de esforços, podem ocorrer fissuras em vigas e lajes, bem como esmagamento de pilares.

De acordo com Porto (2010), considerando-se a ISE na análise estrutural, será possível promover uma estrutura mais realista, pois se avaliará a distribuição de tensões considerando-se a deformabilidade do solo. A veracidade do modelo numérico proposto depende dos dados fornecidos pelo engenheiro de estruturas e pelo engenheiro geotécnico, que fornecerá os parâmetros do solo, que de fato podem ser quantificados por meio de ensaios de campo ou de laboratório, ou mesmo através de tabelas de correlações.

3.2 Modelos de Representação do Solo

Os solos e os elementos estruturais de fundação podem ser representados pelos chamados métodos discretos que os consideram como um conjunto de elementos isolados, como por exemplo o *Método dos Elementos Finitos* que

representa o elemento estrutural como um conjunto de barras ligadas apenas por nós e ainda métodos baseados na hipótese de Winkler, que representa o solo como um conjunto de molas como apresentado por Hachich *et al* (1998). Os métodos discretos são geralmente empregados quando é necessário o estudo simultâneo dos elementos estruturais e o solo de apoio da fundação, a já mencionada ISE. Existem basicamente dois modelos para representar o solo na análise da ISE, quando o solo é representado por molas com respostas lineares ou não, ou quando o solo é representado como um meio contínuo elástico linear ou não.

3.2.1 Modelo de molas lineares

Este modelo também é conhecido como modelo de Winkler, primeiro a representar o solo através de um sistema de molas com resposta linear. Segundo Hachich *et al* (1998), neste modelo, as pressões de contato são proporcionais aos deslocamentos. Este modelo é comumente utilizado para análise tanto de carregamentos verticais, em radiers e vigas de fundação, quanto em carregamentos horizontais, em estacas sob cargas horizontais e estruturas de escoramento de escavações. Será detalhado somente o modelo de Winkler para carregamentos verticais tendo em vista o foco deste estudo.

Para carregamentos verticais, o modelo de molas com resposta linear afirma que as pressões de contato são proporcionais aos recalques, como observa-se na equação 1:

$$q = k_v \cdot w \quad (1)$$

A constante de proporcionalidade k_v é denominada coeficiente de mola. O coeficiente de mola pode ser obtido através de 1) Ensaio de placa, em que obtém-se uma curva de recalque da placa, cuja inclinação em trecho inicial é o próprio coeficiente. 2) Cálculo do recalque da fundação real sendo submetida a um carregamento unitário distribuído. Para esse cálculo, considera-se a fundação como rígida, obtendo assim um recalque médio. A partir do recalque médio calcula-se então o coeficiente de

mola. 3) Uso de tabelas de valores típicos em que o coeficiente de mola pode ser obtido a partir de valores fornecidos na literatura. 4) Correlações com N_{SPT} , que segundo Porto (2010), a correlação do coeficiente de mola, k_v , com o N_{SPT} apresenta-se extremamente útil, pois os valores de N_{SPT} são obtidos no local de implantação da obra, dessa forma tem-se informações reais sobre o maciço local. Além disso, geralmente a única informação disponível para o projetista de fundação é o relatório de sondagem SPT. Cernica (1995) afirma em seu estudo que a correlação expressa pela equação 2, apresenta valores razoáveis na análise de radiers, sendo o valor do coeficiente de mola dado em MPa/m. Chaves *apud* Tepedino (1980) apresenta para determinação do coeficiente de mola, k_v , em argilas ou solos argilosos a equação 3. A unidade obtida com essas expressões é N/cm³. 5) Correlações com a tensão admissível do solo (σ_{adm}), são muito comuns em escritórios de projetos. Primeiramente estima-se a tensão admissível a partir das Equações 4 proposta por Moraes (1976). Em seguida utiliza-se a Tabela 1, que apresenta o coeficiente de mola baseado na tensão admissível do solo (σ_{adm}) como apresentado por Morrison (1993).

$$k_v = 1,8.N_{SPT} \quad (2)$$

$$k_v = 3.N_{SPT} \quad (3)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{SPT}}{7,5} \quad (4)$$

Tabela 1. Valores para K_v – Adaptado (Morrison, 1993)

σ_{adm} (kgf/cm ²)	K_v (kgf/cm ³)	σ_{adm} (kgf/cm ²)	K_v (kgf/cm ³)
0,35	0,91	1,05	2,29
0,45	1,17	1,15	2,47
0,55	1,39	1,25	2,65
0,65	1,57	1,35	2,83
0,75	1,75	1,45	3,01
0,85	1,93	1,55	3,19
0,95	2,11	1,65	3,37

4 ESTUDO DE CASO E MODELAGEM NUMÉRICA

4.1 Edificação Estudada

Foi realizada a modelagem numérica e a análise estrutural de um edifício localizado em Igarapé, Minas Gerais, que possui 4 (quatro) pavimentos, sendo 4 (quatro) apartamentos por pavimento e que utiliza como sistema construtivo paredes em concreto e lajes moldadas “*in loco*”, com espessura de 10 cm, apoiando-se sobre fundação em radier tipo liso com espessura de 18 cm, contando ainda com uma cinta de borda de seção transversal de 20x60 cm. O edifício possui altura total de 15,60 metros considerando os quatro pavimentos com pé direito de 2,80 metros mais a caixa d’água. O solo de apoio do radier trata-se de uma argila mole. O edifício em estudo foi modelado no *software* SAP2000 representando de forma fiel as condições estabelecidas na arquitetura, determinando as abertura de portas e janelas. A Figura 1 apresentará a planta do pavimento tipo e a Figura 2 a modelagem computacional.

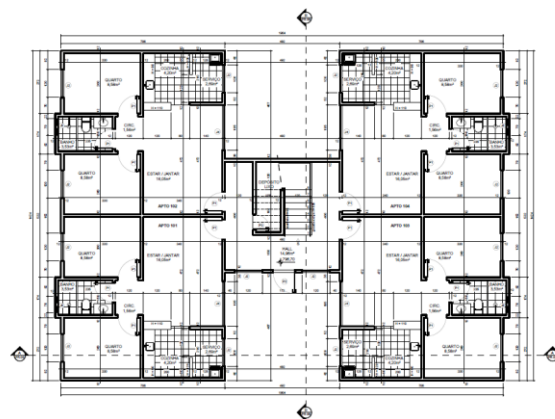


Figura 1. Planta do Pavimento Tipo.

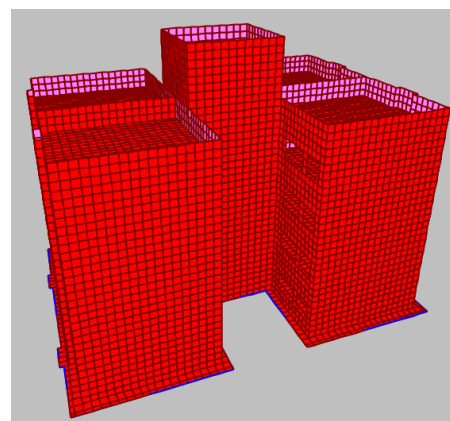


Figura 2. Modelagem Computacional.

4.2 Carregamentos

4.2.1 Cargas Verticais

Nesse estudo foram consideradas cargas verticais permanentes e variáveis (sobrecarga) referentes a um edifício de uso residencial. As cargas permanentes referem-se ao peso próprio da estrutura determinadas automaticamente pelo software SAP2000 através das propriedades físicas e geométricas, dos elementos estruturais. As sobrecargas foram estabelecidas de acordo com a utilização como descrito pela norma ABNT NBR 6120:1980, para a laje que receberá a caixa d'água a carga utilizada foi determinada em função da do volume previsto para caixa d'água utilizada. O lançamento das cargas de utilização nas lajes é apresentado na Figura 3.

- Sobrecarga para dormitório, sala, copa, cozinha e banheiro = $1,50 \text{ kN/m}^2$;
- Sobrecarga para área de serviço = $2,00 \text{ kN/m}^2$;
- Sobrecarga nas escadas = $2,50 \text{ kN/m}^2$;
- Sobrecarga para forro = $0,50 \text{ kN/m}^2$;
- Sobrecarga da caixa d'água = $5,25 \text{ kN/m}^2$.

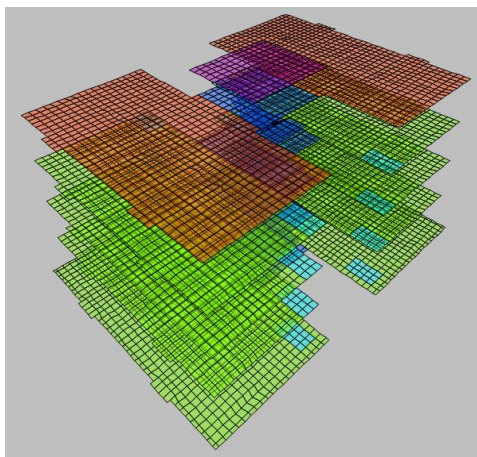


Figura 3. Lançamento das cargas nas lajes.

4.2.2 Esforços Horizontais

A carga horizontal a ser considerada é a carga referente ao vento, que foi determinada de acordo com a ABNT NBR 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações), sendo uma edificação de 15,60 metros foi determinada a carga de vento $q(15,60 \text{ m}) = 0,53 \text{ kN/m}^2$. O lançamento das forças devido ao vento nas

paredes é apresentado na Figura 4.

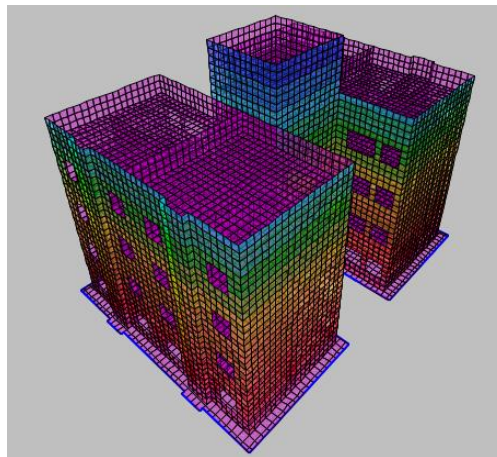


Figura 4. Lançamento das forças devido ao vento.

4.3 Materiais

4.3.1 Concreto

O concreto foi utilizado como material para todos os elementos estruturais (paredes, lajes, radier e cintas) da edificação estudada. Os valores das propriedades físicas foram adotados de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.

4.3.2 Solo

Para o estudo em questão, as correlações foram estimadas com base em sondagens SPT e tensão admissível (σ_{adm}). Segundo Porto (2010), para o dimensionamento das fundações deve-se conhecer os alguns parâmetros dos solos, tais como tensão admissível e ângulo de atrito, que são obtidos indiretamente através de correlações entre os parâmetros desejados e valores de sondagem SPT, embora esses valores sejam aproximados, de modo geral, estão a favor da segurança. Para se obter o $N_{SPT, \text{médio}}$, foi realizada uma média dos valores, para a cota de assentamento da fundação. O valor encontrado foi $N_{SPT, \text{médio}} = 3,36$, obtidos a partir de relatórios de sondagens do terreno de construção do edifício.

O solo foi representado considerando o modelo de Winkler, que considera a estrutura sobre apoios elásticos. Para fins comparativos foram escolhidas três correlações.

4.4 Modelos Analisados

Para fins comparativos foram analisados ao todo 4 (quatro) modelos. O Modelo A considerando a hipótese de apoio indeslocáveis e os demais modelos baseados em três correlações. A respeito das correlações, o modelo B que considera a correlação do $N_{SPT,médio}$ com a tensão admissível e posteriormente esta com o coeficiente de mola, o modelo C considera a correlação proposta por Chaves *apud* Tepedino (1980) e o modelo D que considera a correlação proposta por Cernica (1995) que dependem somente o $N_{SPT,médio}$ atuante na cota de assentamento da fundação. Modelo A: A análise estrutural para este modelo foi realizada considerando que a estrutura está sobre apoio rígido, hipótese esta a mais utilizada em escritórios de projetos, em suma não considera a interação solo-estrutura.

Modelo B: Modelo que considera na análise estrutural o edifício apoiado sobre um meio elástico, representado por um conjunto de molas (Hipótese de Winkler). Para estimar o coeficiente de mola (K_v), foi utilizado a correlação proposta por Moraes (1976) e posteriormente obter o coeficiente de mola a partir dos valores tabelados por Morrison (1993). A equação utilizada para determinação da tensão admissível corresponde a equação 4. Para se obter o coeficiente de mola foi necessário recorrer a tabela 1, logo $K_v = 1,17 \text{ Kgf/cm}^3$ ou 11700 kN/m^3 .

Modelo C: Modelo com características muito semelhantes ao modelo B, porém para estimar o coeficiente de mola (K_v), foi utilizado a correlação proposta por Chaves *apud* Tepedino (1980), para argilas ou solos argilosos. A equação utilizada para determinação do coeficiente deste modelo corresponde a equação 3. Portanto tem-se $K_v = 10,08 \text{ N/cm}^3$ ou 10080 kN/m^3 .

Modelo D: Modelo com características muito semelhantes aos modelos B e C, porém para estimar o coeficiente de mola (K_v), foi utilizado a correlação proposta por Cernica (1995) que apresenta valores razoáveis na análise de radiers. A equação utilizada para determinação do coeficiente deste modelo corresponde a equação 2. Portanto tem-se $K_v = 6,048 \text{ MPa/m}$ ou 6048 kN/m^3 .

5 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir dos modelos propostos anteriormente. Foram escolhidas quatro paredes do primeiro pavimento de forma a representar a edificação em estudo. Para as paredes analisadas são apresentados gráficos de dispersão com suas distribuições de tensões normais.

5.1 Análise Comparativa dos Modelos

Para análise dos resultados serão avaliados a influência da ISE na distribuição de tensões normais de compressão nas paredes do primeiro pavimento considerando a combinação de esforços verticais (Peso Próprio e Sobrecarga de Utilização) e horizontais (Força devido ao Vento). Nas Figuras 5 e 6 é possível observar mesmo que qualitativamente a mudança no fluxo de tensões nas paredes.

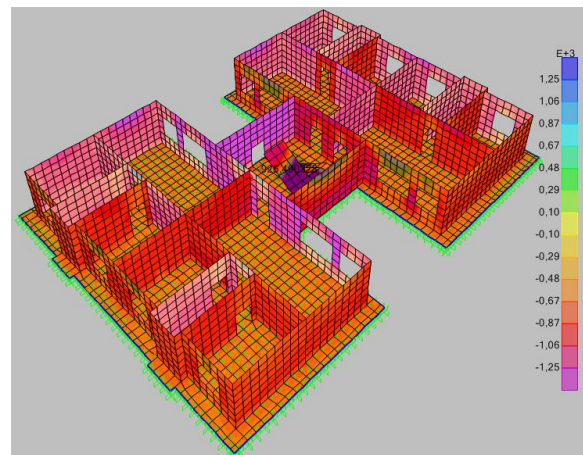


Figura 5. Resultado para o 1º Pavimento - Modelo A.

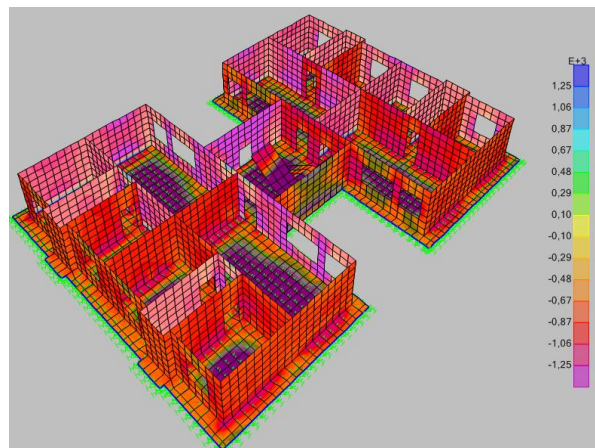


Figura 6. Resultado para o 1º Pavimento - Modelo B.

A seguir na Figura 7 será apresentada a planta chave com destaque para as paredes analisadas. Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos para as paredes P2 (Figura 3), P12 (Figura 4), P7 (Figura 6) e P15 (Figura 5), considerando um conjunto de elementos que melhor representam o comportamento da parede analisada nos modelos A, B, C e D, junto exposição dos resultados de cada parede serão feitos os comentários pertinentes a cada parede.

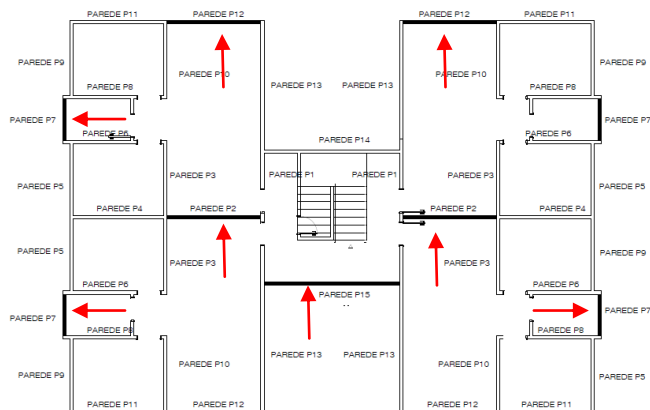


Figura 7. Planta Chave das Paredes Analisadas.

5.1.1 Paredes P2 e P12

Para as paredes P2 e P12 ao se considerar a interação solo-estrutura foi possível verificar após análise dos resultados que foram resumidos em forma de grafico nas Figuras 8 e 9, um aumento das tensões normais de compressão, ou seja, Aobservou-se como era esperado uma alteração do fluxo dos esforços na estrutura. Observação essa que acentua-se discretamente com a maior flexibilidade do solo (Modelo D). O aumento de tensões com a consideração da ISE pode chegar até 36% na parede P12. Observa-se ainda que após a consideração da ISE independente do valor do coeficiente de mola as tensões apresentam o mesmo comportamento. No caso da parede P2 observa-se que próximo as extremidades da abertura da porta o surgimento de anomalias no comportamento das tensões, principalmente após a consideração da ISE, isso deve ao fato de que as extremidades e quinas serem regiões de concentração de tensão.

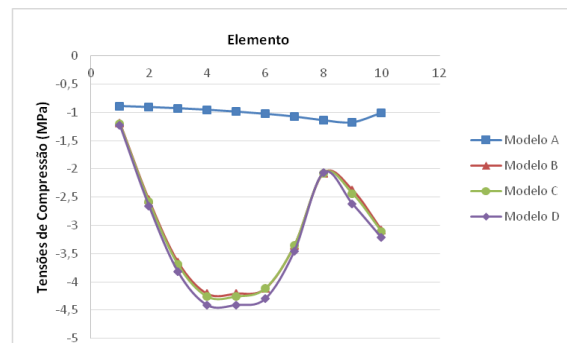


Figura 8: Tensões na parede P2 (1º Pavimento)

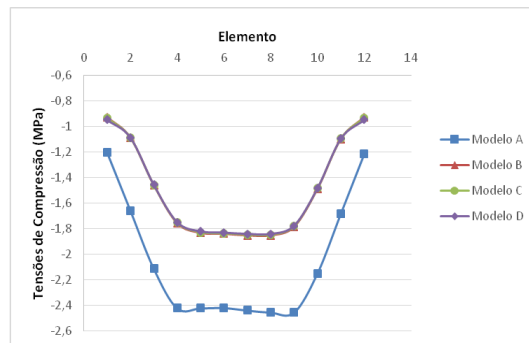


Figura 9: Tensões na parede P12 (1º Pavimento)

5.1.2 Parede P7 e P15

Para as paredes P7 e P15 ao se considerar a interação solo-estrutura foi possível verificar após análise dos resultados que foram resumidos em forma de grafico nas Figuras 10 e 11, uma diminuição das tensões normais de compressão. Observação essa que acentua-se discretamente com a maior flexibilidade do solo (Modelo D). A diminuição de tensões com a consideração da ISE pode chegar a 42% na parede P7 e 27% na parede P15. Essa diminuição não é uniforme, ao longo da parede, em virtude da influência das paredes vizinhas. Observa-se ainda que após a consideração da ISE independente do valor do coeficiente de mola, as tensões apresentam o mesmo comportamento.

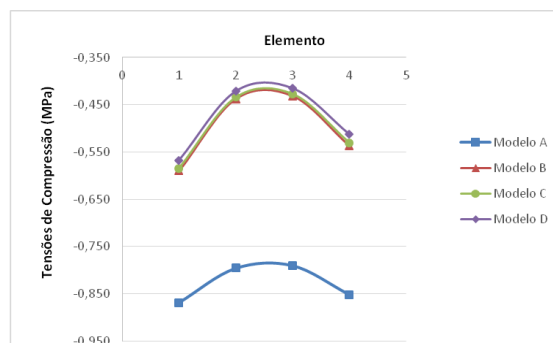


Figura 10: Tensões na parede P7 (1º Pavimento)

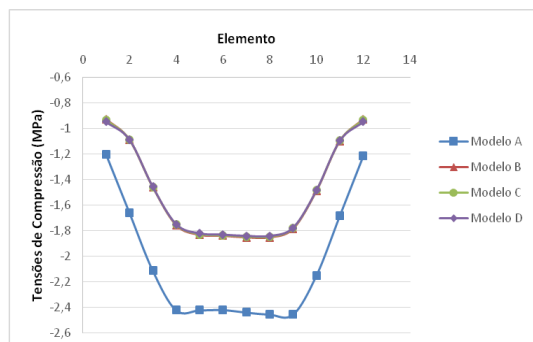


Figura 11: Tensões na parede P15 (1º Pavimento)

5 RESULTADOS

O estudo aqui realizado tinha como objetivo mostrar a importância da consideração do estudo da ISE em projetos estruturais em edificações de pequeno porte, para isso foi necessário uma análise numérica da estrutura proposta sendo possível obter os resultados que foram expostos através de gráficos comparativos dos modelos propostos.

Segundo Fusco (1995) quando se projeta estruturas formadas por paredes de concreto é necessário o acompanhamento do fluxo dos esforços ao longo de um complexo sistema de elementos retangulares delgados, que formam as paredes e lajes da edificação. Tendo em vista essa afirmação, os resultados obtidos confirmam a importância do estudo da ISE em edificações com o sistema construtivo de paredes de concreto. Como pode ser observada essa redistribuição do fluxo de esforços pode trazer mudanças significativas no dimensionamento dos elementos estruturais, podendo até mesmo gerar um dimensionamento equivocados.

No estudo realizado foram comparadas três correlações que fornecem o valor para o coeficiente de mola a partir do $N_{SPT, \text{médio}}$, o que foi observado no entanto é que a estrutura comportou-se de forma muito similar para os três diferentes valores do coeficiente de mola. Portanto conclui-se que apesar da diferença numérica do valor obtido através das correlações utilizadas nos modelos B, C e D, estas correlações são equivalentes uma vez que não apresentam dispersões significativas nos valores de tensões.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas - ABNT. NBR 6118 - *Projeto de estruturas de concreto: procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas - ABNT. NBR 6120 - *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações: procedimento*. Rio de Janeiro, 1980.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas - ABNT. NBR 6123 - *Forças devidas ao vento em edificações: procedimento*. Rio de Janeiro, 1988.
- Cernica, J. N. *Geotechnical Engineering: Foundation Design*. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- Chaves, R. A. *Fundações de Torres de Linhas de Transmissão*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Fusco, P. B. *Técnica de Armar as Estruturas de Concreto*. São Paulo: Pini, 1995.
- Gusmão, A. D. *Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações*. 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Hachich, W. et al. *Fundações: Teoria e Prática*. 2. ed. São Paulo: PINI, 1998.
- Holanda Júnior, O. G. *Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas*. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Moraes, M. C. *Estruturas de fundações*. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.
- Morrison, Nelson.. *Interacción suelo-estructuras: semi-espacio de winkler*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 1993.
- Porto, T. B. *Estudo da Interação de Paredes de Alvenaria Estrutural com a Estrutura de Fundação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.