

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ENGENHARIA CIVIL

BRUNO GOLDMANN BIGARELLA

**ANÁLISE DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM FUNDAÇÕES
SUPERFICIAIS COM E SEM A CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DE VIZINHANÇA**

Porto Alegre

2021

Bruno Goldmann Bigarella

**ANÁLISE DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM FUNDAÇÕES
SUPERFICIAIS COM E SEM A CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DE VIZINHANÇA
ATRAVÉS DA INTEGRAÇÃO EXCEL – SAP2000**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Jorge Luis Palomino Tamayo

Porto Alegre

2021

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hipótese de Winkler	18
Figura 2 - Molas de Translação	21
Figura 3 - Molas de rotação	22
Figura 4 - Principais formas de recalques das edificações	29
Figura 5 - Relação entre os valores de distorção angular e as patologias geradas ...	30
Figura 6 - Efeito da consideração da ISE no recalque.....	31
Figura 7 - Viga de rigidez equivalente à estrutura.....	31
Figura 8 - Comparação dos valores do recalque e do recalque diferencial com e sem ISE	32
Figura 9 - Consideração do processo construtivo na análise estrutural.....	33
Figura 10 - Influência do processo construtivo nos recalques.....	34
Figura 11 - Variação de ΔW_{max} em função de K_{ss} - Pórtico longitudinal periférico.....	35
Figura 12 - Variação de ΔW_{max} em função de K_{ss} - Pórtico longitudinal central..	35
Figura 13 - Edificações vizinhas construídas ao mesmo tempo	36
Figura 14 - Edificações vizinhas construídas em tempos diferentes	37
Figura 15 - Construção de uma edificação entre outras já existentes.....	38
Figura 16 - Construção de duas novas edificações próximas a uma já existente	38
Figura 17 - Relação entre recalque induzido x distância entre os prédios.....	39

Figura 18 - Influência da rigidez na ISE.....	40
Figura 19 - Valores do coeficiente adicional γ_n	43
Figura 20 - Matriz de influência para a consideração do efeito da vizinhança nos recalques	45
Figura 21 - Interface do programa	45
Figura 22 - Células para a definição das coordenadas da edificação.....	46
Figura 23 - Definição das propriedades do material.....	47
Figura 24 - Definição das propriedades dos pilares.....	48
Figura 25 - Definição das propriedades das vigas	48
Figura 26 - Definição das propriedades das lajes	49
Figura 27 - Definição das propriedades do solo	50
Figura 28 - Definição das dimensões das sapatas quadradas.....	50
Figura 29 - Determinação dos coeficientes de mola [Pais e Kausel](Fonte: Autor, 2021).....	51
Figura 30 - Definição do recalque através da teoria da elasticidade	52
Figura 31 - Determinação do k_v (kN/m ³).....	52
Figura 32 - Painel de comandos do programa	53
Figura 33 - Prédio de 50 andares com 10 vãos em Y e 10 vãos em X	54
Figura 34 - Prédio de 10 andares com 20 vãos em Y e 20 vãos em X	54
Figura 35 - Fluxograma da rotina computacional para as molas globais e distribuídas [Iteração].....	56

Figura 36 - Fluxograma para a rotina computacional do método de Pais e Kausel .	57
Figura 37 - Pórtico plano proposto por Souza e Reis (2008).....	58
Figura 38 - Numeração das fundações.....	60
Figura 39 – Nomenclatura das vigas e dos pilares	61
Figura 40 - Forças normais máximas nos pilares	63
Figura 41 - Momento fletor em X nos pilares	64
Figura 42 - Momento fletor em Y nos pilares	65
Figura 43 - Momento na viga 2	65
Figura 44 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança	66
Figura 45 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança.....	67
Figura 46 - Recalque absoluto x Limite tolerável [engastado].....	68
Figura 47 - Recalque absoluto x limite tolerável [molas globais e molas distribuídas].....	69
Figura 48 - Recalque absoluto x limite tolerável [Pais e Kausel].....	69
Figura 49 - Forças normais máximas nos pilares do cenário 2.....	70
Figura 50 - Momento fletor em X nos pilares do cenário 2.....	71
Figura 51 - Momento fletor em Y nos pilares do cenário 2.....	72
Figura 52 - Momento na viga 2 do cenário 2.....	72
Figura 53 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança do cenário 2	73
Figura 54 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança do cenário 2	74

Figura 55 - Recalque absoluto x Limite tolerável no cenário 2 [engastado].....	75
Figura 56 - Recalque absoluto x limite tolerável no cenário 2 [molas globais e molas distribuídas]	76
Figura 57 - Recalque absoluto x limite tolerável no cenário 2 [Pais e Kausel].....	76
Figura 58 - Modelo da estrutura estudada no cenário 3.....	77
Figura 59 - Forças normais máximas nos pilares do cenário 3.....	77
Figura 60 - Momento fletor em X nos pilares do cenário 3.....	78
Figura 61 - Momento fletor em Y nos pilares do cenário 3.....	79
Figura 62 - Momento na viga 2 do cenário 3.....	79
Figura 63 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança do cenário 3	80
Figura 64 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança do cenário 3	81
Figura 65 - Recalque absoluto x Limite tolerável do cenário 3 [engastado].....	82
Figura 66 - Recalque absoluto x limite tolerável do cenário 3 [molas globais e molas distribuídas]	82
Figura 67 - Recalque absoluto x limite tolerável do cenário 3 [Pais e Kausel].....	83
Figura 68 - Modelo da estrutura estudada no cenário 4.....	83
Figura 69 - Forças normais máximas nos pilares do cenário 4.....	84
Figura 70 - Momento fletor em X nos pilares do cenário 4.....	85
Figura 71 - Momento fletor em Y nos pilares do cenário 4.....	86
Figura 72 - Momento na viga 2 do cenário (Fonte: Autor, 2021)	87
Figura 73 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança do cenário	87

Figura 74 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança do cenário 4.....	88
Figura 75 - Recalque absoluto x Limite tolerável do cenário 4 [engastado].....	89
Figura 76 - Recalque absoluto x limite tolerável do cenário 4 [molas globais e molas distribuídas]	89
Figura 77 - Recalque absoluto x limite tolerável do cenário 4 [Pais e Kausel].....	90
Figura 78 - Modelo da estrutura estudada no cenário 5.....	90
Figura 79 - Forças normais máximas nos pilares do cenário 5.....	91
Figura 80 - Momento fletor em X nos pilares do cenário 5.....	92
Figura 81 - Momento fletor em Y nos pilares do cenário 5.....	93
Figura 82 - Momento na viga 2 do cenário 5.....	94
Figura 83 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança do cenário 5	94
Figura 84 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança do cenário 5	95
Figura 85 - Recalque absoluto x Limite tolerável do cenário 5 [engastado].....	96
Figura 86 - Recalque absoluto x limite tolerável do cenário 5 [molas globais e molas distribuídas]	96
Figura 87 - Recalque absoluto x limite tolerável do cenário 5 [Pais e Kausel].....	97
Figura 88 - Momento fletor na viga 2 (Apoios o Engastados)	102
Figura 89 - Diagramas de momentos da viga 2 (Molas Globais)	102
Figura 90 - Diagramas de momentos da viga 2 (Molas Distribuídas).....	103
Figura 91 - Diagramas de momentos da viga 2 (Pais e Kausel, 1988).....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de k_v (kN/m ³)	23
Tabela 2 - Valores de k_v	24
Tabela 3 - Fator de forma I_p	28
Tabela 4 - Valores limites da rotação relativa ou distorção angular.....	29
Tabela 5 - Valores de coeficiente de Poisson	41
Tabela 6 - Classificação do solo em função do índice de resistência a penetração..	41
Tabela 7 - Módulo de Elasticidade do solo	42
Tabela 8 - Diferentes modelos de apoios contemplados pelo programa	53
Tabela 9 - Comparação dos valores de esforços normais e de recalques apresentados por Souza e Reis (2000) com os valores encontrados pelas rotinas computacionais.....	59
Tabela 10 - Modelos do pórtico proposto por Souza e Reis (2000) modelados apartir da rotina computacional criada	59
Tabela 11 - Propriedade do concreto utilizado no estudo.....	61
Tabela 12 - Relação entre as reações verticais com e sem o efeito da vizinhança [%].....	98
Tabela 13 - Variação dos momentos fletores nos pilares no eixo X.....	100
Tabela 14 - Variação dos momentos fletores nos pilares no eixo Y.....	101
Tabela 15 - Relação entre os momentos fletores da viga no cenário 1 e no cenário 2.....	104

Tabela 16 - Variação dos recalques absolutos considerando o efeito da vizinhança.....105

Tabela 17 - Número total de casos que não passaram na verificação dos recalques diferenciais sem efeito da vizinhança 106

Tabela 18 - Número total de casos que não passaram na verificação dos recalques diferenciais com efeito da vizinhança..... 106

LISTA DE ABREVIATURA

ISE- Interação solo-estrutura

NIST – *National Institute of Standards and Technology*

API – *Application Programming Interface*

P - Carga do Pilar

G - Módulo de Rigidez ao Cisalhamento do Solo

μ – *Coefficiente de Poisson*

B1 (x1, y1, z) - Coordenadas do ponto onde quer se saber o recalque ω

B2 (x2, y2, c) - Coordenadas do ponto de aplicação da carga

σ – *Tensão de contato média na base da fundação*

ω – *Deslocamento Vertical (recalque)*

k_v – *Coefficiente de reação vertical*

k_z – *Coefficiente de Reação Vertical para uma Mola Global*

$k_{x,y}$ – *Coefficiente de Reação Horizontal para uma Mola Global*

k_{θ_x} – *Coefficiente de Reação à Rotação no eixo X para uma Mola Global*

k_{θ_y} – *Coefficiente de Reação à Rotação no eixo Y para uma Mola Global*

N – *Força Vertical*

H – *Força Horizontal*

M – *Momento*

v – Deslocamento Horizontal

φ – Deslocamento Rotacional

$(k_s^v)_{Placa}$ – Coeficiente de mola do solo obtido pelo ensaio de placa

$B_{Fundação}$ – Dimensão do menor lado da fundação

B_{Placa} – Dimensão do menor lado da placa

$A_{Fundação}$ – Área da Fundação

A_{Placa} – Área da Placa

$L_{Fundação}$ – Dimensão do maior lado da fundação

ω_{inst} – Recalque imediato (instantâneo)

$\omega_{adensamento}$ – Recalque devido ao adensamento do solo

ω_{creep} – Recalque devido às deformações lentas do solo

E_s – Módulo de elasticidade do solo

I_p – Fator de forma

$E_c * I$ = rigidez da viga equivalente

$\sum E_c * I_v$ =somatória das rigidezes das vigas da superestrutura

$\sum E_a * I_a$ =somatório das rigidezes das alvenarias

q_u – Resistência à compressão não – drenada

σ_{adm} – tensão admissível do solo

N_{spt} – Índice de Resistência à Penetração do Solo

I_x – Momento de inércia em X

I_y – *Momento de inércia em Y*

RESUMO

Este trabalho refere-se à consideração da Interação Solo-Estrutura em estruturas de concreto apoiados em sapatas quadradas rígidas sobre um solo isotrópico e uniforme. Inicialmente é realizada uma revisão bibliográfica afim de apresentar ao leitor os principais trabalhos e conceitos que são abordados nos itens seguintes. Em seguida diferentes configurações de edificações são apresentadas e analisadas tanto considerando a ISE quanto não a considerando. Para todos os cenários, as estruturas também foram analisadas levando-se em consideração a influência do efeito de vizinhança nas fundações. Os resultados obtidos destas análises são comparados entre si com o objetivo de apresentar as influências que a ISE e que a consideração ou não da vizinhança exercem nos esforços e recalques da estrutura.

Para a realização das análises das estruturas utilizou-se a integração entre os softwares Excel e SAP2000 sendo o Excel responsável por receber os dados referentes as edificações analisadas e o SPA2000 responsável pela modelagem e análise da estrutura.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivos Específicos	17
3. LIMITAÇÕES DO TRABALHO	17
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1. Conceitos sobre a deformabilidade do solo	19
4.1.1. Solo como meio contínuo	19
4.1.2. Hipótese de Winkler	20
4.1.3. Determinação do módulo de reação vertical através de valores padronizados.	23
4.1.4. Determinação do módulo de reação vertical através do ensaio de placa.....	24
4.1.5. Determinação do coeficiente de mola através das equações de Pais & Kausel.	25
4.1.6. Determinação do coeficiente de mola através do recalque vertical estimado	26
4.1.7. Determinação do recalque em fundações superficiais.....	27
4.2. Influência dos recalques em fundações rasas	28
4.3. Fatores que influenciam a ISE.....	30
4.3.1. Rigidez relativa estrutura-solo.....	30
4.3.2. Número de pavimentos.....	32
4.3.3. Processo construtivo	33
4.3.4. Forma em planta da edificação	34
4.3.5. Edificações vizinhas	36
4.3.6. Influência do tempo	39
5. METODOLOGIA.....	40
5.1. Método Iterativo	56

5.1.1. Molas Globais e Distribuídas	57
5.2. Método não Iterativo	59
5.2.1. Pais & Kausel (1988).....	59
6. RESULTADOS	60
6.1. Verificação das Rotinas Computacionais	60
6.2. Estudo Paramétrico de Prédio de Pequeno Porte.....	61
6.3. Cenário 1	64
6.4. Cenário 2	70
6.5. Cenário 3	77
6.6. Cenário 4	83
6.7. Cenário 5	90
6.8. Discussão dos resultados	97
6.8.1. Reações verticais	97
6.8.2. Momentos fletores em X e em Y nos pilares.....	99
6.8.3. Momentos fletores na viga 2	102
6.8.4. Recalques absolutos.....	105
6.8.5. Recalques diferenciais	106
REFERÊNCIAS.....	109
ANEXO A - VBA ENGASTE	112
ANEXO B - VBA MOLAS GLOBAIS.....	116
ANEXO C - VBA MOLAS DISTRIBUIDAS.....	121
ANEXO D - VBA PAIS & KAUSEL.....	128

1. INTRODUÇÃO

Segundo Gusmão Filho (2002), as edificações são divididas entre superestrutura, infraestrutura, representada pelas fundações, e o solo, que recebe as forças provenientes da superestrutura.

Tradicionalmente, os engenheiros estruturais optam por calcular a estrutura considerando os apoios como sendo indeslocáveis e, em seguida, passam os resultados obtidos para outra equipe de engenharia, responsável pelo dimensionamento das fundações (IWAMOTO, 2000). Segundo Silva, S. E.; França, W. P. F.; Ayala, R. J. L (2015), entretanto

A consideração de vínculos indeslocáveis nas análises estruturais tem se mostrado ineficaz ao desprezar a interação provocada pela rigidez da estrutura e seus incrementos de solicitações a serem resistidos pelo solo.

A análise da interação solo-estrutura visa, portanto, sanar esta deficiência do método tradicional ao avaliar a estrutura, a fundação e o solo como um sistema único (NIST GCR 12-917-21, 2012). Tal consideração é importante para o correto dimensionamento das estruturas, uma vez que duas estruturas idênticas submetidas às mesmas cargas podem apresentar diferentes reações dependendo do solo sobre o qual elas serão construídas (REIS, 2000).

Apesar de pesquisas substanciais sobre a ISE (Interação Solo Estrutura) estarem disponíveis há muitos anos, a implementação da ISE na prática ainda é relativamente limitada. Os problemas associados com a aplicação prática da ISE originam-se da fraca compreensão de seus fundamentos, uma vez que tal tópico normalmente não é ensinado nos cursos de graduação e, portanto, deve ser aprendido de forma independente. Além disso, a prática é impedida por uma literatura usualmente de difícil compreensão, com exemplos esparsos e que apresentam orientações limitadas. Tais motivos fazem com que a ISE seja raramente aplicada ou aplicada de forma inadequada (NIST GCR 12-917-21, 2012).

Com o desenvolvimento de computadores mais potentes e o surgimento de técnicas numéricas mais avançadas, a análise de estruturas complexas, como é o caso da aplicação da ISE, vem se tornando cada vez mais acessível. Por ser um assunto relativamente complexo que envolve muitas equações e parâmetros, sua aplicação está diretamente ligada a utilização

de computadores, uma vez que somente através deles se torna viável a utilização da ISE em projetos estruturais (IWAMOTO, 2000).

2. OBJETIVOS

Elaborar configurações de edificações sob diferentes cenários de cargas, geometrias e condições de apoio, utilizando uma ferramenta numérica computacional que integra a linguagem de programação Visual Basic com o programa de cálculo estrutural SAP2000, levando em consideração a interação da fundação com o solo. Para esse propósito, definiu-se os seguintes objetivos específicos.

2.1. Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos customizar o programa SAP 2000 através de sua interface de programação (API) para a geração automática de modelos de edificações com fundações rígidas; estudar e elaborar tabelas comparativas, sobre as diferentes abordagens, considerando as diferentes formas de apoios das fundações superficiais; desenvolver cenários de aplicação que mostrem a potencialidade da ferramenta numérica.

3. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho apresenta como limitações: A modelagem numérica de estruturas tipo prédios através de barras considerando o comportamento linear elástico dos materiais; as fundações são consideradas superficiais apoiadas diretamente sobre o solo de fundação, através de sapatas quadradas; o solo de fundação é considerado isotrópico e uniforme; a interação solo estrutura (ISE) é considerada através de métodos desacoplados e acoplados; a planta é regular para a modelagem do problema; não foram considerados carregamentos laterais, e distribuição das cargas das lajes é bidirecional.

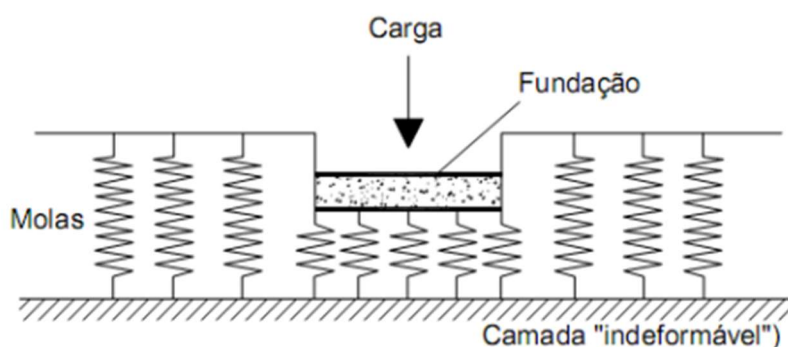
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise da ISE considerando o solo como um meio contínuo é considerada por Scarlat (1993) a forma mais adequada para se analisar a ISE uma vez que assume o solo e a estrutura como um único sistema possibilitando assim a análise da influência que o recalque

de um pilar exerce sobre as demais fundações (SOUZA & REIS, 2008). Esta hipótese é estudada por Mindlin (1936) que propõe equações para se calcular a influência que a carga proveniente da estrutura exerce em diferentes pontos do solo. Tal equação é melhor apresentada no item 4.1.1.

Mais simples do que a hipótese de meio contínuo, a hipótese de Winkler é descrita por Antoniazzi (2011) como sendo a “substituição do solo como molas de rigidez equivalentes e independentes entre si”. Ela pode ser melhor compreendida ao se imaginar o solo como um colchão de de molas que se deformam de forma independente (ALONSO, 1991). Tal analogia, entretanto, representa uma simplificação dos modelos reais uma vez que “considera que o solo é um meio perfeitamente elástico, homogêneo, isotrópico e com relação linear entre forças e deslocamentos” (ALONSO, 1991).

Figura 1 - Hipótese de Winkler



(Fonte: Velloso e Lopes, 2011)

Diversos estudos já foram realizados para sugerir formas de se representar o efeito do solo na estrutura através da consideração da hipótese de molas isoladas proposta por Winkler. Antoniazzi (2011) sugere a utilização de molas distribuídas na fundação, conforme apresentado na equação 4. Souza e Reis (2008), por outro lado, consideram que uma boa aproximação é a consideração de molas globais nos apoios das estruturas apresentadas nas equações de 5 a 9. Pais e Kausel (1988) também sugerem a utilização de molas globais, mas, diferentemente da solução de Souza e Reis que necessita da definição de um recalque estimado através da análise inicial da estrutura como apoios engastados, esta solução sugerem uma alternativa que relaciona diretamente as dimensões das fundações e as propriedades do solo com o comportamento esperado da fundação (NIST GCR 12-917-21, 2012).

Apesar de ser consenso que a ocorrência de recalques diferenciais resulta no surgimento de patologias na edificação, ainda não é consenso entre os pesquisadores a relação entre a magnitude do recalque diferencial e a patologia que irá ser gerada. Tal afirmação confirma-se por exemplo nas diferentes indicações de recalque angular máximo recomendado para evitar danos estruturais. Para Skempton e MacDonald o recalque diferencial não deveria ser maior que 1/150, Meyerhof por outro lado recomenda a consideração de 1/250 como limite máximo e Polshin e Toka sugerem 1/200 (VELLOSO & LOPES, 2004).

A rigidez relativa estrutura-solo exerce grande influência na intensidade dos recalques diferenciais. Desta forma, fatores que ocasionam o aumento da rigidez relativa do solo como o aumento do número de pavimentos, segundo Antoniazzi (2011), ou quanto mais próxima de um quadrado for a planta da edificação, como aponta Barata (1986) exercem também influência na ISE tendo como principal característica a diminuição dos recalques absolutos a medida que a rigidez aumenta.

Outros fatores que influenciam a ISE são: o processo construtivo uma vez que foi constatado a tendência a homogeneização dos recalques ao longo da construção (GUSMÃO & GUSMÃO FILHO 1994); devido ao pré adensamento do solo no caso de uma edificação ser construída antes de outra ou devido a sobreposição dos recalques no caso de edificações construídas ao mesmo tempo (COSTA NUNES 1956), e o tempo que, de acordo com a rigidez da estrutura, pode apresentar diferentes formas de recalque CHAMECKI (1969).

4.1. Conceitos sobre a deformabilidade do solo

As duas principais maneiras de se considerar a ISE são através da hipótese de Winkler e a consideração do solo como um meio contínuo (VELLOSO & LOPES, 2004).

4.1.1. Solo como meio contínuo

Uma das maneiras de se considerar esta hipótese é através da equação 01 proposta por Mindlin (1936) para o cálculo de recalque devido a uma carga concentrada aplicada a certa profundidade da superfície. Tal hipótese assume que “o solo é uma meio tridimensional semi-infinito formado pelo mesmo material (homogeneidade do meio), com comportamento

idêntico em todas as direções (isotropia) e com volume isento de vazios (continuidade)” (CAD/ TQS, 2011).

$$\omega = \frac{P}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{3-4\mu}{R1} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R2} + \frac{(z-c)^2}{R1^3} + \frac{(3-4\mu)(z+c)^2 - 2cz}{R2^3} + \frac{6cz(z+c)^2}{R2^5} \right] \quad (1)$$

com,

$$R1 = \sqrt{(x1+x2)^2 + (y1+y2)^2 + (z-c)^2} \quad (2)$$

$$R2 = \sqrt{(x1+x2)^2 + (y1+y2)^2 + (z+c)^2} \quad (3)$$

onde P é a carga do pilar em (kN); G é módulo de rigidez ao cisalhamento do solo em (kN/m²); μ é o coeficiente de Poisson; x1, y1 e z são as coordenadas do ponto onde quer se saber o recalque em (m); x2, y2 e c são as coordenadas do ponto de aplicação da carga em (m), e ω é o deslocamento vertical em (m) (recalque).

4.1.2. Hipótese de Winkler

A rigidez de cada mola pode ser obtida através da equação 04 (ANTONIAZZI, 2011).

$$k_v = \frac{\sigma}{\omega} \quad (4)$$

onde ω é o recalque (m) gerado pela tensão σ (kN/m²) aplicada sobre uma área de transferência. Sendo assim, as unidades resultantes de k_v são (kN/m³).

De maneira mais pratica, o conjunto de molas distribuídas na base da fundação pode ser substituída por molas globais para os deslocamentos verticais, horizontais e de rotação posicionadas nos nós centrais das fundações (SOUZA e REIS, 2008) e permitindo assim simplificar a modelagem numérica evitando propriamente a modelagem das sapatas.

Tais coeficientes de mola podem ser obtidos com as seguintes equações:

$$K_z = \frac{N}{\omega} \quad (5)$$

$$K_x = \frac{H_x}{v_x} \quad (6)$$

$$K_y = \frac{H_y}{v_y} \quad (7)$$

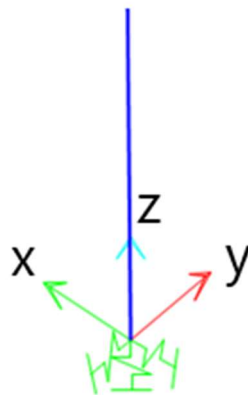
$$K_{\theta_x} = \frac{M_x}{\varphi_x} \quad (8)$$

$$K_{\theta_y} = \frac{M_y}{\varphi_y} \quad (9)$$

onde K_z , K_x e K_y são, respectivamente as rigidezes das molas ao deslocamento nos eixos z, x e y em (kN/m); K_{θ_x} e K_{θ_y} são as rigidezes à rotação das molas nos eixos x e y em (kN*m*rad⁻¹), respectivamente; N, H_x, H_y, M_x e M_y são, respectivamente, a reação em z, reações em x e y em (kN) e os momentos fletores em torno dos eixos x e y em (kN*m); ω , v_x e v_y são os deslocamentos em z, x e y em (m), respectivamente, e φ_x e φ_y são as rotações no eixo x e no eixo y em (rad)

A Figura 2 apresenta as molas de translação nos eixos x, y e z representados pelas setas verde, vermelho e ciano, respectivamente.

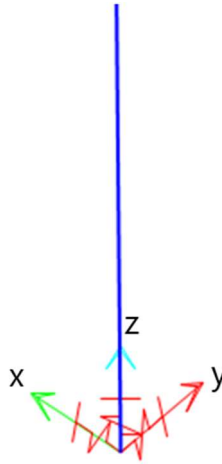
Figura 2 - Molas de Translação



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 3 apresenta as molas de rotação nos eixos x, y e z também representados pelas mesmas cores dos eixos apresentados na figura anterior.

Figura 3 - Molas de rotação



(Fonte: Autor, 2021)

Cabral (2019) propõe a utilização das seguintes equações para a consideração da rigidez do solo como molas globais:

$$K_z = k_v * A_{fundação} \quad (10)$$

$$K_{\theta x} = k_v * I_x \quad (11)$$

$$K_{\theta y} = k_v * I_y \quad (12)$$

com,

$$I_x = \frac{B_x * B_y^3}{12} \quad (13)$$

$$I_y = \frac{B_y * B_x^3}{12} \quad (14)$$

$$A_{fundação} = B_x * B_y \quad (15)$$

onde B_x é a dimensão da fundação no eixo x em (m); B_y é a dimensão da fundação no eixo y em (m); $A_{fundação}$ é a área da fundação em (m²); I_x e I_y são, respectivamente, os

momentos de inércia de área da fundação em relação ao eixo x e no eixo y; K_z é a rigidez da mola ao deslocamento nos eixos z (kN/m); e $K_{\theta x}$ e $K_{\theta y}$ são as rigidezes à rotação das molas nos eixos x e y em (kN*m*rad⁻¹), respectivamente

É importante salientar que a adoção das referidas fórmulas acima, envolve implicitamente a consideração de uma fundação rígida, onde não é possível a geração de trações no solo. O valor do módulo de reação vertical k_v , pode ser obtido através do chamado ensaio de placa, apresentado no Item 4.1.4 deste trabalho e descrito pela NBR6489 – Prova de Carga Direta sobre terreno de fundação. No entanto, falta de dados de campo ou ensaios, podem ser utilizados valores diretamente de tabelas como se apresentara na próxima seção.

4.1.3. Determinação do módulo de reação vertical através de valores padronizados

Apesar de não ser o método mais preciso para se obter os coeficientes de mola, uma vez que é apenas uma alternativa aproximada, nos casos em que não é possível se estimar os valores de k_v e de forma adequada, seja por falta de ensaios ou de dados, este método pode auxiliar na elaboração de modelos estruturais mais próximos da realidade visto que possibilita a consideração da deformação do solo através de valores k_v já consolidados na literatura como os apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2, respectivamente, por Terzaghi (1955) e de Moraes (1976) (ANTONIAZZI, 2011).

Tabela 1 - Valores de k_v (kN/m³)

Argilas	Rija	Muito Rija	Dura
qu (MPa)	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	> 0,4
Faixa de valores	16000 a 32000	32000 a 64000	> 64000
Valor proposto	24000	48000	96000
Areais	Fofas	Mediamente Compacta	Compacta
Faixa de valores	6000 a 19000	19000 a 96000	96000 a 320000
Areia acima do NA	13000	42000	160000
Areias submersas	8000	26000	96000

(Fonte: Terzaghi, 1955)

Tabela 2 - Valores de k_v

Tipo de solo	k_v (kN/m ³)
Turfa leve	5000 a 10000
Turfa pesada	10000 a 15000
Areia fina	10000 a 15000
Aterro de silte, de areia e cascalho	10000 a 20000
Argila molhada	20000 a 30000
Argila úmida	40000 a 50000
Argila seca	60000 a 80000
Argila seca endurecida	100000
Silte compactado com areia e pedra	80000 a 100000
Silte compactado com areia e muita pedra	100000 a 120000
Cascalho miúdo com areia fina	80000 a 120000
Cascalho miúdo com areia grossa	120000 a 150000
Cascalho miúdo com pouca areia	150000 a 200000
Cascalho miúdo com pouca areia compactada	200000 a 250000

(Fonte: Moraes. 1976)

4.1.4. Determinação do módulo de reação vertical através do ensaio de placa

Ainda que o ensaio de placa seja considerado por Décourt e Quaresma Filho (1996) como a forma mais precisa de se obter os coeficientes de reação vertical, este método não é muito utilizado na prática uma vez que apresenta custo elevado e duração significativa. (ANTONIAZZI, 2011).

O ensaio consiste na compressão de uma placa, com área maior ou igual a 0,5 m², no solo. Em posse dos valores da carga aplicada e do recalque gerado no solo é possível estimar os valores do coeficiente de reação vertical utilizando a equação 4. Entretanto, Velloso e Lopes (2004) comentam que os valores dos coeficientes de reação vertical encontrados nos ensaios de placa devem ser corrigidos para as características da fundação real, utilizando a equação 16, para solos arenosos, e a equação 17, para solos argilosos rijos a muito rijos, visto que os coeficientes dependem tanto do solo quanto da estrutura.

$$k_v = (k_s^v)_{Placa} \left(\frac{B_{Fundação} + B_{Placa}}{2B_{Fundação}} \right)^2 \quad (16)$$

$$k_v = (k_s^v)_{Placa} \left(\frac{A_{Placa}}{A_{Fundação}} \right) \quad (17)$$

onde $(k_s^v)_{Placa}$ é o valor do coeficiente de reação vertical encontrado no ensaio de placa em (kN/m³); $B_{Fundação}$ é o lado da fundação em (m); B_{Placa} é o lado da placa em (m); A_{Placa} é a área da placa em (m²); $A_{Fundação}$ é a área da fundação em (m²), e k_v é o coeficiente de reação vertical da fundação em (kN/m³).

4.1.5. Determinação do coeficiente de mola através das equações de Pais & Kausel

Pais & Kausel (1988) propuseram fórmulas aproximadas para a descrição da ISE em fundações rígidas. As fórmulas aproximadas fornecem uma boa aproximação dos coeficientes de mola das fundações e seu uso é muito simples, porém estas equações são válidas apenas para fundações cilíndricas e retangulares, formas mais comuns usadas na prática.

$$K_z = \frac{GB}{1 - \mu} \left[3,1 \left(\frac{L_{Fundação}}{B_{Fundação}} \right)^{0,75} + 1,6 \right] \quad (18)$$

$$K_y = \frac{GB_{Fundação}}{2 - \mu} \left[6,8 \left(\frac{L_{Fundação}}{B_{Fundação}} \right)^{0,65} + 0,8 \left(\frac{L_{Fundação}}{B_{Fundação}} \right) + 1,6 \right] \quad (19)$$

$$K_x = \frac{GB_{Fundação}}{2 - \mu} \left[6,8 \left(\frac{L_{Fundação}}{B_{Fundação}} \right)^{0,65} + 2,4 \right] \quad (20)$$

$$K_{\theta z} = GB_{Fundação}^3 \left[4,25 \left(\frac{L_{Fundação}}{B_{Fundação}} \right)^{2,45} + 4,06 \right] \quad (21)$$

$$K_{\theta y} = \frac{GB_{Fundação}^3}{1 - \mu} [3,73 \left(\frac{L_{Fundação}}{B_{Fundação}}\right)^{2,4} + 0,27] \quad (22)$$

$$K_{\theta x} = \frac{GB_{Fundação}^3}{1 - \mu} [3,2 \left(\frac{L_{Fundação}}{B_{Fundação}}\right)^{0,8} + 0,8] \quad (23)$$

com,

$$G = \frac{Es}{2 * (1 + \mu)} \quad (24)$$

onde K_z , K_x e K_y são, respectivamente as rigidezes das molas ao deslocamento nos eixos z, x e y em (kN/m); $K_{\theta x}$, $K_{\theta y}$ e $K_{\theta z}$ são as rigidezes à rotação das molas nos eixos x, y e z em (kN*m*rad⁻¹), respectivamente; $L_{Fundação}$ é a dimensão do maior lado da fundação em (m); $B_{Fundação}$ é a dimensão do menor lado da fundação em (m); G é o módulo de rigidez ao cisalhamento do solo em (kN/m²); μ é o coeficiente de Poisson, e Es é o módulo de elasticidade do solo em (kN/m²)

4.1.6. Determinação do coeficiente de mola através do recalque vertical estimado

Como já apresentado no item 4.1.2 o k_v pode ser calculado dividindo o valor da tensão de contato média na base da fundação pelo recalque produzido na base da fundação. Tal técnica consiste em uma análise iterativa na qual inicialmente modela-se a estrutura com apoios engastados nas fundações. Em posse dos valores das reações obtidas nestes apoios calcula-se o recalque, a tensão e, por fim, o k_v da equação 4. Modela-se, então, a estrutura considerando-a sobre apoios elásticos com o coeficiente de k_v obtido na etapa anterior. Com os novos valores das reações encontradas calcula-se o novo recalque, tensão e k_v . Este ciclo é repetido até que haja convergência entre os valores de duas iterações (SOUZA e REIS, 2008). É importante salientar que o cálculo dos recalques dentro do método iterativo pode ser feito através de algum outro procedimento analítico como o método de Mindlin (1936) ou similar, onde pode ou não ser levado em consideração o efeito da vizinhança. Ou seja, o recalque num ponto qualquer é influenciando não apenas pela carga atuante nesse local, mas também pelas cargas adjacentes.

4.1.7. Determinação do recalque em fundações superficiais

O recalque do solo pode ser dividido em recalques instantâneos, recalques devido ao adensamento e recalque devido à fluência do material chamada na literatura inglesa de *creep*, conforme é apresentado nas equações 25 e 26, abaixo (SIMONS e MENZIES, 1977).

$$\omega = \omega_{inst} + \omega_{tempo} \quad (25)$$

$$\omega_{tempo} = \omega_{adensamento} + \omega_{creep} \quad (26)$$

onde ω é o deslocamento vertical em (mm); ω_{inst} é o recalque imediato em (mm); $\omega_{adensamento}$ é o recalque devido ao adensamento do solo em (mm), e ω_{creep} é o recalque devido à fluência do solo em (mm).

Os recalques imediatos ocorrem assim que a carga é aplicada; os recalques devido ao adensamento originam-se da diminuição da poropressão de água em caso de solo saturado, e o *creep* representa a deformação lenta do solo (SIMONS e MENZIES, 1977).

A maior parcela dos recalques ocorre devido ao recalque imediato e, portanto, é comum que os recalques devido ao adensamento e ao *creep* não sejam considerados na análise dos recalques numa fase preliminar (SOUZA e REIS, 2008).

O recalque imediato pode ser calculado pela teoria da elasticidade através da equação 27 proposta por Perloff (1975). Esta equação é válida para meios contínuos, elásticos, homogêneos, isotrópicos e semi-infinitos (SOUZA e REIS, 2008). A formula leva em consideração a forma da sapata a partir dos valores do parâmetro I_p estabelecidos na Tabela 3.

$$\omega_{inst} = \sigma B_{Fundação} \left[\frac{1 - \mu^2}{ES} \right] I_p \quad (27)$$

onde ω_{inst} é o recalque da fundação em (m); σ é a tensão de contato da fundação sobre o solo em (kN/m²); $B_{Fundação}$ é o lado da fundação em (m); ES é o módulo de elasticidade do solo em (kN/m²); μ é o coeficiente de Poisson, e I_p é o fator de forma sugerido por Perloff (1975).

Tabela 3 - Fator de forma I_p

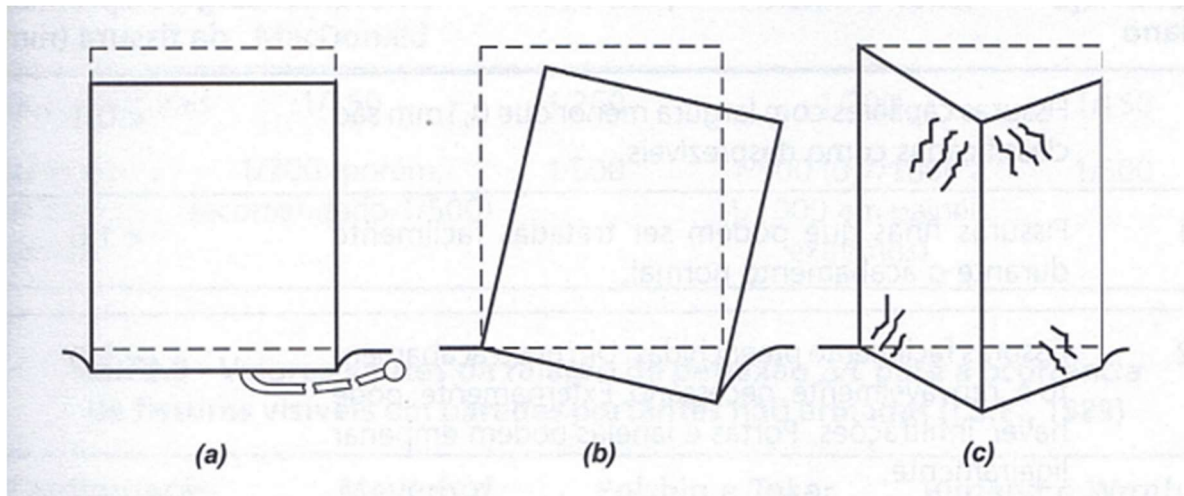
Sapata Flexível				Rígida
Forma	Centro	Canto	Médio	
Circular	1,00	0,64	0,85	0,79
Quadrada	1,12	0,56	0,95	0,99
L/B = 1,5	1,36	0,67	1,15	
2	1,52	0,76	1,30	
3	1,78	0,88	1,52	
5	2,10	1,05	1,83	
10	2,53	1,26	2,25	
100	4,00	2,00	3,70	

(Fonte: Perloff, 1975)

4.2. Influência dos recalques em fundações rasas

Há três formas principais que uma edificação pode se deformar ante as cargas atuantes conforme mostrado na Figura 4. O primeiro (Figura 4a) é resultado do recalque vertical homogêneo da edificação que ocasiona principalmente danos estéticos e funcionais. O segundo (Figura 4b) é gerado quando há o giro da estrutura e, assim como o caso anterior, gera também danos estéticos e funcionais. O terceiro (Figura 4c) ocorre nos casos em que os pilares do centro da edificação recalcam mais do que os da periferia e, diferentemente do primeiro e do segundo caso, pode resultar em danos estruturais. (VELLOSO & LOPES, 2004).

Figura 4 - Principais formas de recalques das edificações



(Fonte: Velloso e Lopes, 2004)

É usual a utilização das distorções angulares e relação de deflexão para quantificar as deformações admissíveis nos edifícios sem, entretanto, haver um consenso nos valores estabelecidos, como é possível notar na Tabela 4 (VELLOSO & LOPES, 2004).

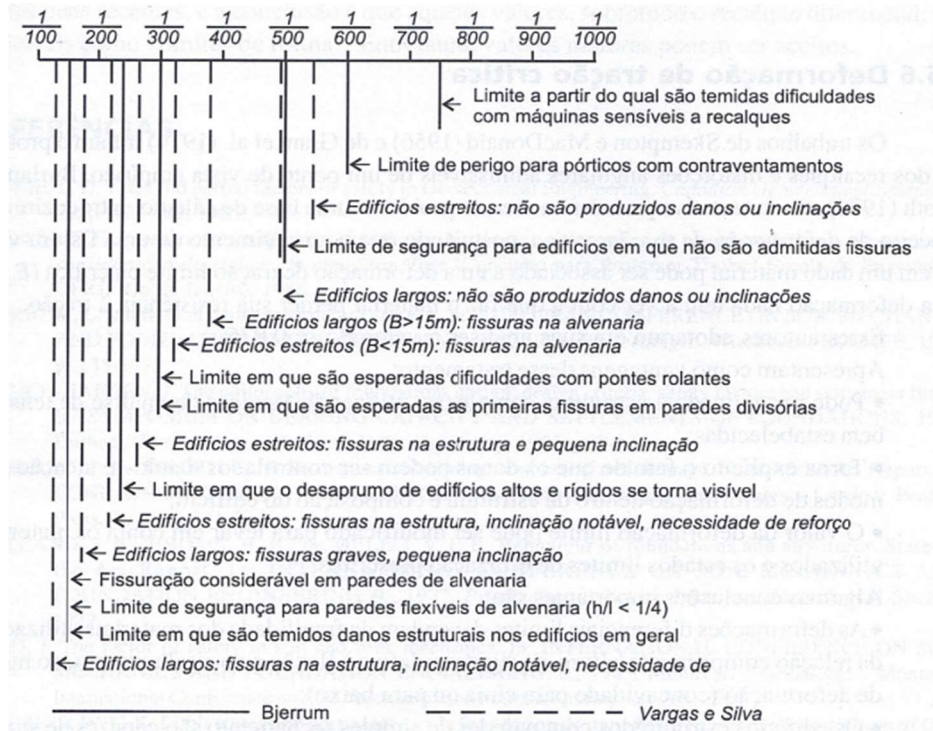
Tabela 4 - Valores limites da rotação relativa ou distorção angular

	Skempton e MacDonald	Meyerhof	Polshin e Tokar	Bjerrum
Danos estruturais	1/150	1/250	1/200	1/150
Fissuras em paredes e divisórias	1/300 (porém o recomendado é 1/500)	1/500	1/500 (0,7/1000 a 1/1000 em painéis extremos)	1/500

(Fonte: Velloso e Lopes, 2004)

Bjerrum (1963) e Vargas e Silva (1973) apresentaram uma relação entre os valores de distorção angular e os problemas gerados nas edificações conforme se apresenta na Figura 5 (VELLOSO & LOPES, 2004).

Figura 5 - Relação entre os valores de distorção angular e as patologias geradas



(Fonte: Velloso e Lopes, 2004)

4.3. Fatores que influenciam a ISE

A continuação se comenta alguns dos fatores que influenciam os efeitos da interação-solo estrutura na análise de edificações.

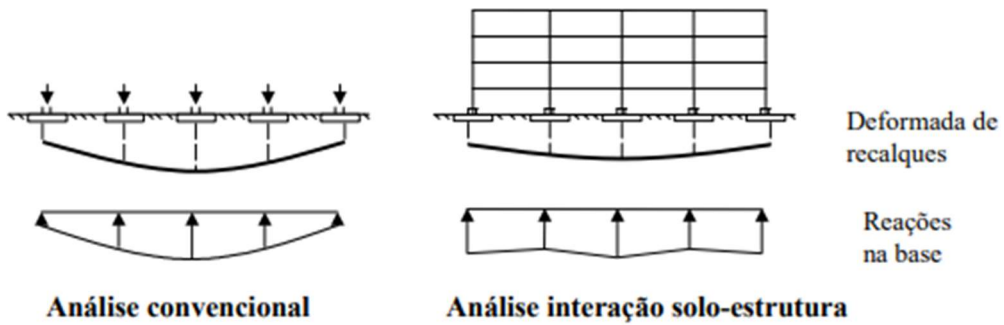
Segundo Antoniazzi (2011):

O mecanismo da interação solo-estrutura está também associado a uma série de fatores e/ou variáveis como o número de pavimentos da edificação, o processo construtivo, forma em planta da edificação, edificações vizinhas, rigidez relativa estrutura-solo, entre outros.

4.3.1. Rigidez relativa estrutura-solo

Pode ser entendida, segundo Meyerhof (1953, apud ANTONIAZZI, 2011), “como a relação entre a rigidez do solo e a rigidez da superestrutura.”. Tal rigidez, conforme é apresentado na Figura 6 “contribui para reduzir os recalques diferenciais e distorções angulares tornando-se um fator mais favorável do que se tratar estrutura e solo separadamente (IWAMOTO, 2000)”.

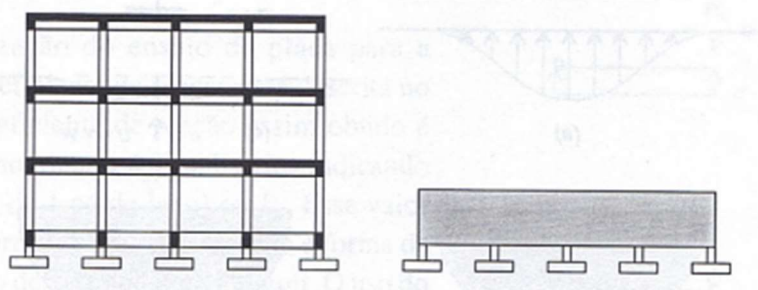
Figura 6 - Efeito da consideração da ISE no recalque



(Fonte: Gusmão, 1994)

Uma das formas de se considerar a influência da estrutura na rigidez relativa solo-estrutura, é considerá-la como uma viga de rigidez equivalente às estruturas que a compõem, (ver Figura 7) conforme é proposto por Meyerhof (1953, apud LOPES & GUSMÃO 2004).

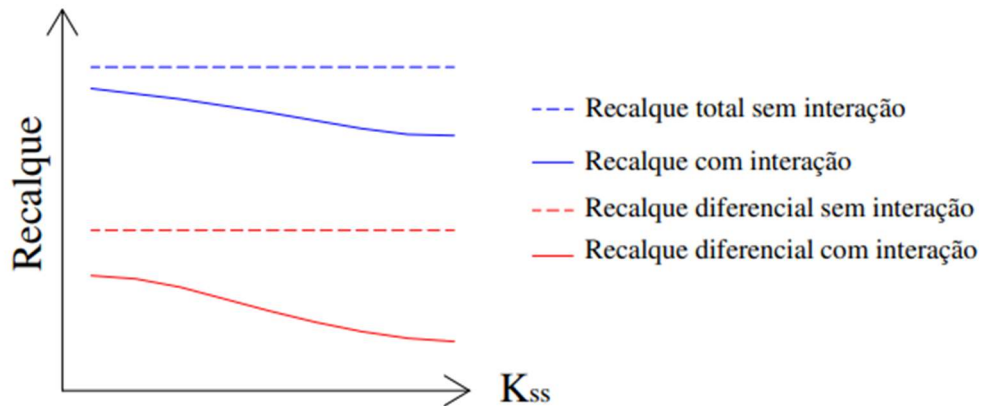
Figura 7 - Viga de rigidez equivalente à estrutura



(Fonte: Velloso e Lopes, 2004)

Posteriormente, Lopes e Gusmão (1991) avaliaram a rigidez relativa entre o solo e a estrutura (COLARES, 2006) e perceberam que o aumento da rigidez entre o solo e a estruturada leva a uma diminuição dos valores dos recalques, principalmente os recalques diferenciais (Figura 8).

Figura 8 - Comparação dos valores do recalque e do recalque diferencial com e sem ISE



(Fonte: Lopes Gusmão, 1991)

De acordo com as informações apresentadas acima, Ramalho e Correa (1991, apud IWAMOTO, 2000), ao analisar a influência de considerar o solo como sendo totalmente rígido ou elástico em dois edifícios com fundações superficiais, confirmaram que a consideração da flexibilidade da fundação gera uma redistribuição dos esforços e momentos fletores tendendo a uma homogeneização dos valores, com os maiores diminuindo e os menores aumentando.

4.3.2. Número de pavimentos

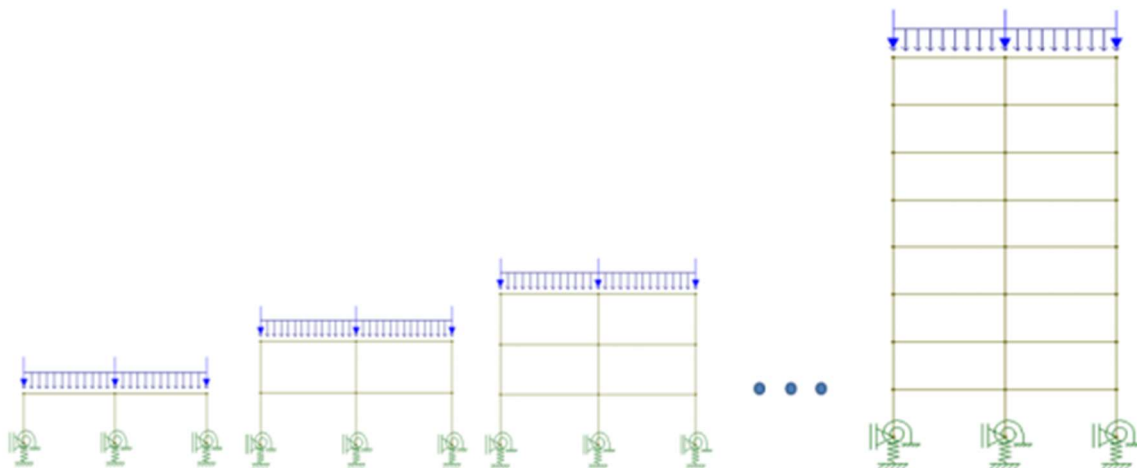
“A estrutura global será tanto mais rígida quanto mais alto for o edifício”. (ANTONIAZZI, 2011)

Entretanto, segundo Goshy (1978, apud IWAMOTO, 2000), ainda que a rigidez entre a estrutura e o solo aumente com o aumento do número de pavimentos, ela não aumenta de forma linear, uma vez que os primeiros pavimentos exercem maior influência na rigidez. Tal afirmação também é verificada por Lopes & Gusmão (1991) ao concluírem que, considerando uma rigidez relativa estrutura-solo constante, os recalques diferenciais diminuem com o aumento do número de pavimentos.

4.3.3. Processo construtivo

Considerar o processo construtivo na análise estrutural de uma edificação “consiste em aplicar as cargas na estrutura de forma gradativa, ou seja, aplicam-se os carregamentos na medida em que cada pavimento é estruturado na prática” (ANTONIAZZI, 2011). Tal método representa um modelo mais próximo ao que encontramos na prática, uma vez que os esforços vão sendo gerados à medida que a estrutura é construída, gerando, assim, resultados mais realistas do que o método que é usualmente empregado, que considera somente a estrutura já na sua configuração final (ANTONIAZZI, 2011). Na Figura 9 se apresenta a maneira de como o processo construtivo é considerado na modelagem numérica.

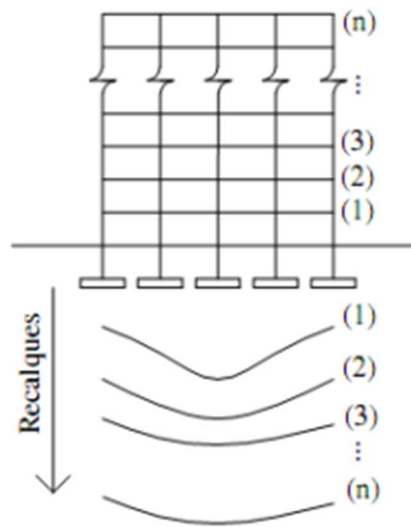
Figura 9 - Consideração do processo construtivo na análise estrutural



(Fonte: Antoniazzi, 2011)

Consonante com as afirmações de Antoniazzi (2011), Gusmão & Gusmão Filho (1994) verificaram, através da medição em campo dos recalques de edificações, que à medida que as edificações são construídas, o aumento das cargas atuantes sobre os pilares, decorrentes da execução de novos pavimentos, geram um aumento dos recalques medidos. Além disso, também constataram que, “juntamente com o progresso da construção, observa-se também um aumento da rigidez da estrutura, verificando-se uma tendência de uniformização dos recalques e da redistribuição das cargas (GUSMÃO & GUSMÃO FILHO 1994)” conforme é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Influência do processo construtivo nos recalques



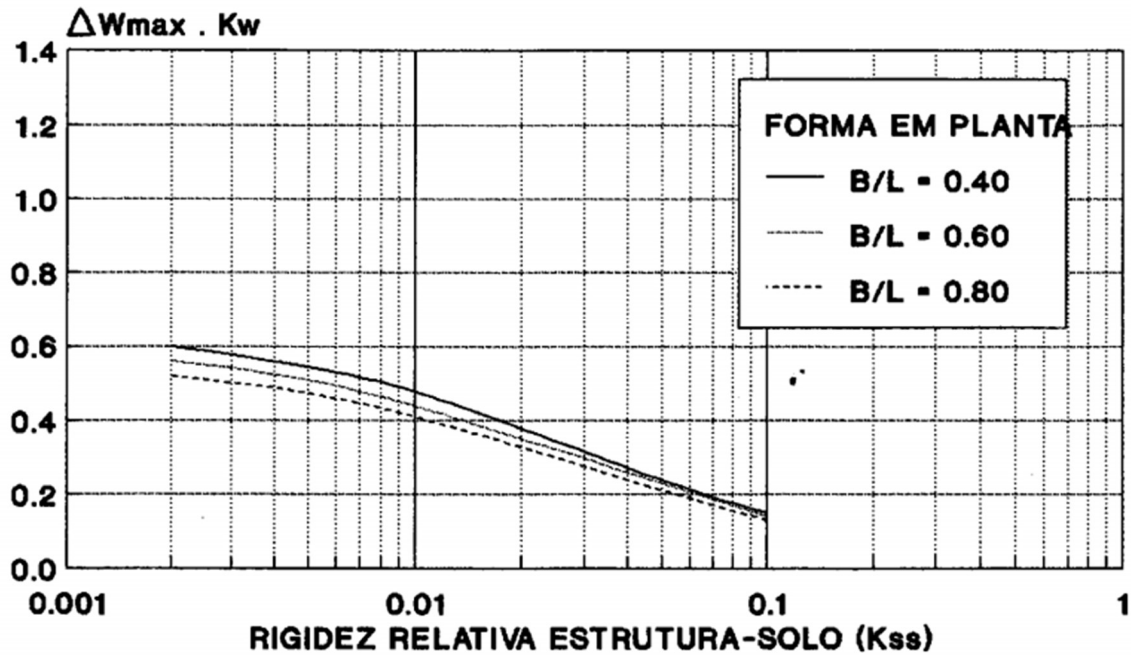
(Fonte: Gusmão e Gusmão Filho, 1994)

4.3.4. Forma em planta da edificação

Segundo Gusmão (1990), “resultados de medições de recalques em diversos tipos de edificações mostram que há uma influência da forma em planta da edificação na tendência à uniformização dos recalques”.

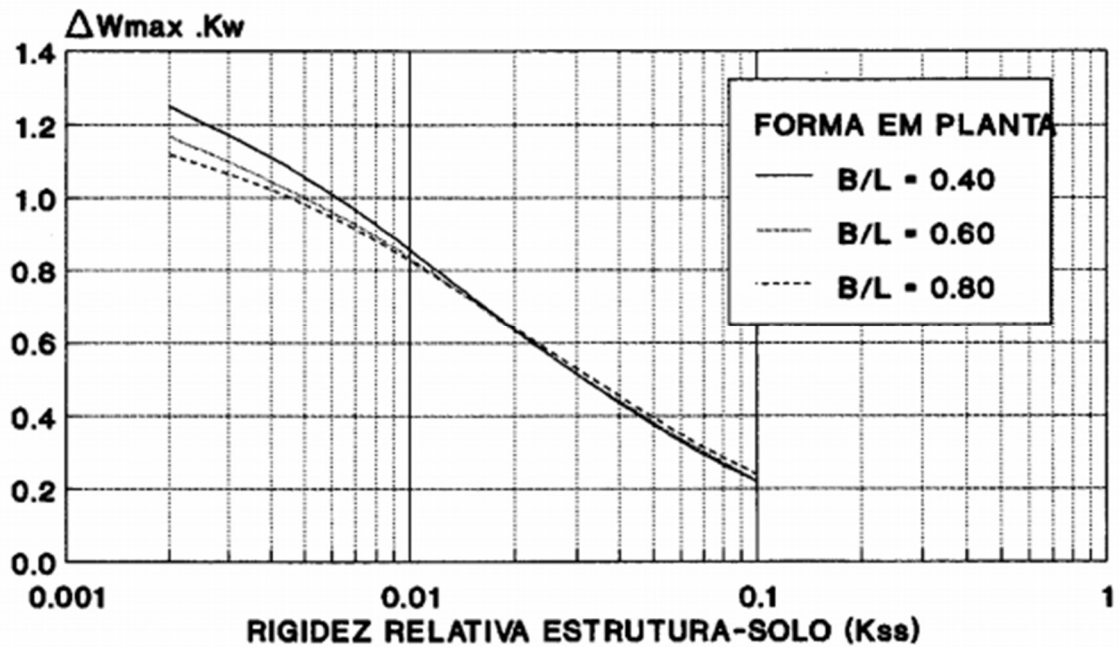
Barata (1986) demonstra que quanto mais próxima de 1 for a relação entre os lados da forma em planta (B/L), onde B é o menor lado da edificação e L é o maior lado da edificação, maior será a tendência de ocorrer a uniformização dos recalques. Tal fenômeno também é observado por Gusmão (1990) e apresentado em seu trabalho conforme é apresentado na Figura 11 e Figura 12.

Figura 11 - Variação de ΔW_{max} em função de K_{ss} - Pórtico longitudinal periférico.



(Fonte: Gusmão, 1990)

Figura 12 - Variação de ΔW_{max} em função de K_{ss} - Pórtico longitudinal central.



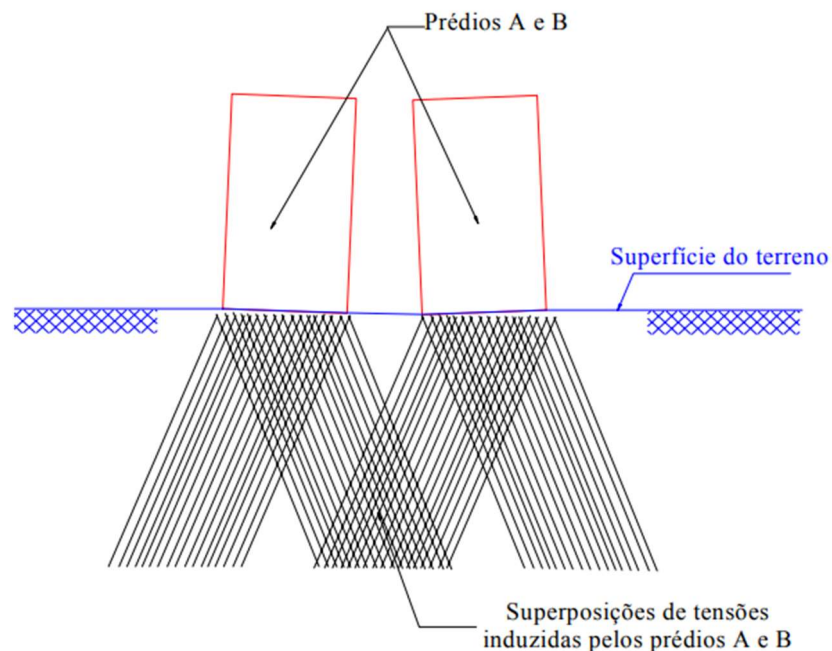
(Fonte: Gusmão, 1990)

4.3.5. Edificações vizinhas

Existem 4 tipos principais de carregamentos responsáveis pelo desalinhamento das edificações (COSTA NUNES 1956).

O primeiro, característico de situações em que duas edificações são construídas ao mesmo tempo, se caracteriza pelo tombamento das estruturas em sentidos opostos (Figura 13) devido à ocorrência de maiores recalques ocasionado pela sobreposição das tensões geradas pelas cargas das edificações (COSTA NUNES 1956).

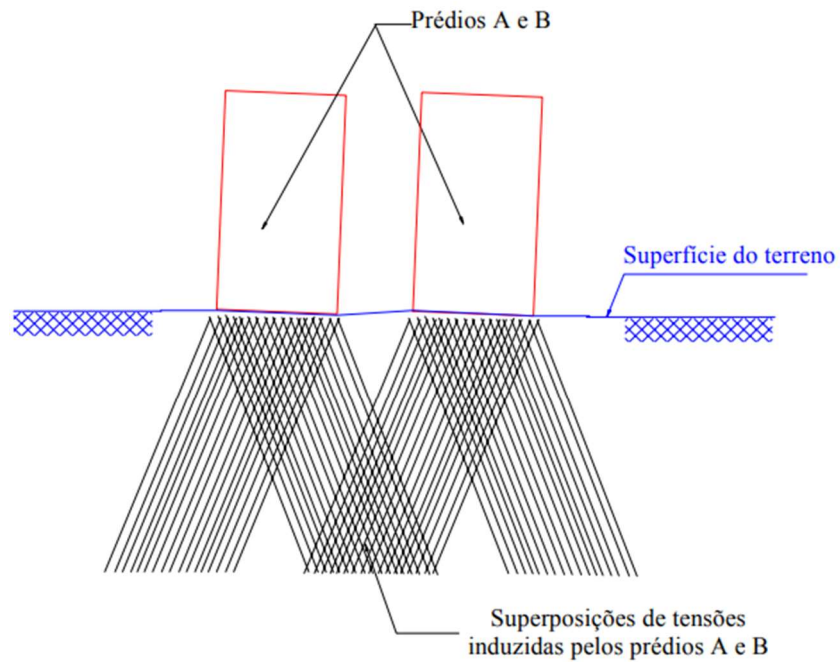
Figura 13 - Edificações vizinhas construídas ao mesmo tempo



(Fonte: Antoniazzi, 2011)

O segundo caso, caracterizado pelo tombamento dos prédios no mesmo sentido, ocorre quando duas edificações vizinhas são construídas em tempos diferentes devido ao pré adensamento do solo provocado pela edificação mais antiga, como é apresentado na Figura 14 (COSTA NUNES, 1956).

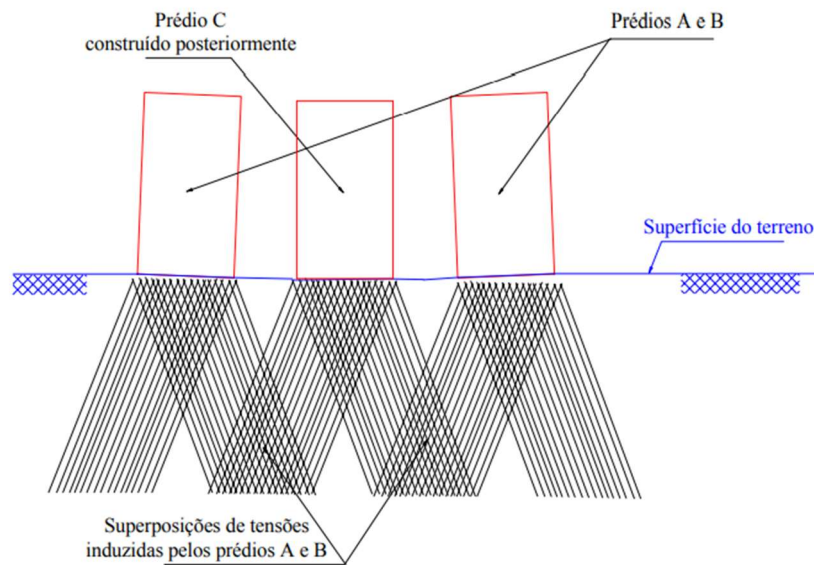
Figura 14 - Edificações vizinhas construídas em tempos diferentes



(Fonte: Antoniazzi, 2011)

O terceiro tipo ocorre devido à construção de uma nova edificação entre outras que já existem (Figura 15). A carga gerada pela construção do novo prédio provoca o adensamento do solo entre as mais antigas provocando o tombamento delas no sentido da mais nova, sem, entretanto, tirar a edificação mais nova do prumo (COSTA NUNES, 1956).

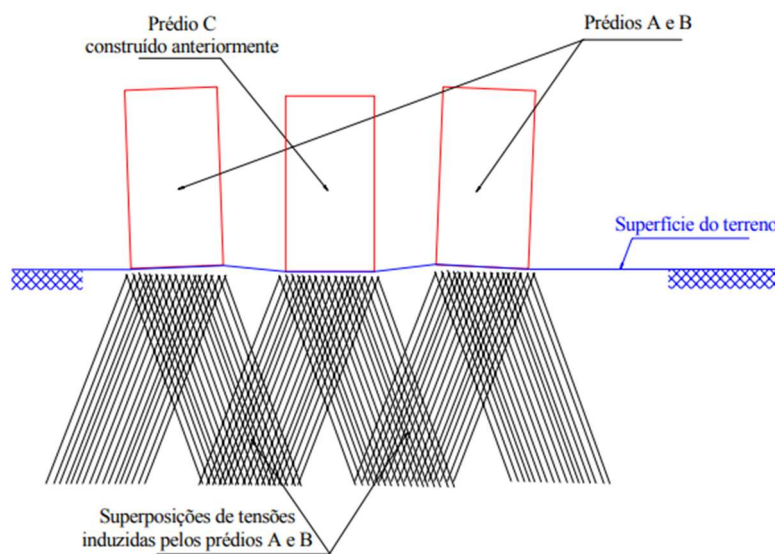
Figura 15 - Construção de uma edificação entre outras já existentes



(Fonte: Antoniazzi, 2011)

O quarto caso se deve a construção de duas novas edificações ao lado de uma já existente (Figura 16). Devido ao solo já estar adensado sob o prédio existente, este caso se caracteriza pelo tombamento dos novos edifícios se afastando do mais antigo que, por sua vez, não sofre desaprumo (COSTA NUNES, 1956).

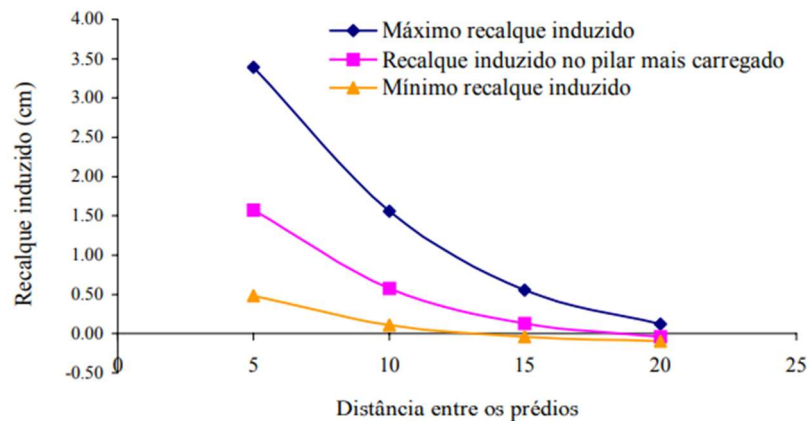
Figura 16 - Construção de duas novas edificações próximas a uma já existente



(Fonte: Antoniazzi, 2011)

Reis (2000) comenta sobre a influência que as construções vizinhas exercem entre si ao demonstrar, através de um estudo paramétrico, que “quanto maior a distância entre os prédios, menores os recalques induzidos pelas construções vizinhas” conforme pode ser visto na Figura 17 gerado a partir dos resultados obtidos de seu estudo.

Figura 17 - Relação entre recalque induzido (cm) x distância entre os prédios (m)

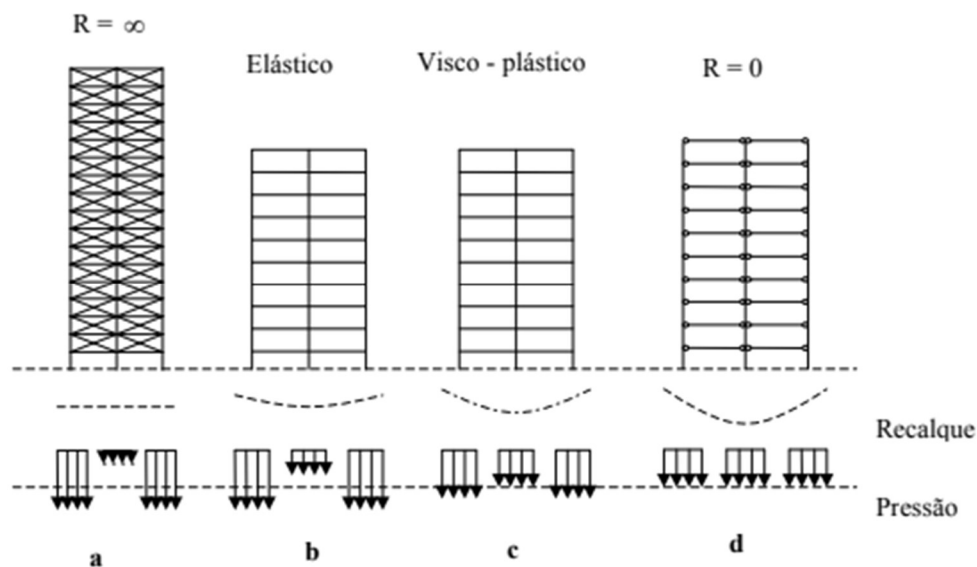


(Fonte: Reis, 2000)

4.3.6. Influência do tempo

A influência do tempo nos recalques pode ser definida entre 4 tipos diferentes dependendo da rigidez das estruturas (Figura 18). O primeiro caso se caracteriza por estruturas infinitamente rígidas, que tendem a apresentar recalques uniformes. O segundo caso, diferentemente do anterior, refere-se às estruturas que não possuem rigidez aos recalques diferenciais e, portanto, se adaptam às movimentações do solo. O terceiro caso refere-se às estruturas elásticas, como as estruturas de aço, que apresentam recalques diferenciais maiores do que a estrutura com rigidez infinita, porém menor que a estrutura com rigidez zero. O último caso são as estruturas visco elásticas, ou seja, estruturas cujas resistências dependem da velocidade do recalque, podendo se comportar como uma estrutura sem rigidez caso o recalque ocorra de forma bastante lenta ou como uma estrutura elástica caso o recalque seja rápido (CHAMECKI, 1969).

Figura 18 - Influência da rigidez na ISE



(Fonte: Chamecki, 1969)

5. METODOLOGIA

Utilizando o programa Excel para a compilação da linguagem de programação VBA (*Visual Basic for Applications*) (Microsoft, 2019), e a interface de programação API (*Application Programming Interface*), do *software* de análise estrutural SAP 2000, foi desenvolvida um programa computacional que permite a geração, análise e dimensionamento de uma estrutura tridimensional de concreto armado considerando as hipóteses de apoios engastados e flexíveis. Para esses últimos foram utilizadas sapatas superficiais modeladas como elementos finitos de cascas apoiadas em molas distribuídas em sua face inferior simulando o comportamento do solo. Outra opção utilizada foram os apoios com molas globais cujas rigidezes podem ser obtidas segundo as seções 4.1.2 e 4.1.6.

As características do solo foram escolhidas pelo autor com base na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7. Para fins exemplificativos optou-se por utilizar o caso que melhor expressaria as diferenças entre os modelos com a ISE e sem a ISE.

Tabela 5 - Valores de coeficiente de Poisson

Solo	μ
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3 - 0,5
Argila Saturada	0,4 - 0,5
Argila não saturada	0,1 - 0,3

(Fonte: Teixeira e Godoy, 1996)

Tabela 6 - Classificação do solo em função do índice de resistência a penetração

Solo	N_{spt}	Designação
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Mediamente Compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito Compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	> 19	Dura(o)

(Fonte: ABNT NBR 6484/2001)

Tabela 7 - Módulo de Elasticidade do solo

Tipo de Solo		E (kPa)
Argila	Muito mole	300 a 3000
	Mole	2000 a 4000
	Média	4000 a 9000
	Dura	7000 a 18000
Areia	Arenosa	30000 a 42000
	Siltosa	7000 a 20000
	Fofa	10000 a 25000
	Compacta	50000 a 85000
	(pedregulho + areia) compacta	98000 a 200000

(Fonte: Santos, s.d)

Para o pré-dimensionamento das vigas foram utilizadas as equações 28, para vãos de tramos internos de vigas contínuas, 29, para vãos de tramos externos de vigas contínuas ou vigas bi apoiadas, e 30 para vãos de vigas em balanço.

$$h_{viga} = \frac{l}{12} \quad (28)$$

$$h_{viga} = \frac{l}{10} \quad (29)$$

$$h_{viga} = \frac{l}{5} \quad (30)$$

onde h_{viga} é a altura da viga em (cm), e l é o comprimento da viga em (cm)

As lajes foram pré-dimensionadas utilizadas as equações 31, 32 e 33 propostas por Libâno (2004)

$$h_{est} = (2,5 - 0,1 * n) \frac{l *}{100} \quad (31)$$

$$l * \leq \begin{cases} lx \\ 0,7 * ly \end{cases} \quad (32)$$

$$h_{laje} = h_{est} + d' \quad (33)$$

onde h_{est} é a espessura da laje em (cm) sem considerar o cobrimento da armadura; l_x é o menor vão da laje em (cm); l_y é o maior vão da laje em (cm); d' é o cobrimento da armadura da laje em (cm); h_{laje} é a espessura final da laje em (cm), e n é o número de pavimentos.

Para o pré-dimensionamento dos pilares foram utilizadas as equações 34 e 35.

$$N_{d,est} = \gamma_f * \gamma_n * \alpha * N_k \quad (34)$$

$$A_{c,est} = \frac{N_{d,est}}{0,85 * f_{cd} + 0,84} \quad (35)$$

com

$$\alpha = 1,3 \text{ para pilares intermediários}$$

$$\alpha = 1,6 \text{ para pilares de extremidade}$$

$$\alpha = 1,8 \text{ para pilares de canto}$$

onde N_k é a carga atuante no pilar em (kN); γ_f é o coeficiente de ponderação; γ_n é o coeficiente de majoração que deve ser aplicado para pilares com dimensão menor que 19 cm, conforme Figura 19; α é o fator de correção da carga atuante no pilar em função de sua posição; $N_{d,est}$ é a carga atuante estimada que atua no pilar em (kN); f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto em (kN/cm²), e $A_{c,est}$ é a área do pilar estimada em (cm²).

Figura 19 - Valores do coeficiente adicional γ_n

b cm	≥ 19	18	17	16	15	14	13	12
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35

Onde:
 $\gamma_n = 1,95 - 0,05 b$;
 b é a menor dimensão da seção transversal do pilar.
 NOTA O coeficiente γ_n deve majorar os esforços solicitantes finais de cálculo nos pilares, quando de seu dimensionamento.

(Fonte: ABNT NBR 6118/2014)

Para o cálculo das reações verticais é necessário inicialmente definir uma área de fundação, para isso utilizou-se a equação 36 para definir o lado da sapata quadrada.

$$B = \sqrt{\frac{N}{\sigma_{adm}}} \quad (36)$$

com,

$$\sigma_{adm} = 20 * N_{spt} \quad (37)$$

onde N é a carga vertical exercida pelo pilar sobre a fundação em (kN); σ_{adm} é a tensão admissível do solo definida como “a maior tensão que pode ser aplicada no solo sem causar ruptura ou recalques excessivos” (RUVÉR, 2005) em (kN/m²); B é o lado da fundação quadrada, e N_{spt} é do índice de resistência a penetração.

As rotinas computacionais também realizam a análise da influência da vizinhança nos recalques das diferentes hipóteses descritas acima. Para a consideração do efeito da vizinhança foi montada uma matriz de influência numa planilha de Excel, onde cada célula armazena o recalque calculado segundo a equação 1 a partir da influência do pilar X, (ver coluna 1 da Figura 20), sobre o pilar Y, linha 1 da Figura 20. Entretanto, visto que a equação de Mindlin não pode ser utilizada para se calcular o deslocamento gerado no ponto de aplicação da carga, (células em vermelho na Figura 20), optou-se por utilizar a equação proveniente da teoria da elasticidade para estes casos segundo a equação 27.

Figura 20 - Matriz de influência para a consideração do efeito da vizinhança nos recalques

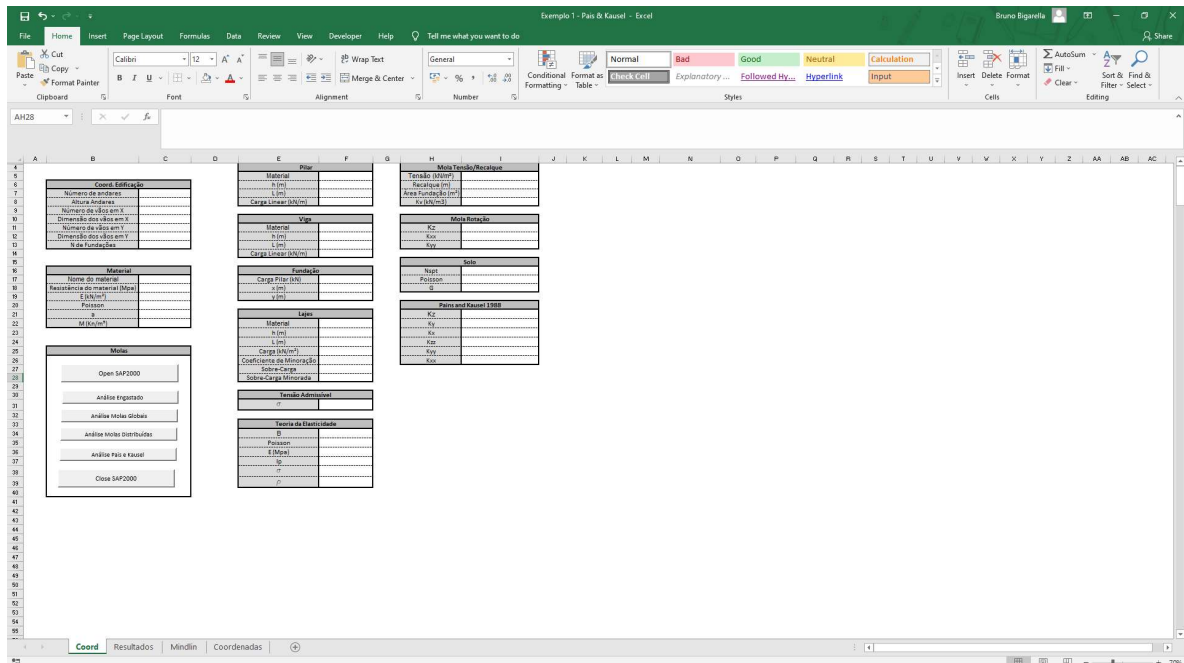
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
P1												
P2												
P3												
P4												
P5												
P6												
P7												
P8												
P9												
P10												
P11												
P12												
Soma (mm)												

(Fonte: Autor, 2021)

A ação do vento não foi considerada, sendo utilizadas apenas às ações verticais de serviço ($g + q$), onde “g” é o peso da estrutura e “q” é a sobrecarga, considerada como $2,0 \text{ kN/m}^2$ para um prédio de escritórios.

A Figura 21 apresenta a interface do programa criado para este trabalho.

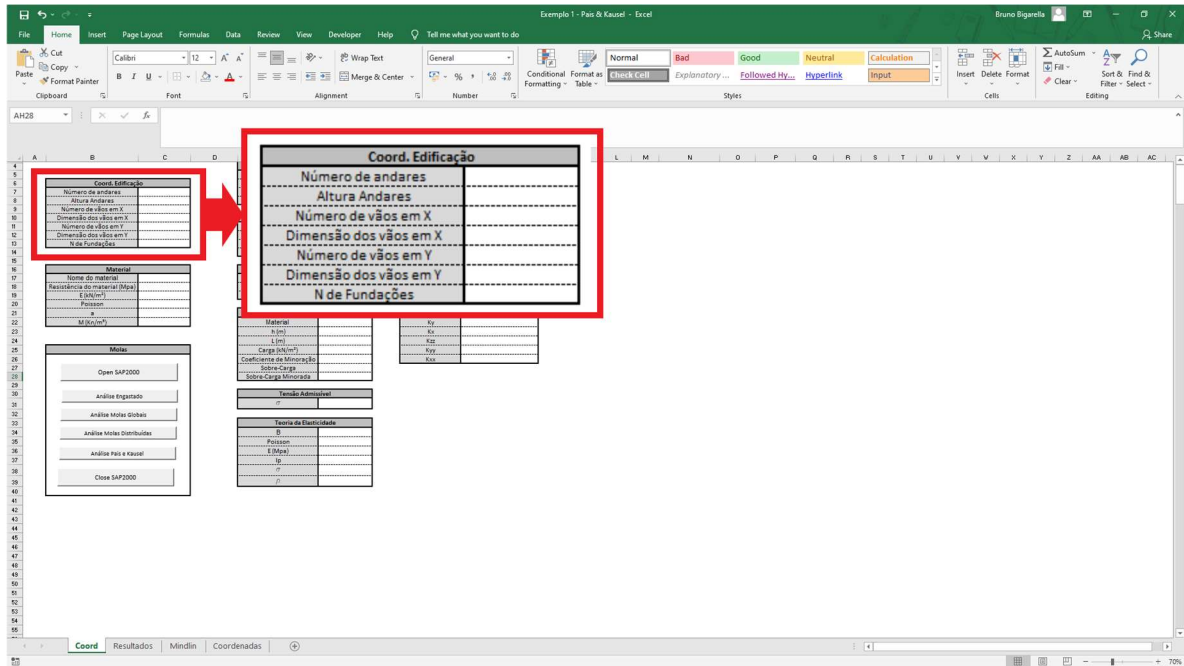
Figura 21 - Interface do programa



(Fonte: Autor, 2021)

A rotina para a utilização do programa consiste nas seguintes etapas. Inicialmente preenche as informações da edificação que se deseja modelar fornecendo o número de andares, altura de cada andar, número de vãos em X e em Y, e a distância entre os eixos em X e em Y (Figura 22).

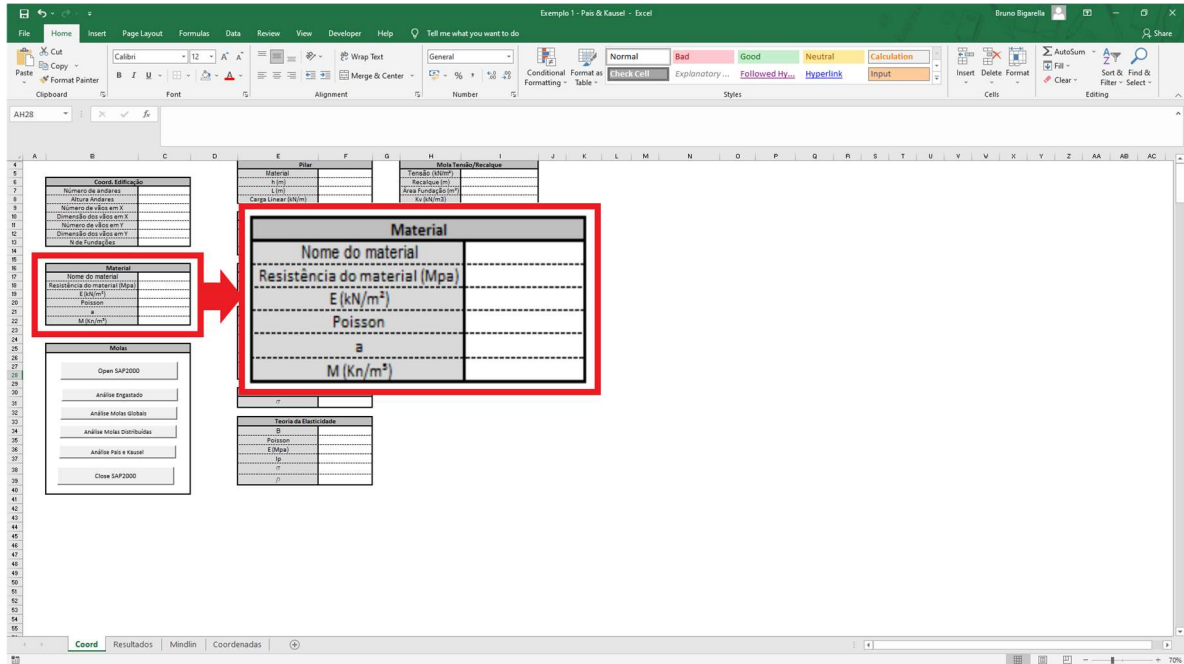
Figura 22 - Células para a definição das coordenadas da edificação



(Fonte: Autor, 2021)

Em seguida deve-se definir o material que se deseja utilizar (Figura 23) indicando o nome, resistência em (MPa), módulo de elasticidade em (kN/m²), coeficiente de Poisson, coeficiente de dilatação térmica em (°C⁻¹) e a densidade do material em (kN/m³).

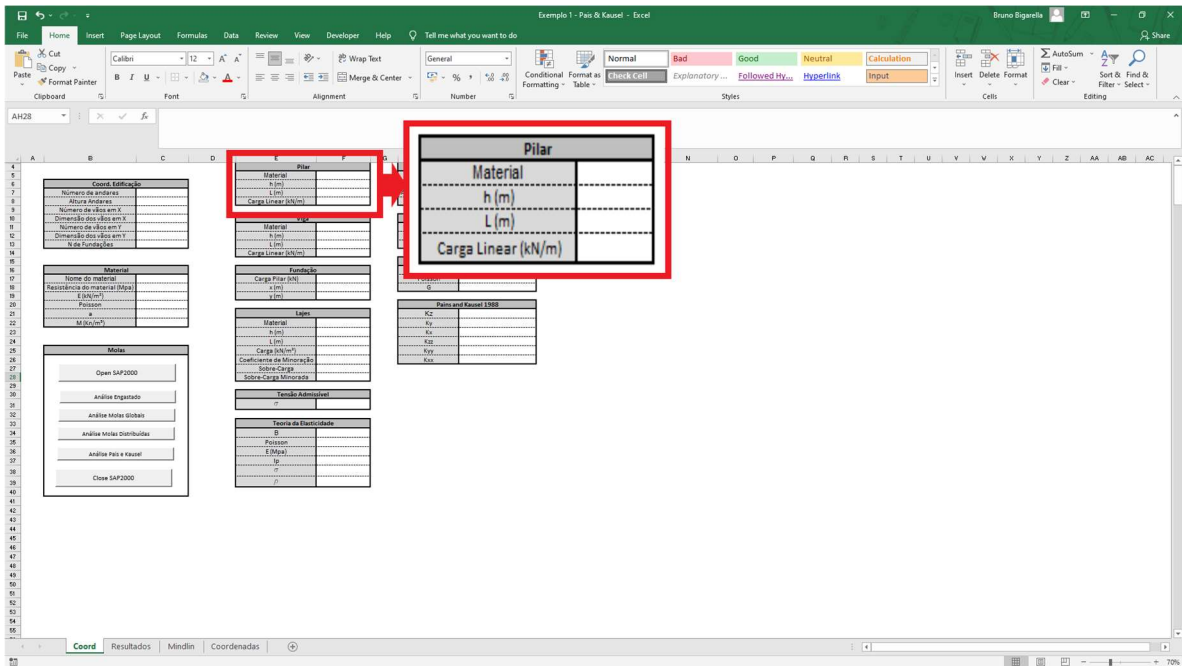
Figura 23 - Definição das propriedades do material



(Fonte: Autor, 2021)

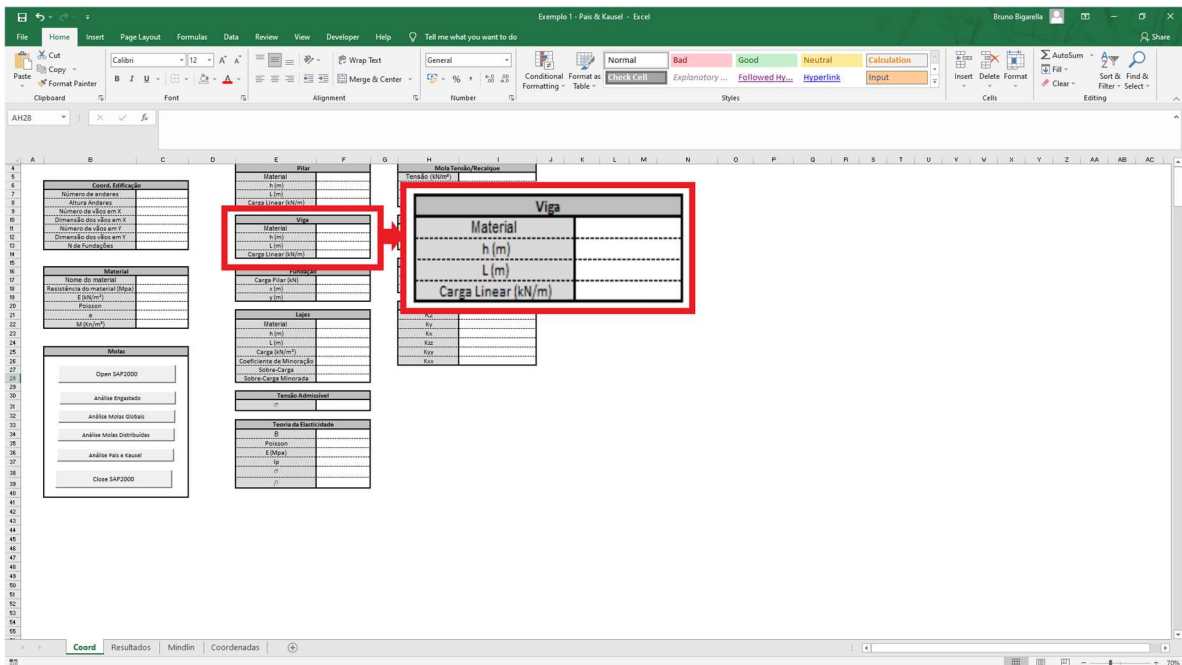
As tabelas apresentadas nas Figuras 24, 25 e 26 apresentam as células que devem ser preenchidas para se modelar as vigas, os pilares e as lajes. Nelas deve-se indicar o material que de que elas serão feitas e as dimensões em (m) representadas pelas letras h para a altura e L para a largura. Pode-se também definir uma sobrecarga em (kN/m²) e um coeficiente de minoração que será aplicado, caso se deseje, que será aplicada sobre a laje. Os valores do peso próprio dos pilares, das vigas e das lajes são calculadas automaticamente em pelo programa utilizando as dimensões fornecidas e a densidade do material selecionado.

Figura 24 - Definição das propriedades dos pilares



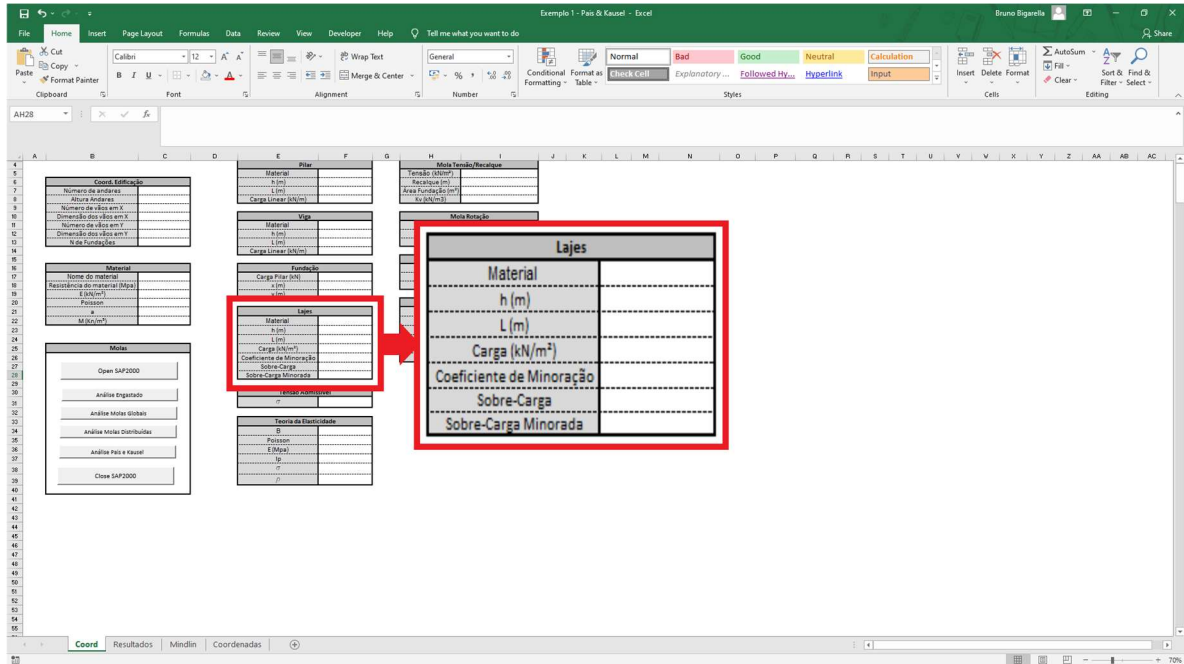
(Fonte: Autor, 2021)

Figura 25 - Definição das propriedades das vigas



(Fonte: Autor, 2021)

Figura 26 - Definição das propriedades das lajes

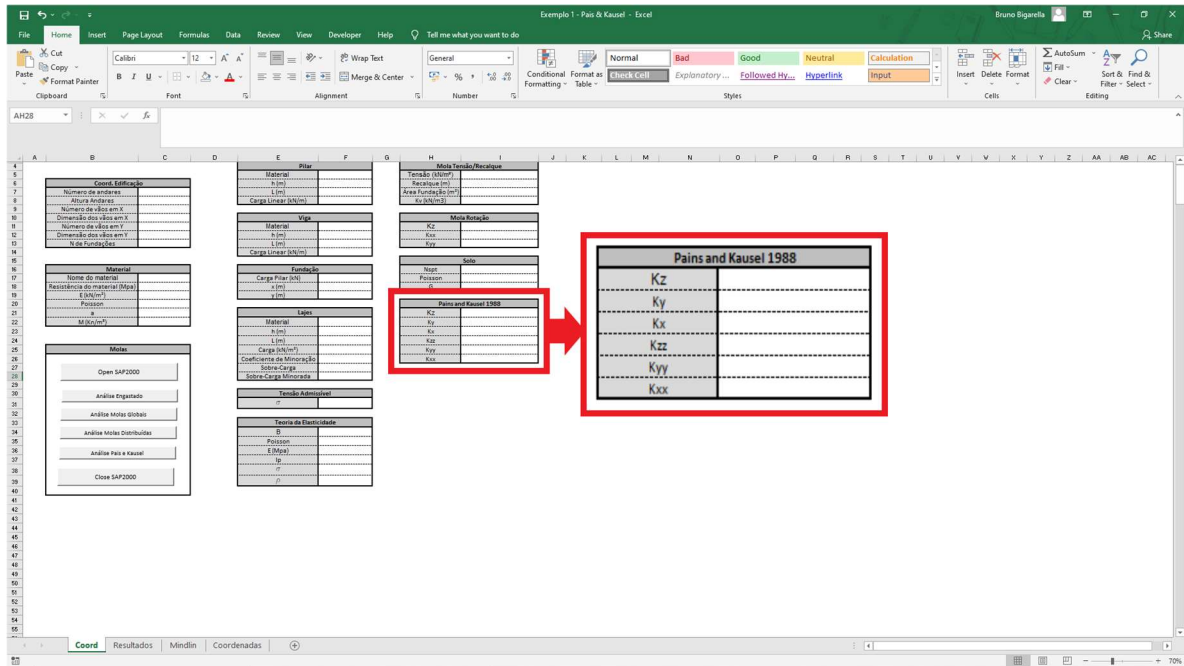


(Fonte: Autor, 2021)

Estando as características da estrutura definida é necessário alimentar o programa com as informações do solo que será considerado. Para isso é necessário informar o N_{spt} , o coeficiente de Poisson do solo nas células apresentadas na Figura 27 Com estes valores o programa calcula os valores do módulo de cisalhamento do solo em (kN/m²) utilizando a equação 24 e a tensão admissível do solo através da equação 30 em (kN/m²).

Em posse das dimensões das sapatas e das propriedades do solo o programa calcula automaticamente os valores dos coeficientes (Figura 29) de mola utilizando as equações 18, 19, 20, 21, 22 e 23 propostas por Pais e Kausel (1988).

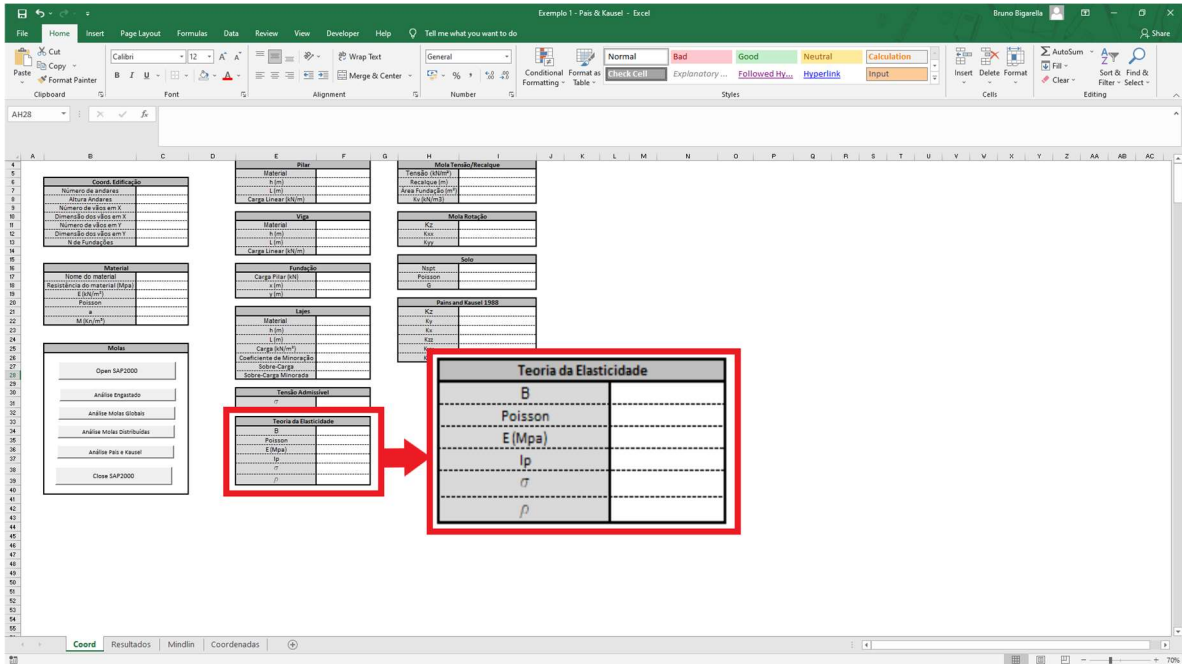
Figura 29 - Determinação dos coeficientes de mola [Pais e Kausel]



(Fonte: Autor, 2021)

O programa então calcula o recalque em (mm) utilizando a equação 27, sendo necessário apenas indicar o fator de forma apresentado na Tabela 3 (Figura 30).

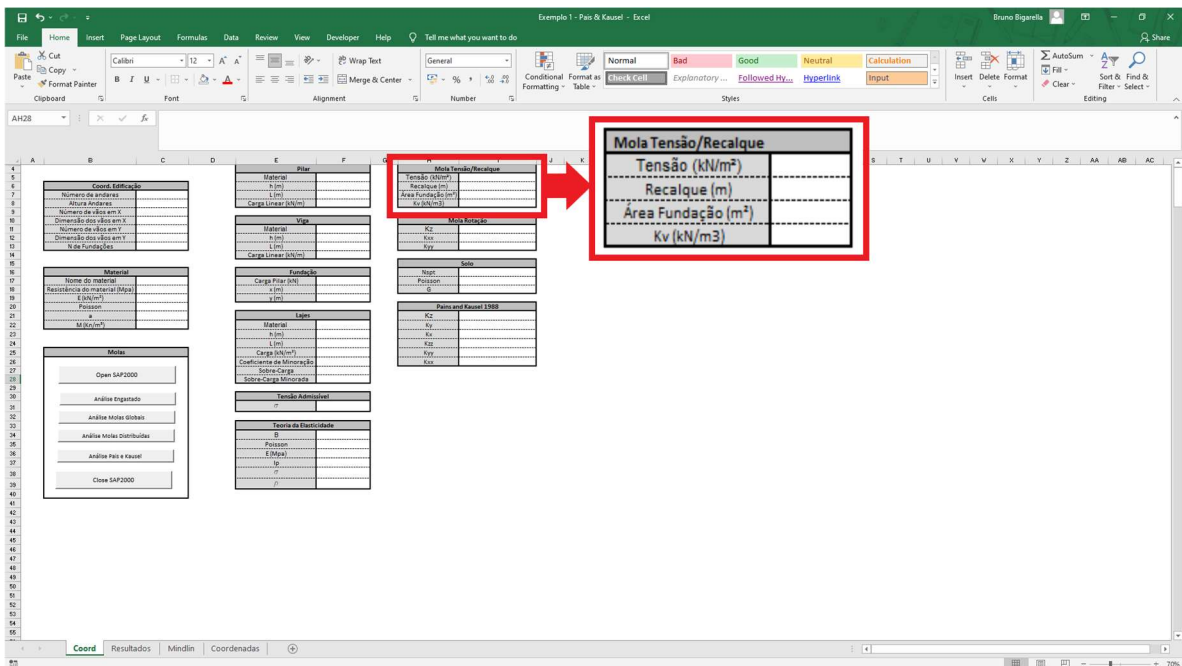
Figura 30 - Definição do recalque através da teoria da elasticidade



(Fonte: Autor, 2021)

Estando o recalque calculado, o programa retorna os valores do módulo de reação vertical (kN/m^3), equação 4, e os valores dos coeficientes de mola 10, 11 e 12.

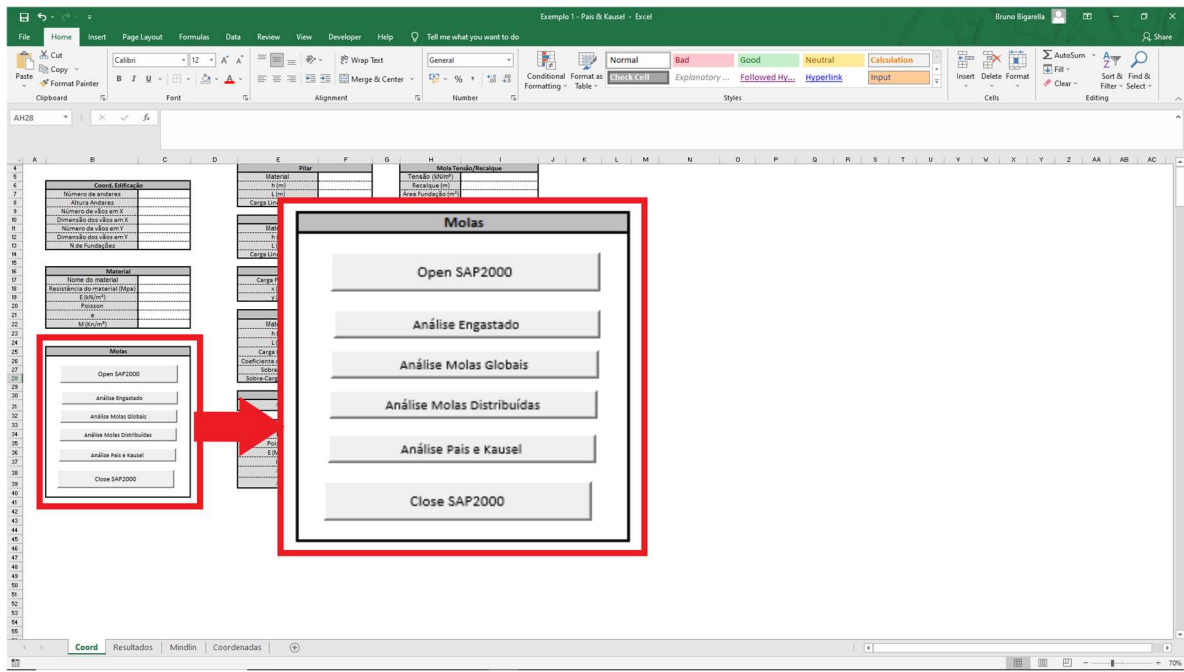
Figura 31 - Determinação do k_v (kN/m^3)



(Fonte: Autor, 2021)

Por fim, basta pressionar o botão *open SAP2000* para iniciar o programa e seleccionar qual a análise que se deseja realizar (Figura 32).

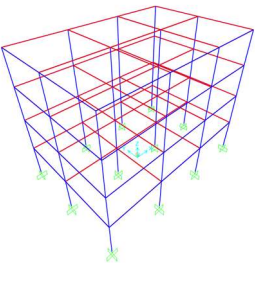
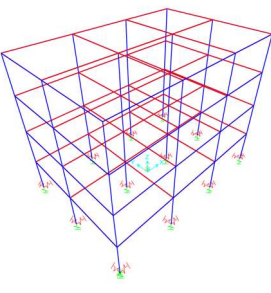
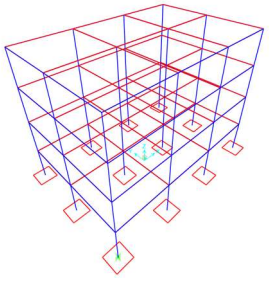
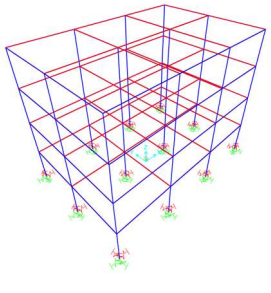
Figura 32 - Painel de comandos do programa



(Fonte: Autor, 2021)

A Tabela 8 apresenta as diferentes formas que os apoios podem ser modelados utilizando o programa.

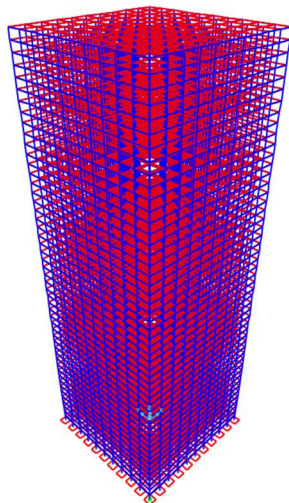
Tabela 8 - Diferentes modelos de apoios contemplados pelo programa

Engastado	Molas Globais	Molas Distribuídas	Pais e Kausel (1988)
			

(Fonte: Autor, 2021)

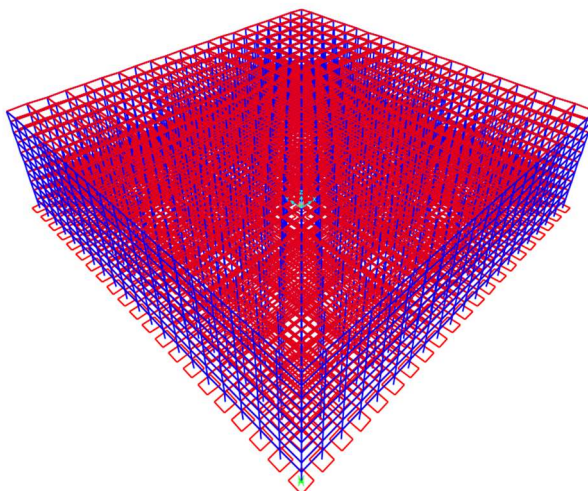
A Figura 33 e a Figura 34 buscam demonstrar as diversas estruturas que podem ser modeladas rapidamente alterando-se apenas os valores das células apresentadas.

Figura 33 - Prédio de 50 andares com 10 vãos em Y e 10 vãos em X



(Fonte: Autor, 2021)

Figura 34 - Prédio de 10 andares com 20 vãos em Y e 20 vãos em X



(Fonte: Autor, 2021)

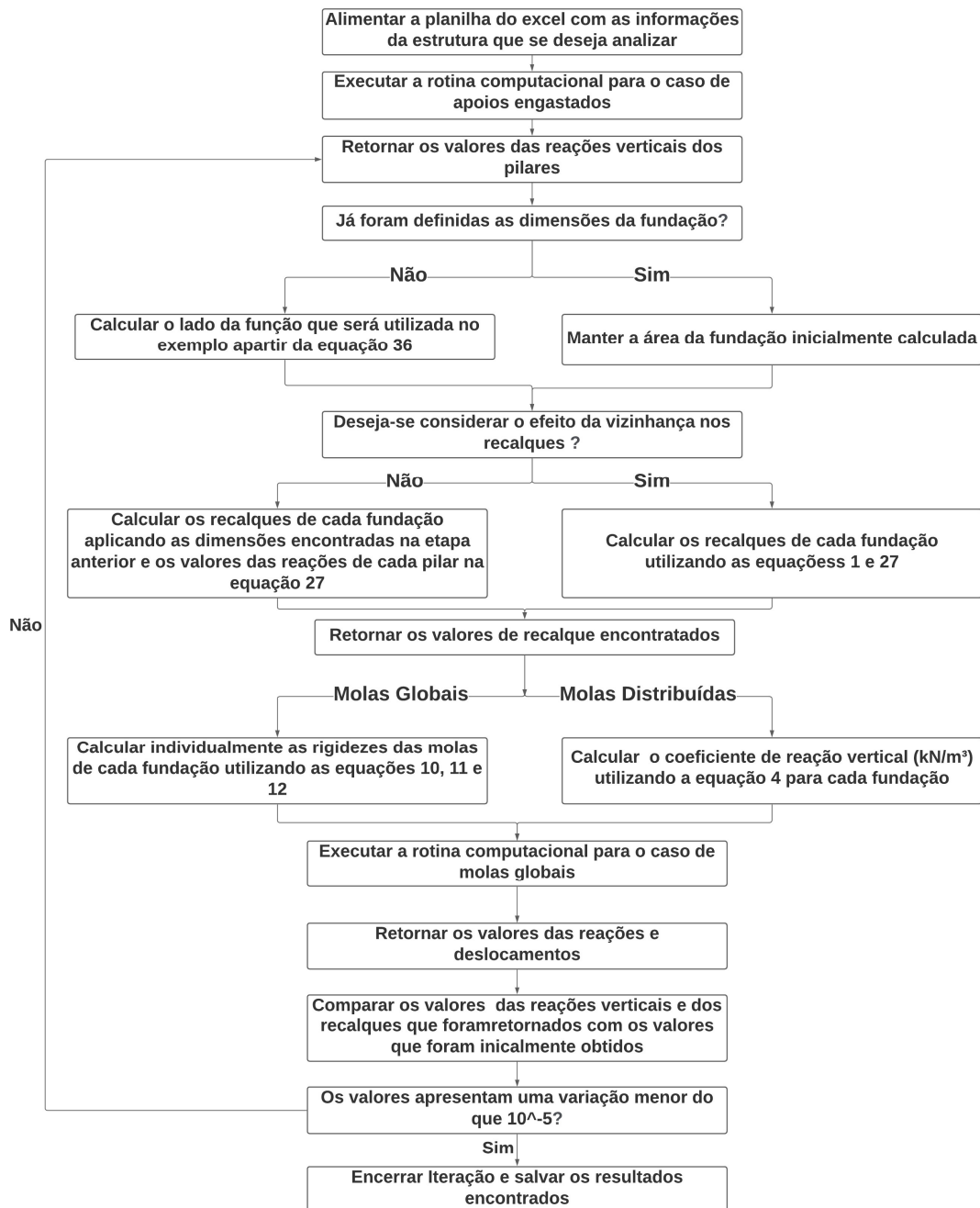
5.1. Método Iterativo

As rotinas computacionais utilizam um método iterativo descrito no item 4.1.6 e seguem os fluxogramas apresentados abaixo.

5.1.1. Molas Globais e Distribuídas

É importante ressaltar que o método usando as molas globais e o método usando as molas distribuídas conduzem a valores similares sempre que a sapata seja rígida e com solo sempre elástico em tração e compressão, mesmo em tensões de tração. No entanto, o modelo distribuído pode ser utilizado com um algoritmo não linear para levar em consideração a possibilidade de existirem parcelas sob a fundação com tração. O fluxograma da rotina computacional utilizada para os cenários que consideram tanto as molas globais quanto as molas distribuídas é apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Fluxograma da rotina computacional para as molas globais e distribuídas



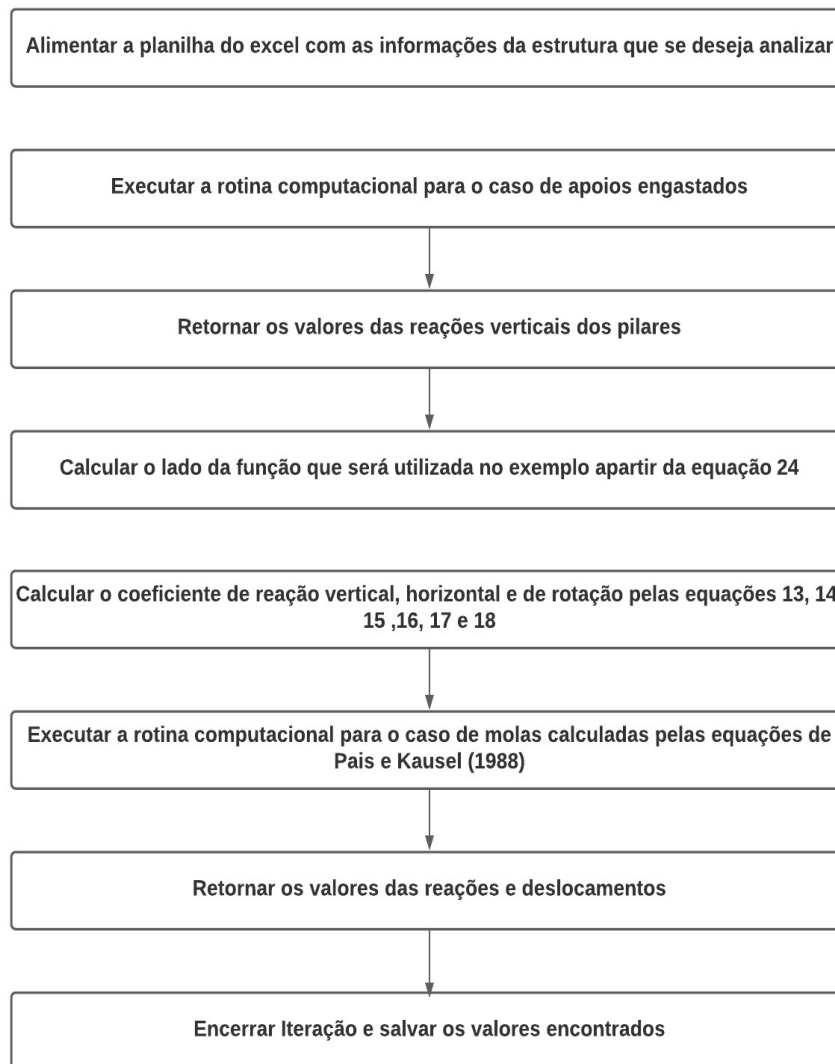
(Fonte: Autor, 2021)

5.2. Método não iterativo

5.2.1. Pais & Kausel (1988)

A Figura 36 apresenta o fluxograma da rotina computacional utilizada para os casos que calculam as rigidezes das molas pelas equações apresentadas no item 4.1.5.

Figura 36 - Fluxograma para a rotina computacional do método de Pais e Kausel



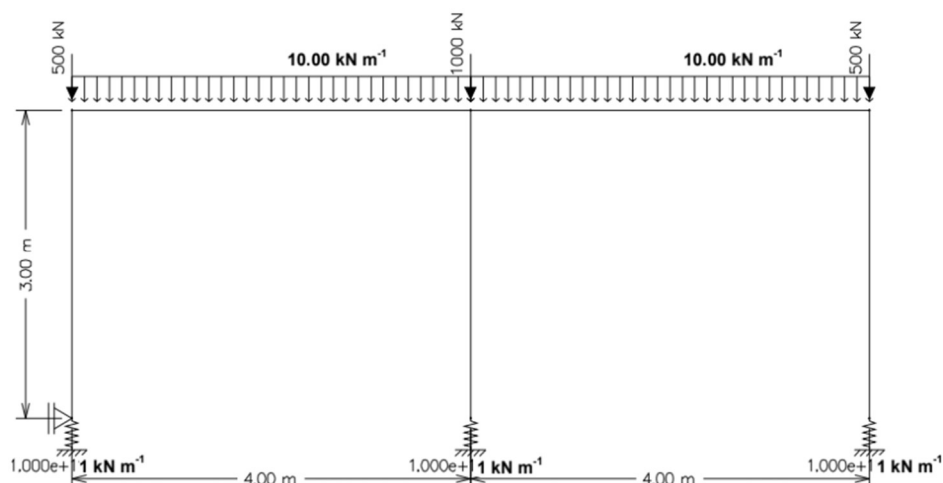
(Fonte: Autor, 2021)

6. RESULTADOS

6.1. Verificação das Rotinas Computacionais

A fim de verificar a rotina criada, modelou-se o pórtico bidimensional proposto por Souza e Reis (2008), Figura 37, utilizando as diferentes rotinas computacionais criadas (Tabela 10). O pórtico é formado por três pilares de 0,15m x 0,30m apoiados em sapatas de 0,6m x 0,6m e duas vigas de 0,15m x 0,3m. O solo possui um módulo de elasticidade de 50 MPa e um coeficiente de Poisson de 0,3.

Figura 37 - Pórtico plano proposto por Souza e Reis (2008)



(Fonte: Souza e Reis, 2008)

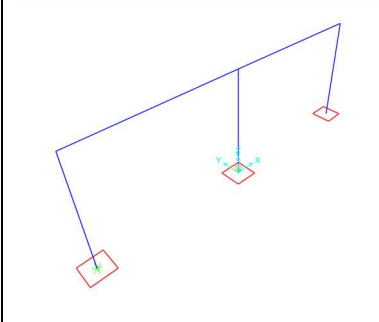
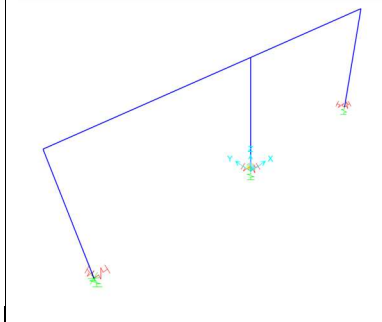
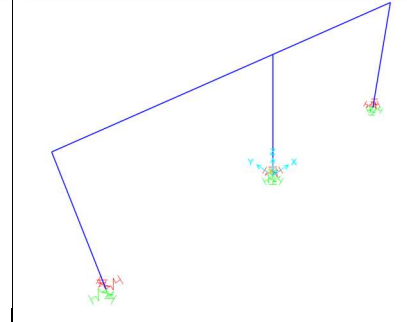
Comparando os resultados obtidos pelos programas com os resultados apresentados pelos autores percebe-se que os valores, tanto as reações verticais, quanto dos recalques, estão muito próximas e, portanto, a rotina computacional encontra-se funcionando.

Tabela 9 - Comparação dos valores de esforços normais e de recalques apresentados por Souza e Reis (2008) com os valores encontrados pelas rotinas computacionais.

Pilar	Souza & Reis (2008)		Molas Distribuídas		Molas Globais		Pais & Kausel	
	Normal (kN)	Recalque (mm)	Normal (kN)	Recalque (mm)	Normal (kN)	Recalque (mm)	Normal (kN)	Recalque (mm)
P1 e P3	521	12,960	522,468	12,996	522,314	12,992	522,180	12,988
P2	1038	25,820	1035,064	25,745	1035,371	25,753	1035,640	25,760

(Fonte: Autor, 2021)

Tabela 10 - Modelos do pórtico proposto por Souza e Reis (2008) modelados apartir da rotina computacional criada

Molas Distribuídas	Molas Globais	Pais e Kausel
		

(Fonte: Autor, 2021)

6.2. Estudo Paramétrico de Prédio de Pequeno Porte

Este estudo paramétrico visa analisar a influência que diferentes aspectos, como o número de pavimentos, os vãos das vigas e a rigidez do solo exercem na ISE. Para isso serão analisados os resultados obtidos considerando 4 hipóteses diferentes: apoios engastados, apoios como molas globais, apoios como molas distribuídas e apoios como molas calculadas pelas equações de Pais e Kausel (1988). Será verificada, também, para cada uma das hipóteses a influência, nos recalques, de se considerar ou não o efeito da proximidade das fundações.

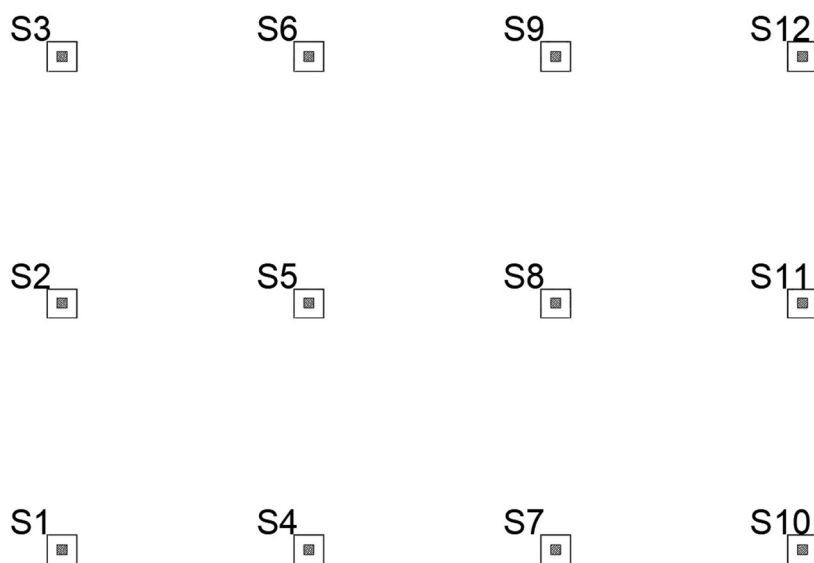
6.2.1. Hipóteses Adotadas

As hipóteses adotadas nos cenários analisados são as seguintes: Não se alteram as seções transversais dos elementos com exceção das sapatas mesmo que o número de andares

aumente; o material possui comportamento linear; as sapatas são quadradas; o solo é isotrópico e uniforme; apenas cargas verticais devido as ações permanentes e variáveis são consideradas; a tensão admissível se estima partir do índice de resistência a penetração do solo (Nspt), e todo terreno apresenta o mesmo perfil estratigráfico

Este estudo usará a numeração apresentada na Figura 38 para se referir as fundações da estrutura.

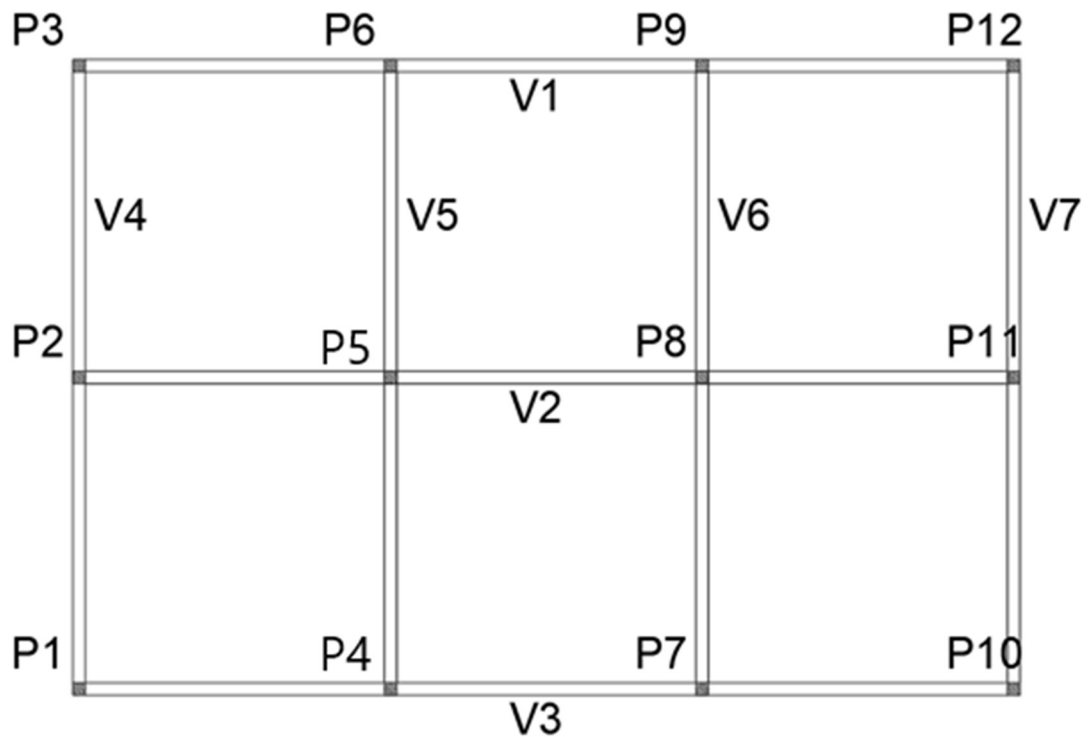
Figura 38 - Numeração das fundações



(Fonte: Autor, 2021)

A viga que será analisada será a viga central do eixo X do primeiro pavimento e será referida como V2, conforme é apresentado na Figura 39.

Figura 39 – Nomenclatura das vigas e dos pilares



(Fonte: Autor, 2021)

O material escolhido para este estudo apresenta as seguintes características:

Tabela 11 - Propriedade do concreto utilizado no estudo

Resistência característica do concreto à compressão - f_{ck} (MPa)	25
Agregado utilizado - α_e	1,2
Módulo de elasticidade do concreto - E (MPa)	33600
Coefficiente de Poisson do concreto - μ	0,2
Peso específico d concreto - M (kN/m ³)	25

(Fonte: Autor, 2021)

onde,

$$E = \alpha_e * 5600 * \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa} \quad (38)$$

com,

$$\alpha_e = 1,2 \text{ para basalto e diabásio}$$

$$\alpha_e = 1 \text{ para granito e gnaisse}$$

$$\alpha_e = 0,9 \text{ para calcário}$$

$$\alpha_e = 0,7 \text{ para arenito}$$

Apesar de existirem formas de se realizar o pré-dimensionamento, conforme foi apresentado acima, buscou-se manter um valor constante entre os diferentes cenários para as dimensões das vigas, pilares e lajes. Desta forma, as dimensões foram escolhidas visando apenas respeitar o valor mínimo exigido por norma. Para os pilares foram escolhidas seções quadradas de lado de 20 cm. As vigas utilizadas possuem altura de 50 cm e largura de 20 cm. As lajes foram modeladas com espessura de 8 cm. Ainda que na prática a escolha por pilares de mesma dimensão para edificações com diferentes números de pavimentos seja questionável sua adoção permitiu isolar os efeitos de ISE nos casos estudados. Portanto, a interpretação dos resultados deve ter um olhar qualitativo mais do que quantitativo. Além disso, é importante salientar que todos os resultados a serem apresentados correspondem a carregamentos de serviço.

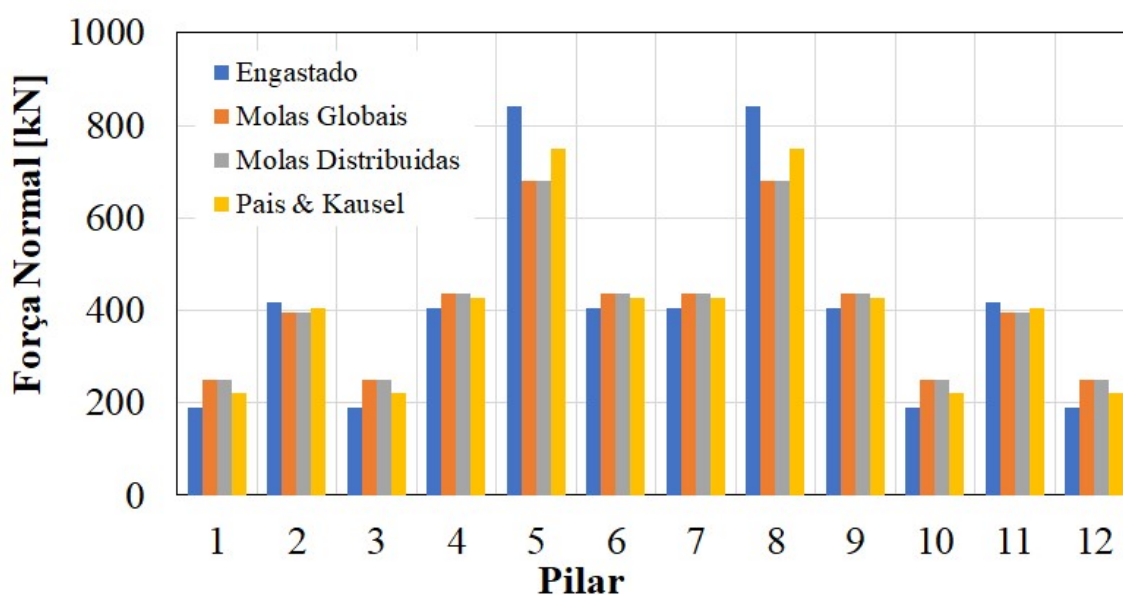
6.3. Cenário 1

Este cenário visa apresentar o modelo de estrutura considerado padrão e, a partir do qual serão realizadas as alterações para os casos futuros.

O modelo deste cenário corresponde a um edifício de 4 pavimentos, com 4 pilares na direção X e 3 na direção Y. O espaçamento entre os pilares é de 5m e o pé direito foi adotado como 3m. O solo sobre o qual está edificação será construído será de areia fofa e apresenta, para fins deste cenário, as seguintes características: Coeficiente de Poisson de 0,2, índice de resistência a penetração de 4 e módulo de elasticidade de 10 MPa.

A Figura 40 apresenta os maiores valores das forças normais de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas no cenário 1. Como esperado os maiores valores estão associados aos pilares intermediários P5 e P8 (ver Figura 39). Os pilares de canto P1, P3, P10 e P12 apresentam os menores valores devido à menor área de influência de carga. Já os pilares de borda, P2, P11, P4, P6, P7 e P9 ficam com valores intermediários.

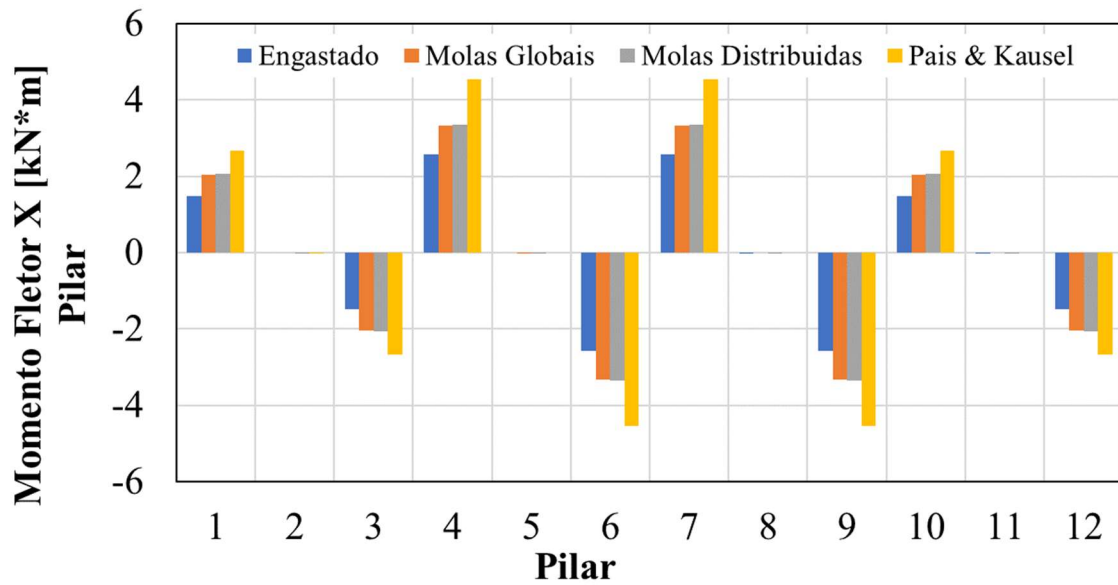
Figura 40 - Forças normais máximas nos pilares



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 41 apresenta os maiores e menores valores dos momentos fletores em torno do eixo X da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. O sinal positivo indica que a direção do vetor do momento fletor acompanha a direção positiva do eixo X. Entretanto, o sinal negativo indica que o momento acompanha a direção negativa deste eixo. É de interesse comentar que todas as hipóteses fornecem valores próximos entre si, no entanto os maiores módulos dos momentos fletores são obtidos para o caso de Pais e Kausel (1988). Também é importante salientar que a magnitude dos valores é relativamente pequena devido a que apenas se consideram carregamentos verticais. De fato, como esperado os valores dos momentos fletores associados com os pilares intermediários P5 e P8 são quase nulos, mostrando a coerência do modelo numérico.

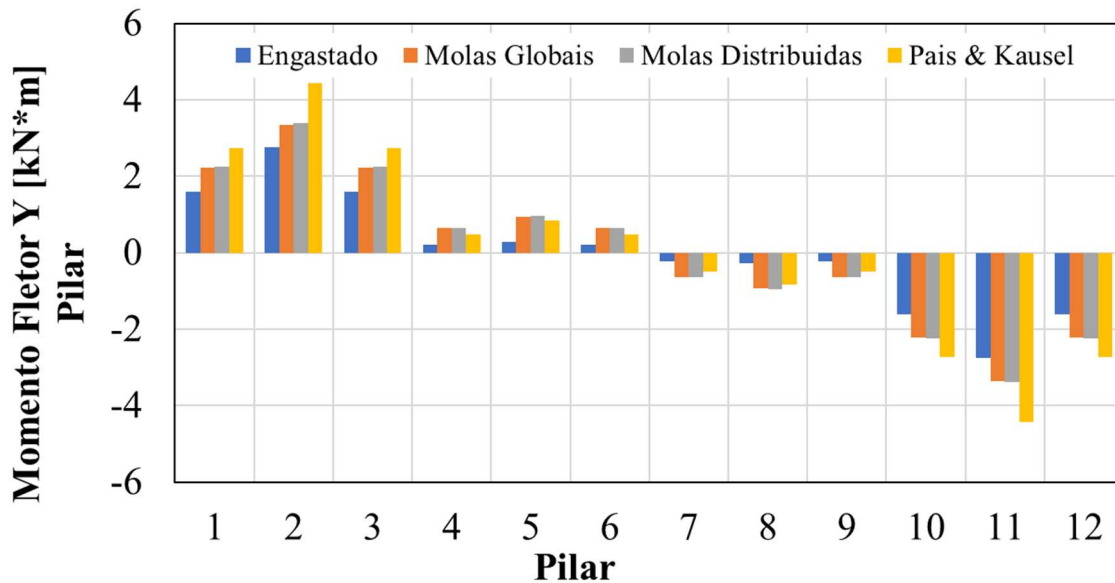
Figura 41 - Momento fletor em X nos pilares



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 42 apresenta os maiores valores dos momentos fletores em torno do eixo Y da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Os sinais dos momentos fletores apresentados tem significado similar ao descrito na figura anterior. Como se pode apreciar os maiores valores em modulo de momentos fletores estão associados aos pilares P1, P2, P3 e suas contrapartes P10, P11 e P12. No entanto, suas magnitudes são relativamente pequenas devido às razões explicadas anteriormente.

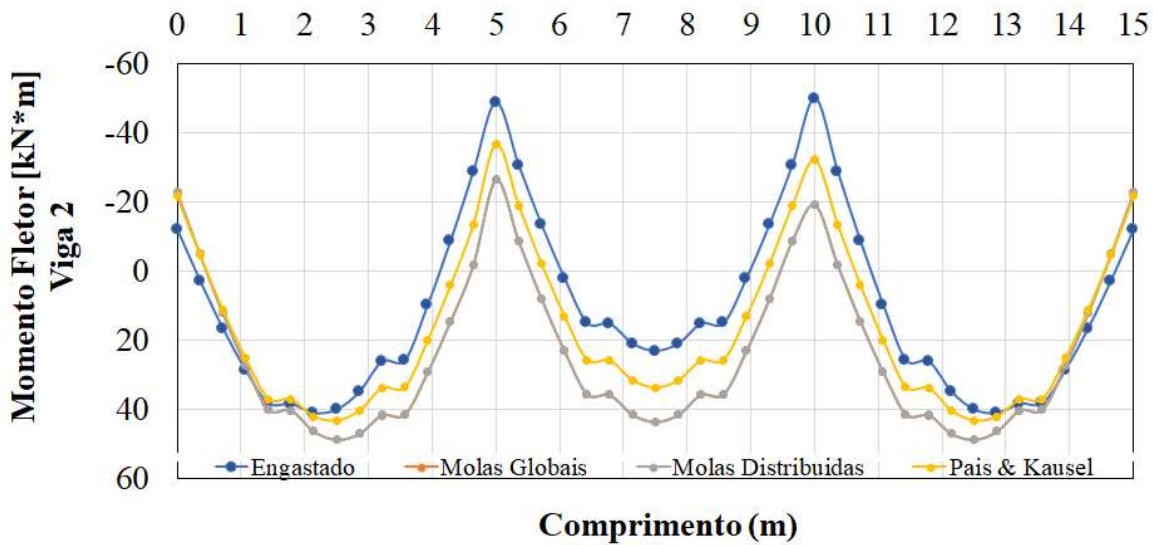
Figura 42 - Momento fletor em Y nos pilares



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 43 apresenta os valores dos momentos fletores em 43 pontos na viga 2 (viga intermediária no sentido dos pórticos mais compridos ao longo do eixo X) para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Como se pode apreciar o modelo com base engastada gera maiores momentos fletores negativos nos apoios internos, os quais são reduzidos conforme a interação solo-estrutura é considerada. No caso dos momentos positivos a tendência é contrária. É importante salientar que a variação dos momentos ao longo do vão não corresponde exatamente com uma parábola como esperado, isto pode ser explicado devido a que o tipo de distribuição que o programa faz em transferir a carga distribuída da laje para as vigas de apoio depende da discretização da malha de elementos finitos. Espera-se que uma maior discretização da laje conjuntamente com o elemento de viga no contorno possa melhorar a distribuição dos momentos fletores ao longo da viga.

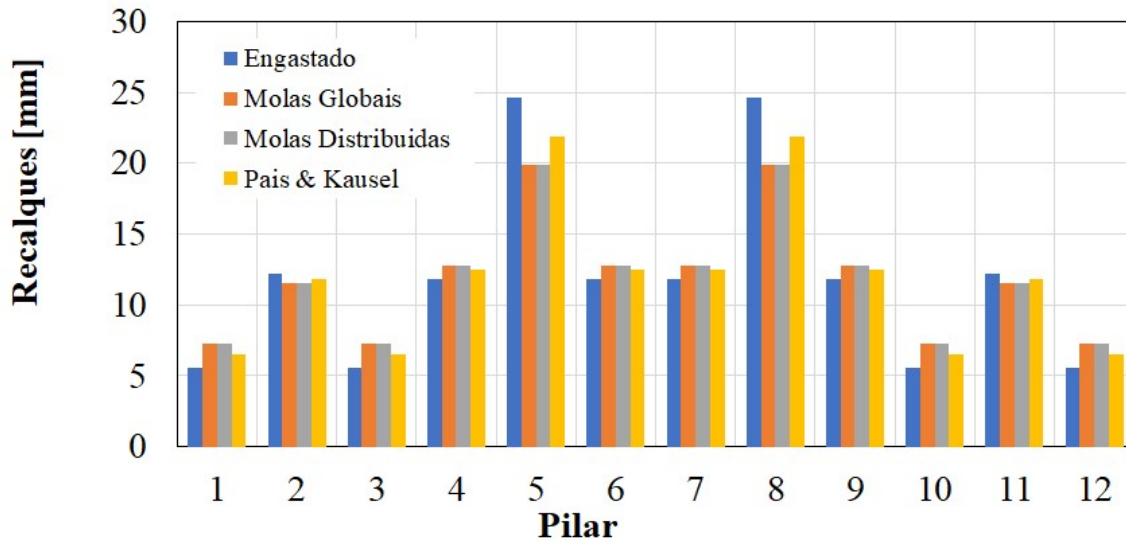
Figura 43 - Momento na viga 2



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 44 apresenta os valores de recalque absoluto sem considerar a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas. Como se pode apreciar os maiores recalques correspondem aos pilares intermediários P5 e P8 e para o modelo engastado. No entanto, deve-se ter cuidado ao interpretar os resultados do modelo engastado, uma vez que embora fisicamente um engaste não apresente deslocamento vertical, sua reação vertical pode ser utilizada para avaliar um recalque através da equação 27. Neste caso deve-se ter ciência também que dita equação considera apenas a força do pilar aplicada de maneira centrada na sapata, fato que não é totalmente certo no caso dos pilares de canto ou de extremidade, onde existe algum tipo de excentricidade devido aos momentos fletores associados. Numa alternativa para contornar esse assunto, seria utilizar o método de sapata equivalente, onde a excentricidade é levada em consideração através da definição de dimensões fictícias reduzidas para a sapata. No entanto por simplicidade esse método não foi aplicado. Já os pilares de canto P1, P3, P10 e P12 apresentam os menores recalques com maiores valores para o caso de molas globais.

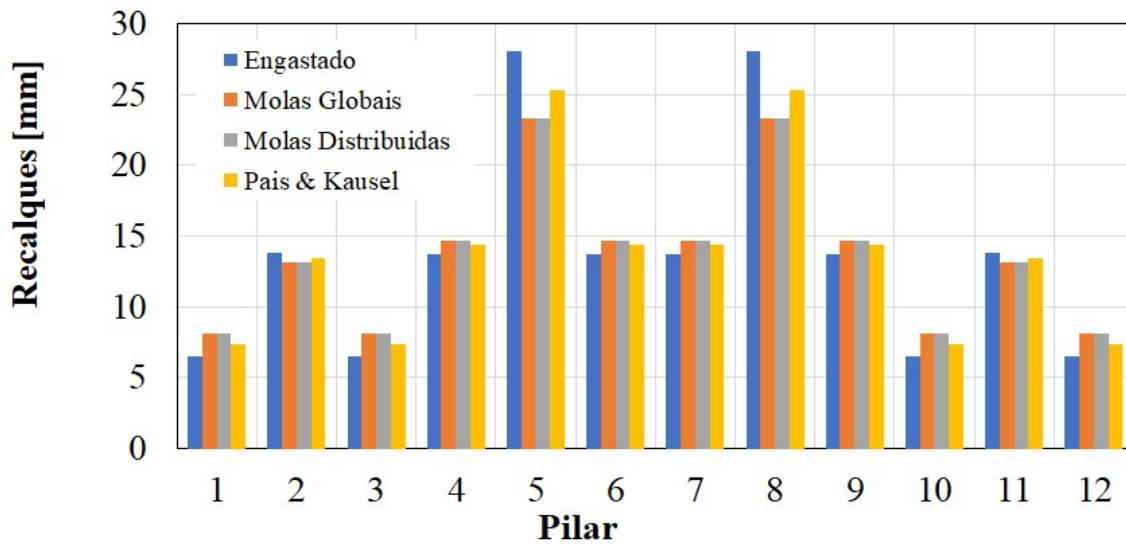
Figura 44 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 45 apresenta os valores de recalque absoluto considerando a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas. Como pode-se apreciar, a tendência da figura anterior é mantida nesse caso, porém com valores maiores para todos os pilares, indicando que os pilares adjacentes exercem algum tipo de influência nos pilares em estudo.

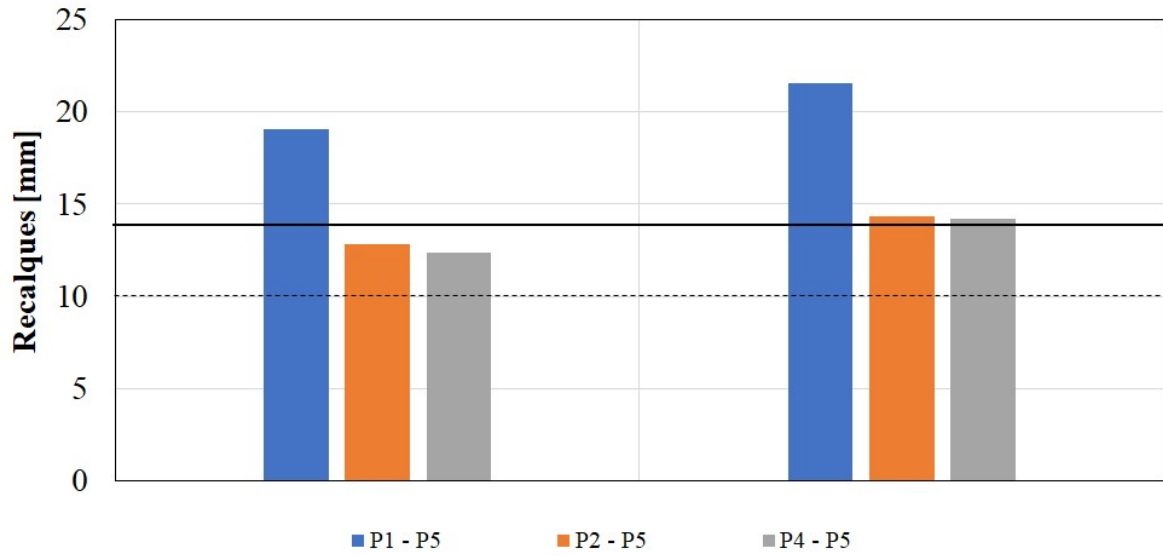
Figura 45 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança



(Fonte: Autor, 2021)

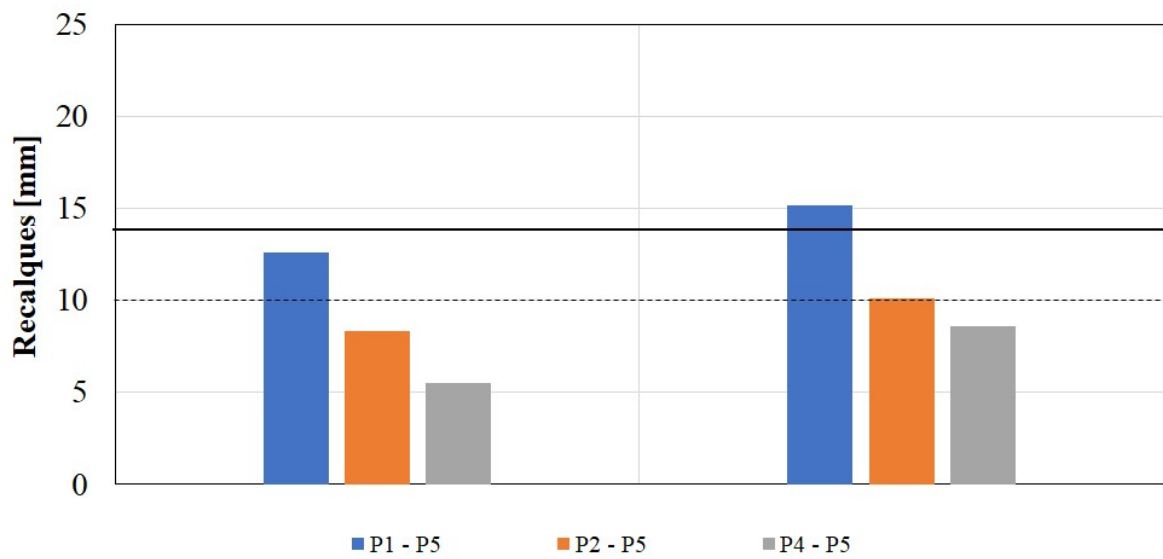
A Figura 46, Figura 47 e Figura 48 comparam os três maiores recalques diferenciais com os seus respectivos valores de limite tolerável para as hipóteses de apoios engastados, molas globais/distribuídas e Pais e Kausel, respectivamente. As barras a esquerda dos gráficos referem-se ao caso sem o efeito da vizinhança e as barras a direita referem-se ao caso com efeito de vizinhança. A linha pontilhada refere-se ao limite tolerável de 10 mm correspondente ao recalque diferencial das fundações P2 – P5 e P4 – P5. A linha cheia refere-se ao limite tolerável de 14,14 mm referente ao limite do recalque diferencial P1 – P5. Como percebe-se na Figura 46, em todos os casos os limites são excedidos, mostrando que certas ações devem ser realizadas para cumprir com esse requerimento. A consideração da vizinhança piora a situação. Como alternativa para solucionar esse problema, sapatas conectadas com vigas de alavanca podem ser consideradas em substituição a sapatas associadas (mais custosas para maiores comprimentos de viga) para reduzir o recalque diferencial. Em relação à Figura 47 e Figura 48, a consideração de ISE traz efeitos benéficos em relação aos recalques diferenciais, ou seja, os valores limites ficam mais próximos dos calculados e inclusive em algumas vezes são maiores.

Figura 46 - Recalque diferencial x Limite tolerável [engastado]



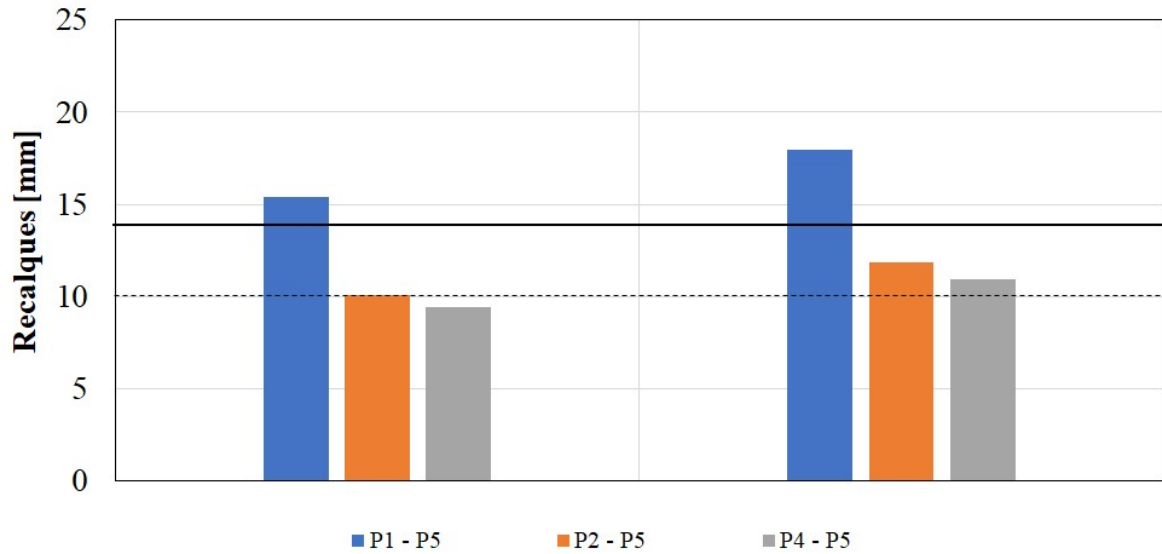
(Fonte: Autor, 2021)

Figura 47 - Recalque diferencial x limite tolerável [molas globais e molas distribuídas]



(Fonte: Autor, 2021)

Figura 48 - Recalque diferencial x limite tolerável [Pais e Kausel]



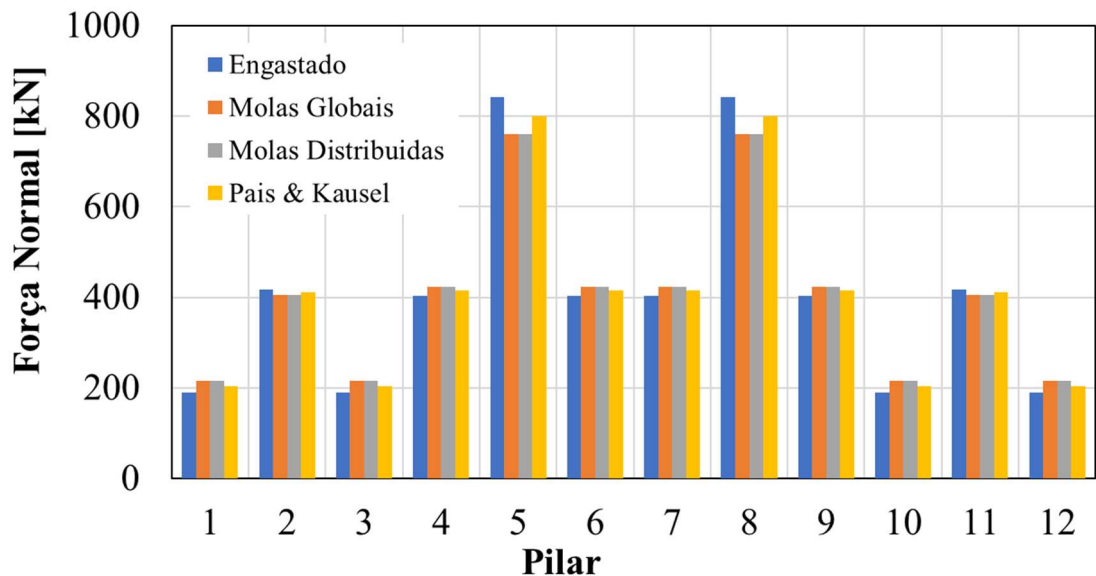
(Fonte: Autor, 2021)

6.4. Cenário 2

Este cenário visa estudar a influência da rigidez do solo na análise da ISE. Para isso, a estrutura utilizada caracteriza-se por possuir as mesmas características da estrutura do cenário 1 sendo alterado apenas o tipo de solo, que passará de um solo de areia fofa a um solo de areia compacta com coeficiente de Poisson de 0,4, índice de resistência a penetração de 19 e módulo de elasticidade de 50 MPa.

A Figura 49 apresenta os maiores valores das forças normais de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas no cenário 2.

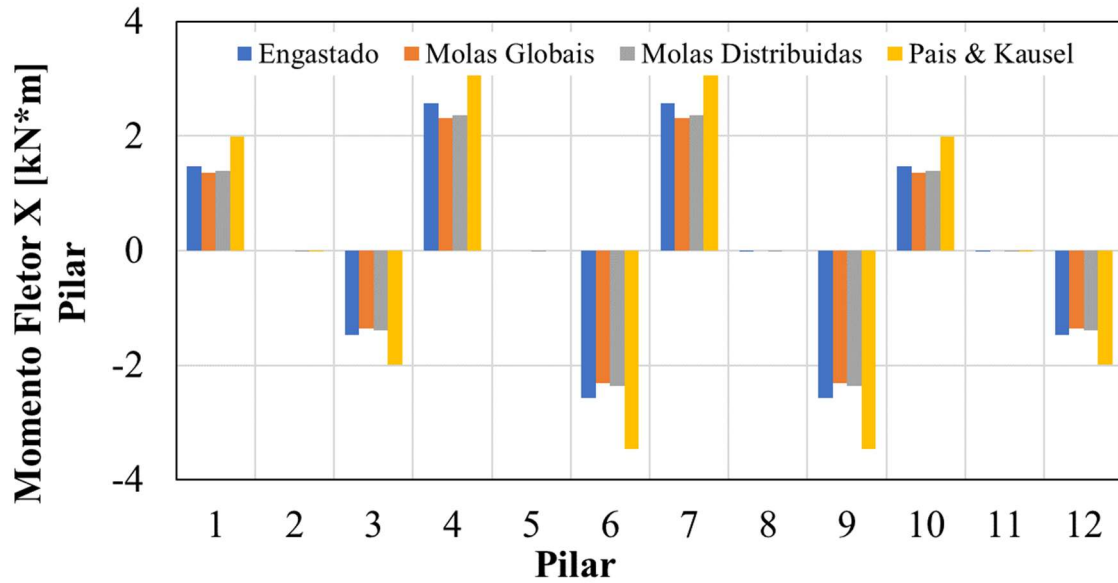
Figura 49 - Forças normais máximas nos pilares do cenário 2



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 50 apresenta os maiores valores dos momentos fletores em torno do eixo X da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Os sinais positivos e negativos dos momentos apresentados abaixo representam suas orientações.

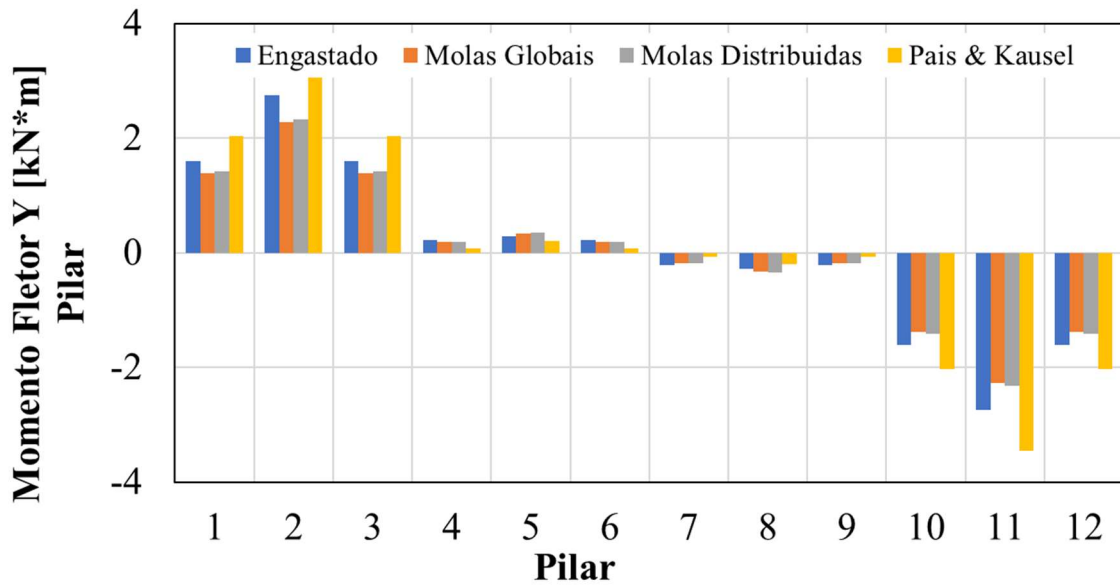
Figura 50 - Momento fletor em X nos pilares do cenário 2



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 51 apresenta os maiores valores dos momentos fletores em torno do eixo Y da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Os sinais positivos e negativos dos momentos apresentados abaixo representam suas orientações.

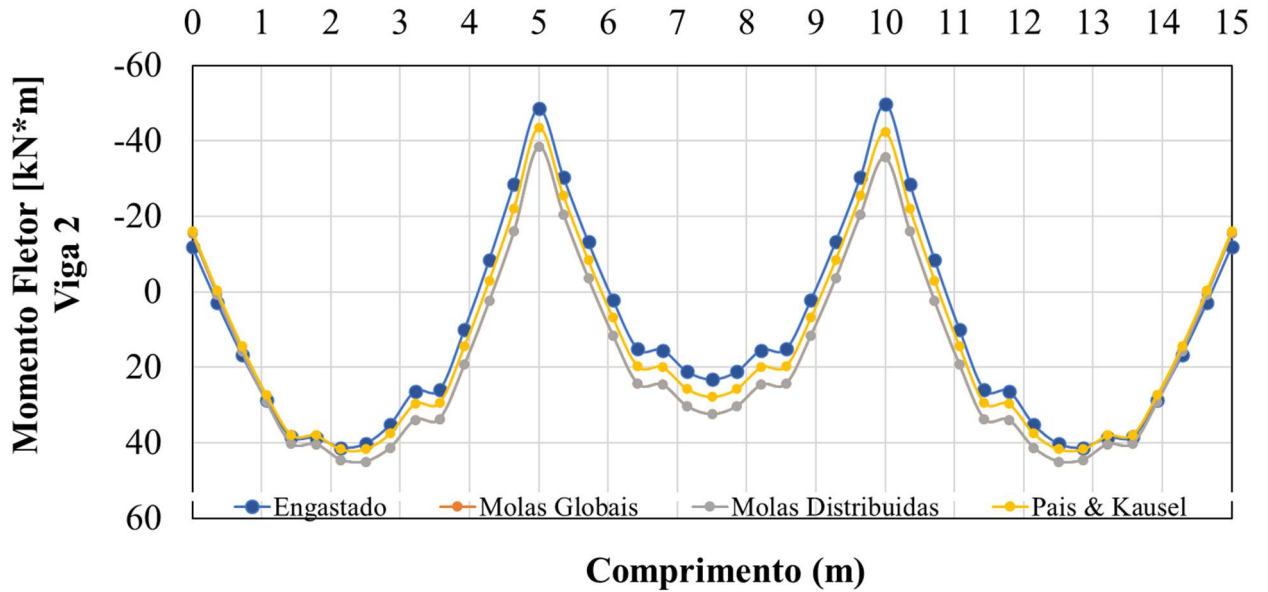
Figura 51 - Momento fletor em Y nos pilares do cenário 2



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 52 apresenta os valores dos momentos fletores em 43 pontos na viga 2 para as 4 hipóteses de apoio consideradas. O mesmo padrão de desenvolvimento em relação ao cenário anterior é mostrado, ou seja, a inclusão de ISE diminui os momentos fletores negativos nos apoios e aumenta os valores dos momentos positivos ao meio do vão. No entanto, a variação entre modelos é pouco significativa em relação ao cenário anterior, fato que é consistente devido à maior rigidez do solo neste caso.

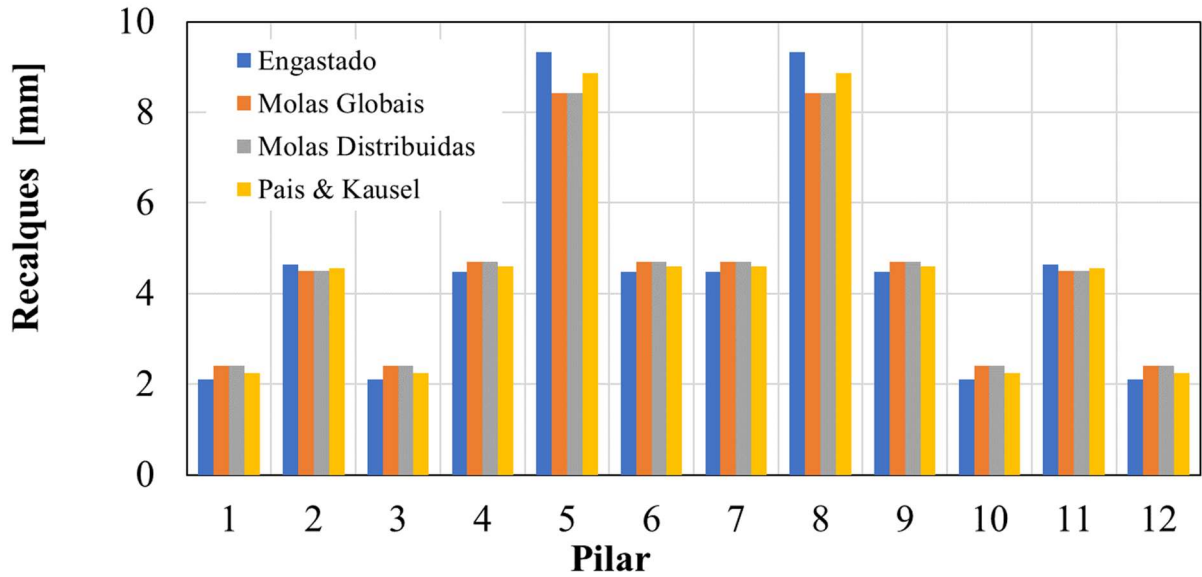
Figura 52 - Momento na viga 2 do cenário 2



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 53 apresenta os valores de recalque absoluto sem considerar a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas. Percebe-se que neste caso, os valores de recalque entre todos os modelos são quase similares, diferentemente do cenário anterior onde existia uma maior variação devido à maior flexibilidade do solo.

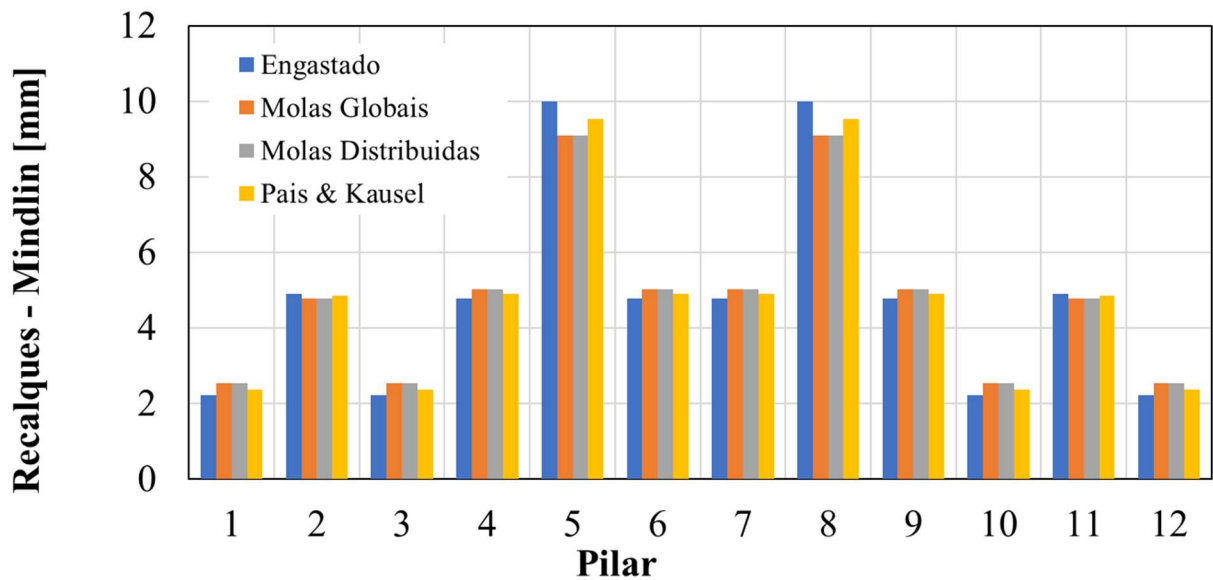
Figura 53 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança do cenário 2



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 54 apresenta os valores de recalque absoluto considerando a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas.

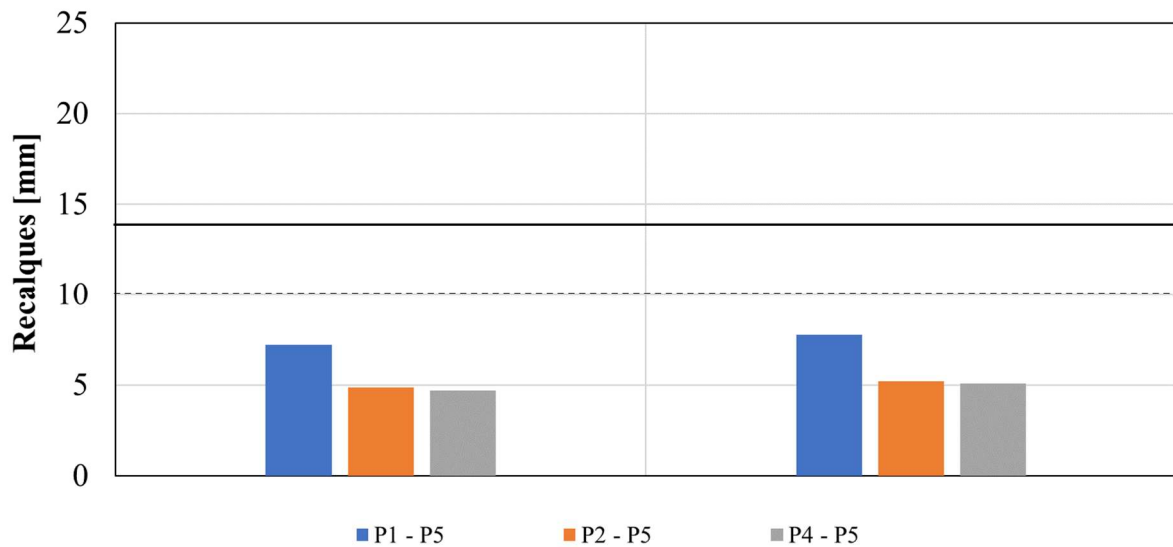
Figura 54 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança do cenário 2



(Fonte: Autor, 2021)

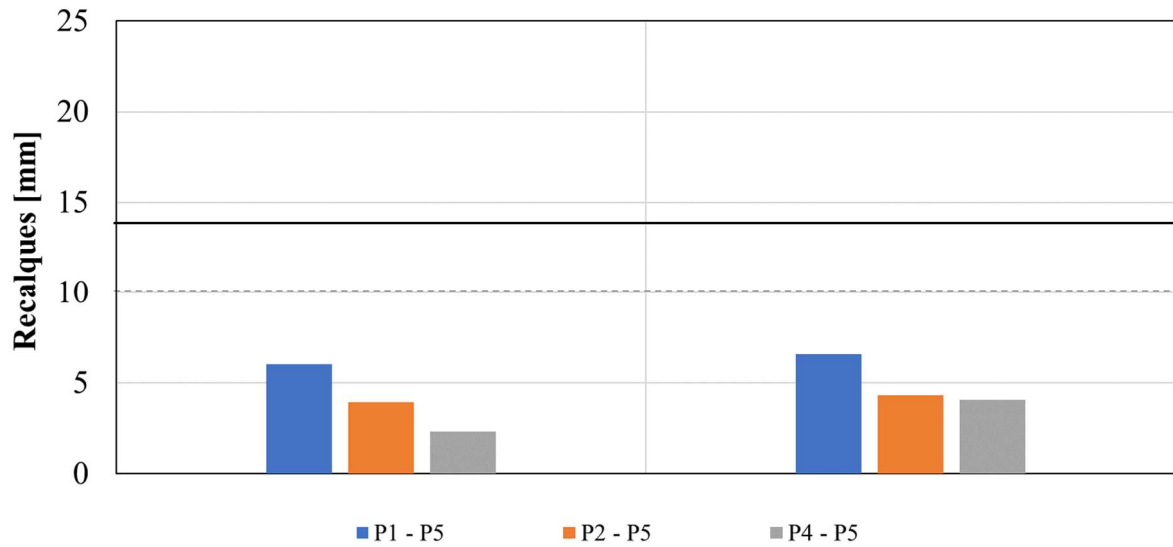
A Figura 55, Figura 56 e Figura 57 comparam os três maiores recalques diferenciais com os seus respectivos valores de limite tolerável para as hipótese de apoios engastados, molas globais/distribuídas e Pais e Kausel, respectivamente. As barras a esquerda dos gráficos referem-se ao caso sem o efeito da vizinhança e as barras a direita referem-se ao caso com efeito de vizinhança. A linha pontilhada refere-se ao limite tolerável de 10 mm correspondente ao recalque diferencial das fundações P2 – P5 e P4 – P5. A linha cheia refere-se ao limite tolerável de 14,14 mm referente ao limite do recalque diferencial P1 – P5. Neste cenário todos os casos estão abaixo dos limites toleráveis, indicando que um solo mais rígido gera menores recalques.

Figura 55 - Recalque diferencial x Limite tolerável no cenário 2 [engastado]



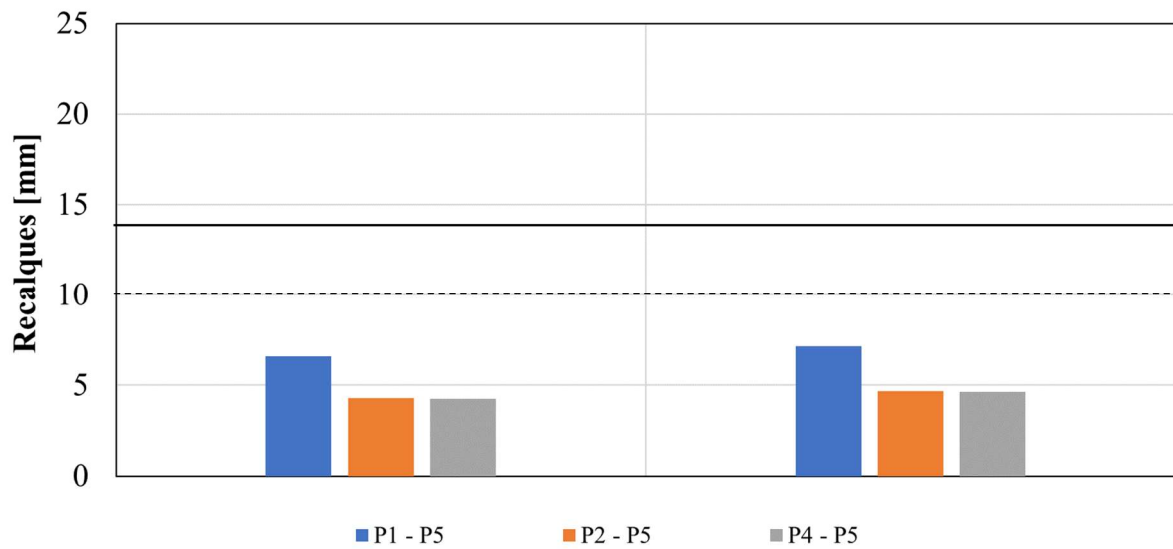
(Fonte: Autor, 2021)

Figura 56 - Recalque diferencial x limite tolerável no cenário 2 [molhas globais e molhas distribuídas]



(Fonte: Autor, 2021)

Figura 57 - Recalque diferencial x limite tolerável no cenário 2 [Pais e Kausel]

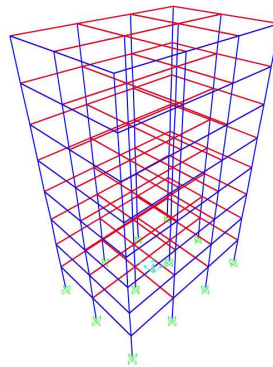


(Fonte: Autor, 2021)

6.5. Cenário 3

Este cenário visa estudar a influência do número de pavimentos na análise da ISE. Para isso, a estrutura utilizada caracteriza-se por possuir as mesmas características da estrutura do cenário 1 sendo alterado apenas o número de pavimentos, aumentado de 4 no cenário 1 para 8 (Figura 58). O solo sobre o qual a estrutura será construída continuará com as mesmas características do cenário 1.

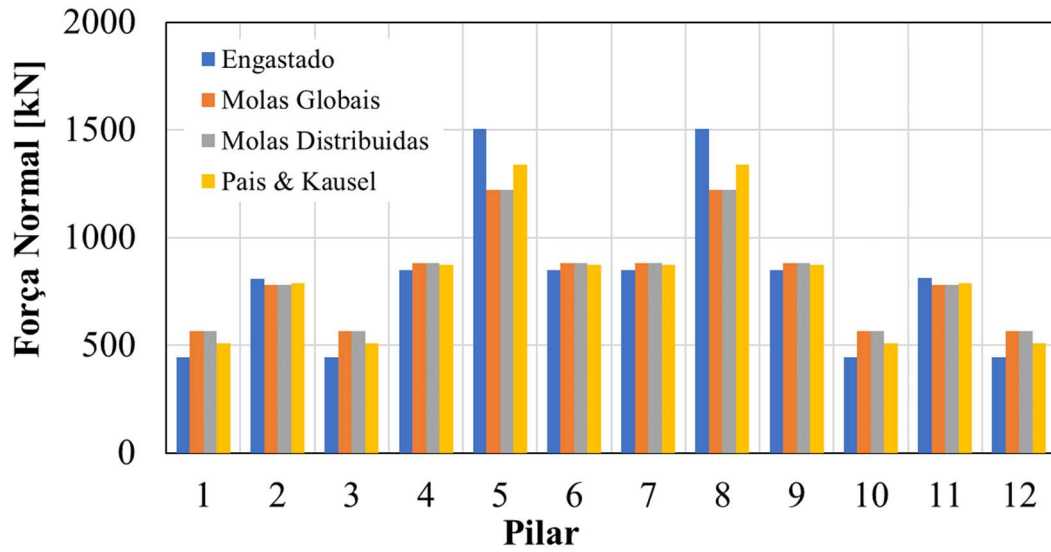
Figura 58 - Modelo da estrutura estudada no cenário 3



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 59 apresenta os maiores valores das forças normais de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas no cenário 3. Houve um incremento de aproximadamente 100% nos esforços axiais dos pilares, o que é consistente com a duplicação do número de pavimentos.

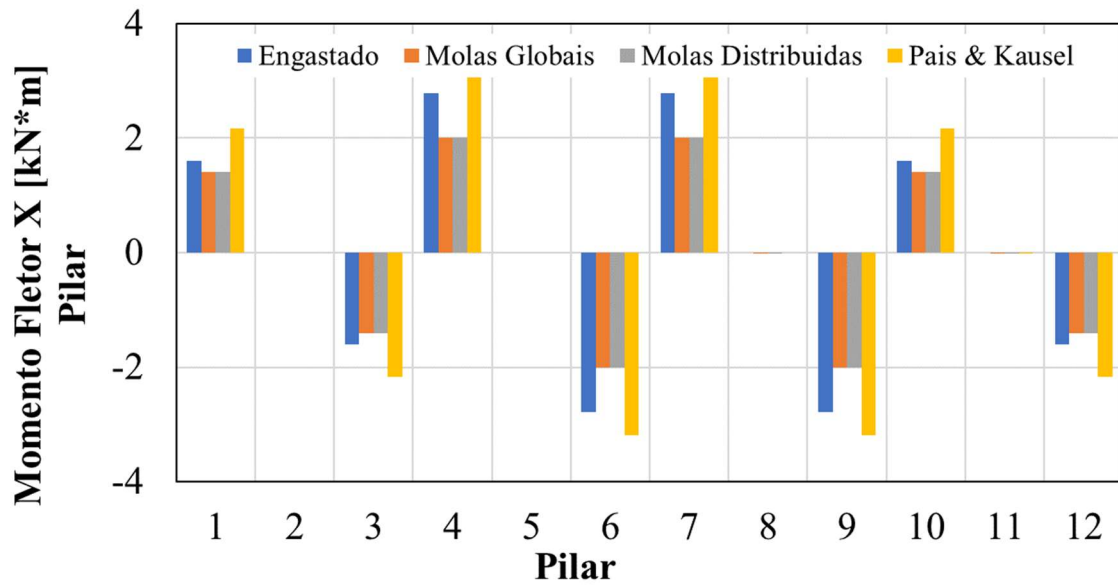
Figura 59 - Forças normais máximas nos pilares do cenário 3



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 60 apresenta os maiores valores dos momentos fletores em torno do eixo X da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Os sinais positivos e negativos dos momentos apresentados abaixo representam suas orientações.

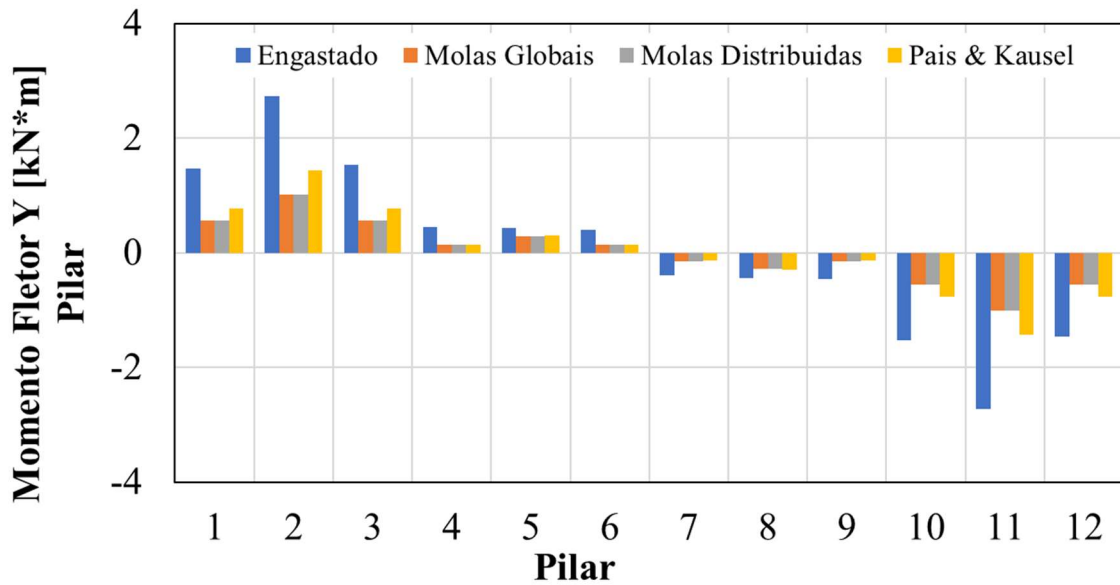
Figura 60 - Momento fletor em X nos pilares do cenário 3



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 61 apresenta os maiores valores dos momentos fletores em torno do eixo Y da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Os sinais positivos e negativos dos momentos apresentados abaixo representam suas orientações.

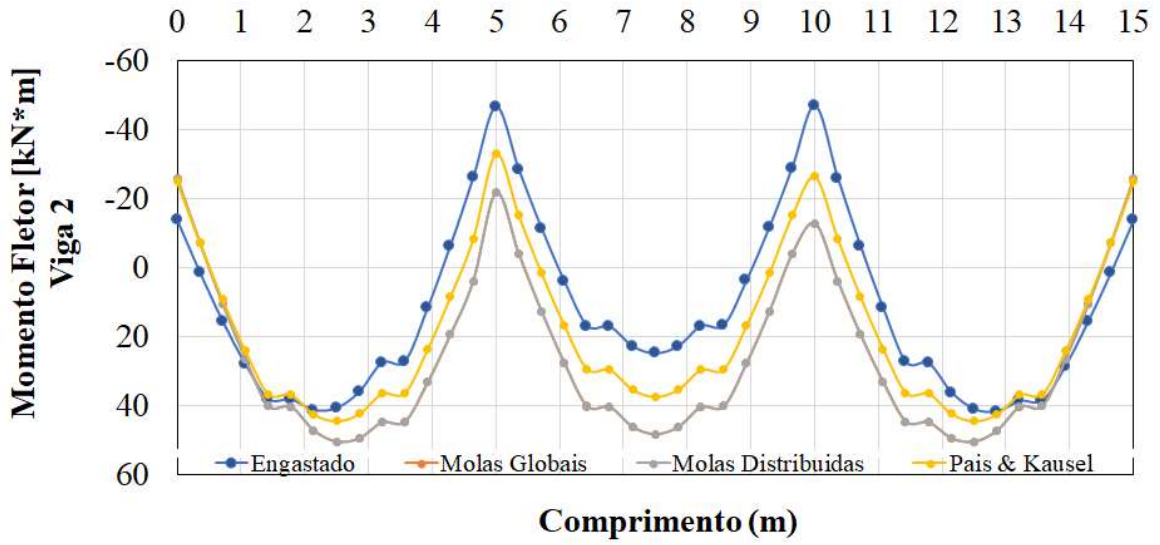
Figura 61 - Momento fletor em Y nos pilares do cenário 3



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 62 apresenta os valores dos momentos fletores em 43 pontos na viga 2 para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Percebe-se que o diagrama de momento não varia substancialmente em relação ao caso do cenário 1, ainda que o número de pavimentos aumento substancialmente (ver Figura 43). Isto pode ser explicado devido a que as vigas continuam recebendo o mesmo carregamento das lajes independente do número de andares. Como foi comentando anteriormente, seriam os pilares que vem aumentada sua carga neste caso.

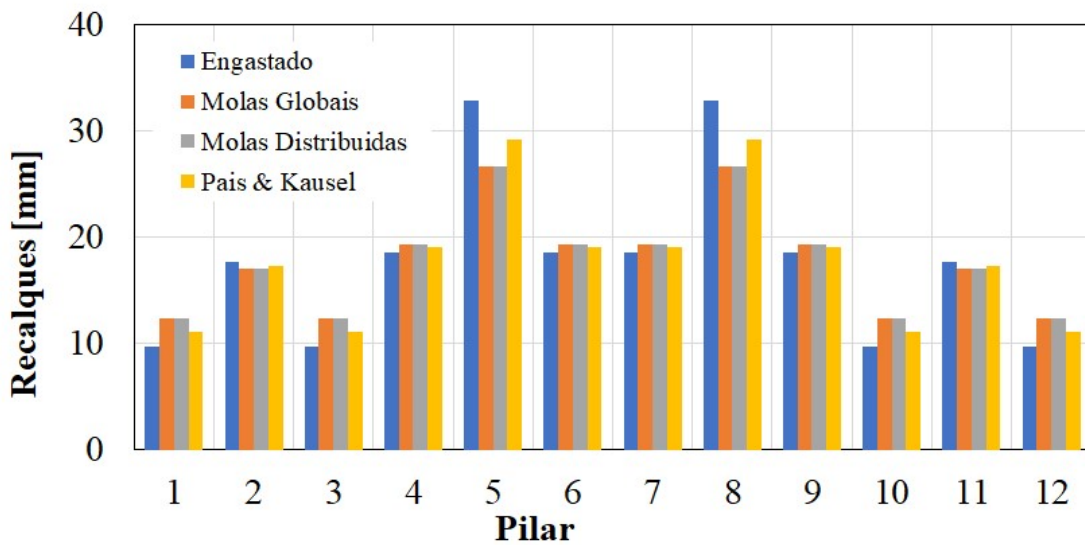
Figura 62 - Momento na viga 2 do cenário 3



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 63 apresenta os valores de recalque absoluto sem considerar a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas. Em relação ao cenário 1 (com máximo recalque de aproximadamente 25 mm para os pilares intermediários P5 e P8), o recalque nesses pilares tem aumentado em 7 mm.

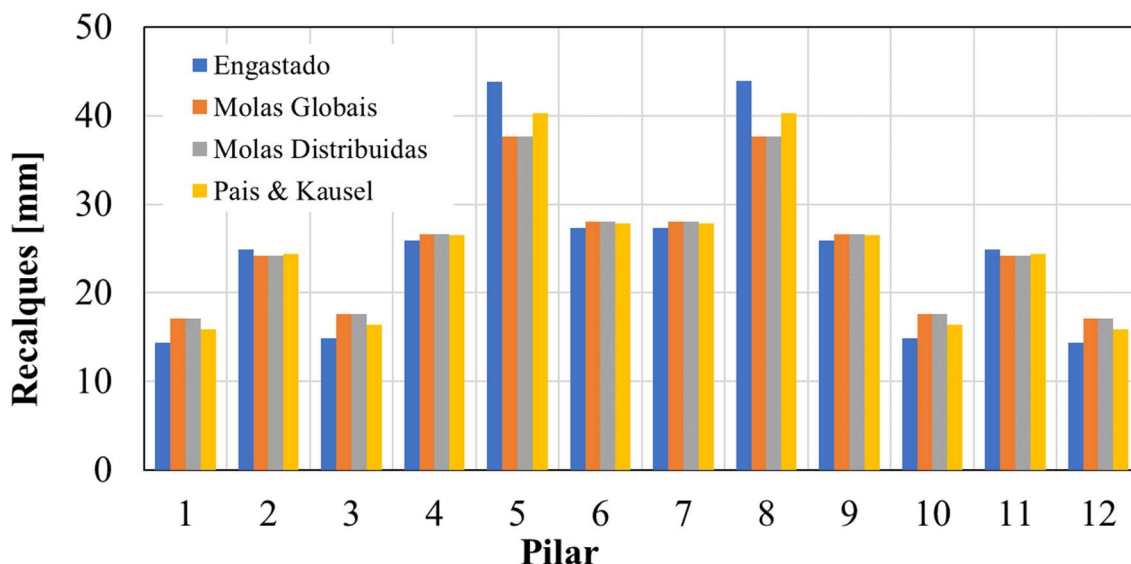
Figura 63 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança do cenário 3



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 64 apresenta os valores de recalque absoluto considerando a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas.

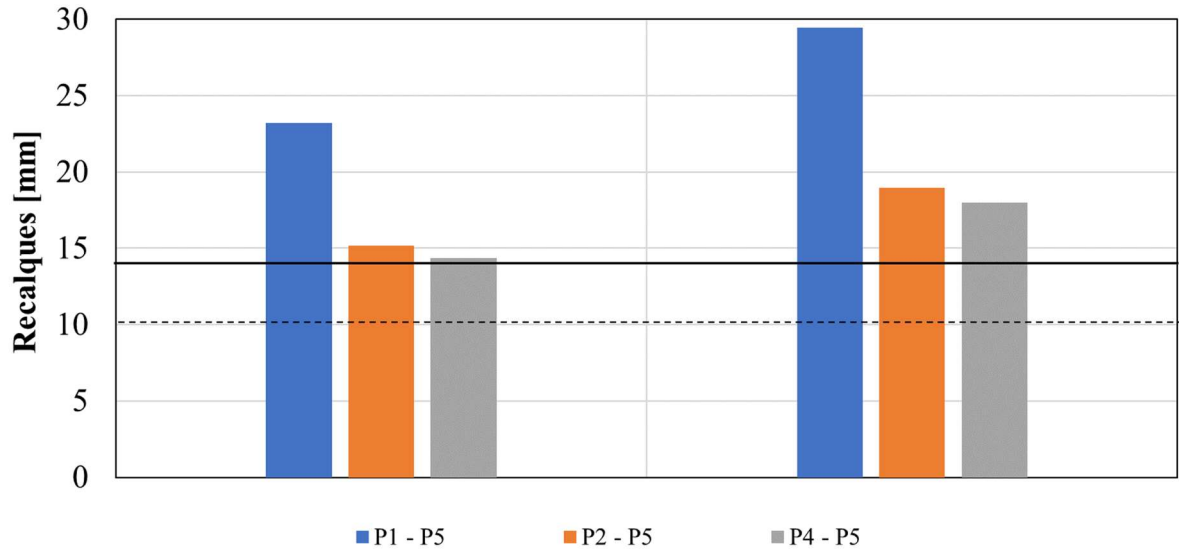
Figura 64 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança do cenário 3



(Fonte: Autor, 2021)

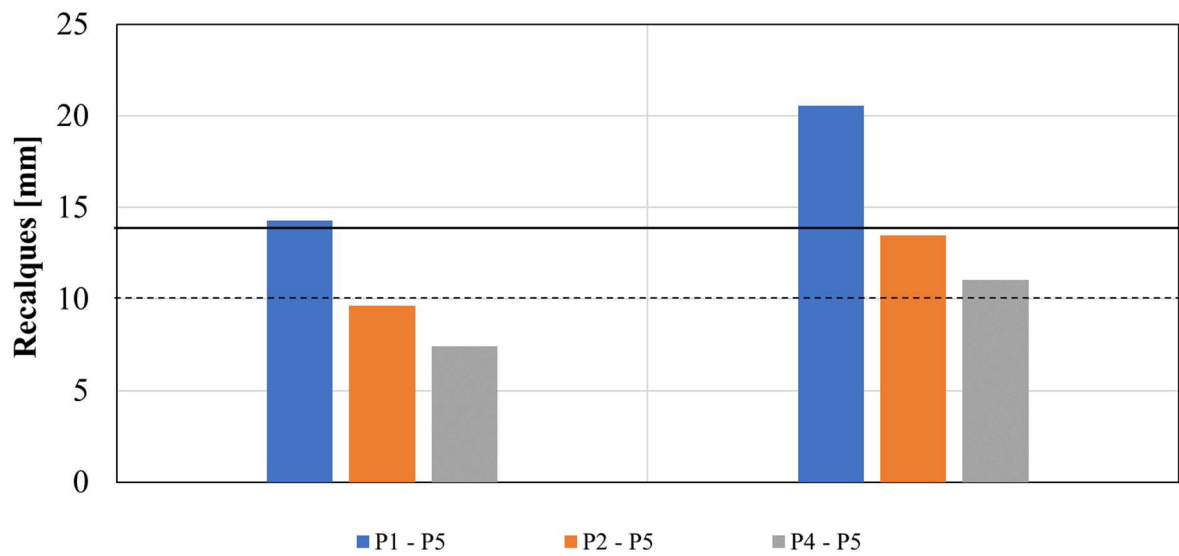
A Figura 65, Figura 66 e Figura 67 comparam os três maiores recalques diferenciais com os seus respectivos valores de limite tolerável para as hipóteses de apoios engastados, molas globais/distribuídas e Pais e Kausel, respectivamente. As barras a esquerda dos gráficos referem-se ao caso sem o efeito da vizinhança e as barras a direita referem-se ao caso com efeito de vizinhança. A linha pontilhada refere-se ao limite tolerável de 10 mm correspondente ao recalque diferencial das fundações P2 – P5 e P4 – P5. A linha cheia refere-se ao limite tolerável de 14,14 mm referente ao limite do recalque diferencial P1 – P5. Como é esperado, visto que no cenário com 4 pavimentos os limites toleráveis já eram superados, esses se vêm significativamente ultrapassados neste caso.

Figura 65 - Recalque diferencial x Limite tolerável do cenário 3 [engastado]



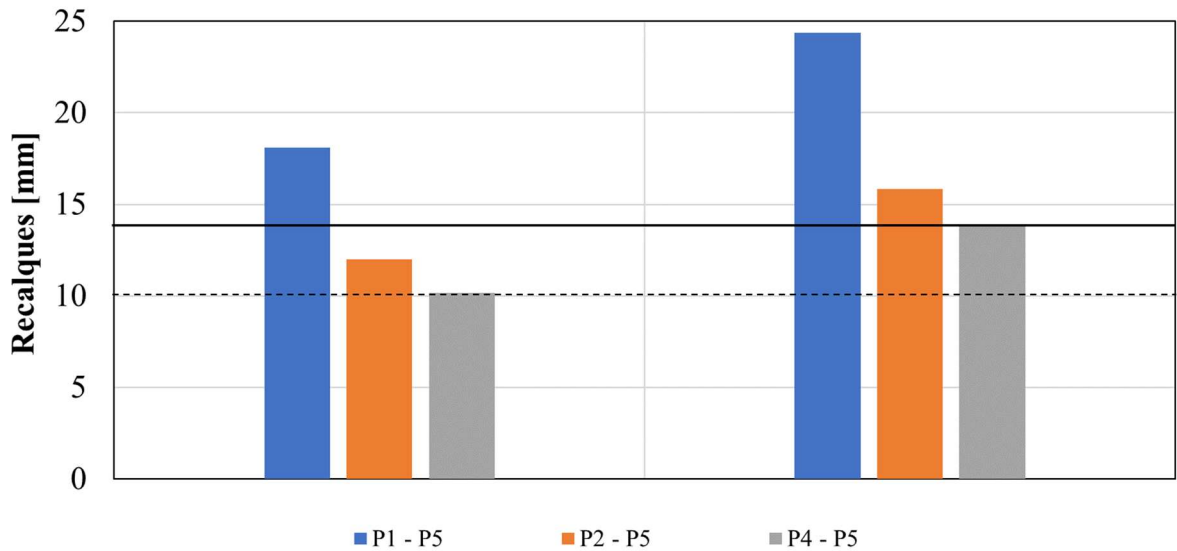
(Fonte: Autor, 2021)

Figura 66 - Recalque diferencial x limite tolerável do cenário 3 [molhas globais e molhas distribuídas]



(Fonte: Autor, 2021)

Figura 67 - Recalque diferencial x limite tolerável do cenário 3 [Pais e Kausel]

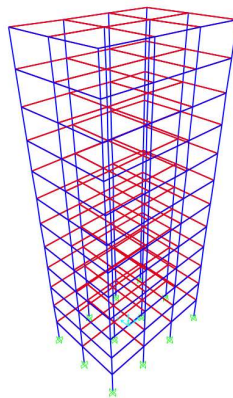


(Fonte: Autor, 2021)

6.6. Cenário 4

O cenário 4, assim como o cenário 3, busca estudar a influência do número de pavimentos na ISE. Entretanto, diferentemente do cenário 3, neste cenário será estudada uma estrutura com 12 pavimentos (Figura 68). O solo sobre o qual a estrutura será construída continuará com as mesmas características do cenário 1.

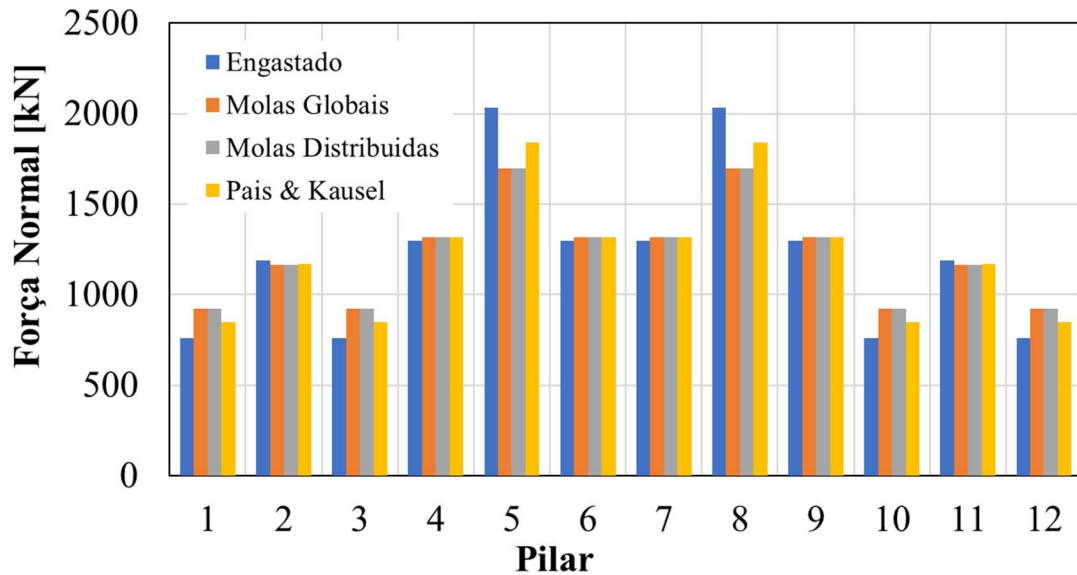
Figura 68 - Modelo da estrutura estudada no cenário 4



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 69 apresenta os maiores valores das forças normais de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas no cenário 4.

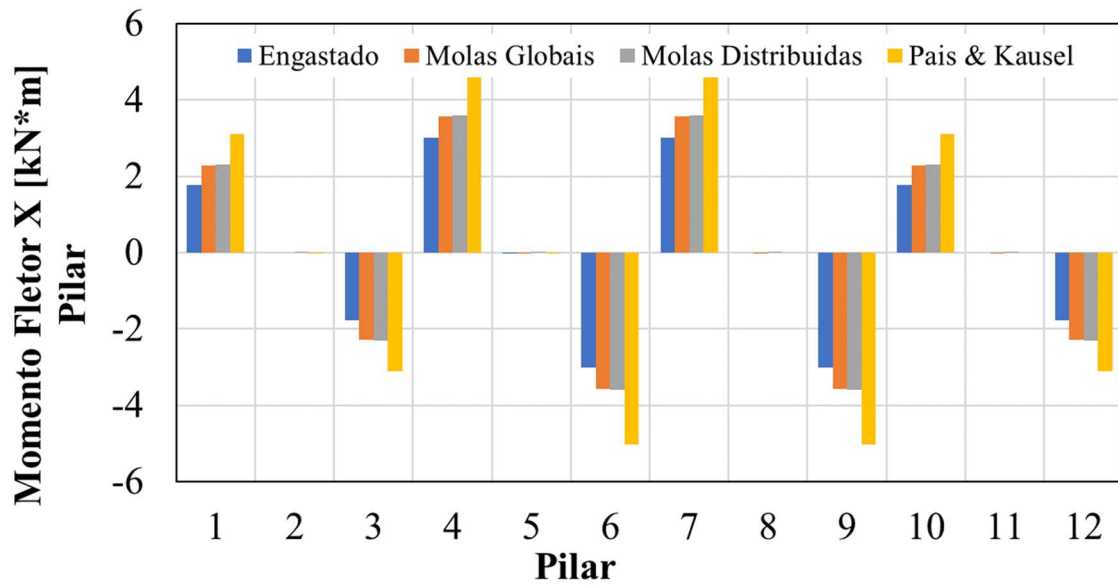
Figura 69 - Forças normais máximas nos pilares do cenário 4



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 70 apresenta os maiores valores dos momentos fletores em torno do eixo X da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Os sinais positivos e negativos dos momentos apresentados abaixo representam suas orientações.

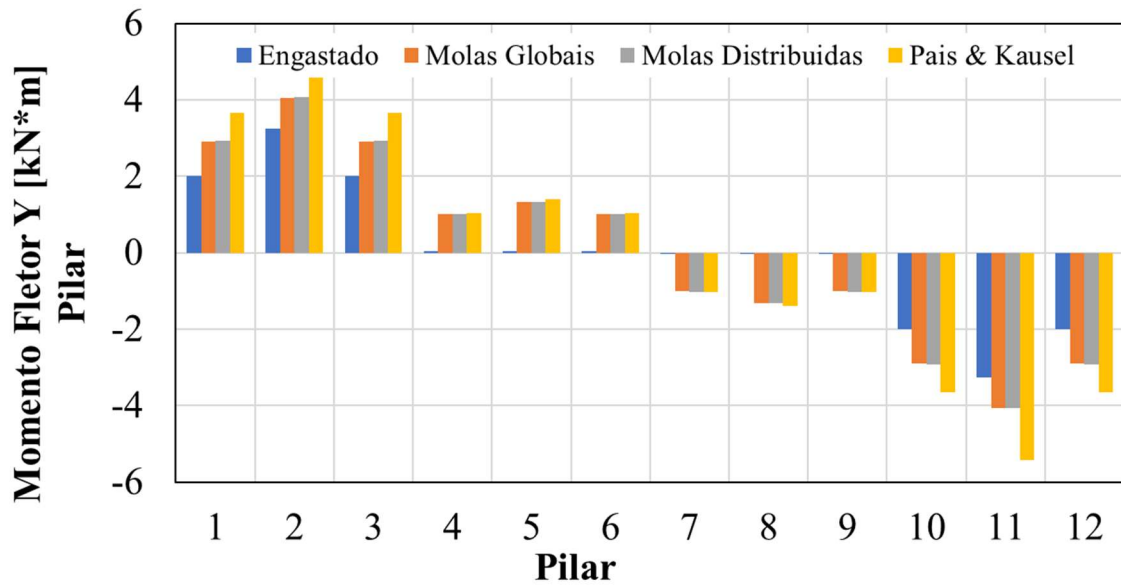
Figura 70 - Momento fletor em X nos pilares do cenário 4



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 71 apresenta os maiores valores dos momentos fletores em torno do eixo Y da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Os sinais positivos e negativos dos momentos apresentados abaixo representam suas orientações.

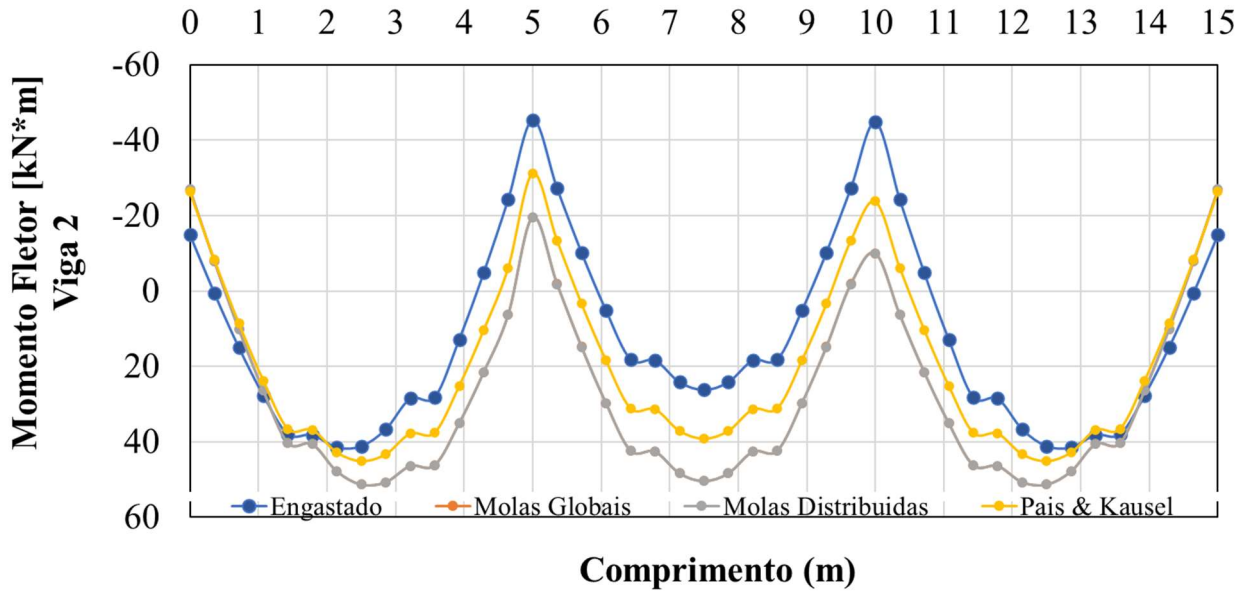
Figura 71 - Momento fletor em Y nos pilares do cenário 4



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 72 apresenta os valores dos momentos fletores em 43 pontos na viga 2 para as 4 hipóteses de apoio consideradas.

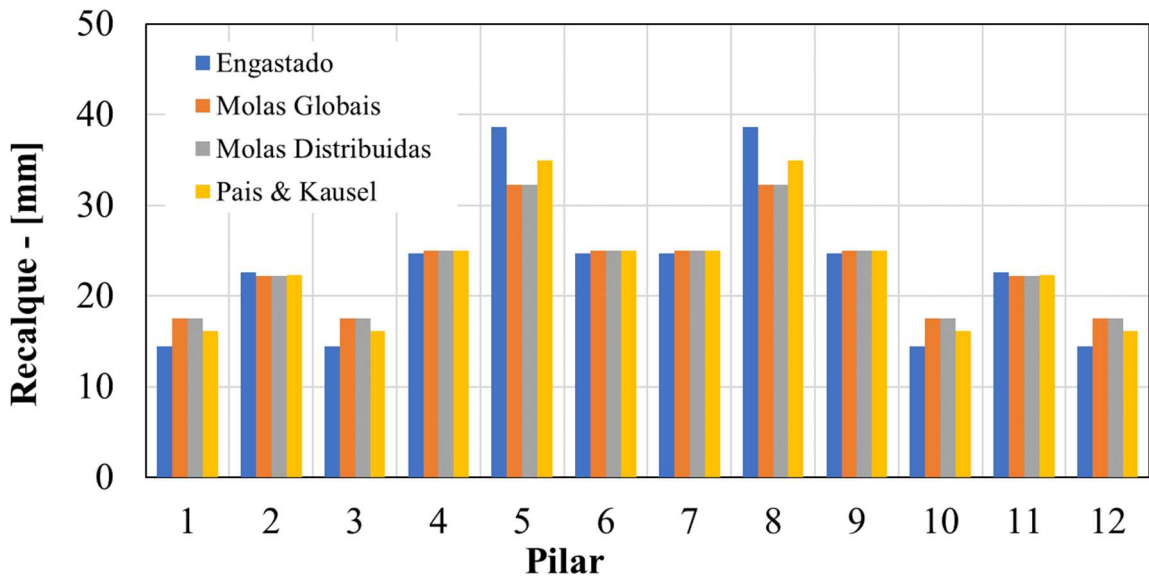
Figura 72 - Momento na viga 2 do cenário 4



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 73 apresenta os valores de recalque absoluto sem considerar a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas.

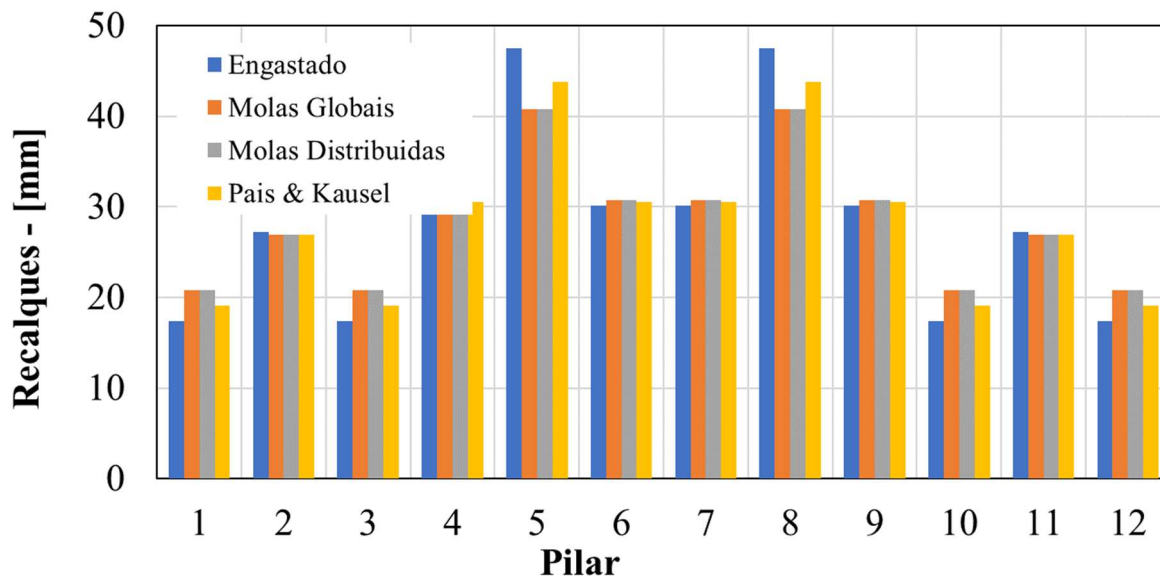
Figura 73 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança do cenário 4



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 74 apresenta os valores de recalque absoluto considerando a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas.

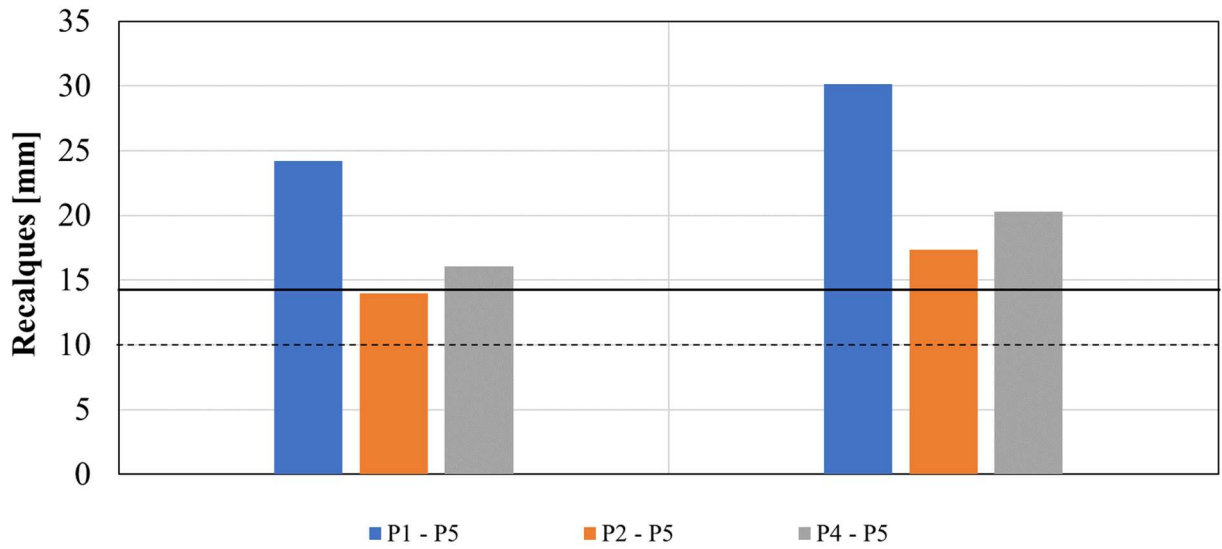
Figura 74 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança do cenário 4



(Fonte: Autor, 2021)

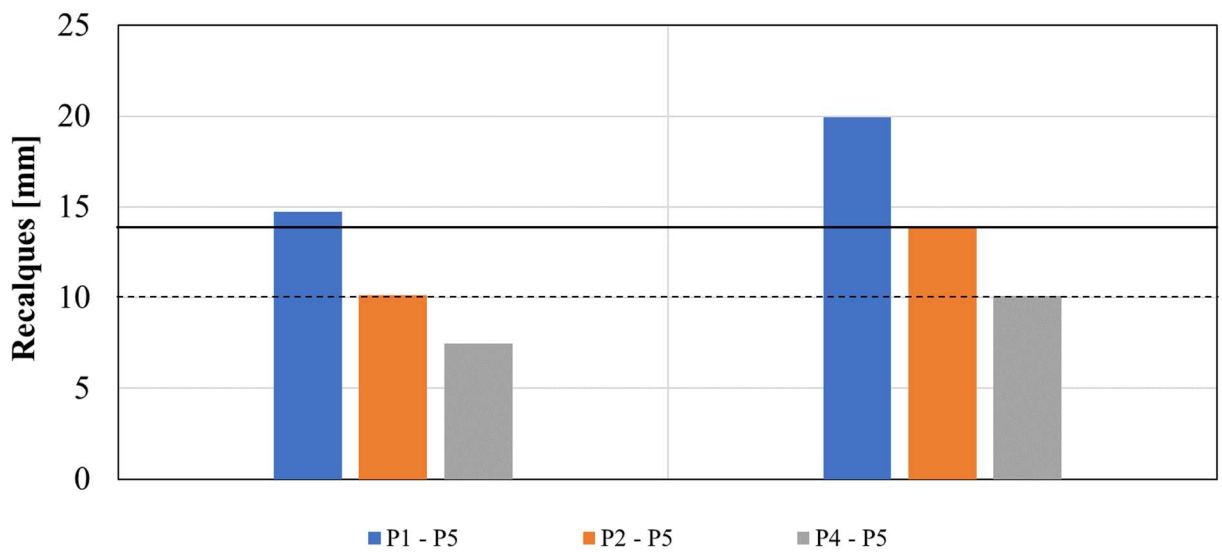
A Figura 75, Figura 76 e Figura 77 comparam os três maiores recalques diferenciais com os seus respectivos valores de limite tolerável para as hipóteses de apoios engastados, molas globais/distribuídas e Pais e Kausel, respectivamente. As barras a esquerda dos gráficos referem-se ao caso sem o efeito da vizinhança e as barras a direita referem-se ao caso com efeito de vizinhança. A linha pontilhada refere-se ao limite tolerável de 10 mm correspondente ao recalque diferencial das fundações P2 – P5 e P4 – P5. A linha cheia refere-se ao limite tolerável de 14,14 mm referente ao limite do recalque diferencial P1 – P5.

Figura 75 - Recalque diferencial x Limite tolerável do cenário 4 [engastado]



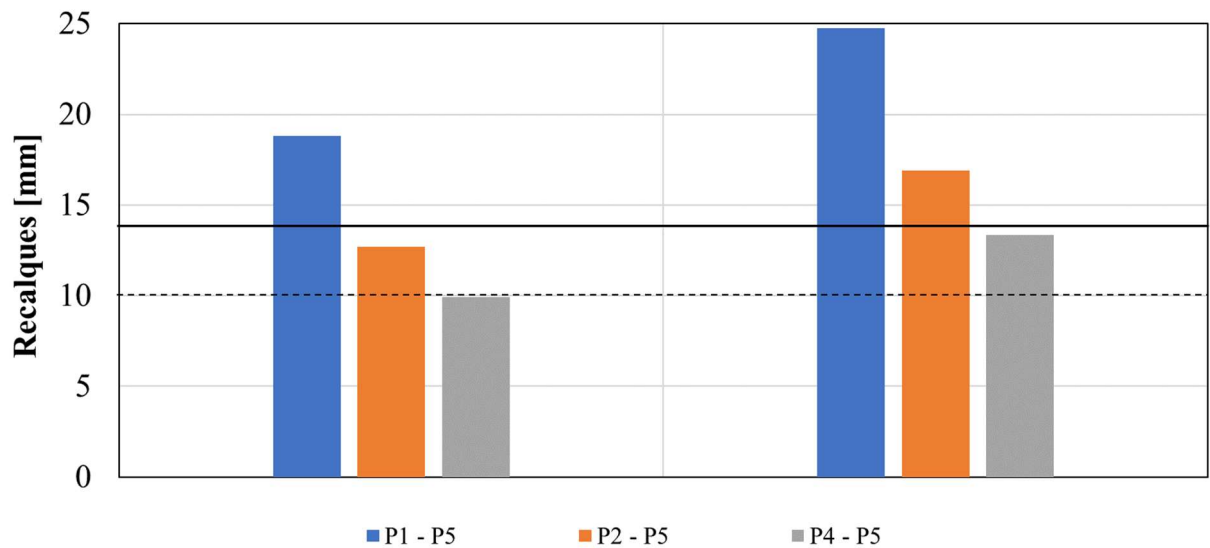
(Fonte: Autor, 2021)

Figura 76 - Recalque diferencial x limite tolerável do cenário 4 [molais globais e molais distribuídas]



(Fonte: Autor, 2021)

Figura 77 - Recalque diferencial x limite tolerável do cenário 4 [Pais e Kausel]

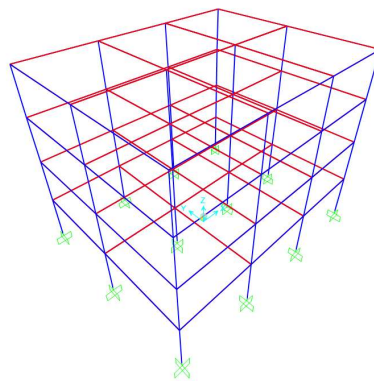


(Fonte: Autor, 2021)

6.7. Cenário 5

Este cenário visa estudar a influência da forma em planta da edificação na análise da ISE. Para isso, a estrutura utilizada terá a distância entre os pilares aumentada de 5m para 6m no eixo Y. Segundo Barata (1986) ao aproximar-se de 1 a relação entre os lados da forma em planta da edificação há a tendência de ocorrer a uniformização dos recalques. O número de pavimentos e as características do solo permaneceram iguais ao do cenário 1.

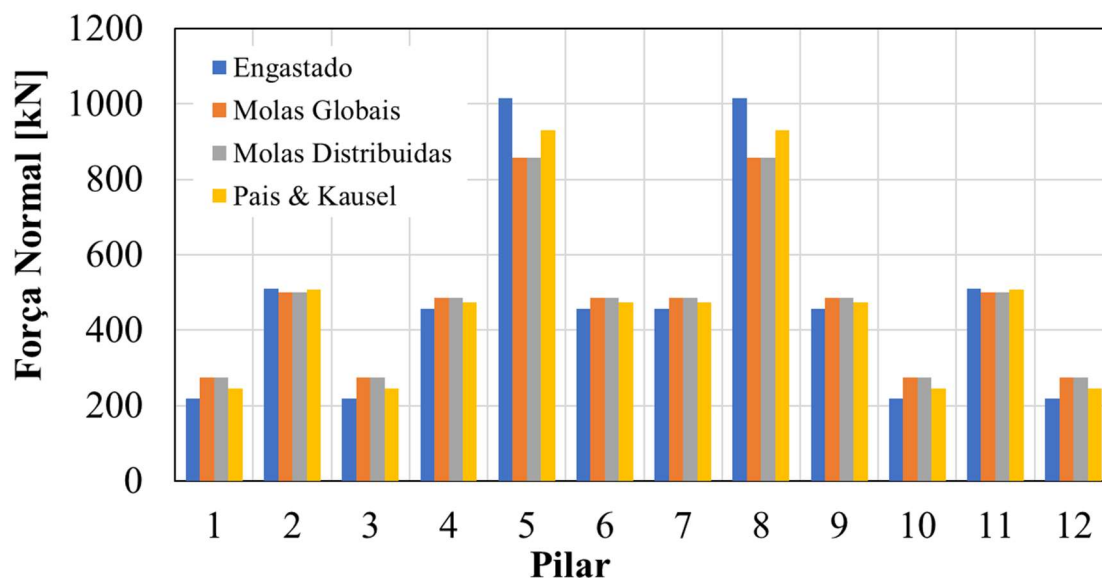
Figura 78 - Modelo da estrutura estudada no cenário 5



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 79 apresenta os maiores valores das forças normais de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas no cenário 5.

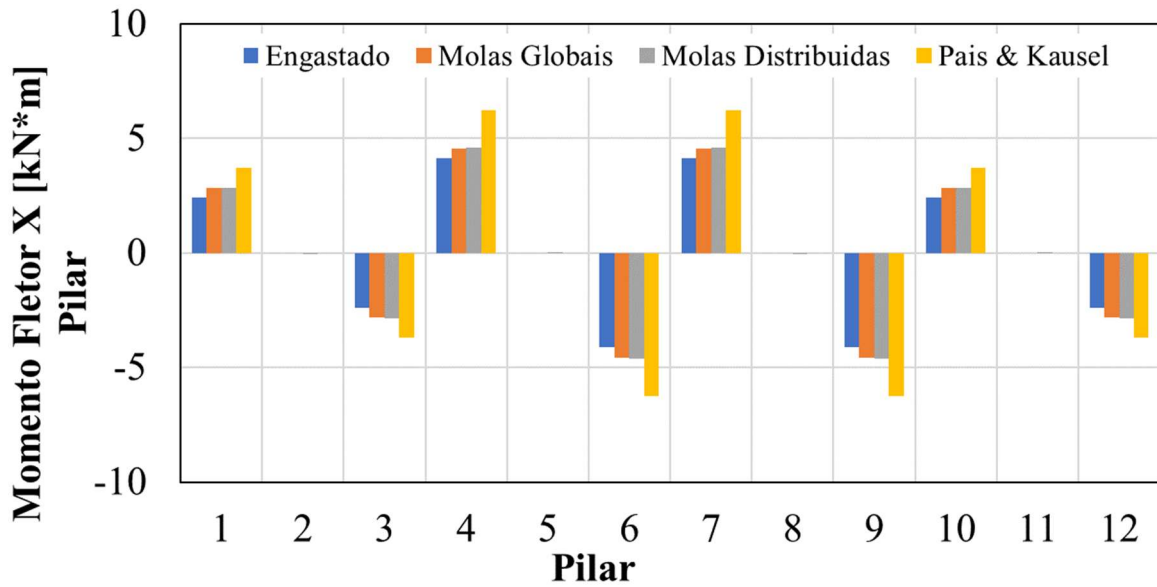
Figura 79 - Forças normais máximas nos pilares do cenário 5



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 80 apresenta os maiores valores dos momentos fletores em torno do eixo X da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Os sinais positivos e negativos dos momentos apresentados abaixo representam suas orientações.

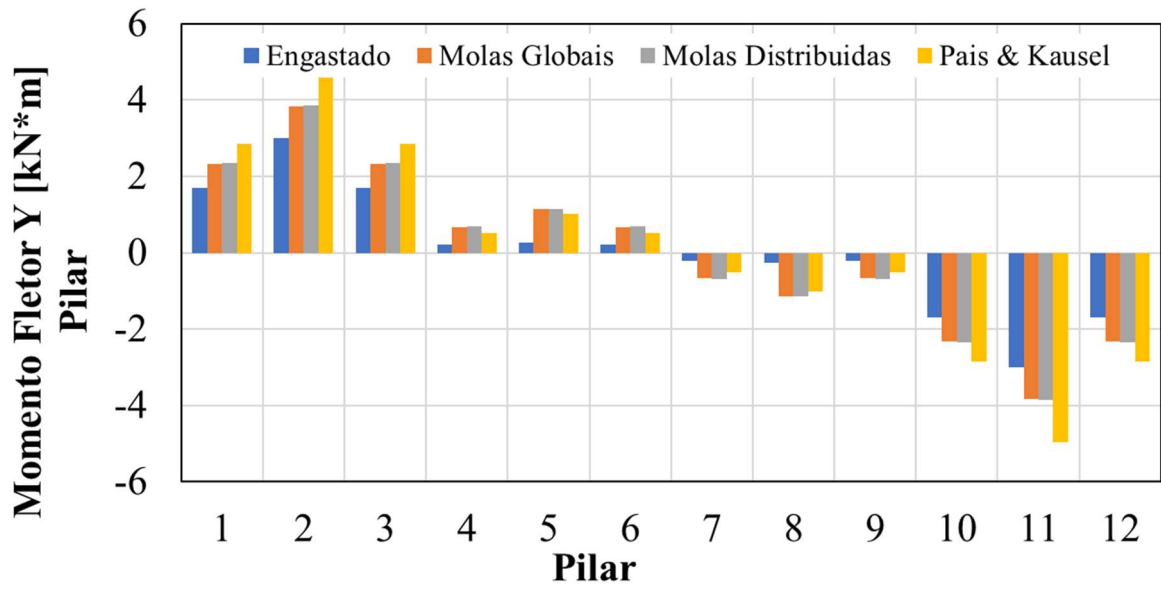
Figura 80 - Momento fletor em X nos pilares do cenário 5



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 81 apresenta os maiores valores dos momentos fletores em torno do eixo Y da base dos pilares de todos os pilares da estrutura para as 4 hipóteses de apoio consideradas. Os sinais positivos e negativos dos momentos apresentados abaixo representam suas orientações.

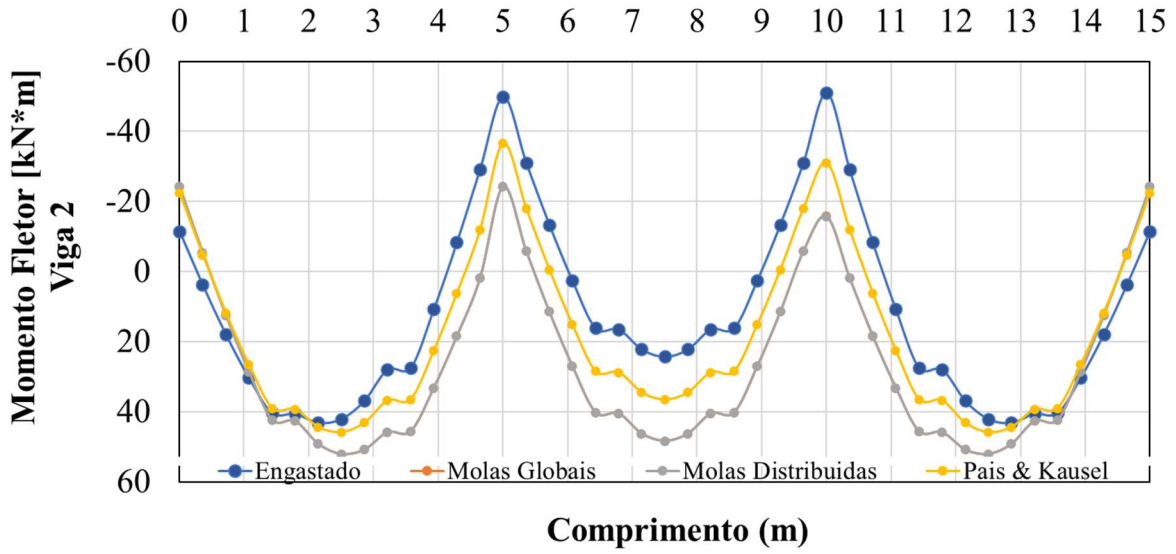
Figura 81 - Momento fletor em Y nos pilares do cenário 5



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 82 apresenta os valores dos momentos fletores em 43 pontos na viga 2 para as 4 hipóteses de apoio consideradas.

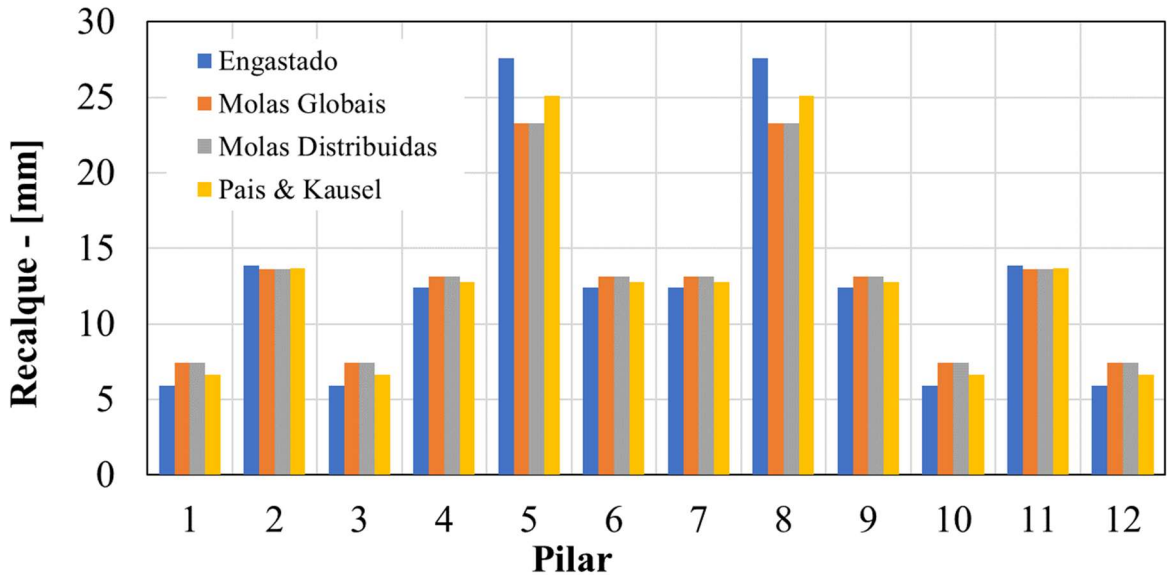
Figura 82 - Momento na viga 2 do cenário 5



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 83 apresenta os valores de recalque absoluto sem considerar a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas.

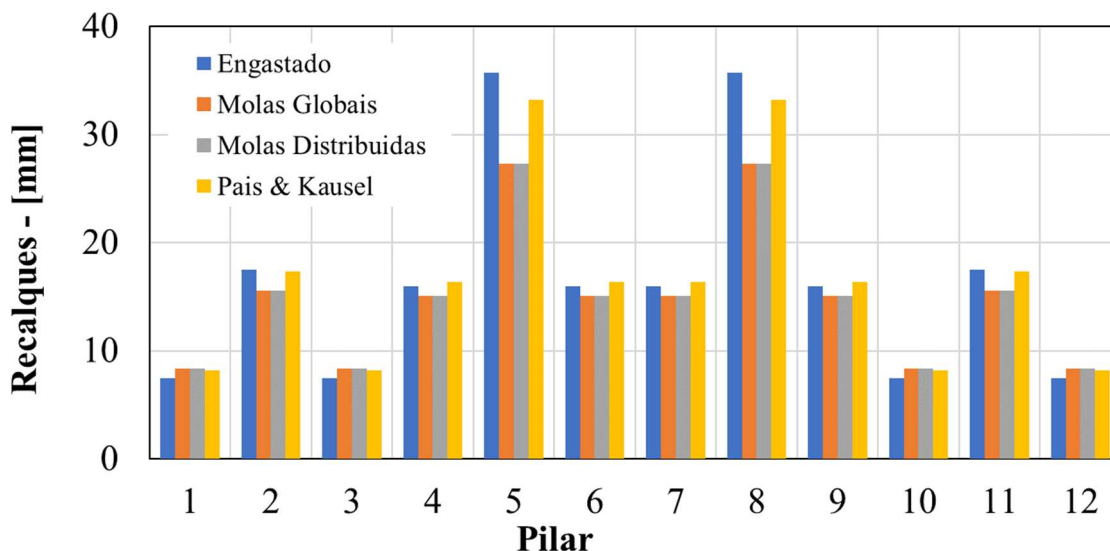
Figura 83 - Recalques absolutos nos pilares sem vizinhança do cenário 5



(Fonte: Autor, 2021)

A Figura 84 apresenta os valores de recalque absoluto considerando a influência do efeito da vizinhança de todos os pilares considerando as 4 hipóteses de apoio consideradas.

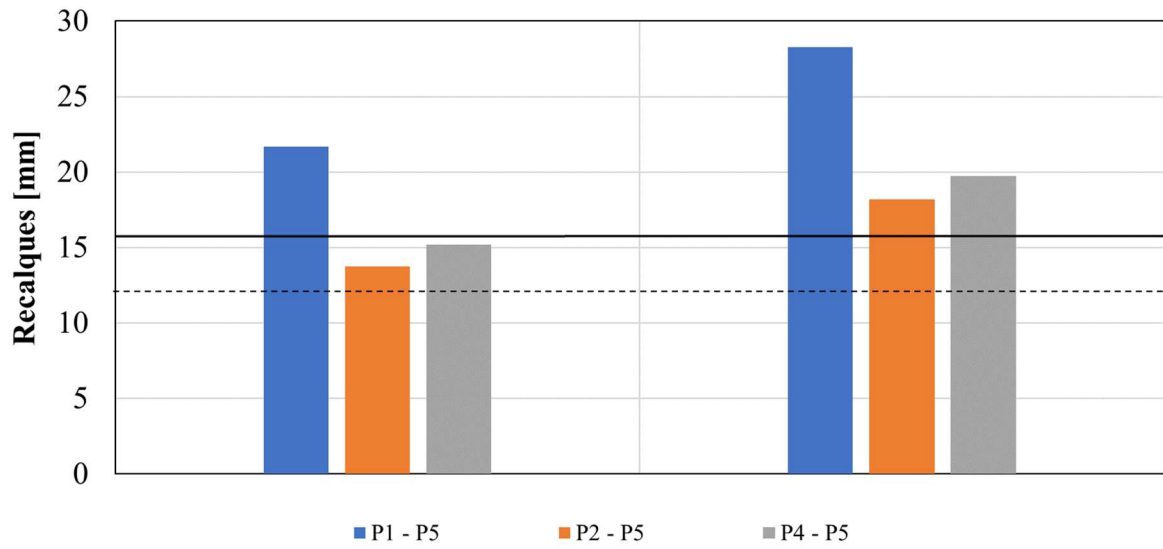
Figura 84 - Recalque absoluto nos pilares com vizinhança do cenário 5



(Fonte: Autor, 2021)

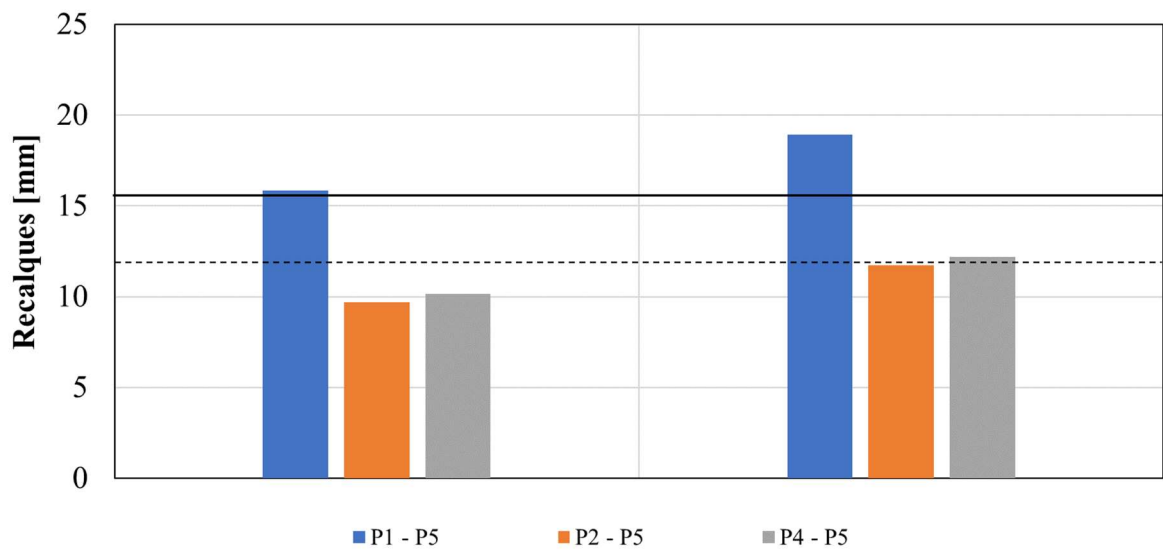
A Figura 85, Figura 86 e Figura 87 comparam os três maiores recalques diferenciais com os seus respectivos valores de limite tolerável para as hipóteses de apoios engastados, molas globais/distribuídas e Pais e Kausel, respectivamente. As barras a esquerda dos gráficos referem-se ao caso sem o efeito da vizinhança e as barras a direita referem-se ao caso com efeito de vizinhança. A linha pontilhada refere-se ao limite tolerável de 12 mm correspondente ao recalque diferencial das fundações P2 – P5 e P4 – P5. A linha cheia refere-se ao limite tolerável de 15,62 mm referente ao limite do recalque diferencial P1 – P5.

Figura 85 - Recalque diferencial x Limite tolerável do cenário 5 [engastado]



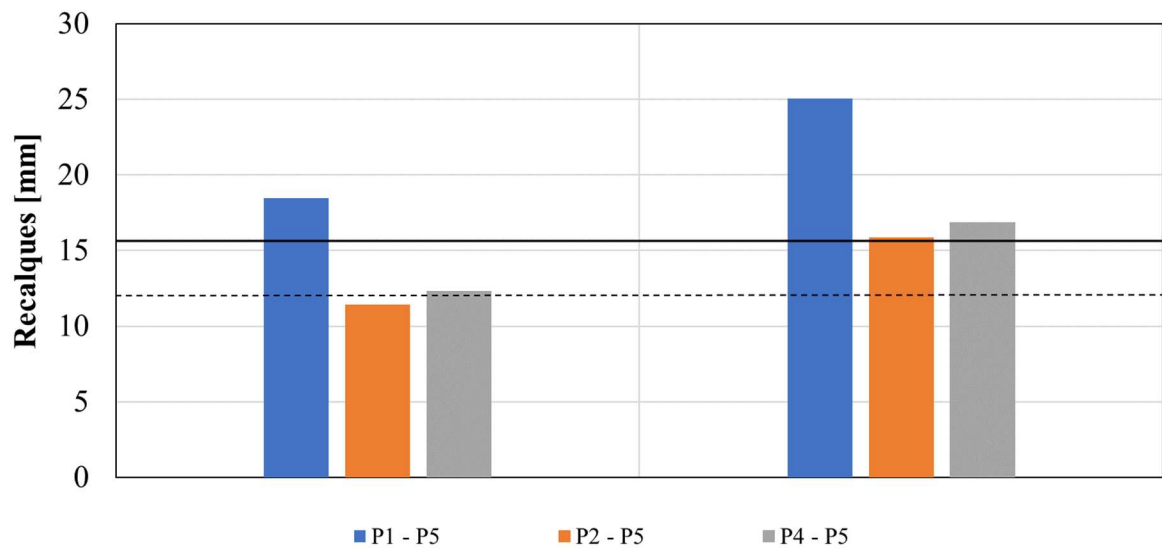
(Fonte: Autor, 2021)

Figura 86 - Recalque diferencial x limite tolerável do cenário 5 [molhas globais e molhas distribuídas]



(Fonte: Autor, 2021)

Figura 87 - Recalque diferencial x limite tolerável do cenário 5 [Pais e Kausel]



(Fonte: Autor, 2021)

6.8. Discussão dos resultados

6.8.1. Reações verticais

A Tabela 12 apresenta a relação entre os valores das reações verticais de cada pilar considerando a ISE, apresentados no item 4.2, com os valores das reações verticais encontradas considerando a hipótese de apoios fixos, também apresentados no item 4.2.

Tabela 12 - Relação entre as reações verticais com e sem o efeito da vizinhança [%]

Molas Globais					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	131%	114%	128%	121%	126%
P2 e P11	95%	97%	96%	98%	98%
P4, P6, P7 e P9	108%	105%	104%	101%	106%
P5 e P8	81%	90%	81%	83%	84%
Molas Distribuídas					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	131%	114%	128%	121%	126%
P2 e P11	95%	97%	96%	98%	98%
P4, P6, P7 e P9	108%	105%	104%	101%	106%
P5 e P8	81%	90%	81%	83%	84%
Pais e Kausel					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	116%	107%	115%	112%	113%
P2 e P11	97%	99%	97%	99%	99%
P4, P6, P7 e P9	106%	103%	103%	101%	104%
P5 e P8	89%	95%	89%	90%	91%

(Fonte: Autor, 2021)

Com relação às variações das reações verticais, foi constatada a tendência à homogeneização dos valores percebida pela redistribuição das reações ao se considerar a ISE. Tais valores foram mais representativos, conforme já era esperado, no cenário 1, apresentado um acréscimo de 31% nas reações dos pilares 1, 2, 10 e 12 e um decréscimo de 29% nas reações dos pilares 5 e 8. Tais variações representam valores significativos à análise da estrutura e a sua não consideração pode levar ao subdimensionamento das estruturas e consequentes danos estruturais.

Também é possível notar a influência que a rigidez da estrutura e do solo exercem na redistribuição das reações uma vez que ao aumentar a rigidez do solo, cenário 2, ou da

estrutura, cenário 3 e 4, constatou-se uma variação menor entre os modelos com ISE e com apoios engastados.

Percebe-se assim, que quanto menos rígida é a estrutura ou o solo mais importante torna-se a consideração da ISE na análise estrutural.

6.8.2. Momentos fletores em X e em Y nos pilares

As Tabelas 13 e 14 apresentam a relação entre os valores de momentos fletores encontrados para os pilares considerando os apoios engastados e considerando a ISE. Uma vez que não foram consideradas as cargas de vento nos cenários, os valores de momento fletor em X e em Y encontrados são muito baixos, fazendo com que pequenas diferenças absolutas entre os modelos resultem em diferenças percentuais bastante elevadas, como foi constatado no cenário 4 onde as diferenças percentuais obtidas entre o método de apoios engastados e os métodos que consideram a ISE chegaram a mais de 4000%, essa diferença representou, entretanto, uma variação de apenas 1,36 kN/m.

Desta forma, os cenários utilizados neste estudo não retornam valores bons o suficiente para se realizar uma análise da influência da consideração da ISE nos momentos fletores dos pilares.

Tabela 13 - Variação dos momentos fletores nos pilares no eixo X

Molas Globais					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	38%	-8%	-12%	28%	18%
P2 e P11	0%	0%	0%	0%	0%
P4, P6, P7 e P9	29%	-10%	-28%	19%	10%
P5 e P8	0%	0%	0%	0%	0%
Molas Distribuídas					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	40%	-6%	-12%	29%	19%
P2 e P11	0%	0%	0%	0%	0%
P4, P6, P7 e P9	31%	-8%	-28%	19%	11%
P5 e P8	0%	0%	0%	0%	0%
Pais e Kausel					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	82%	35%	34%	74%	54%
P2 e P11	0%	0%	0%	0%	0%
P4, P6, P7 e P9	76%	35%	14%	67%	51%
P5 e P8	0%	0%	0%	0%	0%

(Fonte: Autor, 2021)

Tabela 14 - Variação dos momentos fletores nos pilares no eixo Y

Molas Globais					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	38%	-14%	-62%	45%	38%
P2 e P11	22%	-18%	-63%	25%	28%
P4, P6, P7 e P9	193%	-15%	-68%	3645%	223%
P5 e P8	230%	18%	-35%	4304%	341%
Molas Distribuídas					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	40%	-12%	-62%	56%	40%
P2 e P11	23%	-16%	-63%	25%	29%
P4, P6, P7 e P9	197%	-13%	-68%	3664%	226%
P5 e P8	234%	21%	-35%	4325%	346%
Pais e Kausel					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	70%	27%	-47%	82%	69%
P2 e P11	61%	26%	-48%	67%	66%
P4, P6, P7 e P9	124%	-30%	-69%	3690%	148%
P5 e P8	192%	-69%	-51%	4563%	295%

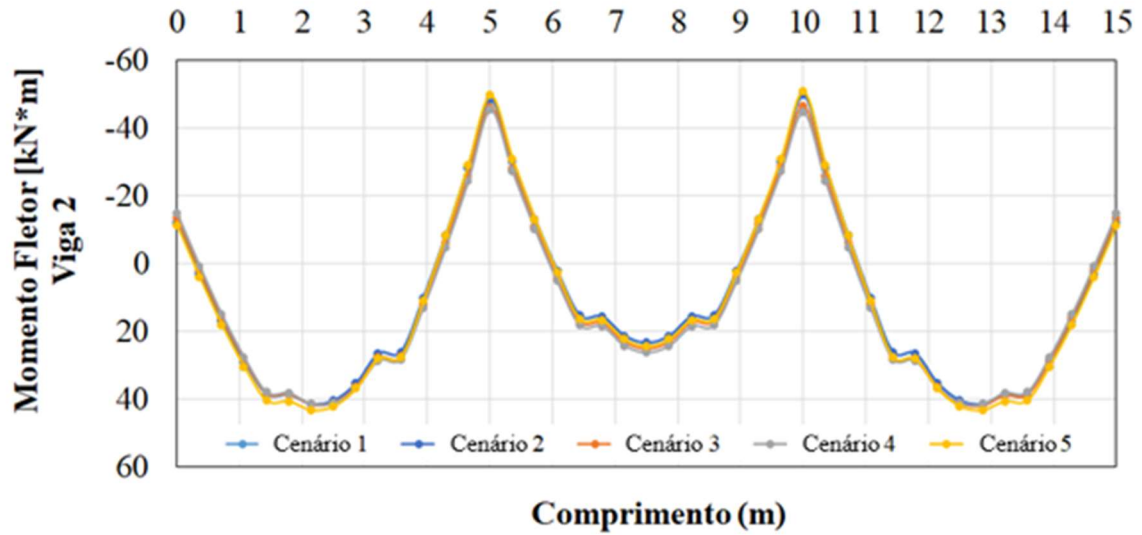
(Fonte: Autor, 2021)

6.8.3. Momentos fletores na viga 2

A Figura 88, Figura 89, Figura 90 e Figura 91 apresentam os diagramas de momentos fletores da viga 2 nos 5 cenários apresentados no item 6 para as hipóteses de apoios engastados, molas globais, molas distribuídas e molas calculadas pelas equações de Pais e Kausel (1988), respectivamente.

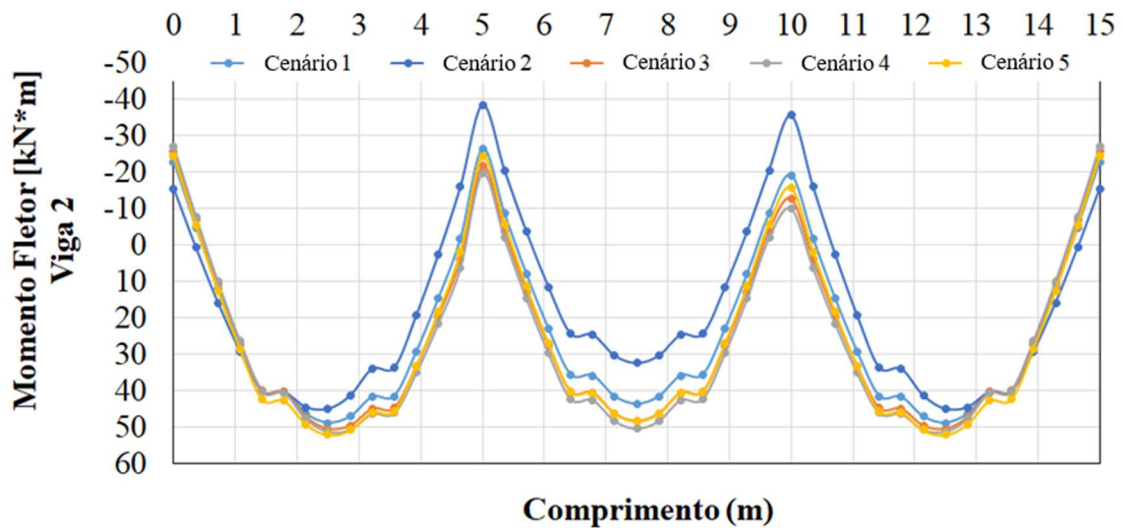
Com relação aos diagramas de momentos das vigas foi constatada a presença de platôs em seis pontos de todos os diagramas gerados. Tal fenômeno ocorreu devido a forma com o SAP2000 distribuiu as cargas das lajes às vigas, discretizando elas em 3 trechos porvão.

Figura 88 - Momento fletor na viga 2 (Apoios o Engastados)



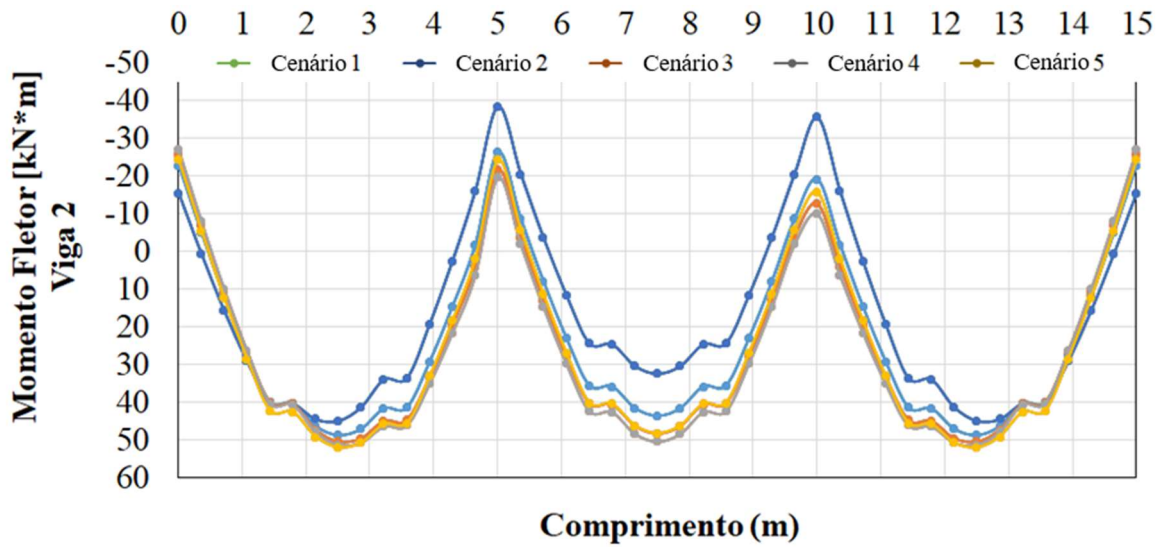
(Fonte: Autor, 2021)

Figura 89 - Diagramas de momentos da viga 2 (Molas Globais)



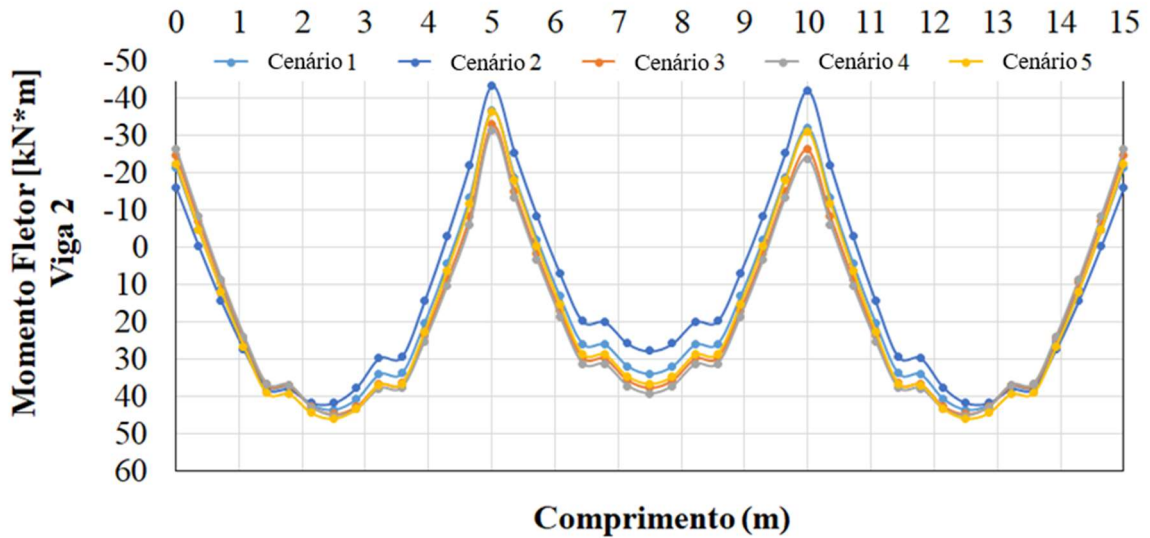
(Fonte: Autor, 2021)

Figura 90 - Diagramas de momentos da viga 2 (Molas Distribuídas)



(Fonte: Autor, 2021)

Figura 91 - Diagramas de momentos da viga 2 (Pais e Kausel, 1988)



(Fonte: Autor, 2021)

Através das imagens acima apresentadas constatou-se que a quantidade de pavimentos e a dimensão dos vãos em Y pouco influenciaram nos momentos da viga, uma vez eles permaneceram semelhantes ao cenário 1. Por outro lado, o aumento da rigidez do solo, cenário 2, resultou em alterações significativas no diagrama de momento chegando a apresentar um aumento de 46% no momento negativo das molas globais e distribuídas quando comparado com os maiores momentos negativos encontrados no cenário 1. Além

disso, também apresentou momentos positivos 8% menores quando comparados com os obtidos no cenário 1.

Tabela 15 - Relação entre os momentos fletores da viga no cenário 1 e no cenário 2

	Engastado	Molas Globais	Molas Distribuidas	Pais e Kausel
Positivo	0%	-8%	-8%	-4%
Negativo	0%	46%	46%	18%

(Fonte: Autor, 2021)

Percebeu-se também, como é apresentado na Figura 88 que o aumento da rigidez do solo resulta em diagramas de momentos muito similares aos obtidos quando se considera os apoios engastados

6.8.4. Recalques absolutos

As tabelas a seguir apresentam a relação entre os recalques absolutos considerando e não considerando o efeito da vizinhança. Conforme foi apresentado no item 6, constatou-se que os recalques absolutos diminuíram com o aumento da rigidez do solo, cenário 2. Foi verificado também que o aumento do número de pavimentos resultou em maiores recalques absolutos, possivelmente devido às cargas adicionais geradas pelos pavimentos acrescidos.

Com relação a influência da vizinhança, constatou-se que em um solo mais rígido ela é quase inexistente, representando, no pior dos casos analisados, um acréscimo de apenas 8% no recalque absoluto. Entretanto, para solos mais fofos chegou a gerar um aumento de 32%. Desta forma, percebe-se que, à medida que a rigidez do solo diminui, mais importante torna-se a consideração da superposição dos efeitos da vizinhança na análise estrutural.

Tabela 16 - Variação dos recalques absolutos considerando o efeito da vizinhança

Engastado					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	15%	6%	11%	20%	26%
P2 e P11	14%	6%	10%	21%	26%
P4, P6, P7 e P9	16%	7%	11%	22%	29%
P5 e P8	16%	7%	10%	23%	29%
Molas Globais					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	16%	6%	16%	19%	12%
P2 e P11	19%	7%	17%	22%	14%
P4, P6, P7 e P9	20%	7%	17%	23%	15%
P5 e P8	25%	8%	19%	26%	17%
Molas Distribuídas					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	16%	6%	16%	19%	12%
P2 e P11	19%	7%	17%	22%	14%
P4, P6, P7 e P9	20%	7%	17%	23%	15%
P5 e P8	25%	8%	19%	26%	17%
Pais e Kausel					
Pilares	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
P1, P3, P10 e P12	17%	5%	16%	18%	23%
P2 e P11	20%	6%	17%	21%	27%
P4, P6, P7 e P9	21%	6%	17%	22%	28%
P5 e P8	24%	7%	19%	25%	32%

(Fonte: Autor, 2021)

6.8.5. Recalques diferenciais

A Tabela 17 e a Tabela 18 apresentam o número total de casos de recalques diferenciais que não passaram na verificação do limite aceitável de $L/500$ apresentado na Tabela 4. Tanto para os casos que consideram a influência da vizinhança quanto para os que não consideram foi constatado que a consideração da ISE resulta em um número menor de reprovações dos recalques diferenciais. Percebeu-se também que, para os cenários 4 e 5 ao se considerar a influência das vizinhanças foi obtido um número maior de casos de reprovação dos recalques diferenciais, demonstrando assim a importância da consideração da vizinhança.

Tabela 17 - Número total de casos que não passaram na verificação dos recalques diferenciais sem efeito da vizinhança

Hipótese	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Engastado	10	0	14	14	10
Molas Globais	0	0	0	6	4
Molas Distribuídas	0	0	0	6	4
Pais e Kausel	0	0	0	6	8

(Fonte: Autor, 2021)

Tabela 18 - Número total de casos que não passaram na verificação dos recalques diferenciais com efeito da vizinhança

Hipótese	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Engastado	14	0	14	18	14
Molas Globais	0	0	0	10	8
Molas Distribuídas	0	0	0	10	8
Pais e Kausel	4	0	0	14	14

(Fonte: Autor, 2021)

Foi verificado também o aumento de reprovações entre os casos da edificação com 8 e 12 pavimentos. Tal fenômeno pode ter ocorrido, conforme foi apresentado no item 4.3.2, pelo fato de que a rigidez entre a estrutura e o solo não aumenta de forma linear com o aumento do número de pavimentos, sendo tal aumento maior nos primeiros pavimentos. Ou

seja, o aumento da carga devido aos 4 pavimentos adicionais pode ter sido mais significativo do que o aumento da rigidez da estrutura resultando assim em recalques diferenciais maiores.

Assim como foi constatado para o recalque absoluto, percebeu-se que a consideração do efeito da vizinhança exerce grande influência nos valores de recalques diferenciais quando o solo apresenta baixa rigidez, aumentando em até 36% o valor do recalque diferencial obtido. Para o caso de areia compacta, entretanto, a maior variação foi de 9%.

7. CONCLUSÃO

Através deste trabalho buscou-se demonstrar a importância de considerar a ISE na análise estrutural tanto para os casos com efeito da vizinhança quanto para os casos em que ela não é considerada. Buscou-se também demonstrar a influência que diferentes parâmetros exercem sobre a ISE. Os resultados obtidos em cada cenário estudado foram apresentados de forma didática e discutidos no item 6.8 visando permitir uma melhor compreensão e interpretação por parte do leitor.

Como foi apresentado no item 6.8 os resultados retornaram valores coerentes com o que era esperado segundo o item 4.3. Em todos os casos que se considerou a ISE, houve uma redistribuição das cargas dos pilares fazendo que os pilares mais carregados no caso engastado transferissem suas cargas aos pilares menos carregados. Devido a esta redistribuição de carregamentos foi verificado também uma redução tanto nos valores dos recalques absolutos quanto nos valores dos recalques diferenciais.

Tal tendência à homogeneização dos recalques também foi verificada nos casos em que o efeito de vizinhança foi considerado. Apesar de os valores de recalque absoluto e de recalque diferenciais terem aumentado quando comparados com o caso em que o efeito de vizinhança não é considerado os mesmos retornaram valores menores para as situações com ISE quando comparados aos obtidos para o mesmo cenário engastado.

Sobre os diagramas de momentos da viga estudada, os resultados também se comportaram conforme o esperado. Para os casos em que somente o número de pavimentos foi alterado houve pouca mudança nos diagramas quando comparados com o cenário 1. A consideração da rigidez do solo, entretanto, mostrou-se bastante significativa na análise dos momentos da viga conforme é apresentado nas Figura 88, Figura 89, Figura 90 e Figura 91.

Apesar da consideração da ISE e da influência da vizinhança na análise dos recalques das fundações ainda não estarem muito difundidas entre os profissionais da engenharia, percebeu-se, com os cenários estudados a sua importância para o correto dimensionamento da edificação uma vez que a sua não consideração pode levar diversas situações indesejadas como: o subdimensionamento de estruturas, como é o caso dos pilares cujo carregamento aumentou após a consideração da ISE, pondo em risco a integridade da mesma; o subdimensionamento devido a não consideração dos efeitos da vizinhança, e o superdimensionamento da estrutura, nas situações em que o carregamento do pilar diminui, podendo representar perdas financeiras à construtora.

Como recomendação final, sugere-se explorar modelos numéricos mais robustos teoricamente na consideração do efeito da ISE. Parte dos modelos apresentados neste documento se baseia em fórmulas propostas na literatura, as quais foram desenvolvidas sob certas condições (Pais e Kausel, 1988) ou através de simplificações considerando sapatas rígidas e solo homogêneo. Modelos numéricos que modelem propriamente o solo de fundação devem ser explorados em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

ALONSO, U. R. **Previsão e controle de fundações**, Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1991.

ANTONIAZZI, J. **Interação Solo-Estrutura de Edifícios com Fundações Superficiais**. Santa Maria: UFSM, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6489: Solo - Prova de carga estática em fundação direta**. Rio de Janeiro, 2019.

BARATA, F.E. **Recalques de Edifícios sobre Fundações Diretas em Terrenos de Compressibilidade Rápida e com a Consideração da Rigidez da Estrutura**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1986.

BJERRUM, L. **Allowable settlement of structures**. Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Germany: Wiesbaden, 1963. v.3.

CABRAL, E. **Curso de interação solo-estrutura**, Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural. São Paulo, 2019

CHAMECKI, S: **Calcul des tassements progressifs des foundation em tenant compte de l'interaction des structures et du sol**. Annales de l'ITBTP, n°.261. 1969.

COLARES, G. **Programa para análise da interação solo-estrutrua no projeto de edifícios**. São Carlos: USP, 2006.

COSTA NUNES, A.J. **Curso de Mecânica dos Solos e Fundações**. Editora Globo, 1956.

GUSMÃO, A. D. **Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1990.

GUSMÃO, A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A.: **Avaliação da influência da interação solo-estrutura**. X COBRAMSEF, Foz do Iguaçu, PR, ABMS, Anais, Vol.1, p.68-74. 1994.

GUSMÃO FILHO, J. de A. **Solos da formação geológica ao uso na engenharia**. Recife, PE, Editora Universitária UFPE, 2002.

IWAMOTO, R. **Alguns Aspectos dos Efeitos da Interação Solo-Estrutura em Edifícios e Múltiplos Andares com Fundação Profunda**. São Carlos: USP, 2000.

MICROSOFT. Microsoft, 2019. **Introdução ao VBA no Office**. Disponível em:<<https://docs.microsoft.com/pt-br/office/vba/library-reference/concepts/getting-started-with-vba-in-office>>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.

MINDLIN, R.D. **Force at a point in the interior of a semi-infinite solid**. Physics, [s/l], v. 7, p. 195-200, 1936.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **NIST GCR 12-917-21: Soil-Structure Interaction for Building Structures**. GAITHERSBURG. 2012

PAIS, A. e KAUSEL, E., **Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations**, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 7, No. 4, 1988.

REIS, J.H.C. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais em argila mole**. São Carlos: USP, 2000

RUVER, C. A. **Determinação do comportamento carga-recalque de sapatas em solos residuais a partir de ensaios SPT**. Porto Alegre: UFRGS, 2005

SCARLAT, A.S. **Effect of soil deformability on rigidity: related aspects of multistory buildings analysis**. ACI Struct. J., Detroit, v. 90, n. 2, p.156-162, 1993.

SILVA, S. E.; FRANÇA, W. P. F.; AYALA, R. J. L. **Estado da arte da interação solo-estrutura e sua influência nos recalques do solo**. Periódico Científico Outras Palavras, Brasília, Vol. 11, n. 2, pág. 31 - 40, 2015.

SIMONS, N. E., MENZIES, B. K. **A Short Course in Foundation Engineering**. London: Butterworth & Co, 1977.

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

VARGAS, M.; SILVA, F. R. **O problema das fundações de edifícios altos: experiência em São Paulo e Santos.** CONFERENCIA REGIONAL SUL-AMERICANA SOBRE EDIFÍCIOS ALTOS. Anais...Porto Alegre: 1973

VELLOSO, D.A.; LOPES, F.R. **Fundações.** Vol. 1. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

ANEXO A - VBA ENGASTE

'Variaveis especificas do problema:

'O numero de Pilares e Vigas

Public Const D As Integer = 500

'O numero de nos da estrutura:

Public Const joint As Integer = 10000

'o número de resultados

Public Const Ponto As Integer = 4000

'Massa especifica do material (lb/in³):

Public Const material As Double = 0.283

'Comprimento de cada barra da estrutura (in):

Public length(D - 1) As Double

'Número de Fundações

Public Const F As Long = 1000

'Declarando variaveis:

Public mySapObject As SAP2000v20.cOAPI

Public myHelper As SAP2000v20.cHelper

Public mySapModel As cSapModel

Public ret As Long

Sub ABRIR()

'Declarando variaveis para a sub ABRIR:

Dim h1 As Double, h2 As Double, h As Double, Val1 As Double, PD As Double, DX As Double, DY As Double, SpringValue() As Double, L1 As Double, L2 As Double, X As Double, Y As Double, Z As Double

Dim MatName As String, PointName() As String, AreaName() As String, Ponto() As String, FrameName() As String

Dim andares As Long, px As Long, PY As Long, L As Long

Dim Value() As Boolean

Dim xCoord As Double, yCoord As Double, zCoord As Double, Vec() As Double, S As Double

'Redimensionar vetores:

ReDim PointName(joint - 1)

ReDim AreaName(F - 1)

'Criar instancia do objeto SAP2000:

Set myHelper = New SAP2000v20.Helper

Set mySapObject = myHelper.CreateObject("C:\Program Files\Computers and Structures\SAP2000 20\sap2000.exe")

'Iniciar programa:

mySapObject.ApplicationStart

'Criar objeto SapModel:

Set mySapModel = mySapObject.SapModel

'Iniciar New Model:

ret = mySapModel.InitializeNewModel(eUnits_kN_m_C)

'Definir material:

```
MatName = Worksheets("Coord").Cells(17, 3).Value  
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMaterial(MatName, eMatType_NoDesign)
```

'Definir modulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansao termica e peso especifico, respectivamente:

```
E = Worksheets("Coord").Cells(19, 3).Value  
U = Worksheets("Coord").Cells(20, 3).Value  
a = Worksheets("Coord").Cells(21, 3).Value  
M = Worksheets("Coord").Cells(22, 3).Value  
Fc = Worksheets("Coord").Cells(18, 3).Value
```

```
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetWeightAndMass(MatName, 1, M)  
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic(MatName, E, U, a)
```

'Cria a Seção dos Pilares

```
h1 = Worksheets("Coord").Cells(7, 6).Value  
L1 = Worksheets("Coord").Cells(6, 6).Value  
ret = mySapModel.PropFrame.SetRectangle("Pilar", MatName, L1, h1, -1)
```

'Cria a Seção das Vigas

```
L2 = Worksheets("Coord").Cells(12, 6).Value  
h2 = Worksheets("Coord").Cells(13, 6).Value  
ret = mySapModel.PropFrame.SetRectangle("Viga", MatName, L2, h2, -1)
```

'Cria a Seção das Lajes

```
h3 = Worksheets("Coord").Cells(22, 6).Value  
h4 = Worksheets("Coord").Cells(23, 6).Value  
ret = mySapModel.PropArea.SetShell_1("Laje", 1, False, MatName, 0, h3, h4)
```

'Criar 3D Model:

```
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value  
PD = Worksheets("Coord").Cells(8, 3).Value  
px = Worksheets("Coord").Cells(9, 3).Value  
DX = Worksheets("Coord").Cells(10, 3).Value  
PY = Worksheets("Coord").Cells(11, 3).Value  
DY = Worksheets("Coord").Cells(12, 3).Value  
ret = mySapModel.File.New3DFrame(2, andares, PD, px, DX, PY, DY, , "viga", "Pilar", "Laje", px, PY)
```

'Engaste Base

```
L = Worksheets("Coord").Cells(13, 3).Value  
h = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
```

ReDim Value(5)

```
For i = 0 To 5  
Value(i) = True
```

```
Next i
```

```
For i = 0 To L - 1
```

```
PointName(i) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (h + 1) * i, 2).Value  
ret = mySapObject.SapModel.PointObj.DeleteRestraint(PointName(i))  
ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetRestraint(PointName(i), Value)
```

```
Next i
```

```

'Adicionar Sobre Carga
  a = andares * px * PY
  For i = 0 To a - 1
    Val1 = Worksheets("Coord").Cells(27, 6).Value
    AreaName(i) = 1 + i
    ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetLoadUniformToFrame(AreaName(i), "DEAD", Val1, 10, 2)

  Next i

'Salvar modelo:
  ret = mySapObject.SapModel.File.Save("C:\Users\bgbig\OneDrive\Desktop\TCC\Testes")

End Sub

Sub Análise()

'Declarando variaveis de auxilio para a analise:
  Dim numberResults As Long, L As Long
  Dim obj() As String, PointName() As String, elm() As String, loadCase() As String, stepType() As String
  Dim stress(D) As Double, stepNum() As Double, objSta() As Double, elmSta() As Double,
displacement1(joint) As Double, displacement2(joint) As Double, displacement3(joint) As Double,
displacement4(joint) As Double, displacement5(joint) As Double, displacement6(joint) As Double
  Dim Normal(Ponto) As Double, Cortante1(Ponto) As Double, Cortante2(Ponto) As Double, Torção(Ponto)
As Double, Momento1(Ponto) As Double, Momento2(Ponto) As Double
  Dim j As Integer

'Deslocamentos em relacao as coordenadas X, Y e Z, respectivamente:
  Dim u1() As Double, u2() As Double, u3() As Double

'Rotacoes em relacao aos eixos X, Y e Z, respectivamente:
  Dim r1() As Double, r2() As Double, r3() As Double

'Esforços axial, cortantes, torcao e momentos:
  Dim P() As Double, V2() As Double, V3() As Double, t() As Double, M2() As Double, M3() As Double

'Definar casos a serem rodados
  ret = mySapModel.Analyze.SetRunCaseFlag("Modal", False)

'Rodar analise:
  ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis

'Selecionar a combinacao de carregamentos "Cargas Pontuais" para gerar os resultados:
  ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("DEAD")

'Gerar deslocamentos dos joints ao longo da estrutura:
ReDim PointName(joint - 1)
L = Worksheets("Coord").Cells(13, 3).Value
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value

For b = 0 To L - 1

  PointName(b) = 1 + andares * b

  ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(PointName(b), eItemTypeElm_ObjectElm,
numberResults, obj, objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P, V2, V3, t, M2, M3)

  Normal(0) = P(0)

```



```
Momento1(0) = M2(0)
Momento2(0) = M3(0)
```

```
Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 10).Value = -1 * Normal(0)
Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 11).Value = -1 * Momento1(0)
Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 12).Value = -1 * Momento2(0)
```

```
Next b
```

```
ret = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl("ALL", eItemTypElm_GroupElm, numberResults, obj,
elm, loadCase, stepType, stepNum, u1, u2, u3, r1, r2, r3)
```

```
'Gerar Esforços ao longo da estrutura:
```

```
ReDim PointName(joint - 1)
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
px = Worksheets("COord").Cells(9, 3).Value
```

```
For i = 0 To px - 1
```

```
PointName(i) = 61 + andares * i
```

```
ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(PointName(i), eItemTypElm_ObjectElm, 10, obj,
objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P, V2, V3, t, M2, M3)
```

```
For k = 0 To 8
```

```
Momento2(k) = M3(k)
```

```
Worksheets("Resultados").Cells(4 + k + 10 * i, 15).Value = Momento2(k)
```

```
Next k
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
Sub FECHAR()
```

```
'Salvar modelo:
```

```
ret = mySapObject.SapModel.File.Save("C:\Users\bgbig\OneDrive\Desktop\TCC\Testes")
```

```
'Fechar SAP2000:
```

```
mySapObject.ApplicationExit False
```

```
'Estabelecer os objetos para Nothing:
```

```
Set mySapObject = Nothing
```

```
End Sub
```

ANEXO B - VBA MOLAS GLOBAIS

'Variaveis especificas do problema:

'O numero de Pilares e Vigas
Public Const D As Integer = 500

'O numero de nos da estrutura:
Public Const joint As Integer = 10000

'o número de resultados
Public Const Ponto As Integer = 4000

'Massa especifica do material (lb/in³):
Public Const material As Double = 0.283

'Comprimento de cada barra da estrutura (in):
Public length(D - 1) As Double

'Número de Fundações
Public Const F As Long = 1000

'Declarando variaveis:

Public mySapObject As SAP2000v20.cOAPI
Public myHelper As SAP2000v20.cHelper
Public mySapModel As cSapModel
Public ret As Long

Sub ABRIR()

'Declarando variaveis para a sub ABRIR:

Dim h1 As Double, h2 As Double, h As Double, Val1 As Double, PD As Double, DX As Double, DY
As Double, SpringValue() As Double, L1 As Double, L2 As Double, X As Double, Y As Double, Z As
Double

Dim MatName As String, pointname() As String, AreaName() As String, Ponto() As String,
FrameName() As String

Dim andares As Long, px As Long, PY As Long, L As Long

Dim Value() As Boolean

Dim xCoord As Double, yCoord As Double, zCoord As Double, Vec() As Double, S As Double

'Redimensionar vetores:

ReDim pointname(joint - 1)

ReDim AreaName(F - 1)

'Criar instancia do objeto SAP2000:

Set myHelper = New SAP2000v20.Helper

Set mySapObject = myHelper.CreateObject("C:\Program Files\Computers and Structures\SAP2000
20\sap2000.exe")

'Iniciar programa:

mySapObject.ApplicationStart

'Criar objeto SapModel:

Set mySapModel = mySapObject.SapModel

'Iniciar New Model:

ret = mySapModel.InitializeNewModel(eUnits_kN_m_C)

'Definir material:

```
MatName = Worksheets("Coord").Cells(17, 3).Value  
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMaterial(MatName, eMatType_NoDesign)
```

'Definir modulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansao termica e peso especifico, respectivamente:

```
E = Worksheets("Coord").Cells(19, 3).Value  
U = Worksheets("Coord").Cells(20, 3).Value  
a = Worksheets("Coord").Cells(21, 3).Value  
M = Worksheets("Coord").Cells(22, 3).Value  
Fc = Worksheets("Coord").Cells(18, 3).Value
```

```
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetWeightAndMass(MatName, 1, M)  
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic(MatName, E, U, a)
```

'Cria a Seção dos Pilares

```
h1 = Worksheets("Coord").Cells(7, 6).Value  
L1 = Worksheets("Coord").Cells(6, 6).Value  
ret = mySapModel.PropFrame.SetRectangle("Pilar", MatName, L1, h1, -1)
```

'Cria a Seção das Vigas

```
L2 = Worksheets("Coord").Cells(12, 6).Value  
h2 = Worksheets("Coord").Cells(13, 6).Value  
ret = mySapModel.PropFrame.SetRectangle("Viga", MatName, L2, h2, -1)
```

'Cria a Seção das Lajes

```
h3 = Worksheets("Coord").Cells(23, 6).Value  
h4 = Worksheets("Coord").Cells(24, 6).Value  
ret = mySapModel.PropArea.SetShell_1("Laje", 1, False, MatName, 0, h3, h4)
```

'Criar 3D Model:

```
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value  
PD = Worksheets("Coord").Cells(8, 3).Value  
px = Worksheets("Coord").Cells(9, 3).Value  
DX = Worksheets("Coord").Cells(10, 3).Value  
PY = Worksheets("Coord").Cells(11, 3).Value  
DY = Worksheets("Coord").Cells(12, 3).Value  
ret = mySapModel.File.New3DFrame(2, andares, PD, px, DX, PY, DY, , "viga", "Pilar", "Laje", px,  
PY)
```

'Engaste Base

```
L = Worksheets("Coord").Cells(13, 3).Value  
h = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
```

ReDim Value(5)

```
Value(1) = True
```

```
Value(0) = True
```

```
Value(5) = True
```

ReDim SpringValue(5)

```
SpringValue(2) = Worksheets("Coord").Cells(8, 9).Value 'Kz
```

```
SpringValue(3) = Worksheets("Coord").Cells(11, 9).Value 'Kxx
```

```
SpringValue(4) = Worksheets("Coord").Cells(12, 9).Value 'Kyy
```

```
For i = 0 To L - 1
```

```
    pointname(i) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (h + 1) * i, 2).Value  
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.DeleteRestraint(pointname(i))  
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(pointname(i), SpringValue)
```

```
Next i
```

```
    ReDim Value(5)  
    Value(0) = True  
    Value(1) = True  
    Value(5) = True
```

```
For i = 0 To L - 1
```

```
    pointname(i) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (h + 1) * i, 2).Value  
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetRestraint("1", Value)
```

```
Next i
```

```
'Adicionar Sobre Carga
```

```
    a = andares * px * PY
```

```
    For i = 0 To a - 1
```

```
        Vall = Worksheets("Coord").Cells(28, 6).Value
```

```
        AreaName(i) = 1 + i
```

```
        ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetLoadUniformToFrame(AreaName(i), "DEAD", Vall, 10, 2)
```

```
    Next i
```

```
'Salvar modelo:
```

```
    ret = mySapObject.SapModel.File.Save("C:\Users\bgbig\OneDrive\Desktop\TCC\Testes")
```

```
End Sub
```

```
Sub Análise()
```

```
'Declarando variaveis de auxilio para a analise:
```

```
    Dim numberResults As Long
```

```
    Dim obj() As String, elm() As String, loadCase() As String, stepType() As String, pointname() As  
String, X1() As String, Y1() As String, Z1() As String
```

```
    Dim stress(D) As Double, stepNum() As Double, objSta() As Double, elmSta() As Double,  
displacement1(joint) As Double, displacement2(joint) As Double, displacement3(joint) As Double,  
displacement4(joint) As Double, displacement5(joint) As Double, displacement6(joint) As Double
```

```
    Dim Normal(Ponto) As Double, Cortante1(Ponto) As Double, Cortante2(Ponto) As Double,  
Torção(Ponto) As Double, Momento1(Ponto) As Double, Momento2(Ponto) As Double, X As Double, Y As  
Double, Z As Double
```

```
    Dim j As Integer
```

```
    Dim andares As Long, px As Long, PY As Long, L As Long
```

```
'Deslocamentos em relacao as coordenadas X, Y e Z, respectivamente:
```

```
    Dim u1() As Double, u2() As Double, u3() As Double
```

```
'Rotacoes em relacao aos eixos X, Y e Z, respectivamente:
```

```
    Dim R1() As Double, r2() As Double, r3() As Double
```

```
'Esforços axial, cortantes, torção e momentos:  
Dim P() As Double, V2() As Double, V3() As Double, t() As Double, M2() As Double, M3() As  
Double
```

```
'Definir casos a serem rodados  
ret = mySapModel.Analyze.SetRunCaseFlag("Modal", False)
```

```
'Rodar análise:  
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis
```

```
'Selecionar a combinação de carregamentos "Cargas Pontuais" para gerar os resultados:  
ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("DEAD")
```

```
'Redimensionar vetores:  
ReDim pointname(joint - 1)  
ReDim X1(joint - 1)  
ReDim Y1(joint - 1)  
ReDim Z1(joint - 1)
```

```
L = Worksheets("Coord").Cells(13, 3).Value  
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
```

```
For b = 0 To L - 1
```

```
pointname(b) = 1 + andares * b
```

```
ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(pointname(b), eItemTypeElm_ObjectElm,  
numberResults, obj, objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P, V2, V3, t, M2, M3)
```

```
Normal(0) = P(0)  
Momento1(0) = M2(0)  
Momento2(0) = M3(0)  
Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 11).Value = -1 * Normal(0)  
Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 12).Value = -1 * Momento1(0)  
Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 13).Value = -1 * Momento2(0)
```

```
Next b
```

```
'Gerar deslocamentos dos joints ao longo da estrutura:
```

```
For k = 0 To L - 1
```

```
pointname(k) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (andares + 1) * k, 2).Value  
ret = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(pointname(k), eItemTypeElm_ObjectElm,  
numberResults, obj, elm, loadCase, stepType, stepNum, u1, u2, u3, R1, r2, r3)  
displacement3(0) = u3(0)  
Worksheets("Resultados").Cells(4 + 5 * k, 4).Value = -1000 * displacement3(0)
```

```
Next k
```

```
'Gerar Deslocamentos por Mindlin
```

```
For i = 0 To L - 1
```

```
pointname(i) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (andares + 1) * i, 2).Value  
ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(pointname(i), eItemTypeElm_ObjectElm,  
numberResults, obj, objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P, V2, V3, t, M2, M3)
```

```

Normal(i) = -1 * P(0)
ret = mySapObject.SapModel.PointObj.GetCoordCartesian(pointname(i), X, Y, Z)
X1(i) = X
Y1(i) = Y
Z1(i) = Z
Worksheets("Coordenadas").Cells(2, 2 + i).Value = X1(i)
Worksheets("Coordenadas").Cells(3, 2 + i).Value = Y1(i)
Worksheets("Coordenadas").Cells(4, 2 + i).Value = Z1(i)

Next i

'Gerar Esforços ao longo da estrutura:
ReDim pointname(joint - 1)
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
px = Worksheets("COord").Cells(9, 3).Value

For i = 0 To px - 1
    pointname(i) = 61 + andares * i
    ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(pointname(i), eItemTypeElm_ObjectElm, 10, obj,
objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P, V2, V3, t, M2, M3)

    For k = 0 To 8

        Momento2(k) = M3(k)

        Worksheets("Resultados").Cells(4 + k + 10 * i, 16).Value = Momento2(k)

    Next k

Next i

End Sub
Sub FECHAR()

'Salvar modelo:
ret = mySapObject.SapModel.File.Save("C:\Users\bgbig\OneDrive\Desktop\TCC\Testes")

'Fechar SAP2000:
mySapObject.ApplicationExit False

'Estabelecer os objetos para Nothing:
Set mySapObject = Nothing

End Sub

```

ANEXO C - VBA MOLAS DISTRIBUIDAS

'Variaveis especificas do problema:

'O numero de Pilares e Vigas
Public Const D As Integer = 5000

'O numero de nos da estrutura:
Public Const joint As Integer = 10000

'o número de resultados
Public Const Ponto As Integer = 9999

'o número de resultados
Public Const Pontu As Integer = 9999

'Massa especifica do material (lb/in³):
Public Const material As Double = 0.283

'Comprimento de cada barra da estrutura (in):
Public length(D - 1) As Double

'Número de Fundações
Public Const F As Long = 1000

'Declarando variaveis:
Public mySapObject As SAP2000v20.cOAPI
Public myHelper As SAP2000v20.cHelper
Public mySapModel As cSapModel
Public ret As Long

Sub ABRIR()

'Declarando variaveis para a sub ABRIR:

Dim h1 As Double, h2 As Double, h As Double, Val1 As Double, PD As Double, DX As Double, DY
As Double, SpringValue() As Double, L1 As Double, L2 As Double, X As Double, Y As Double, Z As
Double

Dim MatName As String, pointname() As String, AreaName() As String, Ponto() As String,
FrameName() As String

Dim andares As Long, px As Long, PY As Long, L As Long

Dim Value() As Boolean

Dim xCoord As Double, yCoord As Double, zCoord As Double, Vec() As Double, S As Double

'Redimensionar vetores:

ReDim pointname(joint - 1)

ReDim AreaName(F - 1)

'Criar instancia do objeto SAP2000:

Set myHelper = New SAP2000v20.Helper

Set mySapObject = myHelper.CreateObject("C:\Program Files\Computers and Structures\SAP2000
20\sap2000.exe")

'Iniciar programa:

mySapObject.ApplicationStart

'Criar objeto SapModel:

Set mySapModel = mySapObject.SapModel

'Iniciar New Model:

```
ret = mySapModel.InitializeNewModel(eUnits_kN_m_C)
```

'Definir material das Vigas e Pilares:

```
MatName = Worksheets("Coord").Cells(17, 3).Value
```

```
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMaterial(MatName, eMatType_NoDesign)
```

'Definir modulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansao termica e peso especifico, respectivamente:

```
E = Worksheets("Coord").Cells(19, 3).Value
```

```
U = Worksheets("Coord").Cells(20, 3).Value
```

```
a = Worksheets("Coord").Cells(21, 3).Value
```

```
M = Worksheets("Coord").Cells(22, 3).Value
```

```
Fc = Worksheets("Coord").Cells(18, 3).Value
```

```
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetWeightAndMass(MatName, 1, M)
```

```
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic(MatName, E, U, a)
```

'Definir material das Fundações:

```
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMaterial("Concreto Fundação", eMatType_NoDesign)
```

'Definir modulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansao termica e peso especifico, respectivamente:

```
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetWeightAndMass("Concreto Fundação", 1, 0)
```

```
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic("Concreto Fundação",  
2800000000000000#, 0.3, 0.00001)
```

'Cria a Seção dos Pilares

```
h1 = Worksheets("Coord").Cells(7, 6).Value
```

```
L1 = Worksheets("Coord").Cells(6, 6).Value
```

```
ret = mySapModel.PropFrame.SetRectangle("Pilar", MatName, L1, h1, -1)
```

'Cria a Seção das Vigas

```
L2 = Worksheets("Coord").Cells(12, 6).Value
```

```
h2 = Worksheets("Coord").Cells(13, 6).Value
```

```
ret = mySapModel.PropFrame.SetRectangle("Viga", MatName, L2, h2, -1)
```

'Cria a Seção das Lajes

```
h3 = Worksheets("Coord").Cells(23, 6).Value
```

```
h4 = Worksheets("Coord").Cells(24, 6).Value
```

```
ret = mySapModel.PropArea.SetShell_1("Laje", 1, False, MatName, 0, h3, h4)
```

'Criar 3D Model:

```
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
```

```
PD = Worksheets("Coord").Cells(8, 3).Value
```

```
px = Worksheets("Coord").Cells(9, 3).Value
```

```
DX = Worksheets("Coord").Cells(10, 3).Value
```

```
PY = Worksheets("Coord").Cells(11, 3).Value
```

```
DY = Worksheets("Coord").Cells(12, 3).Value
```

```
ret = mySapModel.File.New3DFrame(2, andares, PD, px, DX, PY, DY, , "viga", "Pilar", "Laje", px,  
PY)
```

'Engaste Base

```
L = Worksheets("Coord").Cells(13, 3).Value
```

```
h = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
```

```
Fx = Worksheets("Coord").Cells(18, 6).Value
```

```
Fy = Worksheets("Coord").Cells(19, 6).Value
```

```
ret = mySapModel.PropArea.SetShell_1("Fundação", 2, False, "Concreto Fundação", 0, 0.25, h4)
```



```

ReDim Value(5)
Value(1) = True
Value(0) = True
Value(5) = True

```

```

For i = 0 To L - 1
    pointname(i) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (h + 1) * i, 2).Value
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.DeleteRestraint(pointname(i))
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.GetCoordCartesian(pointname(i), X, Y, Z)

```

```

    X1 = X + Fx / 2
    X2 = X - Fx / 2
    Y1 = Y + Fy / 2
    Y2 = Y - Fy / 2
    pointname(i) = PD * px * PY + 1 + i
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.AddCartesian(X1, Y1, 0, pointname(i))
    pointname(i) = PD * px * PY + 2 + i
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.AddCartesian(X1, Y2, 0, pointname(i))
    pointname(i) = PD * px * PY + 3 + i
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.AddCartesian(X2, Y2, 0, pointname(i))
    pointname(i) = PD * px * PY + 4 + i
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.AddCartesian(X2, Y1, 0, pointname(i))

```

```

Next i

```

```

ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetRestraint("1", Value)

```

```

For i = 0 To L - 1

```

```

    ReDim Ponto(3)
    AreaName(i) = andares * px * PY + 1 + i
    Ponto(0) = (andares + 1) * (px + 1) * (PY + 1) + 4 * i + 1 'Relacionar primeiro ponto de cada Pilar
    Ponto(1) = (andares + 1) * (px + 1) * (PY + 1) + 4 * i + 2 'Relacionar segundo ponto de cada Pilar
    Ponto(2) = (andares + 1) * (px + 1) * (PY + 1) + 4 * i + 3 'Relacionar terceiro ponto de cada Pilar
    Ponto(3) = (andares + 1) * (px + 1) * (PY + 1) + 4 * i + 4 'Relacionar quarto ponto de cada Pilar
    ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.AddByPoint(4, Ponto(), AreaName(i), "Fundação")
    ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetAutoMesh(AreaName(i), 5, 0)
    'ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetThickness(AreaName(i), 2, 0, 0, 0.25,
eItemTypes_Objects)

```

```

Next i

```

```

'Adicionar Sobre Carga

```

```

    a = andares * px * PY
    For i = 0 To a - 1
        Val1 = Worksheets("Coord").Cells(28, 6).Value
        AreaName(i) = 1 + i
        ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetLoadUniformToFrame(AreaName(i), "DEAD", Val1, 10, 2)

```

```

Next i

```

```

'Adicionar Molas as Cascas de Fundação

```

```

S = Worksheets("Coord").Cells(8, 9).Value

```

```

ReDim Vec(2)

```

```

For i = 0 To L - 1
    AreaName(i) = andares * px * PY + 1 + i 'Nomear Fundação

```

```
ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetSpring(AreaName(i), 1, S, 2, "", -2, 2, 3, False, Vec, 0, False, "local", eItemType_Objects)
```

```
Next i
```

```
'Salvar modelo:
```

```
ret = mySapObject.SapModel.File.Save("C:\Users\bgbig\OneDrive\Desktop\TCC\Testes")
```

```
End Sub
```

```
Sub Análise()
```

```
'Declarando variaveis de auxilio para a analise:
```

```
Dim numberResults As Long
```

```
Dim obj() As String, elm() As String, loadCase() As String, stepType() As String, pointname() As String, AreaName(F) As String, Ponto() As String, x3() As String, y3() As String, z3() As String
```

```
Dim stress(D) As Double, stepNum() As Double, objSta() As Double, elmSta() As Double, displacement1(joint) As Double, displacement2(joint) As Double, displacement3(joint) As Double, displacement4(joint) As Double, displacement5(joint) As Double, displacement6(joint) As Double
```

```
Dim Normal1(Pontu) As Double, Normal2(Pontu) As Double, Cortante1(Pontu) As Double, Cortante2(Pontu) As Double, Torção(Pontu) As Double, Momento1(Pontu) As Double, Momento2(Pontu) As Double
```

```
Dim Looping As Double, Vec() As Double, L1 As Double, L2 As Double, X As Double, Y As Double, Z As Double
```

```
Dim j As Integer
```

```
Dim andares As Long, px As Long, PY As Long, L As Long
```

```
Dim Value() As Boolean
```

```
'Deslocamentos em relacao as coordenadas X, Y e Z, respectivamente:
```

```
Dim u1() As Double, u2() As Double, u3() As Double
```

```
'Rotacoes em relacao aos eixos X, Y e Z, respectivamente:
```

```
Dim r1() As Double, r2() As Double, r3() As Double
```

```
'Esforços axial, cortantes, torcao e momentos:
```

```
Dim P1() As Double, P2() As Double, V2() As Double, V3() As Double, t() As Double, M2() As Double, M3() As Double
```

```
'Looping
```

```
Looping = Worksheets("Coord").Cells(19, 8).Value
```

```
For a = 0 To Looping - 1
```

```
S = Worksheets("Coord").Cells(8, 9).Value
```

```
L = Worksheets("Coord").Cells(13, 3).Value
```

```
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
```

```
px = Worksheets("Coord").Cells(9, 3).Value + 1
```

```
PY = Worksheets("Coord").Cells(11, 3).Value + 1
```

```
PD = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value + 1
```

```
'Redimensionar vetores:
```

```
ReDim pointname(joint - 1)
```

```
ReDim x3(joint - 1)
```

```
ReDim y3(joint - 1)
```

```
ReDim z3(joint - 1)
```

```
'Definar casos a serem rodados
```

```

ret = mySapModel.Analyze.SetRunCaseFlag("Modal", False)

'Rodar analise:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis

'Selecionar a combinacao de carregamentos "Cargas Pontuais" para gerar os resultados:
ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("DEAD")

For b = 0 To L - 1

    pointname(b) = 1 + andares * b

    ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(pointname(b), eItemTypeElm_ObjectElm,
numberResults, obj, objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P1, V2, V3, t, M2, M3)

    Normal1(0) = P1(0)
    Momento1(0) = M2(0)
    Momento2(0) = M3(0)
    Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 12).Value = -1 * Normal1(0)
    Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 13).Value = -1 * Momento1(0)
    Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 14).Value = -1 * Momento2(0)

Next b

For k = 0 To L - 1

    pointname(k) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (andares + 1) * k, 2).Value
    ret = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(pointname(k), eItemTypeElm_ObjectElm,
numberResults, obj, elm, loadCase, stepType, stepNum, u1, u2, u3, r1, r2, r3)
    displacement3(0) = u3(0)
    Worksheets("Resultados").Cells(4 + 5 * k, 5).Value = -1000 * displacement3(0)

    pointname(k) = PD * px * PY + 1 + k * 4
    ret = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(pointname(k), eItemTypeElm_ObjectElm,
numberResults, obj, elm, loadCase, stepType, stepNum, u1, u2, u3, r1, r2, r3)
    displacement3(0) = u3(0)
    Worksheets("Resultados").Cells(4 + 5 * k + 1, 5).Value = -1000 * displacement3(0)

    pointname(k) = PD * px * PY + 2 + k * 4
    ret = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(pointname(k), eItemTypeElm_ObjectElm,
numberResults, obj, elm, loadCase, stepType, stepNum, u1, u2, u3, r1, r2, r3)
    displacement3(0) = u3(0)
    Worksheets("Resultados").Cells(4 + 5 * k + 2, 5).Value = -1000 * displacement3(0)

    pointname(k) = PD * px * PY + 3 + k * 4
    ret = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(pointname(k), eItemTypeElm_ObjectElm,
numberResults, obj, elm, loadCase, stepType, stepNum, u1, u2, u3, r1, r2, r3)
    displacement3(0) = u3(0)
    Worksheets("Resultados").Cells(4 + 5 * k + 3, 5).Value = -1000 * displacement3(0)

    pointname(k) = PD * px * PY + 4 + k * 4
    ret = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(pointname(k), eItemTypeElm_ObjectElm,
numberResults, obj, elm, loadCase, stepType, stepNum, u1, u2, u3, r1, r2, r3)
    displacement3(0) = u3(0)
    Worksheets("Resultados").Cells(4 + 5 * k + 4, 5).Value = -1000 * displacement3(0)

Next k

'Unlock Model

```

```

ret = mySapObject.SapModel.SetModelIsLocked(False)

'Deletar resultados
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.DeleteResults(All, True)

'Deletar área existente
For b = 0 To L - 1

    AreaName(b) = andares * (px - 1) * (PY - 1) + 1 + b 'Nomear Fundação
    ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.DeleteSpring(AreaName(b), eltemType_Objects)
    ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetSpring(AreaName(b), 1, S, 2, "", -2, 2, 3, False, Vec, 0,
False, "local", eltemType_Objects)

Next b

'Mudar Coordenadas Pontos
Fx = Worksheets("Coord").Cells(18, 6).Value
Fy = Worksheets("Coord").Cells(19, 6).Value

For i = 0 To L - 1

    pointname(i) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (andares + 1) * i, 2).Value
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.GetCoordCartesian(pointname(i), X, Y, Z)

    X1 = X + Fx / 2
    X2 = X - Fx / 2
    Y1 = Y + Fy / 2
    Y2 = Y - Fy / 2

    pointname(i) = PD * px * PY + 1 + i * 4
    ret = mySapObject.SapModel.EditPoint.ChangeCoordinates_1(pointname(i), X1, Y1, 0, False)
    pointname(i) = PD * px * PY + 2 + i * 4
    ret = mySapObject.SapModel.EditPoint.ChangeCoordinates_1(pointname(i), X1, Y2, 0, False)
    pointname(i) = PD * px * PY + 3 + i * 4
    ret = mySapObject.SapModel.EditPoint.ChangeCoordinates_1(pointname(i), X2, Y2, 0, False)
    pointname(i) = PD * px * PY + 4 + i * 4
    ret = mySapObject.SapModel.EditPoint.ChangeCoordinates_1(pointname(i), X2, Y1, 0, False)

Next i

'Gerar Deslocamentos por Mindlin

For i = 0 To L - 1

    pointname(i) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (andares + 1) * i, 2).Value
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.GetCoordCartesian(pointname(i), X, Y, Z)
    x3(i) = X
    y3(i) = Y
    z3(i) = Z
    Worksheets("Coordenadas").Cells(2, 2 + i).Value = x3(i)
    Worksheets("Coordenadas").Cells(3, 2 + i).Value = y3(i)
    Worksheets("Coordenadas").Cells(4, 2 + i).Value = z3(i)

Next i

Next a

For b = 0 To L - 1

```

```

S = Worksheets("Coord").Cells(8, 9).Value
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
px = Worksheets("Coord").Cells(9, 3).Value + 1
PY = Worksheets("Coord").Cells(11, 3).Value + 1

AreaName(b) = andares * (px - 1) * (PY - 1) + 1 + b 'Nomear Fundação
ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.DeleteSpring(AreaName(b), eItemType_Objects)
ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetSpring(AreaName(b), 1, S, 2, "", -2, 2, 3, False, Vec, 0,
False, "local", eItemType_Objects)

Next b

'Redimensionar vetores:
ReDim pointname(joint - 1)

'Definar casos a serem rodados
ret = mySapModel.Analyze.SetRunCaseFlag("Modal", False)

'Rodar analise:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis

'Selecionar a combinacao de carregamentos "Cargas Pontuais" para gerar os resultados:
ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("DEAD")

ReDim pointname(joint - 1)
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
px = Worksheets("COord").Cells(9, 3).Value

For i = 0 To px - 1
    pointname(i) = 61 + andares * i
    ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(pointname(i), eItemTypeElm_ObjectElm, 10, obj,
objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P1, V2, V3, t, M2, M3)

    For k = 0 To 8

        Momento2(k) = M3(k)

        Worksheets("Resultados").Cells(4 + k + 10 * i, 16).Value = Momento2(k)

    Next k

Next i

End Sub
Sub FECHAR()

'Salvar modelo:
ret = mySapObject.SapModel.File.Save("C:\Users\bgbig\OneDrive\Desktop\TCC\Testes")

'Fechar SAP2000:
mySapObject.ApplicationExit False

'Estabelecer os objetos para Nothing:
Set mySapObject = Nothing
End Sub

```

ANEXO D - VBA PAIS & KAUSEL

'Variaveis especificas do problema:

'O numero de Pilares e Vigas
Public Const D As Integer = 500

'O numero de nos da estrutura:
Public Const joint As Integer = 10000

'o número de resultados
Public Const Ponto As Integer = 10000

'Massa especifica do material (lb/in³):
Public Const material As Double = 0.283

'Comprimento de cada barra da estrutura (in):
Public length(D - 1) As Double

'Número de Fundações
Public Const F As Long = 1000

'Declarando variaveis:

Public mySapObject As SAP2000v20.cOAPI
Public myHelper As SAP2000v20.cHelper
Public mySapModel As cSapModel
Public ret As Long

Sub ABRIR()

'Declarando variaveis para a sub ABRIR:

Dim h As Double, PD As Double, L1 As Double, L2 As Double, DX As Double, DY As Double,
SpringValue() As Double, h1 As Double, h2 As Double
Dim MatName As String, PointName() As String, AreaName() As String
Dim andares As Long, px As Long, PY As Long, L As Long
Dim Value() As Boolean

'Redimensionar vetores:

ReDim PointName(joint - 1)
ReDim AreaName(F - 1)

'Criar instancia do objeto SAP2000:

Set myHelper = New SAP2000v20.Helper
Set mySapObject = myHelper.CreateObject("C:\Program Files\Computers and Structures\SAP2000
20\sap2000.exe")

'Iniciar programa:

mySapObject.ApplicationStart

'Criar objeto SapModel:

Set mySapModel = mySapObject.SapModel

'Iniciar New Model:

ret = mySapModel.InitializeNewModel(eUnits_kN_m_C)

'Definir Concreto:

MatName = Worksheets("Coord").Cells(17, 3).Value
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMaterial(MatName, eMatType_Concrete)

'Definir modulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansao termica e peso especifico, respectivamente:

```
E = Worksheets("Coord").Cells(19, 3).Value
U = Worksheets("Coord").Cells(20, 3).Value
A = Worksheets("Coord").Cells(21, 3).Value
M = Worksheets("Coord").Cells(22, 3).Value
Fc = Worksheets("Coord").Cells(18, 3).Value
```

```
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetWeightAndMass(MatName, 1, M)
ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic(MatName, E, U, A)
'ret = mySapObject.SapModel.PropMaterial.SetOConcrete_1(MatName, 25000, False, 1, 0, 0, 0, 0, 0)
```

'Cria a Seção dos Pilares

```
h1 = Worksheets("Coord").Cells(6, 6).Value
L1 = Worksheets("Coord").Cells(7, 6).Value
ret = mySapModel.PropFrame.SetRectangle("Pilar", MatName, L1, h1, -1)
```

'Cria a Seção das Vigas

```
L2 = Worksheets("Coord").Cells(12, 6).Value
h2 = Worksheets("Coord").Cells(13, 6).Value
ret = mySapModel.PropFrame.SetRectangle("Viga", MatName, L2, h2, -1)
```

'Cria a Seção das Lajes

```
h3 = Worksheets("Coord").Cells(23, 6).Value
h4 = Worksheets("Coord").Cells(24, 6).Value
ret = mySapModel.PropArea.SetShell_1("Laje", 1, False, MatName, 0, h3, h4)
```

'Criar 3D Model:

```
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
PD = Worksheets("Coord").Cells(8, 3).Value
px = Worksheets("Coord").Cells(9, 3).Value
DX = Worksheets("Coord").Cells(10, 3).Value
PY = Worksheets("Coord").Cells(11, 3).Value
DY = Worksheets("Coord").Cells(12, 3).Value
ret = mySapModel.File.New3DFrame(2, andares, PD, px, DX, PY, DY, , "Viga", "Pilar", "Laje", PD,
PY)
```

'Engaste Base

```
L = Worksheets("Coord").Cells(13, 3).Value
h = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
```

ReDim Value(5)

Value(1) = True

Value(0) = True

Value(5) = True

ReDim SpringValue(5)

SpringValue(0) = Worksheets("Coord").Cells(22, 9).Value 'Kx

SpringValue(1) = Worksheets("Coord").Cells(21, 9).Value 'Ky

SpringValue(2) = Worksheets("Coord").Cells(20, 9).Value 'Kz

SpringValue(3) = Worksheets("Coord").Cells(25, 9).Value 'Kxx

SpringValue(4) = Worksheets("Coord").Cells(24, 9).Value 'Kyy

SpringValue(5) = Worksheets("Coord").Cells(23, 9).Value 'Kzz

For i = 0 To L - 1

PointName(i) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (h + 1) * i, 2).Value

```

ret = mySapObject.SapModel.PointObj.DeleteRestraint(PointName(i))
ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(PointName(i), SpringValue)
'ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetRestraint(PointName(i), Value)

Next i

'Adicionar Sobre Carga
A = andares * px * PY
For i = 1 To A
Val1 = Worksheets("Coord").Cells(28, 6).Value
AreaName(i) = i
ret = mySapObject.SapModel.AreaObj.SetLoadUniformToFrame(AreaName(i), "DEAD", Val1, 10, 2)

Next i

'Definir combinação
ret = mySapModel.RespCombo.Add("COMB1", 0)
ret = mySapModel.RespCombo.SetCaseList("COMB1", eCNameType_LoadCase, "DEAD", 1)

'Salvar modelo:
ret = mySapObject.SapModel.File.Save("C:\Users\bgbig\OneDrive\Desktop\TCC\Testes")

End Sub

Sub Análise()

'Declarando variaveis de auxilio para a analise:
Dim numberResults As Long, andares As Long, px As Long, L As Long
Dim obj() As String, elm() As String, loadCase() As String, stepType() As String, PointName() As
String, X1() As String, Y1() As String, Z1() As String
Dim stress(D) As Double, stepNum() As Double, objSta() As Double, elmSta() As Double,
displacement1(joint) As Double, displacement2(joint) As Double, displacement3(joint) As Double,
displacement4(joint) As Double, displacement5(joint) As Double, displacement6(joint) As Double
Dim Normal(Ponto) As Double, Cortante1(Ponto) As Double, Cortante2(Ponto) As Double,
Torção(Ponto) As Double, Momento1(Ponto) As Double, Momento2(Ponto) As Double, X As Double, Y As
Double, Z As Double
Dim j As Integer

'Deslocamentos em relacao as coordenadas X, Y e Z, respectivamente:
Dim u1() As Double, u2() As Double, u3() As Double

'Rotacoes em relacao aos eixos X, Y e Z, respectivamente:
Dim r1() As Double, r2() As Double, r3() As Double

'Esforços axial, cortantes, torcao e momentos:
Dim P() As Double, V2() As Double, V3() As Double, t() As Double, M2() As Double, M3() As
Double

'Definar casos a serem rodados
ret = mySapModel.Analyze.SetRunCaseFlag("Modal", False)

'Rodar analise:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis

'Selecionar a combinacao de carregamentos "Cargas Pontuais" para gerar os resultados:
ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("DEAD")

```



```

'Redimensionar vetores:
  ReDim PointName(joint - 1)
  ReDim X1(joint - 1)
  ReDim Y1(joint - 1)
  ReDim Z1(joint - 1)

'Gerar deslocamentos dos joints ao longo da estrutura:
andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
px = Worksheets("COord").Cells(9, 3).Value
L = Worksheets("Coord").Cells(13, 3).Value

For b = 0 To L - 1

  PointName(b) = 1 + andares * b

  ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(PointName(b), eItemTypElm_ObjectElm,
numberResults, obj, objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P, V2, V3, t, M2, M3)

  Normal(0) = P(0)
  Momento1(0) = M2(0)
  Momento2(0) = M3(0)

  Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 11).Value = -1 * Normal(0)
  Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 12).Value = -1 * Momento1(0)
  Worksheets("Resultados").Cells(4 + b, 13).Value = -1 * Momento2(0)

Next b

For k = 0 To L - 1

  PointName(k) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (andares + 1) * k, 2).Value
  ret = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(PointName(k), eItemTypElm_ObjectElm,
numberResults, obj, elm, loadCase, stepType, stepNum, u1, u2, u3, r1, r2, r3)
  displacement3(0) = u3(0)
  Worksheets("Resultados").Cells(4 + 5 * k, 4).Value = -1000 * displacement3(0)

Next k

'Gerar Deslocamentos por Mindlin

For i = 0 To L - 1

  PointName(i) = Worksheets("Resultados").Cells(4 + (andares + 1) * i, 2).Value
  ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(PointName(i), eItemTypElm_ObjectElm,
numberResults, obj, objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P, V2, V3, t, M2, M3)
  Normal(i) = -1 * P(0)
  ret = mySapObject.SapModel.PointObj.GetCoordCartesian(PointName(i), X, Y, Z)
  X1(i) = X
  Y1(i) = Y
  Z1(i) = Z
  Worksheets("Coordenadas").Cells(2, 2 + i).Value = X1(i)
  Worksheets("Coordenadas").Cells(3, 2 + i).Value = Y1(i)
  Worksheets("Coordenadas").Cells(4, 2 + i).Value = Z1(i)

Next i

'Gerar Esforços ao longo da estrutura:
ReDim PointName(joint - 1)

```

```

andares = Worksheets("Coord").Cells(7, 3).Value
px = Worksheets("COord").Cells(9, 3).Value

For i = 0 To px - 1
    PointName(i) = 61 + andares * i
    ret = mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(PointName(i), eItemTypeElm_ObjectElm, 10, obj,
objSta, elm, elmSta, loadCase, stepType, stepNum, P, V2, V3, t, M2, M3)

    For k = 0 To 8

        Momento2(k) = M3(k)

        Worksheets("Resultados").Cells(4 + k + 10 * i, 16).Value = Momento2(k)

    Next k

Next i

End Sub
Sub FECHAR()

'Salvar modelo:
    ret = mySapObject.SapModel.File.Save("C:\Users\bgbig\OneDrive\Desktop\TCC\Testes")

'Fechar SAP2000:
    mySapObject.ApplicationExit False

'Estabelecer os objetos para Nothing:
    Set mySapObject = Nothing

End Sub

```