



Desenvolvimento de um Programa para Análises da Interação Solo-Estrutura em Sapatas

Alexandre Vilaça Silva¹, Fernanda Aparecida Souza², Eduardo Souza Cândido²,
Milena Camila de Oliveira², Millena Cristina Barros², Luisa de Moura Leão²

¹Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) – Ouro Preto – MG – Brasil

²Universidade Federal de Lavras (UFLA) – Lavras – MG – Brasil

alexandre.vilaca@aluno.ufop.edu.br, {fernandasouza1708,
millenacbarros}@gmail.com, eduardo.candido@ufla.br, {mcoliveira,
luisa.leao1}@estudante.ufla.br

Abstract. *The Soil Structure interaction (SSI) is a very important subject on the civil construction area, however, it is little recognized due to its complex analysis. In this context, to help on SSI analysis for footings, a software named AnISEs was developed, which can estimate settlement, and determine the vertical modulus of subgrade reaction and the spring constant for each footing, based on the soil profile, the foundation and the structure characteristics, and the methodology for calculating settlements based on the elastic medium. The validation process was based on solving problems described in literature, through which the software proved its practicality, efficiency, and applicability on SSI related problem solving.*

Resumo. *A interação solo estrutura (ISE) é um tema de grande importância no âmbito da construção civil, porém ainda pouco abordado devido à complexidade de análise. Neste contexto, para auxiliar na análise da ISE em sapatas, foi desenvolvido e validado o programa AnISEs, o qual é capaz de fornecer estimativas de recalques, o coeficiente vertical do solo e o coeficiente de mola para sapatas por meio do perfil de sondagem, características das sapatas e pilares além da metodologia a ser utilizada no cálculo dos recalques, de acordo com o meio elástico. O processo de validação consistiu na resolução de problemas descritos na literatura, por meio do qual o software se mostrou rápido, eficiente e aplicável na resolução de problemas relacionados à ISE.*



1. Introdução

As crescentes demandas no ramo da construção civil vêm tornando os projetos de engenharia mais modernos e complexos. Assim, faz-se imprescindível que as empresas e projetistas busquem métodos mais rápidos e eficientes para o desenvolvimento de projetos, fator que torna o uso de softwares indispensável para desenvolvimento e modelagem estrutural.

No entanto, mesmo com os avanços nos *softwares* para cálculos e nos métodos de análise estrutural, muitas simplificações ainda são feitas na etapa de modelagem de um edifício, como o uso da hipótese de apoios indesejáveis. Em geral, o desenvolvimento dos projetos no Brasil é realizado considerando o sistema estrutura-fundação-solo separadamente e apesar do modelo de cálculo ter possibilitado inúmeros avanços nos projetos estruturais, essas simplificações nem sempre levam a resultados que condizem com a realidade física.

Visando uma abordagem mais realista para os problemas estruturais, diversos estudos foram desenvolvidos considerando a interação solo-estrutura (ISE), que avalia a resposta conjunta de três sistemas fortemente interligados: a estrutura, a fundação e o solo (REIS e AOKI, 2005, COLARES, 2006, ANTONIAZZI, 2011, SOUZA e REIS, 2008 e PAVAN et al., 2014).

Dentro desse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver, validar uma ferramenta computacional para auxiliar na análise da ISE, levando em consideração a redistribuição dos esforços gerada pelos recalques da edificação.

2. Referencial teórico

2.1. Interação Solo-Estrutura

O estudo da ISE fornece como a estrutura, de forma conjunta, reage às solicitações impostas ao ser submetida a um carregamento, podendo se aproximar ao comportamento real da edificação (BAHIA, 2015).

Segundo Reis (2000), a análise da ISE deve levar em consideração alguns fatores que interferem no problema, principalmente quando se trata de solos moles e adensáveis. Dentre esses fatores, a rigidez da ligação entre a estrutura e o solo; os recalques diferenciais causados por fundações próximas na edificação; e as influências das etapas construtivas se destacam, uma vez que influenciam diretamente no estado de tensões de um ponto do maciço de solo.

Assim, a avaliação da interação solo-estrutura requer uma visão integrada dos diferentes materiais que compõe o sistema e parte de uma análise iterativa que considera a redistribuição de esforços em uma estrutura e a modificação dos recalques nas fundações, o que resulta em projetos mais confiáveis, eficientes e seguros.

De acordo com Colares (2006), o mecanismo de ISE gera, genericamente, uma redistribuição de esforços nos elementos estruturais, de modo mais evidente nos pilares e essa redistribuição ocorre de maneira semelhante nos recalques, sendo os diferenciais mais afetados que os totais. Desta forma, os recalques gerados pelas estruturas constituem um fator de importância crucial para qualquer análise da ISE, devendo ser devidamente mensurados e analisados.



2.2. Recalques

O dimensionamento das fundações de qualquer obra de engenharia deve assegurar coeficientes de segurança adequados à ruptura do terreno e às deformações excessivas nele provocadas. Essa garantia é obtida pela aplicação de dois critérios: ruptura e deslocamentos (ALBUQUERQUE e GARCIA, 2020).

A equação geral para o cálculo dos recalques pode ser expressa pela Equação 1.

$$\rho = \rho_c + \rho_i \quad (1)$$

Onde: ρ é o recalque total, ρ_c é o recalque por adensamento e ρ_i o recalque imediato.

Segundo Cintra et al. (2011), o recalque por adensamento é típico de solos de granulometria fina saturados e ocorre por meio da dissipação lenta das pressões neutras ao longo do tempo. O recalque imediato, por sua vez, ocorre em um intervalo curto de tempo e é proveniente de deformações a volume constante. Com base na ABNT NBR 6122 (2019), a estimativa dos valores de recalques pode ser realizada por meio de métodos teóricos, semiempíricos e/ou provas de carga direta.

No presente trabalho será considerada somente a parcela devido ao recalque imediato, a qual será estimada por meio do uso de métodos teóricos e semiempíricos.

2.2.1. Recalque Imediato em Meio Elástico Homogêneo (MEH)

2.2.1.1. Camada Semi-Infinita

Para a estimativa do recalque imediato por meio da Teoria da Elasticidade, foi utilizado o método de análise publicado em 1885 por Boussinesq e empregado por pesquisadores como Cintra et al. (2011). Para o desenvolvimento do método partiu-se da Equação 2, que primeiramente foi desenvolvida considerando uma placa circular rígida com largura igual a B apoiada em uma camada semi-infinita de argila sobreadensada e posteriormente foi estendida para as condições de sapata flexível, quadrada ou retangular.

$$\rho_i = \sigma B \left[\frac{1 - \nu^2}{E_s} \right] I_p \quad (2)$$

Onde: σ é a tensão média na superfície de contato; B é o diâmetro da placa circular; ν é o coeficiente de Poisson; E_s é o módulo de deformabilidade e I_p é o fator de influência dependente da forma e da rigidez da sapata (Tabela 1).

Tabela 1. Fator de influência I_p (Adaptado de Perloff e Baron, 1976).

Forma	Sapata Flexível			Rígida
	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	

O módulo de deformabilidade do solo (E_s), segundo Teixeira e Godoy (1996), pode ser estimado por meio de correlações com o valor de N_{SPT} conforme Equação 3.



$$E_s = \alpha K N_{SPT} \quad (3)$$

Onde: α (Tabela 2) e K (Tabela 3) são fatores de correlação dependentes do tipo de solo.

Tabela 2. Fator α (Adaptado de Teixeira e Godoy, 1996).

Tipo de solo	α
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Tabela 3 – Fator K (Adaptado de Teixeira e Godoy, 1996).

Tipo de Solo	K (MPa)
Areia com pedregulhos	1,10
Areia	0,90
Areia siltosa	0,70
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,30
Silte argiloso	0,25
Argila Siltosa	0,20

2.2.1.2. Camada Finita

Janbu et al. (1956) considerando deformações a volume constante e adaptando a teoria da elasticidade definiram, por meio da Equação 4, o recalque imediato (ρ_i) médio de sapatas flexíveis.

$$\rho_i = \mu_0 \mu_1 \frac{\sigma B}{E_s} \quad (4)$$

Onde: μ_0 e μ_1 são fatores de influência do embutimento da sapata e da espessura da camada de solo, respectivamente; σ é a tensão média na superfície de contato entre a placa e o maciço de argila; B é o diâmetro da sapata e E_s o módulo de deformabilidade do solo.

Os fatores μ_0 e μ_1 podem ser obtidos através de gráficos propostos por Janbu et al. (1956), que relacionam a geometria da sapata com o embutimento e com a espessura da camada de solo.

2.2.1.3. Multicamadas

Em muitos casos, o maciço de solo compreendido entre a base da sapata e o indeslocável pode ser composto por mais de uma camada de solo, provocando assim a variação do módulo de deformabilidade entre as camadas. Segundo Cintra et al. (2011), este tipo de problema pode ser resolvido aplicando-se uma metodologia de cálculo baseada em uma camada hipotética, sapata fictícia ou média dos módulos.

- **Camada Hipotética**

O recalque total considerando-se apenas duas camadas, pode ser obtido por meio da soma do recalque individual de cada uma delas, como apresentado na Equação 5.

$$\rho_{total} = \rho_1 + \rho_2 \quad (5)$$



Onde: ρ_1 é o recalque da primeira camada e ρ_2 é o recalque da segunda camada.

Para o cálculo de ρ_1 aplica-se diretamente o caso de camada finita, considerando o indeslocável na base da camada estudada. Para a obtenção de ρ_2 , Simons e Menzies (1981) sugeriram que primeiro seja feito o cálculo do recalque ($\rho_{1,2,E_2}$) de uma camada hipotética com espessura total das duas camadas e com módulo de deformabilidade da segunda (E_2), e então subtrair o recalque da primeira camada (ρ_{1,E_2}) calculado considerando o módulo de deformabilidade da segunda camada (E_2). Assim, o recalque ρ_2 será igual a $\rho_2 = \rho_{1,2,E_2} - \rho_{1,E_2}$.

De maneira análoga, pode-se levar em conta a presença de uma terceira e até mais camadas. Essa metodologia pode ser considerada uma solução exata para o recalque de multicamadas, dentro das limitações do conceito exato em geotecnia (CINTRA et al., 2011).

- **Sapata Fictícia**

Neste método o cálculo do recalque da segunda camada é simplificado. Assim tem-se o cálculo de ρ_1 por meio da aplicação direta do caso de camada finita; e para o cálculo de ρ_2 , considera-se uma sapata fictícia apoiada no topo da camada estudada, com dimensões ampliadas através da propagação 1:2.

- **Média dos Módulos**

De acordo com Cintra et al. (2011) este método considera que todas as camadas do solo são equivalentes a uma única camada com módulo de deformabilidade dado pela média ponderada dos módulos de cada camada. Logo, para n camadas o módulo de deformabilidade médio do solo é dado pela Equação 6.

$$E_{s,m\u00e9dio} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i E_{s,i}}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (6)$$

Onde: H_i é a espessura da camada i ; $E_{s,i}$ é o módulo de deformabilidade da camada i .

Assim, o recalque pode ser obtido por meio da Equação 4 substituindo o módulo de deformabilidade pelo módulo de deformabilidade médio ($E_{s,m\u00e9dio}$). Apesar da simplicidade, esta solução não será considerada no presente trabalho.

2.2.2. Recalques Imediatos em Meio Elástico Não Homogêneo (MENH)

2.2.2.1. Método de Schmertmann (1970) e Schmertmann, Hartman e Brown (1978)

O método proposto por Schmertmann em 1970 é baseado na teoria da elasticidade e subdivide o perfil de sondagem em um número suficiente de subcamadas pouco espessas, de modo que seja razoável supor um valor constante de E_s para cada uma delas. Para desenvolver o método, considerou-se um carregamento uniforme σ , que atua na superfície de um semiespaço elástico, isotrópico e homogêneo, com módulo de deformabilidade E_s . Para essa situação, a deformação vertical ε_z a uma profundidade z pode ser dada pela Equação 7.

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma}{E_s} I_z \quad (7)$$

Onde, I_z é o fator de influência na deformação.



Considerando as deformações que ocorrem em um bulbo de profundidade $2B$, sendo B a largura da sapata, Schmertmann (1970) observou que a deformação máxima do solo não ocorre em uma cota coincidente com a base da sapata, mas sim a uma profundidade em torno de $z = B/2$ como mostra a Figura 1a.

Considerando um maior embutimento da sapata no solo, Schmertmann (1970) define um fator de correção (C_1) do recalque dado pela Equação 8, variando de 1 a 0,5, devido à redução do recalque em até 50%.

$$C_1 = 1 - 0,5 \left(\frac{q}{\sigma^*} \right) \geq 0,5 \quad (8)$$

Onde: q é a tensão vertical efetiva à cota de apoio da fundação (sobrecarga); σ^* é a tensão líquida aplicada pela sapata ($\sigma^* = \sigma - q$).

Semelhante às argilas, outra parcela de recalque se desenvolve com o tempo nas areias. Assim, para corrigir o efeito do tempo, Schmertmann (1970) adota um fator de correção C_2 de acordo com a Equação 9.

$$C_2 = 1 + 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \quad (9)$$

Onde: t é o tempo, em anos.

Para o recalque imediato, onde não há o acréscimo de tempo considera-se $C_2 = 1$.

Assim, considerando os fatores de embutimento e tempo, o recalque de sapatas em areia pode ser expresso pelo somatório dos recalques de todas as subcamadas consideradas homogêneas até a profundidade de $z = 2B$ conforme a Equação 10.

$$\rho_i = C_1 C_2 \sigma^* \sum_{i=1}^n \frac{I_z}{E_s} \Delta Z \quad (10)$$

Onde: I_z é o fator de influência na deformação à meia-altura da i -ésima camada; E_s é o módulo de deformabilidade da i -ésima camada e ΔZ é a espessura da i -ésima camada.

Schmertmann, Hartman e Brown (1978) introduziram aperfeiçoamentos no método de Schmertmann (1970) acrescentando a análise de sapata corrida. Dois novos diagramas (Figura 1b) foram propostos para a distribuição do fator de influência.

O valor máximo de I_z que ocorre a $z = B/2$ para sapatas quadradas e $z = B$ para sapatas corridas é dado pela Equação 11. O valor de I_z , em cada camada, pode ser obtido por semelhança de triângulos.

$$I_{zmáx} = 0,5 + 0,1 \sqrt{\frac{\sigma^*}{\sigma_v}} \quad (11)$$

Onde: σ_v é a tensão vertical efetiva na profundidade correspondente a $I_{zmáx}$.

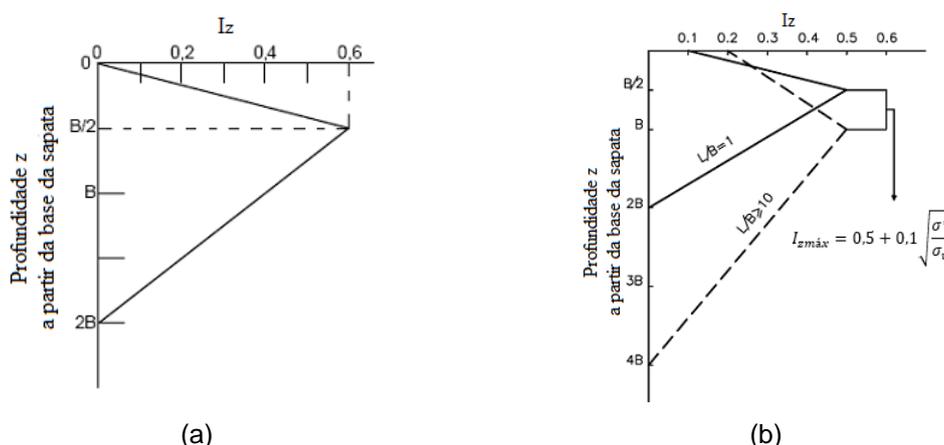


Figura 1. Fator de influência na deformação vertical (Adaptado de Schmertmann, Hartman e Brown, 1978).

2.3. Modelagem da Interação Solo-Estrutura

O comportamento dos solos submetidos a carregamentos externos é um dos principais elementos a se considerar na análise da ISE, uma vez que a distribuição de tensões e recalques no maciço altera de forma significativa a interação do solo com a estrutura. Cada tipo de solo pode precisar de diferentes equações constitutivas, demandando diferentes tipos de modelagem.

A complexidade do comportamento dos solos tem levado ao desenvolvimento de diversos modelos de previsão, principalmente se tratando da análise da ISE. Dentre os principais modelos clássicos empregados destacam-se os modelos de Winkler e do meio contínuo.

2.3.1. Modelo de Winkler

Winkler (1867) propôs um modelo de comportamento do solo no qual o deslocamento de um ponto situado na superfície do maciço é considerado diretamente proporcional ao carregamento aplicado neste local. Neste método o solo é tratado como um conjunto de molas lineares independentes. Dessa forma, a análise da deformação é considerada somente na região de apoio da fundação, uma vez que uma mola não é afetada pela deformação da outra (Figura 2). O maior problema no uso deste modelo consiste na determinação da rigidez das molas elásticas usadas para substituir o solo sob a fundação.

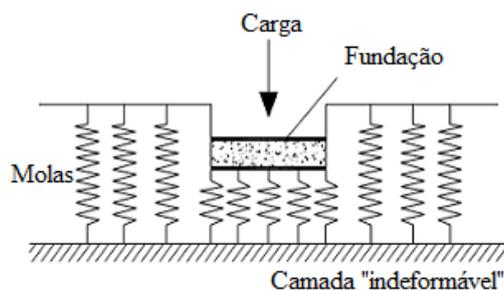


Figura 2. Consideração da deformação do solo no método de Winkler (Adaptado de Antoniazzi, 2011).



2.3.1.1. Coeficiente de Reação Vertical

O coeficiente de reação vertical do solo (k_v) pode ser definido como a razão entre a tensão aplicada ao maciço e o respectivo deslocamento vertical. De acordo com o modelo de Winkler (1867), este parâmetro pode ser calculado conforme a Equação 13.

$$k_v = \frac{\sigma}{\rho} \quad (13)$$

Onde: σ é a tensão de contato média na base da fundação e ρ é o recalque do elemento de fundação.

Segundo Velloso e Lopes (2011), o coeficiente de reação vertical do solo pode ser obtido por meio do cálculo do recalque real da fundação, através de ensaios de placa ou ainda por meio de tabelas de valores típicos ou correlações.

2.3.1.2. Coeficiente de Mola

De acordo com Winkler (1867), é possível determinar o coeficiente de mola (K) por meio de uma relação entre o coeficiente de reação vertical do solo e a área de influência do elemento de fundação em contato com o solo, como apresentado na Equação 14.

$$K = k_v A_{influência} \quad (14)$$

Onde: k_v é o coeficiente de reação vertical do solo e $A_{influência}$ é a área de influência da mola. No caso de sapatas, considera-se a área da base da sapata como área de influência.

Nota-se que o coeficiente de mola é diretamente proporcional ao coeficiente de reação vertical do solo. Uma vez determinados os coeficientes de mola, estes são inseridos nos apoios da estrutura, anteriormente considerados como indeslocáveis.

2.3.2. Modelo de Meio Contínuo

Este modelo é uma maneira mais real de representar o solo, já que permite a avaliação das tensões ao longo do solo de forma contínua (PORTO et al., 2012).

O meio contínuo pode ser desenvolvido considerando o solo como um meio elástico ou elastoplástico. No caso de se considerar como um meio elástico as soluções são baseadas na teoria da elasticidade, e para o elastoplástico a solução somente pode ser obtida por via numérica, utilizando o método dos elementos finitos, por exemplo (VELLOSO e LOPES, 2011).

Segundo Crespo (2004), uma das maiores desvantagens do emprego do modelo elástico reside na imprecisão das reações calculadas na borda das fundações.

3. Desenvolvimento do Programa

O *software* AnISEs (Análise da Interação Solo-Estrutura em Sapatas), registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob o número BR 51 2020 002333-9, foi desenvolvido para avaliar a interação solo-estrutura em sapatas. Por meio da estimativa dos recalques e com o auxílio do *software* Ftool Basic[®], o programa fornece os coeficientes de reação vertical do solo e os coeficientes de mola em meio elástico homogêneo e não homogêneo.

O código computacional foi implementado na plataforma Delphi, uma ferramenta pertencente à Embarcadero Technologies que apresenta um ambiente de desenvolvimento integrado que pode ser ampliada e customizada com componentes e ferramentas criadas utilizando uma linguagem orientada a objetos (*Object Pascal*).

Para o desenvolvimento do *software* foi utilizada uma estrutura baseada em classes, o que possibilita a construção de sistemas muito mais complexos e ao mesmo tempo de fácil entendimento. Desta forma, o funcionamento pode ser sintetizado em uma sequência de passos lógicos como ilustrado na Figura 3.

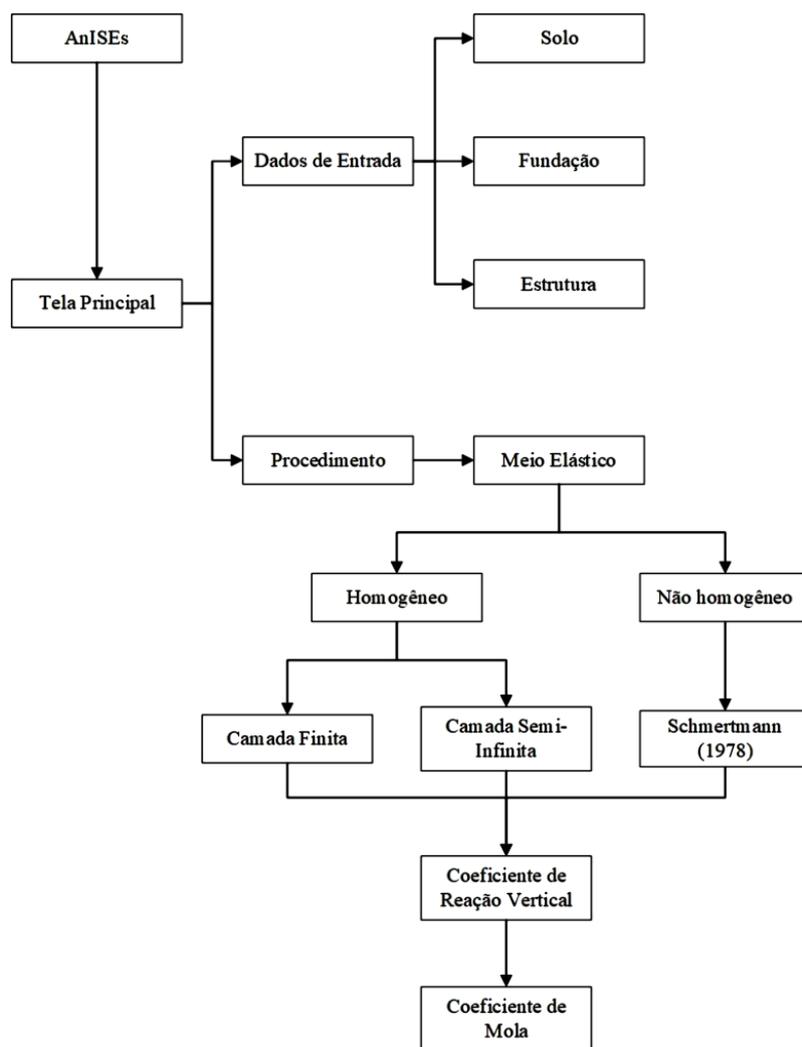


Figura 3. Sequência de passos de execução do AnISEs.

O AnISEs apresenta uma interface gráfica que facilita a comunicação entre o usuário e o programa, por meio do uso de botões e campos de preenchimento, fornecendo assim o direcionamento de quais ações devem ser realizadas pelo software. A primeira tela exhibe a apresentação do título do programa e dos membros envolvidos na construção do mesmo.

Em seguida é iniciada a tela principal (Figura 4), onde na barra de *Menus* são exibidas as opções *Dados de Entrada*, *Procedimento*, *Resultado* e *Sobre*. A opção *Dados de Entrada* é destinada ao preenchimento dos dados necessários para a realização dos cálculos, os quais são referentes as informações relacionadas ao solo, a fundação e a estrutura.



Figura 4. Dados de entrada.

No campo *Solo* (Figura 5), são preenchidas as informações referentes ao perfil de sondagem, tais como *profundidade*, *tipo de solo*, *NSPT* e *peso específico*. O usuário possui também a opção de trabalhar com até nove áreas representativas e presença de nível de água, bem como utilizar diretamente o módulo de deformabilidade (Figura 6).

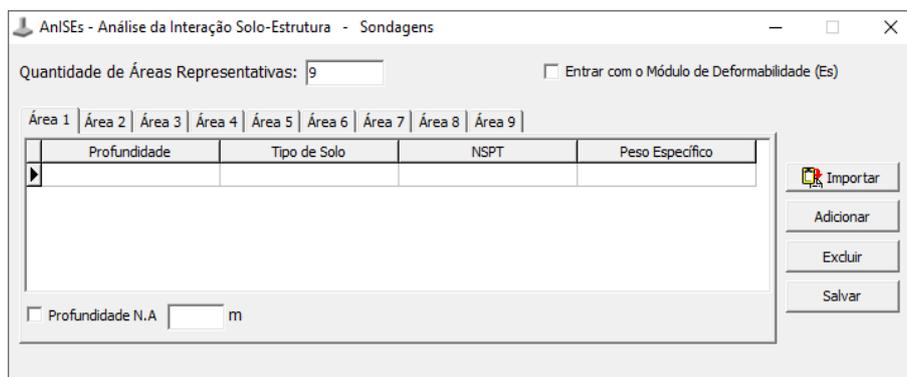


Figura 5. Dados do solo.

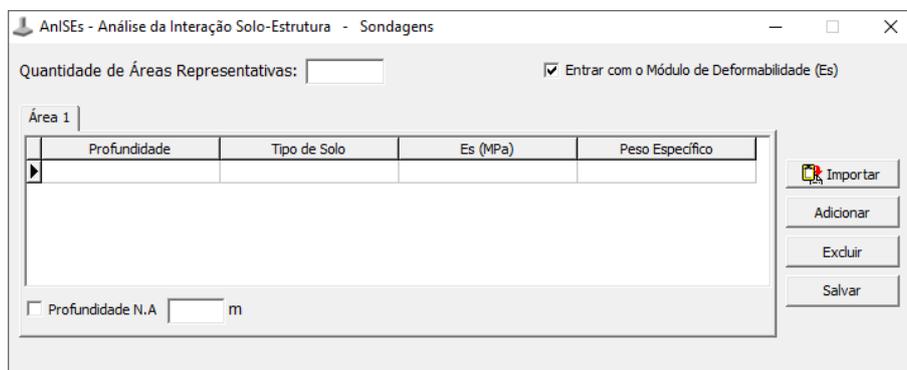


Figura 6. Dados do solo com módulo de deformabilidade (Es).

Em *Fundação* (Figura 7), são definidos os parâmetros relativos à fundação, tais como a quantidade de elementos, área representativa de sondagem, geometria, cota de assentamento (h) e peso específico do solo acima da cota de assentamento.

No item *Estrutura* (Figura 8), cadastra-se os dados relativos à superestrutura, tais como a quantidade de pilares, área representativa de sondagem, geometria e carga.

Em *Procedimento* (Figura 9), pode-se definir a metodologia de cálculo de acordo com o meio elástico, podendo este ser homogêneo ou não homogêneo. Para o meio elástico homogêneo pode-se trabalhar com os métodos de Camada Semi-Infinita e Finita. No método de Camada Semi-Infinita (Figura 10a) o usuário deve fornecer o valor do coeficiente de Poisson e do fator de influência, que pode ser fornecido diretamente ou calculado por meio do botão *Calcular I_p* como mostra a Figura 10b. Para o cálculo de I_p são necessárias informações relativas à rigidez forma, dimensões e posição da sapata.

Number of Foundation Elements:

Dados:

Fundacao	Área Rep.	B (m)	L (m)	h (m)	Peso Especifico
▶					

Buttons: Importar, Adicionar, Excluir, Salvar

Figura 7. Dados Fundação.

Number of Pillars:

Dados:

Pilar	Área Rep.	bp (m)	ap (m)	Carga (kN)
▶				

Buttons: Importar, Adicionar, Excluir, Salvar

Figura 8. Dados Estrutura.

Menu: Dados de Entrada | **Procedimento** | Resultado | Sobre

Sub-menu: Meio Elástico > Homogêneo > Não Homogêneo

Figura 9. Procedimentos.

(a) Entrada de dados: v: Ip:

Resultados:

Pilar	Área Rep.	Tipo de Solo	NSPT	Es (MPa)	Ip	Recalque (mm)
▶						

Buttons: Calcular, Excluir, Salvar

(b) Cálculo do fator influência (Ip):

Tipo de Sapata: Escolher... L/B:

Forma: Escolher... Posição: Escolher...

Ip:

Figura 10. Camada Semi-Infinita: (a) Entrada de dados e (b) Cálculo do fator influência (I_p).

Em *Camada Finita* (Figura 11), são fundamentais as informações referentes ao número de camadas do perfil de sondagem e dos fatores de influência (embutimento da sapata e espessura da camada de solo), que podem ser obtidos com o auxílio dos ábacos apresentados por Janbu et al. (1956) e acessáveis por meio do botão *Ábacos*. Para um perfil de sondagem possuindo multicamadas foi implementada a metodologia de sapata fictícia para o cálculo do recalque.



Figura 11. Método Camada Finita.

No meio elástico não homogêneo tem-se implementado o método de Schmertmann, Hartman e Brown (1978) (Figura 12).

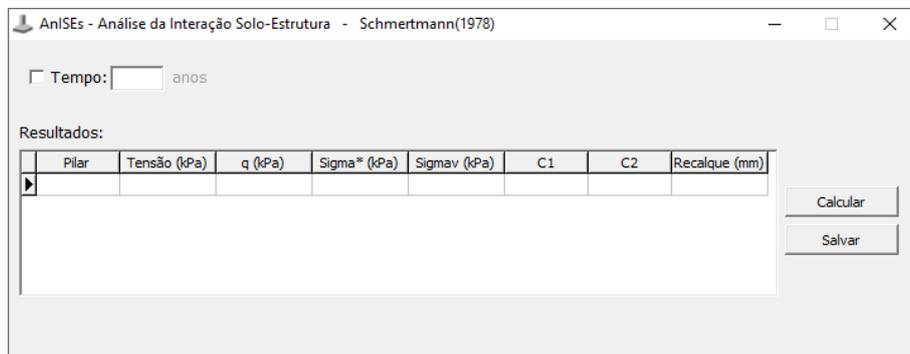


Figura 12. Método de Schmertmann, Hartman e Brown (1978).

No ícone *Resultado* (Figura 13), os valores dos coeficientes de reação vertical e de mola são exibidos para cada elemento de fundação analisado. Por fim, no item *Sobre* são apresentadas as informações sobre os desenvolvedores do programa.

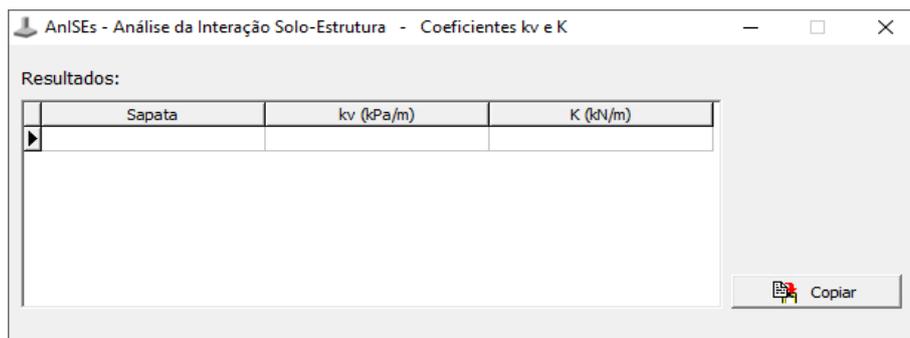


Figura 13. Coeficientes de reação vertical e coeficientes de mola.

4. Validação

O processo de validação tem como objetivo comprovar os resultados obtidos pelo *software*, comparando os valores dos recalques e a eficácia do processo iterativo com os apresentados na literatura. Para a validação em meio elástico homogêneo foram utilizados os métodos de camada Semi-Infinita e Camada Finita e, para o meio elástico não homogêneo, utilizou-se o método de Schmertmann, Hartman e Brown (1978).

4.1. Validação da Estimativa de Recalques

4.1.1. Recalque em Meio Elástico Homogêneo

4.1.1.1. Camada Semi-Infinita

Para a validação do método da camada semi-infinita utilizou-se um exercício resolvido do Capítulo 3 de Cintra et al. (2011), que permite estimar o recalque da sapata apresentada na Figura 14. Para o cálculo, considera-se uma sapata rígida, com $B = L = 3$ m, aplicando ao solo a tensão de 0,2 MPa.

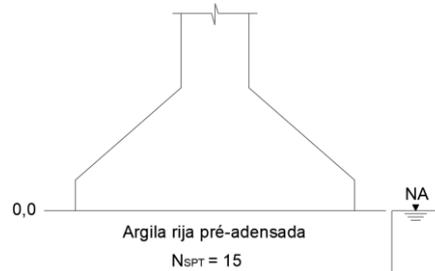


Figura 14. Sapata Assentada sobre solo argiloso (Adaptado de Cintra et al., 2011).

Para a resolução analítica do exercício, utilizou-se a Equação 2 para a estimativa do recalque. Para o cálculo do módulo de deformabilidade, a partir da Equação 3, tem-se: I_p igual a 0,99 (Tabela 1), α igual a 7 (Tabela 2) e, por extrapolação, K igual a 0,15 (Tabela 3). Assim:

$$E_s = 7 \cdot 0,15 \cdot 15 \cong 16 \text{ MPa}$$

Por fim, é possível estimar o recalque através da Equação 2.

$$\rho_i = 0,2 \cdot 3 \cdot \left[\frac{1 - 0,5^2}{1 \times 6} \right] \cdot 0,99 = 27,8 \text{ mm}$$

Para a resolução do problema por meio do AnISEs, é necessária a inserção dos dados referentes ao solo, fundação e estrutura. Vale ressaltar que a tensão do solo não é um parâmetro de entrada do programa, uma vez que o mesmo trabalha com a força aplicada à fundação pela estrutura, calculando por si próprio a tensão, relacionando a força com a área da sapata. Assim, para a sapata quadrada de 3 x 3 m do enunciado, foi inserido uma força de 1800 kN no pilar para resultar em uma tensão aplicada de 200 kPa.

É perceptível que, para valores de recalque com uma casa decimal, o valor do recalque estimado pelo programa (Figura 15) está condizente com o encontrado por Cintra et al. (2011).

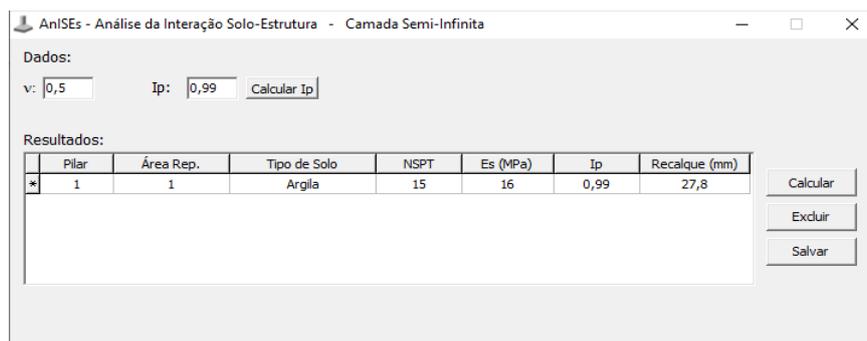


Figura 15. Estimativa do recalque em camada Semi-Infinita pelo AnISEs.

4.1.1.2. Camada Finita

Cintra et al. (2011) propuseram uma alteração no exercício anterior, agora com a sapata apoiada à cota de 1,5 m e com o topo rochoso à cota de 7,5 m de acordo com a Figura 16. Assim, a resolução passa a ser realizada utilizando-se camada finita.

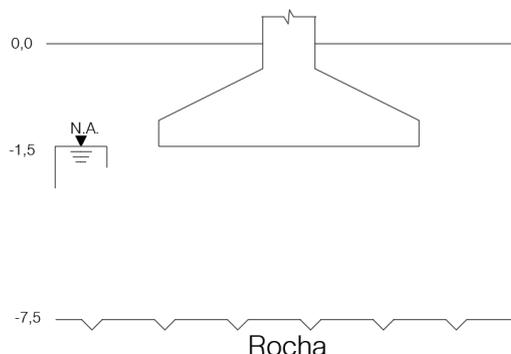


Figura 16. Sapata assentada sobre solo argiloso com topo rochoso visível (Adaptado de Cintra et al., 2011).

Para o cálculo utilizando o método de camada finita são necessários os fatores μ_0 e μ_1 , sendo estes obtidos através de gráficos propostos por Janbu et al. (1956), que relacionam a geometria da sapata com o embutimento e com a espessura da camada de solo.

Logo, para a sapata quadrada em questão ($L/B = 1$), têm-se os parâmetros μ_0 e μ_1 iguais a 0,86 e 0,56, respectivamente. Desta forma, foi possível estimar o recalque por meio da Equação 4.

$$\rho_i = 0,86 \cdot 0,56 \cdot \frac{0,2 \cdot 3}{16} = 18,1 \text{ mm}$$

Para o cálculo pelo AnISEs é necessária a inserção dos valores dos fatores μ_0 e μ_1 e do número de camadas a ser considerada, visto que o programa também trabalha com o modelo de multicamadas. Através do resultado obtido (FIGURA 17) verifica-se a igualdade entre os resultados.



Figura 17. Estimativa do recalque em camada Finita pelo AnISEs.

4.1.2. Recalque em Meio Elástico Não Homogêneo

Para a validação da estimativa de recalque em Meio Elástico Não Homogêneo por meio do método de Schmertmann, Hartman e Brown (1978) empregou-se um exercício resolvido apresentado por Cintra et al. (2011). Neste exercício, pede-se a estimativa do

recalque imediato da sapata indicada na Figura 18, com $B = L = 3$ m, apoiada à cota de 2 m (peso específico igual a 17 kN/m^3), aplicando ao solo a tensão $\sigma = 0,2 \text{ MPa}$.

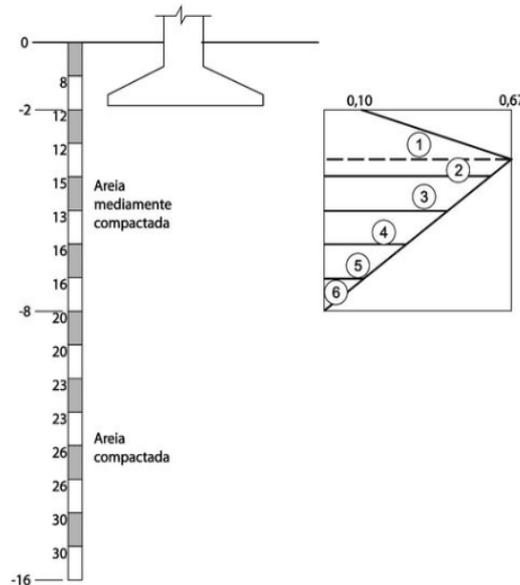


Figura 18. Sapata apoiada sobre solo arenoso (Adaptado de Cintra et al., 2011).

Para a resolução analítica fez-se necessário construir uma planilha utilizando o *software* Microsoft Office Excel 2019. Na planilha, foram inseridos os cálculos (Seção 2.2.2.1.) de sobrecarga (q), tensão líquida (σ^*), tensão vertical (σ_v), fator de correção de embutimento (C1) por meio da Equação 11 e fator de correção do tempo (C2), considerado igual a 1 para o caso de recalque imediato. Para o cálculo de I_z , necessário para a estimativa do recalque, o solo foi discretizado em 6000 camadas de espessura (Δz) igual a 1 milímetro, para maior precisão no resultado. Assim, após implementação dos cálculos e discretização no Microsoft Office Excel, obteve-se o resultado apresentado na Tabela 4 por meio da Equação 10.

Tabela 4. Estimativa de recalque da sapata empregando o Microsoft Office Excel.

Sobrecarga (kN)	σ^* (kPa)	σ_v (kPa)	C1	C2	ρ_i (mm)
34,00	166,00	59,50	0,90	1,00	8,70

O resultado obtido por meio do AnISEs está apresentado na Figura 19. Comparando os resultados obtidos pelos *softwares* (Excel e AnISEs) nota-se a igualdade entre os valores.

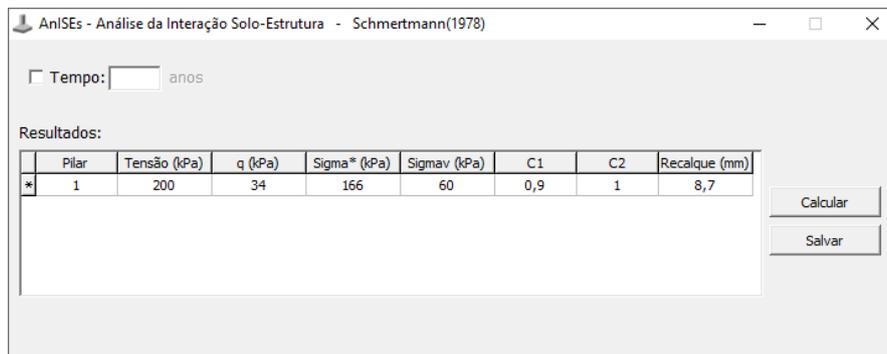


Figura 19. Estimativa do recalque da sapata pelo método de Schmertmann, Hartman e Brown (1978).

Apesar da validação empregar um perfil de sondagem com solos arenosos, sabe-se que o método de Schmertmann, Hartman e Brown (1978) tem sido empregado na estimativa de recalques para diversos tipos de estratigrafias (ÁRABE et al., 2000 e CITIROGLU et al., 2011). Desta forma, a validação aqui realizada permite o emprego do AnISEs independentemente do perfil estratigráfico.

4.2. Validação do Processo Iterativo

Para validar o processo iterativo de determinação dos coeficientes de mola utilizando o AnISEs e o Ftool Basic®, foi utilizado o pórtico plano carregado (FIGURA 20) apresentado por Souza e Reis (2008), admitindo-se que as vigas e pilares possuem seções transversais de 15 x 30 cm. Além disso, os pilares se apoiam sobre sapatas com dimensões de 60 x 60 cm, que por sua vez se apoiam em um solo com $E_s = 50$ GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3.

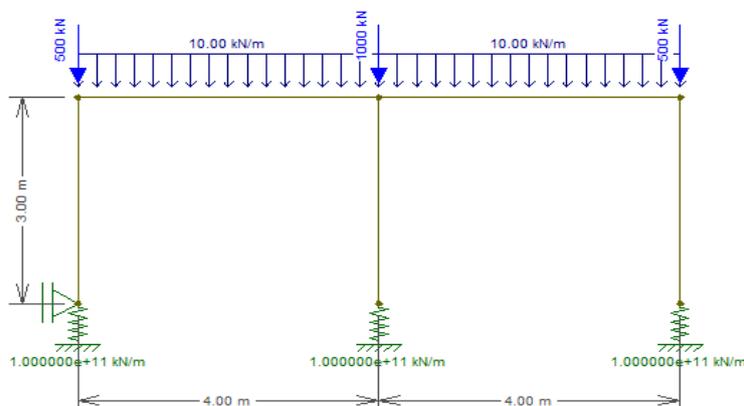


Figura 20. Pórtico Plano Carregado (Adaptado de Souza e Reis, 2008).

Souza e Reis (2008) apresentaram duas metodologias para aplicação da ISE no pórtico e obteve os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. ISE com controle dos coeficientes de mola (Souza e Reis, 2008).

Pilar	Apoio Rígido		Apoio Flexível			
			Iteração 1		Iteração 2	
	K (kN/m)	R (kN)	K (kN/m)	R (kN)	K (kN/m)	R (kN)
P1	∞	-516	40203,7	-521	40203,7	-521
P2	∞	-1049	40203,7	-1039	40203,7	-1039
P3	∞	-516	40203,7	-521	40203,7	-521

Para a validação do processo iterativo efetuado no AnISEs considerou-se a primeira metodologia, na qual as reações de apoio da estrutura foram calculadas inicialmente considerando os apoios rígidos e em seguida, a partir das reações encontradas, estimou-se os recalques das fundações dos três pilares por meio da Equação 2, considerando um valor de $I_p = 0,82$ para as sapatas rígidas.

Para a realização do processo iterativo, replicou-se o pórtico no Ftool Basic®, inserindo as dimensões dos pilares e vigas e aplicou-se os esforços e carregamentos nos locais indicados na Figura 20. Considerando que os componentes estruturais são de concreto, foram inseridos nos parâmetros dos materiais um módulo de elasticidade $E = 25$ GPa e um coeficiente de Poisson de 0,2. Para os apoios, assim como no pórtico

proposto por Souza e Reis (2008), foram utilizados coeficientes K iguais a 1×10^{11} kN/m. Assim, as reações encontradas estão apresentadas na Figura 21.

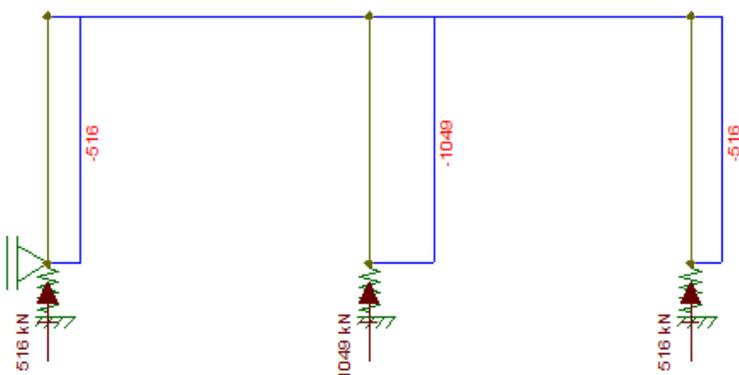


Figura 21. Reações de apoio calculadas pelo Ftool Basic®.

Na sequência, as informações relativas ao solo, fundações e estrutura foram inseridas no AnISEs. Para o cálculo do recalque, foi utilizado o método da camada Semi-Infinita. Assim, para a primeira iteração, foram obtidos os coeficientes de mola apresentados na Figura 22.



Figura 22. Resultados da primeira iteração efetuada no AnISEs.

Com os primeiros coeficientes de mola determinados, o Ftool Basic® foi novamente utilizado para a determinação das novas reações, onde os novos coeficientes de mola foram acrescentados (Figura 23), e novas reações foram encontradas (Figura 24).

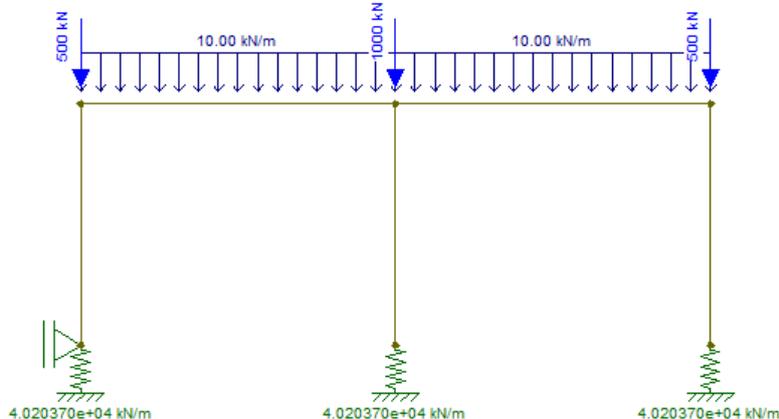


Figura 23. Pórtico carregado para primeira iteração efetuada.

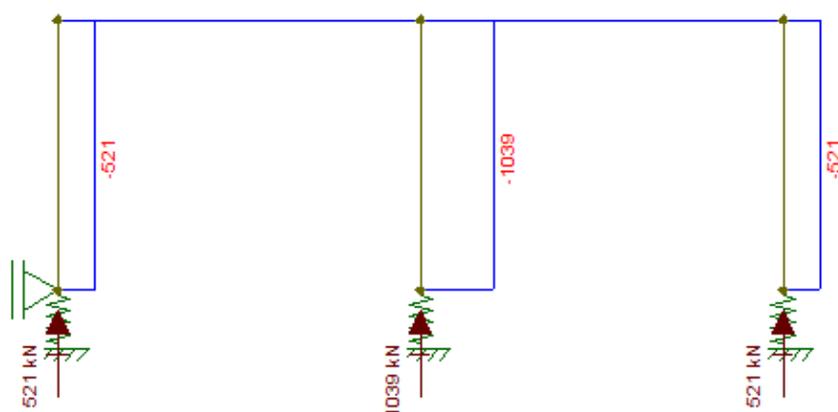


Figura 24. Reações de apoio encontradas pelo Ftool Basic® na primeira iteração.

Para a segunda iteração, os valores das reações não se alteraram e, com isso, os coeficientes de mola também se mantiveram os mesmos. Os resultados das iterações efetuadas estão apresentados na Tabela 6. Nota-se que os resultados alcançados foram similares aos obtidos por Souza e Reis (2008) (Tabela 5).

Tabela 6. Coeficientes de mola e reações encontradas em cada iteração no AnISEs.

Pilar	Apoio Rígido		Apoio Flexível			
	K (kN/m)	R (kN)	Iteração 1		Iteração 2	
			K (kN/m)	R (kN)	K (kN/m)	R (kN)
P1	1×10^{11}	-516	40203,7	-521	40203,7	-521
P2	1×10^{11}	-1049	40203,7	-1039	40203,7	-1039
P3	1×10^{11}	-516	40203,7	-521	40203,7	-521

5. Conclusão

O *software* proposto mostrou-se eficiente na estimativa de recalques por diferentes metodologias, além de calcular os coeficientes de reação vertical do solo e os coeficientes de mola para este tipo de fundação.

Todas as validações do algoritmo implementado mostraram-se eficientes nas análises, apresentando resultados precisos e confiáveis, e ainda rápida execução no processo iterativo para análise da ISE

Por fim, diante da facilidade de execução do *software* desenvolvido, do bom desempenho apresentado nas validações, conclui-se que o AnISEs apresenta-se como uma excelente ferramenta para a engenharia de fundações. O desempenho apresentado pelo programa, evidencia que aplicação do mesmo vai além do campo acadêmico, podendo também ser utilizado satisfatoriamente para soluções dos problemas de engenharia rotineiramente enfrentados no mercado de trabalho.

Referências

- Albuquerque, P. J. R. e Garcia J. R. (2020) “Engenharia de Fundações”. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC-GEN. v. 1. 400p.
- Antoniuzzi, J. P. (2011) “Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais”. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria.



- Árabe, L. C. G., Árabe, A. M. F., Testa, T. A. R. e Almeida, J. M. N. (2000) “Estimativa de recalques em fundações rasas através de um software que implementa o método de Schmertmann”. Faculdade de Ciência da Computação, Universidade Federal de Uberlândia.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6122 (2019) “Projeto e execução de Fundações”. Rio de Janeiro.
- Bahia, G. A. D. (2015) “Avaliação do desempenho de fundações em edificação no DF com a utilização de técnicas de interação solo-estrutura”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 245p.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N. e Albiero, J. H. (2011) “Fundações diretas: projeto geotécnico”. São Paulo: Oficina de Textos.
- Citiroglu, H. K., Capar, O. F. e Bilir, M. E. (2011) “Allowable bearing capacity based on Schmertmann method for sandy soils”. Scientific Research and Essays, v. 6, n. 2, p. 369-381.
- Colares, G. M. (2006) “Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios”. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos.
- Crespo, V. A. S. (2004) “Estudo da sensibilidade de edificações em relação ao solo”. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro.
- Janbu, N., Bjerrum, L. e Kjaernsli, B. (1956) “Veiledning ved losning av fundamenteringsoppgaver”. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute. (Publication 16).
- Pavan, R. C., Costella, M. F. e Guanieri, G. (2014) “Interação solo-estrutura para sistemas estruturais reticulados sobre fundações rasas”. Revista IBRACON de estruturas e materiais, v. 7, n. 2, p. 273-285.
- Perloff, W. H. e Baron, W. (1976) “Soil mechanics: principles and applications”. Minnesota: Ronald Press Co. 745 p.
- Porto, T. B., Mendonça, B. Q. e Carvalho, L. S. G. (2012) “Análise estrutural de pisos industriais utilizando o método dos elementos finitos”. In: Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Salta, Argentina.
- Poulos, H. G. (1975) “Soil-structure interaction”. In: X ICSMFE, Estocolmo, ISSMFE. Proceedings. v. IV. p. 307-334.
- Reis, J. H. C. (2000) “Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais em argila mole”. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Reis, J. H. C. e Aoki, N. (2005) “Aplicação do método de aproximações sucessivas para solução de problemas em interação solo-estrutura de edifícios”. Anais. Belo Horizonte: ABMS, v. 7, Belo Horizonte, p. 405-410.
- Schmertmann, J. H. (1970) “Static cone to compute settlement over sand. Journal Soil Mechanics and Foundations Division”, ASCE, v. 96, n. SM3. p. 1011-1043.
- Schmertmann, J. H., Hartman, J. P. e Brown, P. R. (1978) “Improved strain influence factor diagrams. Journal Geotechnical Division”, ASCE, v. 104, n. 8.
- Simons, N. E. e Menzies, B. K. (1981) “Introdução à engenharia de fundações”. Tradução inglês (ed. 1977). Rio de Janeiro: Interciência. 199 f.
- Souza, R. A. e Reis, J. H. C. (2008) “Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas”. Acta Sci. Technol., V. 30, N. 2, P. 161-171.



- Teixeira, A. H. e Godoy, N. S. (1995) “Análise, projeto e execução de fundações rasas”. Fundações: teoria e prática. São Paulo: Pini, Cap. v. 7, p. 227-264.
- Terzaghi, K. (1956) “Evaluation of coefficient of subgrade reaction”. Geotechnique, v. 5, n. 4, p. 297-326.
- Velloso, D. A. e Lopes, F. R. (2011) “Fundações, volume 1: critérios de projeto – investigações do solo – fundações superficiais”. São Paulo: Oficina de Textos, 2ª ed.
- Winkler, E. (1867) “Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik”.