

## STUDY OF A STRUCTURAL MASONRY BUILDING WITH THE ANALYSIS OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION

**Thiago B. Porto and Roberto M. da Silva**

*Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Escola de Engenharia, 4º andar, Belo Horizonte, MG, Brasil,  
porto@dees.ufmg.br, roberto@dees.ufmg.br, <http://www.pos.dees.ufmg.br>*

**Palavras-chave:** Interação Solo-Estrutura, Análise Estrutural, Alvenaria Estrutural, Tensões, Modelagem Numérica, Fundações Superficiais.

**Resumo.** Este artigo apresenta uma análise das tensões normais nas paredes do primeiro pavimento de um edifício piloto de alvenaria estrutural através de uma modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o software SAP 2000, v.12. São descritas as características gerais da edificação, de suas fundações e do perfil geotécnico local, bem como o estudo dos elementos finitos e da malha em MEF a serem utilizados na modelagem. Em seguida, é procedida uma análise da influência da consideração da Interação Solo-Estrutura (ISE) ao longo da altura da edificação, objetivando assim, avaliar até que pavimento os efeitos da consideração da ISE se mostram significativos. As condições de contorno providas pelo solo de fundação são representadas de duas formas e posteriormente comparadas entre si. São apresentadas também comparações entre as tensões normais ao longo das paredes do primeiro pavimento considerando-se ou não os efeitos da ISE. Os resultados permitem uma melhor compreensão do mecanismo da interação solo-estrutura, contribuindo assim para o aprimoramento das metodologias de análises, qualidade do projeto e, conseqüentemente, desempenho da edificação.

## 1 INTRODUÇÃO

A forte recessão que o Brasil enfrentou, principalmente no início da década de 1990, antes do programa brasileiro de estabilização econômica (Plano Real, 1994), levou as grandes construtoras de obras prediais a procurarem alternativas socioeconômicas que viabilizassem a execução de obras que atendessem, principalmente, a classe média. A alvenaria estrutural foi o sistema construtivo adotado para enfrentar esse desafio, utilizando-se um único elemento para assumir a dupla função de vedação e estrutura.

Dentro do esforço de aprofundar a pesquisa sobre esse sistema construtivo, um ponto de grande importância a ser estudado, em termos de projeto e análise estrutural, é o comportamento de paredes de alvenaria sobre a estrutura de fundação. A hipótese de apoios rígidos para as condições de vinculação de edifícios é de utilização generalizada pelos projetistas de estruturas; já se pode, no entanto, usufruir-se de análises mais realistas, que levam em consideração a deformabilidade do solo adjacente às fundações. Entende-se que a escolha do tipo de fundação deve ser fruto da análise de diversas alternativas e não deve ser pautada pelas imposições do sistema que se apresentam no mercado, que não são, necessariamente, as alternativas mais racionalizadas.

Segundo Porto (2010), para se buscar uma solução estrutural racionalizada para a fundação faz-se necessário o estudo criterioso e adequado do mecanismo de transferência de carga entre o sistema estrutural e o maciço de solos ou rochas, bem como o conhecimento prévio das características físicas e mecânicas do solo em análise. Essa análise conjunta do sistema estrutural e do sistema geotécnico é conhecida por “Estudo da Interação Solo-Estrutura - ISE”.

Na análise estrutural de um edifício, considerar que a fundação é indeslocável ou totalmente rígida pode conduzir a uma distribuição irreal das cargas ao longo das paredes de alvenaria estrutural e a uma avaliação inadequada da estabilidade global da obra. A interação solo-estrutura (ISE), considerando que a fundação recalca baseada, por exemplo, em modelos de paredes apoiados em molas, com rigidez compatível com as cargas e os recalques esperados, pode tornar as previsões de Engenharia mais realistas e, conseqüentemente, mais confiáveis. Os engenheiros de fundações devem se conscientizar da existência de ferramentas de análise disponíveis, como, por exemplo, o método dos elementos finitos e técnicas numéricas que permitem efetuar as mencionadas previsões. Devem, principalmente, familiarizar-se com a importância da mecânica dos solos e das rochas, da geologia e dos efeitos da execução que alteram as propriedades iniciais dos solos que formam o sistema geotécnico.

## 2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ISE

Segundo Aoki e Cintra (2005), o objeto de estudo da interação solo-estrutura é a ação recíproca entre os corpos materiais (ou elementos) componentes do conjunto tridimensional formado pelo sistema estrutural (estrutura) e pelo sistema geotécnico (maciço de solos diversos) de uma obra de construção civil submetida às diversas ações externas (Figura 1). O equilíbrio estático desse sistema tridimensional altamente hiperestático envolve a interação entre elementos contínuos do maciço de solos e elementos discretos da estrutura.

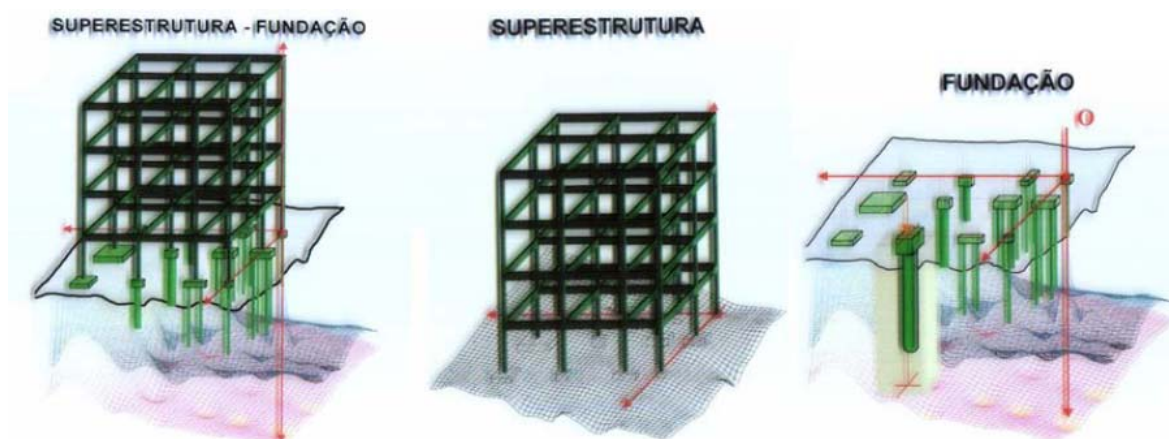


Figura 1: Conjunto superestrutura e fundação  
Fonte: Aoki e Cintra (2005).

## 2.1 Efeitos Introduzidos a uma Edificação Devido a ISE

Um dos principais efeitos mecânicos introduzidos em uma edificação devido a ISE é, segundo Gusmão (1990), uma redistribuição das cargas nos elementos estruturais, com tendência à uniformização dos recalques diferenciais. Os pilares de canto que, em princípio, receberiam menos cargas em uma análise convencional (considerando-se uma base rígida), receberiam mais cargas, considerando-se a ISE (através da deformabilidade do solo) e aliviando-se, dessa forma, os pilares de centro mais carregados.

Sendo assim, uma análise estrutural, considerando-se a ISE, não necessariamente irá promover uma estrutura mais econômica e sim uma estrutura mais realista, pois se avaliará a distribuição de tensões considerando-se a deformabilidade do maciço de solos. É importante ressaltar que uma modelagem numérica “realista” não depende apenas do engenheiro de estruturas, mas também do engenheiro geotécnico, para, assim, se ter parâmetros dos solos, de fato, reais, a serem usados na modelagem. Esses parâmetros podem ser quantificados por meio de ensaios de campos ou de laboratório, ou mesmo por tabelas de correlações. Neste artigo será avaliada a influência da rigidez relativa entre o solo e a estrutura e a influência do número de pavimentos.

## 3 MODELOS DE COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

Para efetuar a análise do comportamento de uma estrutura, é essencial o conhecimento das equações constitutivas dos materiais que a compõem. Recorrendo-se à Reologia — ciência que estuda o comportamento dos materiais por meio das suas equações constitutivas, é possível fazer o relacionamento entre as tensões, as deformações e o tempo.

É significativamente importante para o projetista saber o comportamento mecânico do material em análise. Neste sentido, as Teorias da Elasticidade e da Plasticidade apresentam alguns modelos de idealização do comportamento tensão-deformação. Ao realizar-se uma análise, deve-se ter o cuidado de se aplicar ao problema aquele modelo que lhe for mais apropriado.

É usual na Teoria da Elasticidade, considerar que o material é isotrópico, homogêneo e possui uma relação tensão-deformação linear. Sabe-se, no entanto, que os solos são não-homogêneos, anisotrópicos, e que apresentam relação tensão-deformação não-linear.

Morgenstern (1975), propôs um organograma indicando os modelos clássicos do comportamento tensão-deformação para os solos, conforme pode-se ser visto na Figura 2, abaixo.

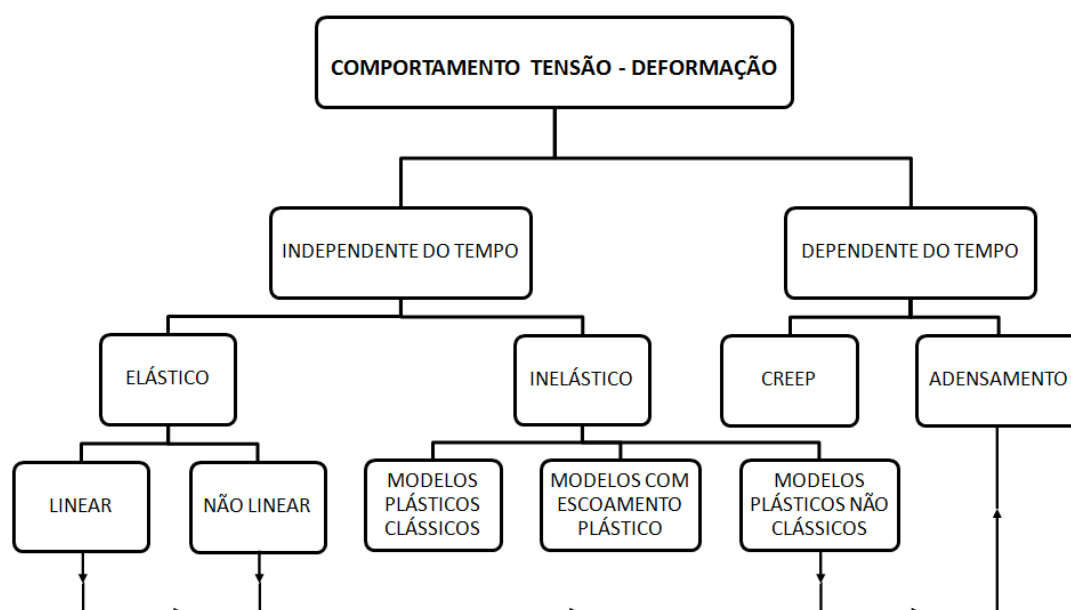


Figura 2: Classificação de modelos de comportamento tensão-deformação em solos.

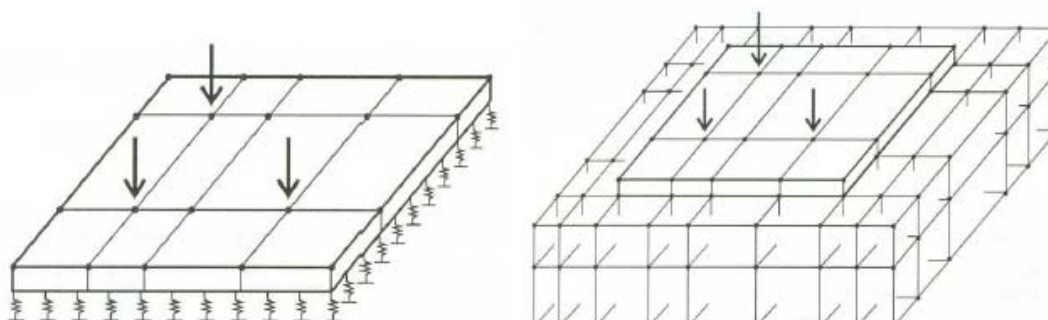
Fonte: Adaptado de Morgenstern (1975).

#### 4 MODELOS DISCRETOS PARA REPRESENTAÇÃO DO SOLO

Os métodos discretos ou métodos discretizados são aqueles que representam o maciço de solo ou sistema geotécnico não como um sólido contínuo, mas como um conjunto de elementos isolados. Pode-se citar, como exemplos, o Método dos Elementos Finitos, que representa o elemento estrutural de fundação como um conjunto de barras ligadas, e os métodos baseados na hipótese de Winkler, o qual representa o solo como um conjunto de molas.

A análise conjunta do sistema estrutural e geotécnico que utiliza um desses modelos discretos é conhecida como Interação Solo-Estrutura-ISE, conceito este, já descrito anteriormente. Nesse tipo de análise, pode-se utilizar dois modelos para representar o sistema geotécnico, a saber:

1. O maciço de solo é representado por molas (com resposta linear ou não); e
2. O maciço de solo é representado como um meio contínuo (elástico linear ou não).



(a) Elementos de placa sobre apoio elástico

(b) Elementos de placa sobre elementos sólidos

Figura 3: Modelos para representação do sistema geotécnico.

#### 4.1 Modelo de Winkler

Esse modelo foi apresentado por Winkler, em 1867, para estudar o comportamento de vigas em fundações elásticas. Ele representa o meio solo como um conjunto de molas linearmente elásticas e mutuamente independentes, discretas e rigorosamente espaçadas. De acordo com essa idealização, a deformação da fundação devido à carga aplicada está confinada apenas nas regiões carregadas. Para o caso de deformação vertical, a Hipótese de Winkler é dada pela Eq. 1:

$$\sigma(x, y) = K_s^v \cdot w(x, y) \quad (1)$$

onde:

$\sigma(x, y)$  é a tensão de contato média na base da fundação;

$w(x, y)$  é o deslocamento vertical (recalque); e

$K_s^v$  é o módulo de reação vertical, sendo este valor definido em função do tipo de solo que compões o maciço de fundação.

Essa constante ( $K_s^v$ ) também é chamada pela literatura pelos seguintes nomes: (a) constante de proporcionalidade, (b) coeficiente de reação vertical, (c) coeficiente de recalque e (d) coeficiente de mola

Por ser relativamente simples, é o modelo mais utilizado no estudo da ISE, nos escritórios de projeto. O grande problema desse modelo é determinar a rigidez das molas elásticas usadas para substituir o solo abaixo da fundação. Esse problema se torna duplo, já que o valor do módulo de reação vertical não depende apenas da natureza do maciço de solo, mas também das dimensões da área carregada e da profundidade de assentamento do elemento de fundação. Deve-se ter, portanto, bastante atenção ao determiná-lo numericamente para uso em problemas práticos.

Uma deficiência desse modelo é que ele não leva em conta a dispersão da carga sobre uma área de influência gradualmente crescente com o aumento da profundidade e, outra, considerar o solo como tendo um comportamento tensão-deformação linear. Seu pior defeito, porém, é considerar que as molas sejam independentes, o que quer dizer a não-existência de ligação coesiva entre as partículas contidas no meio solo.

Dutta e Roy (2002), apresentam em seu trabalho uma revisão bibliográfica das principais maneiras possíveis de se modelar o solo subjacente utilizando a aproximação Winkleriana. Entre os principais modelos estão: Modelo de Winkler (1867); Modelo de Filonenko-Borodich (1940); Modelo de Fundação de Hetenyi (1946); Modelo de Pasternak (1954); Modelo de Kerr (1965); Modelo de Analogia Viga-Coluna (1993); Novo Modelo Contínuo de Winkler (2001); entre outros.

#### 4.2 Meio Contínuo

Quando se pretende analisar a distribuição de tensões ao longo do sistema geotécnico ou mesmo os recalques das diversas camadas do maciço de solos provenientes das cargas atuantes de uma edificação, por exemplo, a aproximação baseada nas hipóteses de Winkler, onde o maciço de solo é representado por um conjunto de molas, não é satisfatória.

Neste caso, torna-se necessária uma representação do solo de maneira mais realista, de tal forma que se consiga considerar o contínuo do solo, bem como suas diversas camadas. Almeida (2003) apresenta, em seu trabalho, 2 (dois) modelos, quando se pretende fazer a consideração do sistema geotécnico como um contínuo.

O primeiro modelo parte do manuseio das equações advindas da Teoria da Elasticidade aplicada a um meio contínuo, homogêneo e elástico; ou seja, uma solução analítica. Uma desvantagem da utilização de uma solução analítica baseada nessa teoria é que as soluções encontradas são aplicáveis a um número limitado de problemas, pois de maneira geral as equações não são resolvidas.

Uma segunda maneira de se representar o contínuo do solo é com a utilização dos potentes métodos numéricos; mais precisamente, com o emprego do Método das Diferenças Finitas (MDF), do Método dos Elementos Finitos (MEF) e do Método dos Elementos de Contorno (MEC). Neste trabalho será utilizado o Método dos Elementos Finitos através do software Comercial SAP2000.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo consiste em uma análise numérica linear, utilizando-se o programa SAP 2000 v. 12, para obtenção das tensões normais na base das paredes do primeiro pavimento de um edifício piloto de alvenaria estrutural de 11 pavimentos, sobre radier.

Soares (2006) aponta o radier como um dos tipos de fundações em que a ISE tem grande relevância e que se apresenta como problema ideal a ser estudado. O referido autor cita, também, que existem grandes centros de pesquisa no mundo inteiro nos quais o principal tipo de fundação estudado é o radier, como é o caso do Centro de Geotecnologia da Universidade de Manhattam, nos Estados Unidos da América.

Para avaliar a variação das tensões na base da alvenaria provocadas pelas cargas verticais e horizontais, serão adotadas diferentes hipóteses de cálculo, que fornecerão dados para se analisar a influência da deformabilidade do solo de fundação na distribuição dessas tensões.

### 5.1 Descrição do Edifício em Estudo

Apresenta-se nas figuras abaixo o pavimento tipo do edifício em estudo, bem como as paredes escolhidas como estruturais para esta pesquisa.

O edifício foi idealizado de modo a representar, de forma esquemática, o que geralmente acontece nos edifícios reais, com as paredes contendo aberturas (portas e janelas) e propiciando interação entre as mesmas, fazendo com que haja uma redistribuição entre as cargas provenientes das lajes e do peso próprio das paredes.

A planta baixa do pavimento tipo, o corte AA e as paredes estruturais do pavimento tipo são apresentadas nas Figuras 4 a 6.

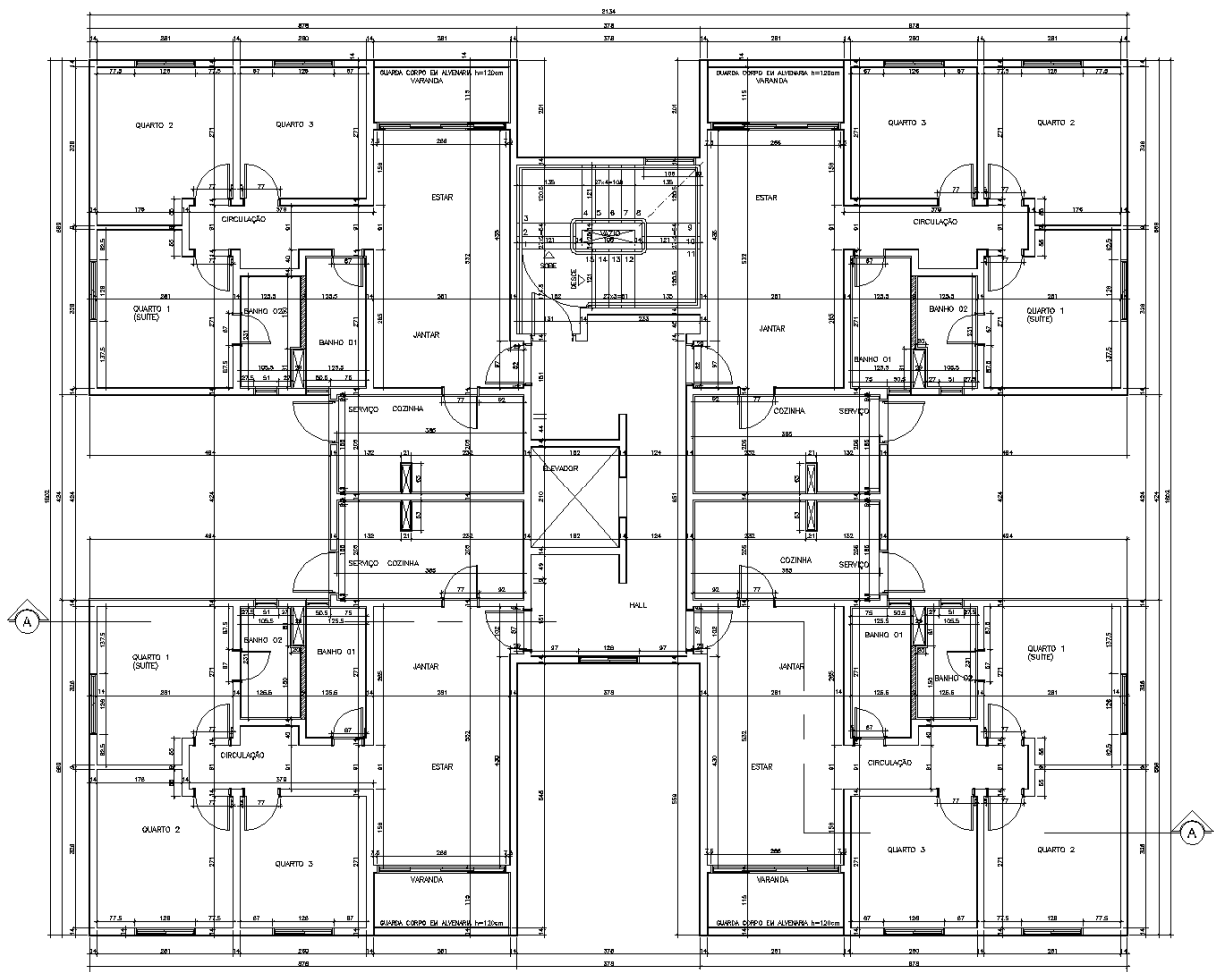


Figura 4: Pavimento tipo

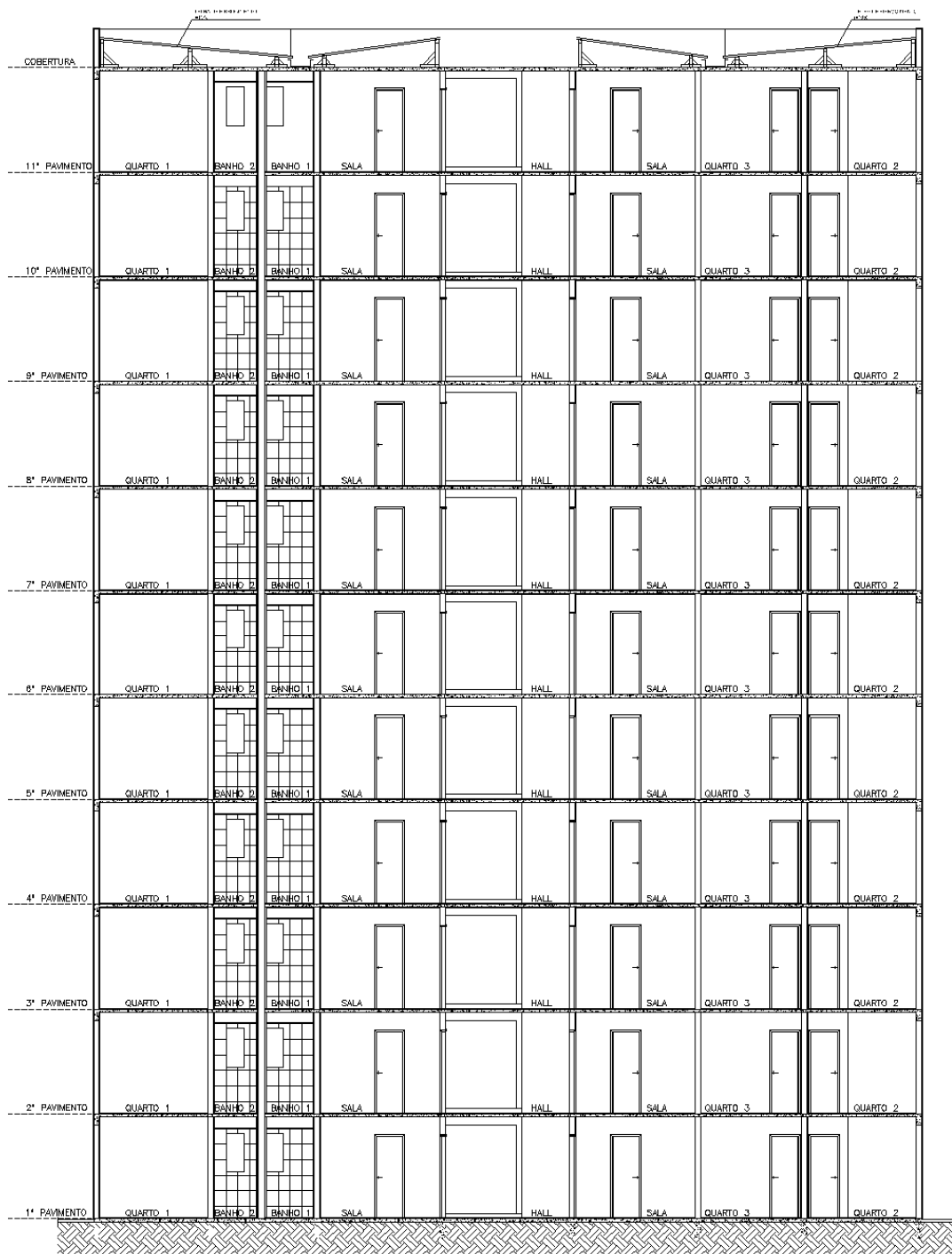


Figura 5: Corte AA



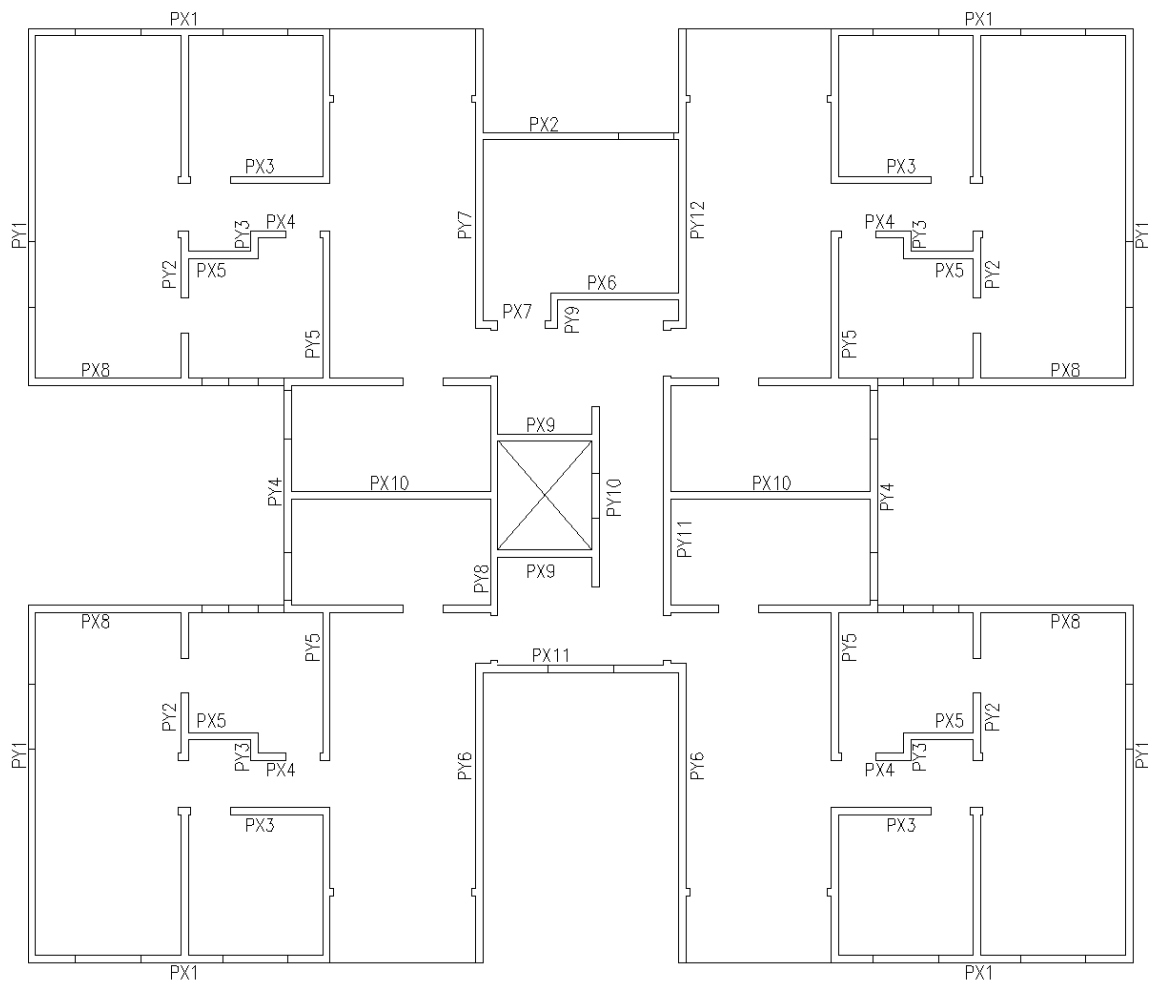


Figura 6: Paredes estruturais do pavimento tipo

## 5.2 Descrição do Perfil Geotécnico Local

Os três perfis de solo utilizados neste trabalho (pouca deformabilidade, deformabilidade mediana e muito deformável) foram baseados em ensaios SPT realizados na região metropolitana de Belo Horizonte. O solo de pouca deformabilidade é constituído nas primeiras camadas de silte argilo-arenosa, filito (xistoso) e de consistência dura. A partir de 5 metros de profundidade o solo é formado por matacão ou rocha com o  $N_{SPT}$  na ordem de 30/15.

O solo de deformabilidade mediana é constituído em suas primeiras camadas por argila siltosa e a partir de 6 m ele passa a ser silte argiloso (solo residual) cujo  $N_{SPT}$  médio é de 15 golpes.

O solo de grande deformabilidade é constituído em suas primeiras camadas de argila siltosa, muito mole e a partir de 7 metros passa a ser silte arenoso (areia fina). O  $N_{SPT}$  médio é de 6 golpes.

### 5.3 Propriedade Física dos Materiais

- **Alvenaria de Blocos de Concreto**

Para a modelagem do edifício-piloto, no entanto, foram adotados, para o coeficiente de Poisson e para o peso específico, respectivamente, os seguintes valores:

$$- \nu_a = 0,20;$$

$$- \gamma_a = 14 \text{ kN/m}^3.$$

Para o Módulo de Elasticidade, adotaram-se 3 (três) valores distintos, calculados da seguinte maneira: dividiu-se a estrutura em 2 (dois) grupos de 4 (quatro) andares e um grupo de 3 (três) andares, admitindo-se a hipótese de resistência à compressão de 1 MPa por andar. Com isto, tem-se, para os 4 (quatro) andares superiores, o valor de 4 MPa. Esse valor, porém, é inferior ao mínimo exigido pela NBR 10837 (ABNT, 1989), cujo valor é de 4,5 MPa, e que foi adotado. Para os 4 (quatro) andares intermediários, o valor da resistência à compressão adotado foi de 8 MPa e, para os 3 (três) andares inferiores, o valor é de 11 MPa. Com esses valores, calculou-se o módulo de elasticidade, por meio da Equação 2, representada abaixo.

$$E_{alv} = 800 * f_p \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

- **Concreto do Radier e Lajes**

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2004), foram adotados os seguintes valores:

- Coeficiente de Poisson -  $\nu_c = 0,20$ ;
- Resistência à Compressão do Concreto -  $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$
- Módulo de Elasticidade -  $E_c = 23.800 \text{ MPa}$  e
- Peso Específico -  $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ .

- **Estimativa dos parâmetros dos solos com base no SPT**

O dimensionamento das fundações exige, muitas vezes, o conhecimento de parâmetros dos solos não diretamente determinados por meio de sondagens.

Correlações entre esses parâmetros e valores de SPT medidos em sondagens, entretanto, têm sido obtidas, permitindo que estimativas razoavelmente confiáveis sejam feitas.

Para este trabalho o Módulo de Elasticidade e o coeficiente de Poisson do solo foram baseados nas tabelas apresentadas abaixo.

TABELA 1: Valores de  $E_s$  em função do  $N_{SPT}$ .

Fonte: DÉCOURT, 1995..

Tipo de Solo	$E_s \text{ (MN/m}^2\text{)}$
Areias	$3,5N_{72}$
Solos Intermediários	$3,0N_{72}$
Argilas Saturadas	$2,5N_{72}$

TABELA 2: Valores Típicos de Coeficiente de Poisson.  
Fonte: BOWLES, 1988.

Tipo de Solo	$\nu$
Argila saturada	0,40 – 0,50
Argila parcialmente saturada	0,10 – 0,30
Argila arenosa	0,20 – 0,30
Silte	0,30 – 0,45
Areia comum	0,30 – 0,40

#### 5.4 Considerações Sobre a Modelagem Numérica

Ao edifício foram aplicadas ações verticais e horizontais. O carregamento vertical consiste basicamente do seu peso próprio e das sobrecargas normalmente aplicadas em um projeto estrutural, de acordo com a NBR 6120 (1980). As ações do vento foram baseadas na NBR 6123 (1988). Neste trabalho não foi considerado elementos de contato entre o solo e a estrutura de fundação. Portanto não se pode avaliar com exatidão as tensões de tração provocadas pelo vento na edificação.

Analisa-se o maciço de solo conforme dois modelos, nos quais:

- o solo é considerado como um meio contínuo, elástico, linear, isotrópico e heterogêneo;
- o meio solo é representado por um conjunto de molas linearmente elásticas e mutuamente independentes, discretas e rigorosamente espaçadas.

A modelagem foi feita tridimensionalmente, pelo Método dos Elementos Finitos - MEF, utilizando-se o programa SAP2000, versão 12, disponível no Laboratório de Mecânica Computacional do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais - LAMEC/DEES/UFMG.

Lajes, radier e paredes foram modelados com elemento de casca SHELL (elemento de 4 nós). O maciço de solo será representado pelo elemento sólido SOLID (elemento de 4 nós) e por molas dependendo do modelo em análise. O elemento de casca possui seis graus de liberdade por nó, referentes às translações (U1, U2 e U3) e as rotações (R1, R2 e R3), e o elemento sólido possui apenas três graus de liberdade por nó, referentes às translações (U1, U2 e U3); ambos elementos segundo as coordenadas X, Y e Z.

No presente trabalho, foi dotada a macro-modelagem, uma vez que está se analisando um edifício de 11 (onze) pavimentos, em que as dimensões do painel de alvenaria são grandes, em relação às dimensões das unidades e à espessura das juntas.

A modelagem tridimensional do maciço de solo utilizando o elemento SOLID foi realizada tendo suas dimensões baseadas no bulbo de tensões de uma placa quadrada, baseada na equação de Boussinesq. Em planta, o maciço possui 83.2m x 70.4m por 57m de profundidade. A altura do Radier em estudo é de 60 cm. Diversos testes foram feitos avaliando a deformabilidade do solo e o momento fletor no Radier com espessuras variando de 35 a 90 cm. A espessura de 60 cm mostrou-se mais viável em termos técnicos e econômicos, portando adotada neste trabalho.

#### Modelo completo

- Altura do Edifício = 30.8 m
- Área em Planta = 384.5 m<sup>2</sup>
- N° de Nós = 120.807
- N° de Elementos de Casca = 64.082

- N° de Sólidos = 82.160

## 5.5 Modelos Estudados

Submeteu-se o edifício em estudo a seis modelos distintos:

- (1) Nesse modelo, a análise da estrutura será feita considerando-se que ela está totalmente engastada na base; ou seja, sobre apoio rígido, para a condição de vinculação do edifício-piloto. Esse sistema é o adotado na maioria dos escritórios de cálculo, desconsidera-se portanto a existência da interação solo-estrutura;
- (2) Nesse modelo, o edifício-piloto ficará apoiado sobre um maciço de solo tridimensional bastante rígido. Os parâmetros desse solo foram baseados em um relatório de sondagem real. O solo de fundação é admitido como forte, com pouca deformabilidade;
- (3) Modelo com as mesmas características do modelo 02, com a diferença de que o solo de fundação é admitido como sendo mediano, apresentando deformação moderada;
- (4) Também como nos modelos 02 e 03, o solo é modelado como um meio contínuo tridimensional. Para este modelo, admite-se para o solo de fundação as características de um solo fraco, com muita deformabilidade.
- (5) Modelo com as mesmas características do modelo 03, exceto no que se refere ao modelo proposto para o solo. Nesta hipótese, o edifício ficará apoiado num meio elástico, representado por um conjunto de molas independentes. Para estimativa do Módulo de Reação Vertical ( $k_s$ ), a única variável escolhida foi o número de golpes  $N_{SPT}$ . O objetivo desse modelo é avaliar a diferença entre a distribuição de tensões obtida na base do edifício, em comparação com o modelo 3;
- (6) Modelo com as mesmas características do modelo 03, exceto no que se refere ao modelo proposto para o solo. Nesta hipótese, o edifício ficará apoiado num meio elástico, representado por um conjunto de molas independentes (hipótese de Winkler). Para estimativa do Módulo de Reação Vertical ( $k_s$ ), a variável foi o módulo de elasticidade  $E$  na cota de assentamento do radier e o menor lado  $B$  do radier, e, portanto, esse modelo leva em consideração a forma em planta do elemento de fundação. O objetivo desse modelo é avaliar a diferença entre a distribuição de tensões obtidos na base do edifício para os modelos 3 e 5;

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Análise 1

Neste item analisa-se a distribuição de tensões verticais no maciço de solo, ao longo da profundidade.

No intuito de mostrar o bulbo de tensões provocado pela presença da edificação, este item tem por objetivo representar, por meio de desenhos, as distribuições de tensões verticais no maciço de solo, ao longo da profundidade, para os modelos 2, 3 e 4. Para efeito de análise, foram considerados dois cortes, XZ e YZ na estrutura e no maciço de solos. Esse cortes passam pelas paredes PX9 e PY4, respectivamente.

- Corte YZ (PY4)

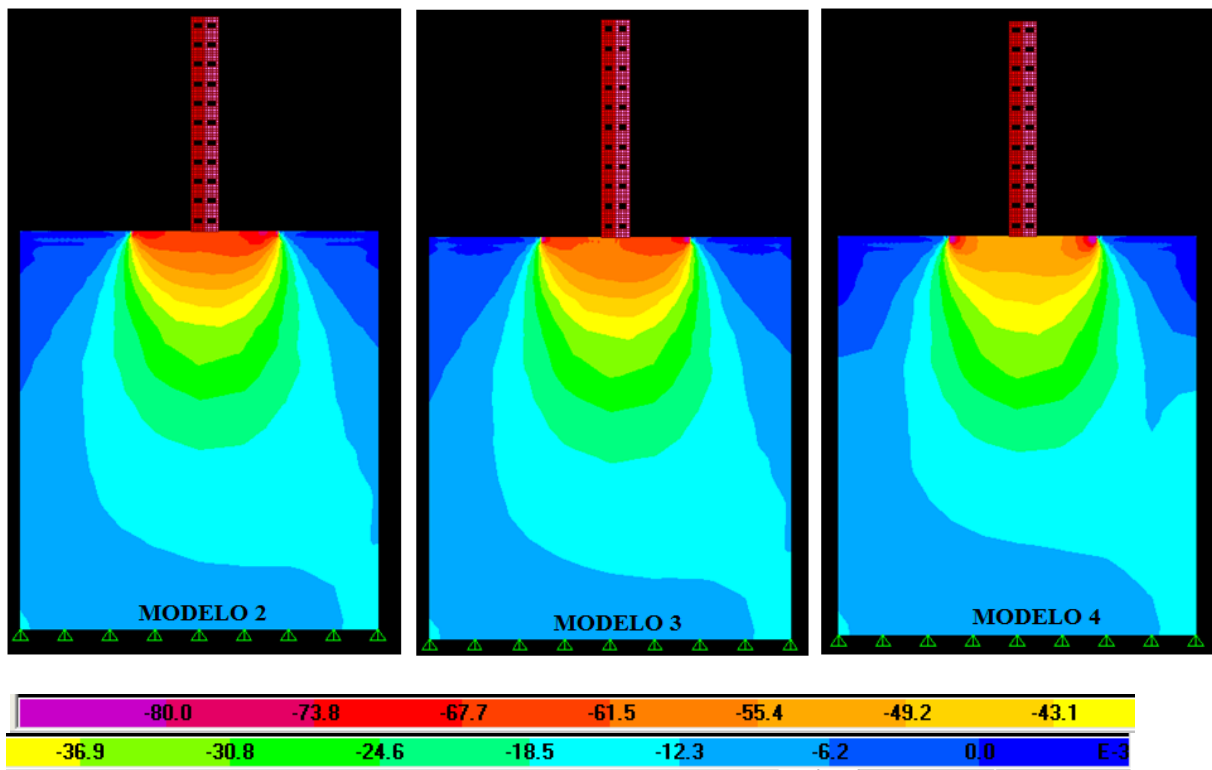


Figura 7: Bulbo de tensões no corte YZ ( $10^{-3}$ ) MPa

- Corte XZ (PX9)

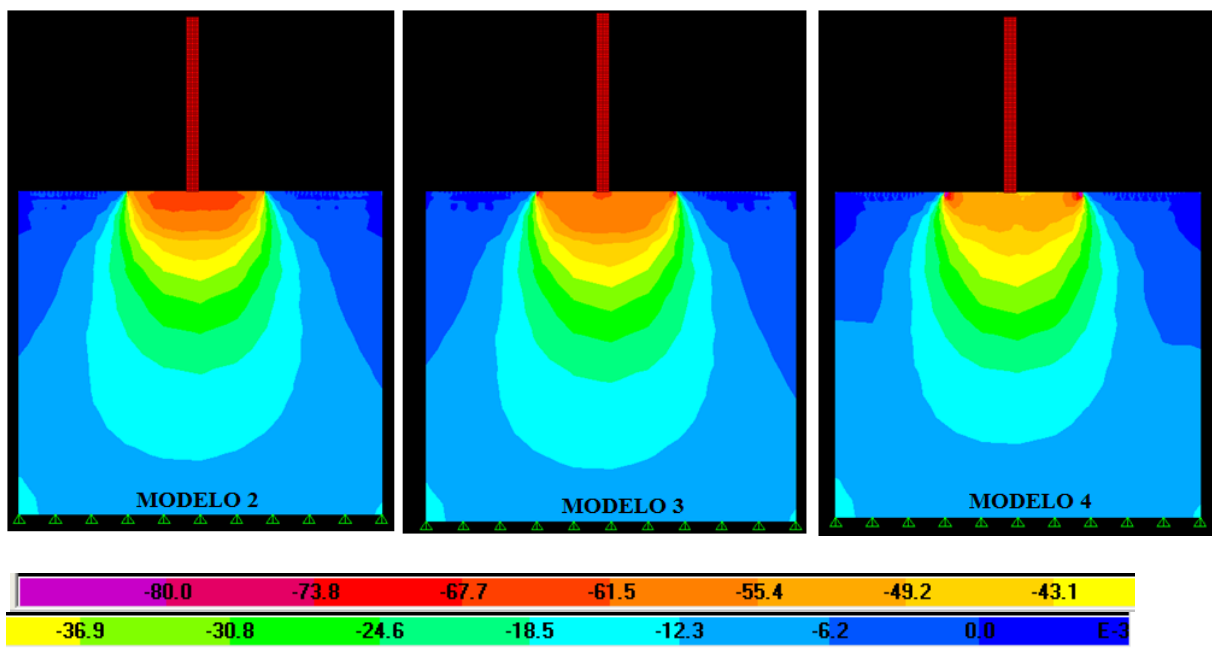


Figura 8: Bulbo de tensões no corte XZ ( $10^{-3}$ ) MPa

Nas figuras apresentadas, percebe-se, perfeitamente, o bulbo de tensões. Pode-se visualizar que ele se comporta de maneira muito similar ao bulbo proposto por Bowles (1988), baseado na equação de BOUSSINESQ.

Analisando-se a três figuras de cada corte (XZ e YZ) representando os modelos 2, 3 e 4 respectivamente, percebe-se que na medida em que o solo torna-se mais flexível há um alívio de tensões no centro e uma concentração de tensões na extremidade do radier.

## 6.2 Análise 2

Neste item, avalia-se a influência do modelo adotado para o solo na distribuição de tensões normais nas paredes do 1º (primeiro) pavimento, considerando-se apenas ações verticais.

Nas tabelas seguintes, são apresentados os resultados obtidos para as paredes PX1, PX10, PY1 e PY6. Pretende-se, neste item, avaliar, qualitativamente, as diferenças entre os modelos empregados para o solo (meio contínuo e apoio elástico), discutindo-se as limitações e os potenciais de cada um deles. Todos os modelos representam o mesmo tipo de solo. No modelo 3, o maciço de solo é representado por elementos sólidos tridimensionais e os modelos 9 e 10 representam o solo com apoios elásticos. No modelo 10, o valor do módulo de reação vertical é corrigido pelas dimensões da fundação.

- **Parede PX1**

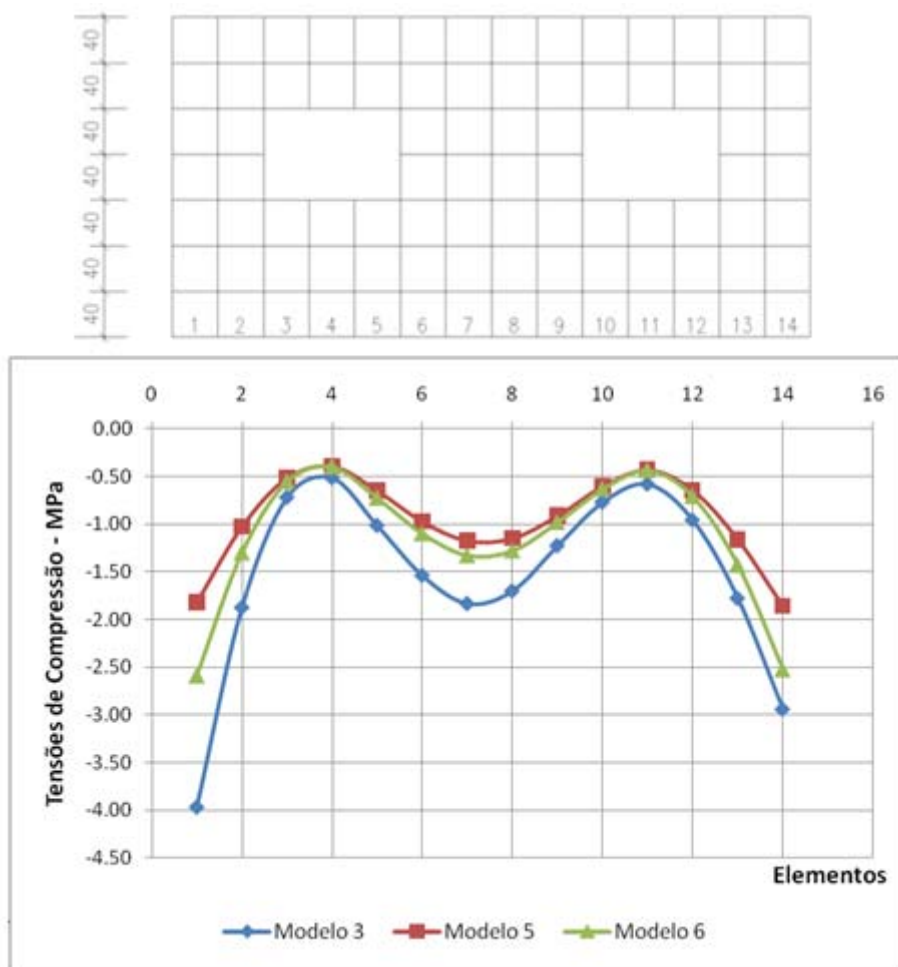


Figura 9: Tensões na base da parede PX1 (1º Pavimento) – Análise 2.

Embora o perfil de solo utilizado nos 3 (três) modelos seja o mesmo, percebe-se que os resultados das tensões ao longo das paredes são diferentes. Esse resultado já era esperado, porque foram utilizadas hipóteses de cálculos diferentes.

Nessa parede, a consideração do modelo 3 (elementos sólidos 3D) forneceu valores de tensões normais maiores do que nos modelos 9 e 10, cuja representação do solo é feita a partir de uma base elástica. Deduz-se que a representação do solo no modelo 3 fornece um solo mais flexível, quando comparada com outros modelos.

- **Parede PX10**

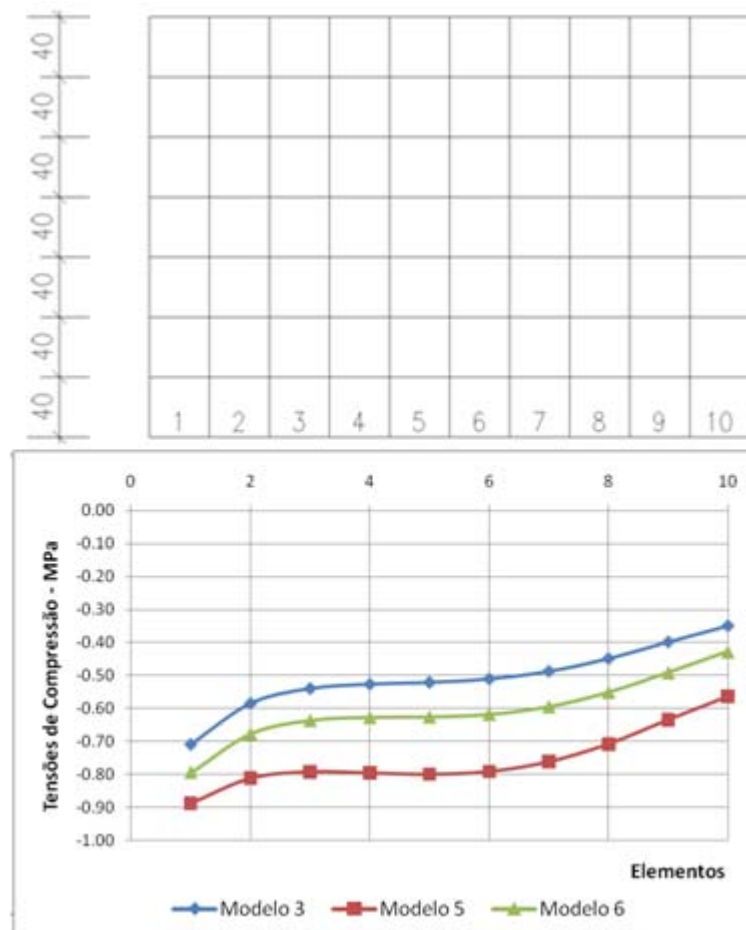


Figura 10: Tensões na base da parede PX10 (1º Pavimento) – Análise 2.

Nessa parede, percebe-se que os perfis das curvas são bastante parecidos. Como essa parede é interna, ocorre uma inversão dos modelos 3 e 6, em comparação com a parede PX1, analisada anteriormente.

- **Parede PY1**

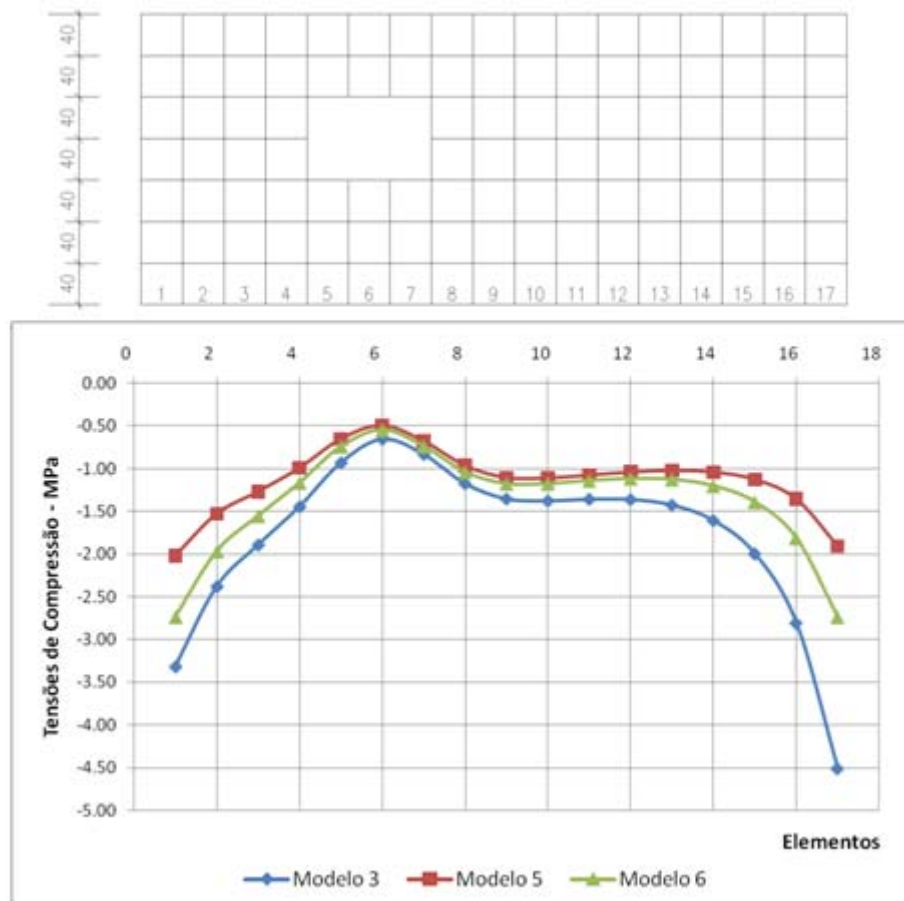


Figura 11: Tensões na base da parede PY1 (1º Pavimento) – Análise 2.

Essa parede tem um comportamento similar ao da parede PX1, que também é externa. A distribuição de tensão é maior no modelo 3 (elementos sólidos 3D), em comparação com os demais modelos, que representam o solo a partir de um grupo de molas independentes, sugerindo, então, que o modelo 3 representa um solo mais flexível, embora o perfil de solo seja o mesmo.



- **Parede PY6**

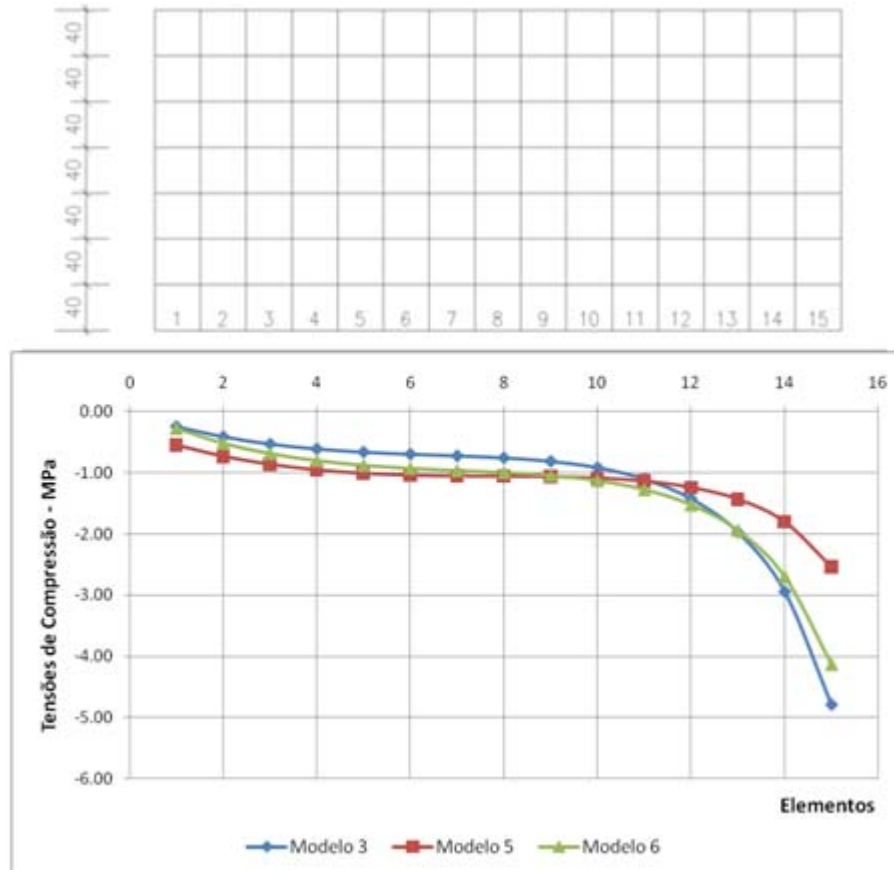


Figura 12: Tensões na base da parede PY6 (1º Pavimento) – Análise 2.

Nessa parede ocorrem os dois fenômenos verificados nas paredes PX1 e PX10. Do elemento 1 ao 11, o modelo 3 possui a menor tensão; do 11 ao 15, possui a maior, invertendo-se, assim, o que se verifica para o modelo 5.

### 6.3 Análise 3

Neste item, analisa-se a influência da ISE na distribuição de tensões normais nas paredes ao longo da altura do edifício, considerando-se apenas ações verticais.

Para se avaliar a influência da interação solo-estrutura na distribuição de tensões normais nas paredes ao longo da altura do edifício, consideraram-se apenas os modelos 1 e 3. Apresenta-se aqui (Figura 13), os valores obtidos para as tensões verticais médias na base das paredes PX1, PX10, PY1 e PY6, para os pavimentos 1, 3, 6, 9 e 11.

O objetivo desse item, portanto, é avaliar em qual pavimento a influência da ISE se torna menos importante.

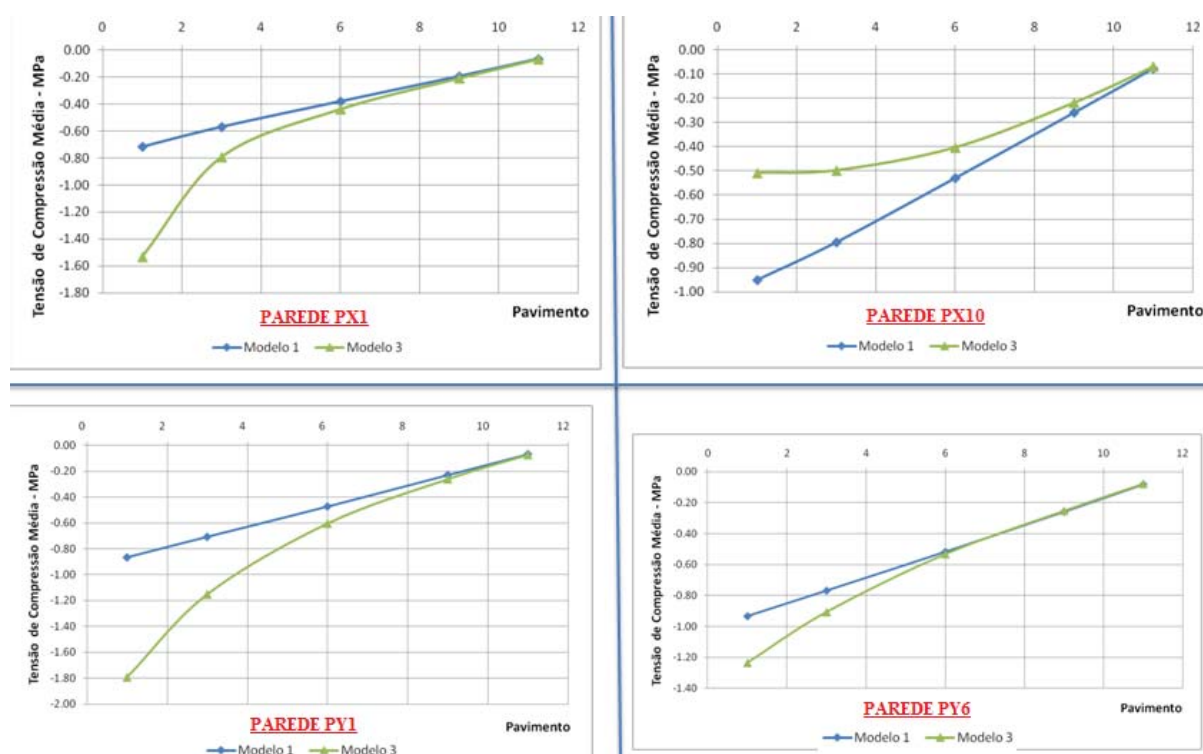


Figura 13: Tensões médias de compressão ao longo da altura do edifício – Paredes PX1, PX10, PY1 e PY6.

Como se pode perceber, a influência da ISE diminui nos pavimentos superiores. De maneira geral, percebe-se que a influência da ISE na distribuição de tensões verticais é mais acentuada nos primeiros pavimentos; ou seja, até o 6<sup>o</sup> (sexto) pavimento, a partir do qual sua influência se torna praticamente desprezível.

Ao contrário das demais paredes, avaliando-se apenas os primeiros pavimentos, verifica-se que na parede PX10 a tensão média é maior no Modelo 1, onde não considera-se os efeitos da ISE. Isso se justifica pois as paredes PX1, PY1 e PY6 são externas ao edifício.

## 7 CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho se encontram na discussão dos resultados das análises feitas, destacando-se as seguintes:

A consideração da interação solo-estrutura provoca uma maior homogeneização das tensões ao longo da base da edificação. Essa constatação é mais acentuada na medida em que o solo torna-se mais flexível. Com a consideração da ISE percebeu-se que as extremidades da edificação sofrem um acréscimo de carga que não seria verificado em uma análise convencional (constatação da Análise 1), ao passo que no centro da edificação ocorreu um alívio de tensão.

Verificou-se, neste trabalho, que as diferenças em relação ao modelo que representa o maciço de solos através de elementos sólidos tridimensionais e o modelo que representa o solo através de molas discretas (modelo de Winkler) não são discrepantes.

O modelo tridimensional em estudo que considerou o conjunto sistema geotécnico e estrutural trabalhando juntos possui uma grande vantagem em relação aos modelos que, tradicionalmente, aplicam molas de rigidez isoladas para cada apoio e que ignoram, completamente, a continuidade parcial do solo ou admitem apoios totalmente engastados.

No entanto, a grande vantagem do modelo de Winkler é sua fácil inserção dentro de um pacote computacional e de seu fácil entendimento físico. O grande problema para o uso deste modelo é como associar um maciço altamente complexo, com variações de tipos de solos, variação da capacidade resistente, cota do nível de água variável, etc., com um simples número. Todavia, para efeitos práticos, esse modelo continua sendo uma boa alternativa.

A utilização do Método dos Elementos Finitos numa análise de interação solo-estrutura, simulando o solo como um meio tridimensional, requer uma quantidade enorme de manipulação de dados e de alto custo de processamento, o que muitas vezes inviabiliza uma análise com caráter prático.

Portanto, usar o modelo de Winkler é uma opção adequada, prática e que traz resultados satisfatórios em termos de recalques, tensões e esforços para as análises e projeto de edifícios convencionais (análise estática), sendo então inviável, o uso do MEF na análise do dia-a-dia de projetos de edifícios convencionais.

Uma outra vantagem com relação a análise integrada entre a estrutura e o maciço de solo estratificado, é que pode-se avaliar numericamente, efeitos como a redistribuição dos esforços nas paredes de alvenaria estrutural, o que não seria possível em uma análise convencional.

Através da Análise 3, percebeu-se que os efeitos da ISE na distribuição de tensões nas paredes, ao longo da altura da edificação, são significativos, preponderantemente nos primeiros pavimentos, sendo constatado que, a partir do 6º (sexto) pavimento, essa influência torna-se muito pequena (10 a 30%). Essa tendência de decréscimo da influência da ISE nos pavimentos superiores, porém, não cresce linearmente com o número de pavimentos da edificação.

Em fim, com a interação entre o solo de fundação e a estrutura da edificação a ser construída, ter-se-á uma maior compatibilização entre a deformabilidade da estrutura como um todo, bem como uma significativa uniformização das tensões na base da edificação, garantindo-se, então, estruturas mais econômicas e seguramente estáveis, justificando-se sua utilização na análise estrutural dos projetos de alvenaria estrutural.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, PROPEES-UFMG e a ANCORA Engenharia de Estruturas Ltda, pelo apoio a esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- Almeida V. S. Análise da interação solo não-homogêneo/estrutura via acoplamento MEC/MEF. 192p. Tese. (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- Aoki, N.; Cintra, J. C. Introdução ao estudo da interação solo-estrutura. Notas de aula, Aula nº 3. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, 2005.
- Aoki, N. Aspectos geotécnicos da interação estrutura - maciço de solos. In: Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 28., São Carlos, EESC-USP, 1-5, Editora: Helena M. C. Carmo Antunes, Proceedings..., v. 1, p. vii-xx, 1997.
- Aoki, N. Desafios da Geotecnia em momentos de crise. I Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste – GEOCENTRO, 1., jun. Associação Brasileira de

- Mecânica de Solos - ABMS/IGS, Goiânia, 2009.
- Barata, F. E. Recalques de Edifícios sobre Fundações Diretas em Terrenos de Compressibilidade Rápida e com a Consideração da Rigidez da Estrutura. Tese (Concurso para Professor Titular do Departamento de Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.
- Bowles, J. E. Foundation Analysis and Design. 4. ed.. New York: McGraw-Hill, 1988.
- Décourt, L. Prediction of load settlement relationships for foundations on the basis of the SPT-T. Ciclo de Conferências Internacionales Leonardo Zeevaert. p. 87-104, México, Universidade Nacional Autónoma do México, 1995.
- Dutta, S. C.; Roy, R. A Critical Review on Idealization and Modeling for Interaction Among Soil-Foundation-Structure System. Computers and Structures, Elsevier, v. 80, p.1579-1594, 2002.
- Goshy, A. D. Soil-Foundation-Structure Interaction. Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineering - ASCE, Reston (Virginia), v. 104, n. ST5, p. 749-761, 1978.
- Gusmão, A. D. Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.
- Gusmão, A. D. Aspectos relevantes da interação solo estrutura em edificações. Rev. Solos e Rochas, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 47-55, 1994.
- Morgenstern, N. R. Stress-Strain Relations for Soils on Practice. Proc. of the V Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Buenos Aires, v. IV, p. 1-41, 1975.
- Porto, T. B. Estudo da Interação de Paredes de Alvenaria Estrutural com a Estrutura de Fundação. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- SAP2000. Integrated Software for Structural Analysis and Design. Analysis Reference Manual, v.11. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA, 2006.
- Silva, N. U. P. Análise de Tensões Verticais em Edifícios de Alvenaria Estrutural Considerando a Interação Solo-Estrutura. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- Soares, J. M. Estudo Numérico-Experimental da Interação Solo-Estrutura em Dois Edifícios do Distrito Federal. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.