



CONSIDERAÇÃO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA ANÁLISE DE PÓRTICOS DE CONCRETO ARMADO

CONSIDERATION OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN THE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAMES

Rubens M. C. Fagundes (A) (1); Leonardo Vargas (2); Almir Barros da S. Santos Neto (3)

(1) (A) Eng. Civil, Me. Doutorando do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Santa Maria, Brasil.

(2) Eng. Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

(3) Eng. Civil, Dr., Professor do Curso de Engenharia Civil, UFSM, Santa Maria, Brasil.

rubens.fagundes@acad.ufsm.br;

Área temática: Análise Estrutural.

Resumo

Estudos sobre Interação Solo-Estrutura (ISE) em estruturas de pequeno porte são ainda escassos na literatura, seja com fundações profundas ou rasas. Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento estrutural de três pórticos de concreto armado, considerando maciços de solo com diferentes perfis de resistência, dois diferentes modelos matemáticos de representação da ISE e custo de materiais. Foram utilizados os softwares TQS e SAP2000 na modelagem computacional. Quando verificado a ISE em solos com maciços mais rígidos, as análises resultaram em valores próximos ao que consideram a base dos pilares engastada. Em contrapartida, os modelos que apresentam solos moles resultaram em uma maior distribuição de esforços na estrutura. A diferença dos modelos matemáticos adotados para representação da ISE teve como fator determinante o tempo destinado às análises e processamento matemático, pois ambos modelos resultaram em respostas semelhantes. As análises auxiliaram na determinação de um modelo mais realista quando considerado a ISE em estruturas de pequeno porte e principalmente a importância de refinar a análise estrutural, para obter um dimensionamento estrutural que resulte em economia e segurança.

Palavras-chave: interação solo-estrutura, concreto armado, reforço estrutural, análise estrutural.

Abstract

Studies on Soil-Structure Interaction (SSI) in small structures are still scarce in the literature, whether with deep or superficial foundations. Thus, this work aims to study the structural behavior of three reinforced concrete frames, considering soil masses with different strength profiles, two mathematical models of representation of the ISE, and the cost of materials. The TQS and SAP2000 software were used in the computational modeling. When checking the ISE in soils with more rigid massifs, the analysis resulted in values close to what they consider the base of the fixed pillars. On the other hand, the models presenting soft soils resulted in a more significant distribution of efforts in the structure. The difference in the mathematical models adopted to represent the ISE determined the time allocated to the analysis and mathematical processing, as both models resulted in similar responses. The analysis helped to determine a more realistic model when considering the ISE in small structures, especially the importance of accurate structural analysis to obtain a structural design that results in economy and safety.

Keywords: soil-structure interaction, reinforced concrete, structural reinforcement, structural analysis.



1. INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia computacional e do Método dos Elementos Finitos (MEF) resultaram em programas mais sofisticados, principalmente na área de análise e dimensionamento de estruturas. Com inúmeras pesquisas, principalmente para grandes edificações, a consideração da ISE na análise estrutural ainda apresenta diversos modelos matemáticos que buscam representar a deformabilidade das fundações juntamente com a superestrutura. Com isso, a ISE ainda não é um fenômeno amplamente considerado na análise de estruturas, principalmente em estruturas de pequeno porte, em que o tempo de modelagem computacional é baixo. Sendo assim, em sua maioria, projetistas consideram os apoios dos pilares como sendo indeslocáveis.

Essa consideração mais simplificada da base da edificação engastada pode gerar divergências entre o modelo estrutural e a estrutura real. Isso ocorre principalmente quando o tipo de fundação for estaca isolada sobre um bloco, resultando em dados de comprimento de flambagem em desacordo com o comportamento real da estrutura.

Em consonância, a atualização da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR) 6122:2019 colocou a análise de ISE como obrigatória em casos específicos, como por exemplo, qualquer estrutura cuja deformabilidade possa influenciar na distribuição dos esforços.

Neste sentido, o objetivo geral deste trabalho e desta pesquisa foi analisar o comportamento estrutural de três pórticos de concreto armado, projetados como reforços estruturais, onde considerou-se maciços de solo com diferentes perfis de resistência. Foi verificado também a influência do comprimento de flambagem do pilar quando considerado bloco isolado sem travamento.

2. ESTADO DA ARTE

A metodologia ou hipótese Winkler (1867) é um dos métodos mais utilizados para considerar a Interação solo-estrutura (ISE) em razão da sua simplicidade e fácil implementação computacional. Contudo, a representação do solo por meio de molas é contestada por alguns autores, como Poulos (1975), Gusmão (1990), Holanda Jr. (1998) e Reis (2000).

Meyerhof (1953) baseado na teoria de Mindlin (1936), concluiu que os recalques diferenciais dependem não apenas da rigidez do conjunto, mas também da deformabilidade do maciço de fundação. Chamecki (1954) propôs um processo iterativo onde a repetição ocorre até a convergência dos valores dos recalques e das reações de apoio. Verificou-se com o uso do processo, que os recalques diferenciais passavam a ser menos acentuados ao considerar-se a rigidez da estrutura no cálculo.

Fonte et al. (2001) concluíram que para solos com pequena rigidez o elemento de sapata isolada teve um comportamento semelhante a uma articulação e com o aumento da rigidez do solo a ligação começa a funcionar como engaste parcial. Antoniazzi (2011) verificou que devido à redistribuição de cargas, os recalques diferenciais passam a ser menores. Mendonça (2012) averiguou que a redistribuição dos momentos fletores, esforços normais e reações verticais nos pilares foram significativos para os pilares periféricos. Fagundes (2017) estudou e verificou a importância de considerar a ISE somada análise incremental construtiva em edificações de diferentes alturas.

Schepers (2017) pesquisou a otimização do sistema dinâmico da ISE em 3D sendo a discretização da estrutura realizada pelo MEF. Foram encontradas algumas limitações de modelagem numérica computacional visto a complexidade das análises. Seguindo a análise



dinâmica da ISE, Papadopoulos et al (2018) propuseram através de um protótipo, uma metodologia que facilita a interpretação das características da interação dinâmica do solo-estrutura.

Rittter et al. (2020) verificaram a influência da ISE em edifícios de concreto armado de pequeno porte com fundações profundas. Foi utilizado o sistema SISES do TQS, sendo o edifício simulado com 4,6 e 8 pavimentos e três diferentes solos, gerando assim 8 estudos de caso. Em todas as análises a ISE influenciou no índice de estabilidade global Gama Z, sempre aumentando esse valor. De modo geral, o custo global da estrutura apresentou um acréscimo máximo de 0,17% quando considerada a ISE nos modelos.

Araujo Jr et al. (2021) estudaram sobre as previsões de recalque em fundações profundas e seus efeitos na ISE em uma estrutura de concreto armado. Foi utilizado o método da NBR 6122:2019 que apresentou 56,01% de dispersão perante os demais métodos. Os outros métodos utilizados foram de Aoki e Lopes (1975) e Meyerhod (1959). Os autores concluíram a importância de avaliar o impacto das incertezas causadas pela previsão de recalques no índice de confiabilidade e na probabilidade de ruína de fundações profundas. Os modelos que contemplam a ISE podem conduzir a esforços de magnitudes bem diferentes que, por sua vez, refletem na segurança das estruturas e fundações.

Através de um modelo reduzido numericamente e simplificado em 3D, Vicencio e Alexander (2021) analisaram, sob excitação sísmica, a influência da ISE e verificaram a complexidade no levantamento de dados e tempo de processamento em um modelo 3D. Através de uma análise probabilística Forcellini (2021) considerou a ISE somada a ações de sismos em dois edifícios de concreto armado. O autor destacou o aumento da probabilidade de falha de ambos edifícios quando considerado a ISE.

Bahia et al. (2021) verificaram a influência da ISE em um edifício de concreto armado por meio de um processo interativo entre os programas CAD/TQS e GARP. Os autores confirmaram a constatação de Gusmão (1990), que afirmou existir um limite para a ISE exercer influência, pois a partir do quinto andar da edificação não se teve mais grande influência da ISE na análise estrutural.

3. METODOLOGIA

Os três pórticos de concreto armado analisados possuem 4, 5 e 6 metros de vão horizontal, sendo os pórticos 1 e 2 com 4 metros e o pórtico 3 com 5 metros de pé direito estrutural. Os pórticos apresentam as seguintes dimensões conforme a Tabela 1:

Tabela 1 – Dimensões dos pórticos.

PÓRTICOS	VÃO H (m)	VIGA	PILAR
PÓRTICO 1	4	19x25	20x40
PÓRTICO 2	5	19x25	20x40
PÓRTICO 3	6	19x28	25x48



Os softwares TQS® e SAP2000® foram utilizados para modelagem computacional através do MEF. Inicialmente, no processo iterativo foi considerado o modelo com apoios indesejáveis (M_{IND}) e, posteriormente, a consideração da ISE até a obtenção da convergência. Os modelos que consideraram a ISE pelo sistema SISES do TQS®, geraram os valores dos coeficientes de mola automaticamente após a inserção dos valores do *Standard Penetration Test* (SPT) e análises do software.

Visualização gráfica

SONDAGEM 3

Nível do solo: (0m)

ARGILO ARENOSO

ARGILO ARENOSO

ARGILO ARENOSO

Indesejável: (10.43m) (0m)

Seleção da sondagem para Edição / Visualização:

Nº	SONDAGEM
1	SONDAGEM 1
2	SONDAGEM 2
3	SONDAGEM 3

Dados gerais da sondagem atual:

Título: SONDAGEM 3

X do furo: 0 m

Y do furo: 0 m

Profundidade do indesejável: 10.45 m

Profundidade de arrasamento: 0 m

Profundidade do nível d'água: 0 m

Defasagem p/ início da sondagem: 0 m

Profundidade do furo: 10 m

Tipos de ensaio:

☒ SPT ☐ SPT-T ☐ Adão ☐ Pressão de Injeção

Camadas de solo:

Nº	Material	DESCRIÇÃO DO SOLO	INI	FIM
1	Argila	ARGILO ARENOSO	0	6
2	Argila	ARGILO ARENOSO	6	8,5
3	Argila	ARGILO ARENOSO	8,5	10,45

Figura 1. SISES do TQS® na etapa de registro do SPT.

Inicialmente, no cálculo do coeficiente de mola é definido um valor escalar denominado coeficiente de reação vertical (k_v), definido como a pressão necessária para provocar um deslocamento vertical unitário, apresentado na Equação 01.

$$k_v = \frac{p_v}{y} \quad 1$$

Em que:

k_v é o coeficiente de reação vertical (N/m³);

p_v é a pressão vertical aplicada (N/m²);

y é o deslocamento vertical do solo (m).

Após foram definidos os coeficientes de mola com base em propriedades elásticas do solo fornecidas pela literatura e na hipótese de Winkler. No SAP2000®, considerou-se as molas lineares elásticas calculadas com base no modelo de Winkler e discretizadas a cada metro da estaca para representação do sistema ISE tanto na vertical como na horizontal (Figura 2).

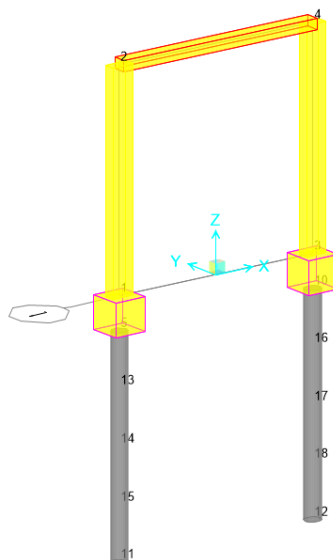


Figura 2. Modelagem por MEF do pórtico 1 no SAP2000®.

As combinações de ações utilizadas para o levantamento de esforços analisados foram as de Estado Limite Último (ELU) considerando as ações de peso próprio, permanentes, acidentais e sem a ação de vento. Os perfis geotécnicos escolhidos para consideração da ISE, apresentam os respectivos limites de sondagem: perfil (S1) 10,45m, perfil (S2) 7,40 e perfil (S3) 5,0.

Por último, foi analisado o aumento do comprimento de flambagem dos pilares considerando as fundações do tipo bloco com estaca isolada, sem travamento. Conforme ABNT NBR 6122:2010 deve-se evitar, na ausência de travamentos, o diâmetro da estaca ser inferior a 30 cm. Dessa forma, as estacas dos pórticos têm diâmetro de 30 cm.

4. RESULTADOS

A consideração da ISE nos modelos não resultou em diferenças significativas quando comparado à análise sem a ISE. É importante observar que na modelagem com o software TQS®, quando considerado um bloco sobre uma estaca, emite um alerta sobre a necessidade de rótulas na fundação, em razão de blocos de fundação não suportarem momentos fletores. Assim, o software sugere valores pré-definidos de coeficientes de mola.

Nas reações de apoio, que antes eram realizadas com o levantamento na base do pilar, fica distribuída ao longo da estaca e nas molas após ISE, ou seja, com o comportamento mais próximo à realidade. Os momentos fletores negativos nas vigas junto ao pilar, apesar de poucas alterações, apresentaram redistribuição de esforços como em grandes edificações. Foram avaliados em ambos os pórticos (Figura 3) uma redução de 7% no pórtico 1 e de 10% nos pórticos 2 e 3, respectivamente, nos momentos fletores negativos nas vigas. Nota-se que a variação não foi entre os diferentes solos, mas sim entre a estrutura dos pórticos, na qual os maiores resultaram em alterações mais significativas.

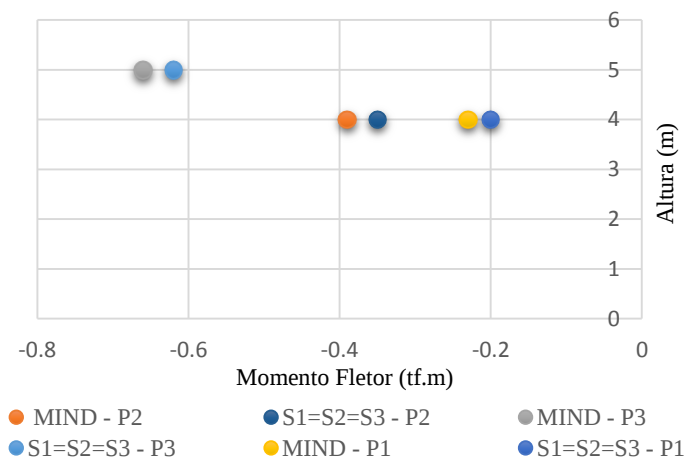


Figura 3. Momento fletor negativo na viga junto ao pilar.

Na Figura 4a o bloco travado é considerado como um apoio indeslocável, o que resulta em um valor de comprimento de flambagem equivocado. Na linha azul pontilhada é possível ver a distância e o ponto de inflexão quando o bloco de fundação está engastado e com travamento.

Na Figura 4b apresenta-se a análise de flambagem feita no SAP2000® em que o solo é considerado como sendo um meio elástico, e o ponto de inflexão se estende até um ponto do solo. O comprimento de flambagem depende da rigidez do solo e automaticamente da profundidade da estaca, fazendo com que esse ponto de inflexão seja maior ou menor conforme as características do solo. No exemplo da Figura 4 é avaliado o pórtico 1 considerando o solo S3, assim, é a menor estrutura e a menor profundidade da estaca analisada neste estudo. Sendo ponderado os fatores citados, mesmo assim é possível notar a diferença do coeficiente de flambagem se comparada a e b na Figura 4.

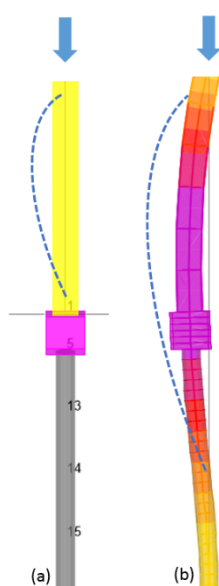


Figura 4. Comprimento de flambagem do pilar: (a) M_{IND} ; (b) ISE



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como resultado da análise dos modelos, considerado a ISE, houve pouca diferença de esforços e um baixo tempo de processamento. Porém, verificou-se como positivo a consideração da ISE em estruturas de pequeno porte, em razão dos diferentes coeficientes de flambagem apresentados quando considerado o bloco isolado com uma estaca sem travamento.

Considerando que as mudanças foram nos esforços, e o dimensionamento passou por pequenas alterações, as dimensões dos pórticos não são afetadas diretamente nos casos analisados. A variação do tipo de solo afetou o dimensionamento da estaca, o que já era esperando.

A análise do comprimento de flambagem deve ser realizada com toda atenção, visto que a ruína por flambagem é repentina, mesmo não apresentando uma variação nas ações aplicadas. Logo, conclui-se a importância do travamento quando dimensionado o bloco com somente uma estaca. Caso não tenha esse travamento, ocorre a necessidade de uma avaliação mais rebuscada, como a realizada neste trabalho. Por fim, com uma melhor compreensão da distribuição de esforços e comportamento da estrutura, a análise e dimensionamento tornam-se mais econômicas e seguras.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Fundações. - NBR 6122, Rio de Janeiro, 2019.
- ARAUJO, Jr. E..L.; FERREIRA, S. R. M.; GUSMÃO, A. D. Estudo comparativo de previsões de recalque em fundações profundas e seus efeitos na interação solo-estrutura. *Reserach, Society and Development*, v.10, n.9, 2021.
- BAHIA, G. de A. D.; CUNHA, R.P. da Mota, N. M. B. Desempenho de edifícios altos com emprego da interação solo-estrutura. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v.12, 2021.
- CHAMECKI, S. Consideração com rigidez da estrutura no cálculo dos recalques da fundação. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS*, 1954, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, RS. v.1, 1954.
- FORCELLINI, D. Analytical fragility curves of shallow-founded structures subjected to Soil-Structure Interaction (SSI) effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021.
- FONTE, F. L. F.; FONTE, A. O. C.; PONTES, I. D. S. Análise de Interação Solo-Estrutura em Edifícios. *Simpósio Brasileiro de Informática em Geotecnia*, 2001.
- GUSMÃO, A. D. Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações, Rio de Janeiro, 1990. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 165 p.



- HOLANDA JR., O. G. Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- MEYERHOF, G.G. Some recent foundation research and its application to design. STRUCTURAL ENGINEERING. Londres, 1953.
- MINDLIN, R. D. Force at a point in the interior of a semi – infinite solid. Physics, 7, p.195-202, 1936.
- MENDONÇA, F.R.S. Avaliação do Efeito da Interação Solo-Estrutura Sobre o Comportamento Estrutural de Edificações em Aço e Mistas (Aço-Concreto). Dissertação (Mestrado em Estruturas), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- PAPADOPOULOS, M.; VAN BEEUMEN, R.; FRANÇOIS, S.; DEGRANDE, G.; LOMBART, G. Computing the modal characteristics of structures considering soil-structure interaction effects. In: X International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2017, Berlim, 2017, Anais, Germany, 2017, p. 391-396.
- POULOS, H. G. Settlements analysis of structural foundation systems. Proceedings, IV South – East Asian Conference on Soil Engineering, Kuala Lumpur, Malásia, v. IV, pp. 52-62, 1975
- RITTER, M.G. ; MENEGOTTO, M.L. ;COSTELLA, M.F ; PAVAN, R.C. ; PILZ, S.E. Análises de interação solo-estrutura em edifícios com fundação profunda. Revista IBRACON de Estrutura e Materiais. Vol. 13, N.2 Abril 2020. P.248-273.
- REIS, J.H.C. Interação solo-estrutura de grupo de edifícios com fundações superficiais em argila mole. Dissertação de Mestrado – EESC da USP, São Carlos, SP, 155p., 2000.
- SCHEPERS, W. Fast 3D FEM-BEM coupling for dynamic soil-structure interaction. In: X International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2017, Berlim, 2017, Anais, Germany, 2017, p. 391-396.
- TQS INFORMÁTICA LTDA. Manual teórico: sistema de interação solo-estrutura. São Paulo: TQS Informática Ltda, 2022.
- VIVENCIO, F. ALEXANDER, N. A. Method to evaluate the dynamic structure-soil-structure interaction of 3-D buildings arrangement due to seismic excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021.
- WINKLER, E. E. O. Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit. Domicius. Prag, 1867.