

# Análise da interação solo-estrutura de uma edificação unifamiliar assentada em diferentes perfis de solos

ANALYSIS OF THE SOIL-STRUCTURE INTERACTION OF A SINGLE-FAMILY BUILDING LOCATED IN DIFFERENT SOIL PROFILES

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE UN EDIFICIO UNIFAMILIAR EN BASE A DIFERENTES PERFILES DE SUELO

**Iury Costa Barros**

Instituto Federal de Goiás (IFG)  
iucosbarros@gmail.com

**Arlam Carneiro Silva Junior**

Instituto Federal de Goiás (IFG)  
arlam.junior@ifg.edu.br

## Resumo

A Interação Solo-Estrutura (ISE) trata da relação de interdependência entre a superestrutura, a estrutura de fundação e o maciço de solo. No ofício da Engenharia Civil, a interação entre os projetistas de estruturas e de fundações não ocorre de forma plena, principalmente para obras de pequeno e médio porte, sendo predominante a consideração de apoios rígidos por parte do projetista de estruturas e a não informação da real rigidez da edificação ao projetista de fundações. No presente trabalho, considera-se a ISE no desenvolvimento de um projeto residencial unifamiliar, em alvenaria de blocos cerâmicos e estrutura em concreto armado sobre fundação rasa em sapata isolada, avaliando três diferentes perfis de solos. Observa-se a redistribuição dos esforços nos pilares após a ISE, dos centrais para os periféricos, porém de forma sutil devido à baixa carga da edificação e da sua tipologia sem simetria perfeita. Constata-se, assim, que, para os solos com boa capacidade de carga (A e B), há economia no consumo de concreto e fôrma, ao passo que, para o solo C, com baixa capacidade de carga, há aumento na dimensão de grande parte das sapatas de fundação. Neste caso, verifica-se um maior consumo de concreto e fôrma, não apresentando economia, mas favorecendo a segurança, que é o aspecto de maior importância.

**Palavras-chave:** *Interação Solo-Estrutura (ISE); sapatas isoladas; recalque.*

## Abstract

The Soil-Structure Interaction (SSI) is the interdependent relationship between the superstructure, the foundation and the soil mass. In Civil Engineering, the interaction between structural and foundation designers does not occur fully, especially for small and medium-sized works, being predominant the consideration of rigid support by the structural designer and the non-information of the real stiffness of the building to the foundation designer. In this context, the present study considered SSI in the development of a single-family residential project, in ceramic block masonry and reinforced concrete structure on shallow foundation in isolated footings, considering three different soil profiles. It was observed a redistribution of efforts in the pillars after the SSI, from the central to the peripheral ones, but in a subtle way due to the low load of the building and its typology without perfect symmetry. It can be seen, therefore, that, for the soils with good load capacity (A and B) there is savings in the consumption of concrete and formwork, while for soil C, with low load capacity, there is an increase in the size

of most of the foundation footings, resulting in a higher consumption of concrete and formwork, not resulting in savings, but in favor of safety, which is the aspect of greatest importance.

**Keywords:** *Soil-Structure Interaction (SSI); isolated footings; settlement.*

### Resumen

La Interacción Suelo-Estructura (ISE) se ocupa de la relación de interdependencia entre la superestructura, la estructura de cementación y la masa del suelo. En Ingeniería Civil, la interacción entre proyectistas de estructuras y de cementaciones no se produce de forma plena, especialmente en obras de pequeño y mediano tamaño, predominando la consideración de apoyos rígidos por parte del proyectista de estructuras y la no información de la rigidez real del edificio al proyectista de cementaciones. En este contexto, este trabajo consideró el ISE en el desarrollo de un proyecto residencial unifamiliar, en mampostería de bloques cerámicos y estructura de concreto armado sobre cementación somera en zapata aislada, considerando tres perfiles de suelo diferentes. Se observó la redistribución de esfuerzos en los pilares después del ISE, desde los centrales hacia los periféricos, pero de forma sutil debido a la baja carga del edificio y su tipología sin perfecta simetría. Para suelos con buena capacidad de carga (A y B), hubo ahorro en el consumo de concreto y encofrado, mientras que para el suelo C, con baja capacidad de carga, hubo un aumento en el tamaño de la mayoría de las zapatas de cimentación, lo que llevó a un mayor consumo de concreto y encofrado, no mostrando ahorro, pero sí favoreciendo la seguridad, que es el aspecto más importante.

**Palabras clave:** *Interacción Suelo-Estructura (ISE); zapatas aisladas; asentamiento.*

## Introdução

A estrutura de uma edificação é composta por subsistemas construtivos integrados, sendo eles a superestrutura e a infraestrutura. Comumente, a superestrutura de uma edificação é constituída por pilares, vigas e lajes, na qual os carregamentos provenientes das lajes são descarregados nas vigas, que por suas vezes descarregam as cargas nos pilares, enquanto a infraestrutura é responsável por receber o somatório desses carregamentos que chegam às bases dos pilares e dissipar suas respectivas cargas no maciço de solo (Almeida; Mendonça; Brandão, 2014). O solo, por sua vez, apresenta como característica uma certa deformabilidade após ser submetido aos carregamentos da superestrutura, gerando, assim, deslocamentos no Elemento Estrutural de Fundação (EEF), que, por sua vez, gera deslocamentos na superestrutura também, caracterizando assim uma relação de interdependência entre a superestrutura, a fundação e o maciço de solos, sendo essa a definição de Interação Solo-Estrutura (ISE) (Almeida; Mendonça; Brandão, 2014). Vale salientar que a ISE já se inicia durante a fase de construção, se equilibrando após um determinado tempo, sendo essa rigidez relativa da estrutura, fundação e solo que determina o comportamento do sistema da ISE (Aydin *et al.*, 2020).

Em se tratando dos parâmetros considerados para a realização de projetos de estruturas e fundações, ainda é comum a não consideração da ISE, sendo predominante a consideração de apoios rígidos (engastados) para o dimensionamento da estrutura e a desconsideração da real rigidez da edificação para o dimensionamento das fundações (Bahia, 2015). Dessa forma, as considerações da ISE tornam o cálculo e dimensionamento dos elementos mais condizentes com a realidade, evitando assim que surjam esforços adicionais não previstos previamente em projeto.

No ofício da Engenharia Civil, majoritariamente os projetistas estruturais e de fundações interagem entre si apenas uma vez, durante o envio das cargas nos pilares por parte do projetista estrutural ao projetista de fundações, não levando a uma boa representação da realidade (Bahia, 2015). Devido a interdisciplinaridade, para a consideração da ISE é fundamental um bom conhecimento da dinâmica das estruturas e da dinâmica dos solos, dificilmente havendo um profissional com conhecimento em ambos, sendo esse o principal motivo da necessidade de uma maior integração entre os projetistas (Ritter *et al.*, 2020; Roberto; Sola, 2013).

Diante disso, métodos de cálculos baseados na análise da ISE aproximam essas duas áreas da Engenharia Civil, sendo os esforços avaliados em conjunto, de forma que a estrutura não seja considerada atuando de forma independente do solo e que a fundação não seja considerada atuando independente da estrutura, obtendo assim um modelo mais próximo da realidade e conseqüentemente mais seguro (Marques *et al.*, 2021; Aydin *et al.*, 2020).

Em se tratando da aplicação da ISE em residências unifamiliares, tal técnica apresenta grande importância devido ao elevado déficit habitacional no Brasil, levando em consideração a quantidade de domicílios precários, em coabitação e com elevados custos de aluguel, como por exemplo em Goiânia, cidade foco do presente trabalho. De acordo com Lis (2021), em 2019 o Brasil registrou um déficit habitacional de 5.876 milhões de moradias, apontados pela Fundação João Pinheiro. Estados da região Norte e Nordeste possuem os maiores déficits com relação ao número total de domicílios, sendo relacionado principalmente as moradias precárias. O alto custo do aluguel urbano representa mais da metade do déficit habitacional total, sendo Goiânia pertencente a um grupo de 26 cidades com os maiores preços médios de locação.

O estudo realizado por Silva, Alves e Andrade (2023) apresenta o comparativo de custos para construção de uma edificação unifamiliar comparando diferentes métodos construtivos, demonstrando a importância da investigação de métodos que visem a redução de desperdícios e morosidade em obras residenciais, mantendo sua qualidade. Já Araújo *et al.* (2020), em seu estudo, realizaram a análise de patologias em uma edificação unifamiliar devido a ocorrência de recalques diferenciais, constatando que dentre os fatores que influenciaram na problemática, um fator relevante foi a falta de investigação geotécnica e da análise com a ISE.

Ao longo de sua história, Goiânia apresenta um grande crescimento populacional, tornando-se um espaço complexo com problemas de habitação, fazendo assim com que surgissem, na década de 1960, os processos de verticalização e horizontalização na cidade. O processo de verticalização ocorreu principalmente nos setores destinados às classes mais altas, ao passo que, nos setores destinados às camadas populares, ocorreu o processo de horizontalização (Oliveira *et al.*, 2004). Diante disso, nota-se a importância das residências unifamiliares para a região de Goiânia, fazendo-se necessário estudos a respeito de técnicas que visem a obtenção de resultados mais assertivos durante a realização dos projetos de tais residências, evitando ao máximo patologias decorrentes de recalques diferenciais, conforme exposto por Araújo *et al.* (2020).

O presente trabalho buscou analisar a utilização da ISE no desenvolvimento de um projeto estrutural para uma edificação unifamiliar considerando diferentes perfis de solos, de forma a encontrar a influência dos mesmos sobre o comportamento global da estrutura e, dessa forma, contribuir para que técnicas mais realistas se façam cada vez mais presentes em escritórios de projetos de Engenharia. Para tal, foi utilizado o *software* comercial TQS para análise da ISE, obtendo como resultados a redistribuição de esforços nos pilares, dos mais centrais para os mais periféricos.

## Revisão bibliográfica

Para uma melhor compreensão acerca do fenômeno da ISE, faz-se necessário o conhecimento do seu comportamento, bem como seus fatores envolvidos. Portanto, apresenta-se a partir daqui uma revisão bibliográfica focada nas características dos solos e estruturas típicas da região metropolitana de Goiânia, fundações e interação solo-estrutura.

Com relação ao Estado de Goiás, principalmente na Capital Goiânia, de acordo com Gonçalves e Ferreira (2013), a partir dos anos 2000 houve um aquecimento ascendente do mercado imobiliário e conseqüentemente a verticalização da cidade, passando assim a atrair construtoras nacionais e multinacionais que já atuavam com fundações em outras partes do Brasil. Além disso, ao longo de sua história, Goiânia sempre mostrou um grande crescimento populacional, apresentando uma taxa geométrica de crescimento de aproximadamente 1,77% para o período de 2000 a 2010 (Borges; Barreira; Costa, 2017). Para complementar, de acordo com a Fundação João Pinheiro (2021), o déficit habitacional relativo da Região Metropolitana de Goiânia em 2019 foi de 7,4%, sendo um dos fatores que motivou o governo a criar programas que facilitassem a conquista da casa própria para famílias de baixa renda, como o Minha Casa Minha Vida, demonstrando assim a importância das residências unifamiliares (D'Agostini, 2018). Sendo este o foco de análise do presente trabalho, ou seja, a realização de um estudo acerca dos efeitos da consideração da ISE em uma residência unifamiliar assentada em diferentes maciços de solos.

### Interação solo-estrutura

Estruturas de Fundações são elementos estruturais cuja finalidade é receber as cargas totais de uma edificação e transmiti-la para o maciço de solo, de forma que não ocorra ruptura do terreno de fundação e nem deformações excessivas no solo, acompanhada de recalques que prejudiquem a obra. Quanto à terminologia, as fundações são comumente divididas em dois grandes grupos: fundações rasas (superficiais ou diretas) e fundações profundas. A NBR 6122 define que as fundações rasas são aquelas cujas bases estejam assentadas em profundidade inferior a duas vezes sua menor dimensão e as fundações profundas são aquelas cujas pontas (ou bases) estejam apoiadas em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão e no mínimo 3 m de profundidade (ABNT, 2022).

Quanto ao recalque de solos, como mencionado anteriormente, a ISE pode apresentar considerável influência nos movimentos das estruturas de fundações das edificações. Apesar de já haver uma grande quantidade de estudos acerca do assunto, os recalques ainda apresentam desafios às teorias devido à heterogeneidade dos solos. Sendo assim, a obtenção de valores mais precisos dos recalques pode ser aprimorada através de melhores técnicas de investigação do solo, como por exemplo através de redes geodésicas de monitoramento de estruturas, capazes de fornecer informações com precisões cada vez mais assertivas, além também da utilização de modelos mais representativos e da análise através da ISE (Colares, 2006; Santos; Seixas, 2021). Conforme a sua classificação, os recalques são separados em absolutos e diferenciais, sendo o recalque absoluto definido pelo deslocamento vertical de um EEF, já o recalque diferencial trata-se da diferença entre os recalques absolutos de dois quaisquer elementos, sendo ambos caracterizados como movimentos verticais no sentido descendente, diferentemente do fenômeno de deslizamento,

que conforme descrito por Santos e Seixas (2021), se caracterizam como um conjunto de movimentos gravitacionais que possuem plano de ruptura curvo ou plano. Há também o chamado recalque diferencial específico (ou distorção angular), que se trata da relação entre o recalque diferencial e a distância entre os centros dos dois pilares em estudo.

Uma das primeiras pesquisas desenvolvidas sobre o tema no Brasil foi proposta por Chamecki (1954), na qual foi realizada a análise da ISE através de um processo iterativo, no qual, inicialmente, considerou-se a estrutura com apoios indeslocáveis e coeficientes de transferências de cargas (referentes às reações de apoio provenientes de recalques unitários de um apoio qualquer), sendo realizado até que houvesse convergência entre os valores de recalques e reações de apoio. Desta forma, a pesquisa de Chamecki (1954) estabeleceu uma ligação entre a rigidez da estrutura e os recalques da fundação, sendo esse um fator importante na eficiência do projeto.

Em trabalhos já consolidados da área, destaca-se a ocorrência de redistribuição de esforços quando se considera a deformabilidade do solo, ocorridas em estruturas de pórticos quando sujeitas a recalques diferenciais (Silva, 2010). Antoniazzi, Alva e Soares (2010) observaram a ocorrência dessa redistribuição de esforços, em que pilares centrais foram aliviados; enquanto, os pilares periféricos passaram a ser mais solicitados axialmente. Portanto, observa-se que a não consideração da ISE pode levar a um comportamento diferente do observado na realidade.

De acordo com Colares (2006), semelhante ao efeito de redistribuição de esforços, essa alteração de comportamento ocorre também com os valores dos recalques, principalmente no que se refere aos diferenciais, que passam a se distanciar daqueles obtidos por análise estrutural que não contemple a ISE. Isso é exemplificado na Figura 1, em que, à esquerda é possível observar o comportamento da deformada de recalques e das reações de apoio com a consideração da ISE. Verifica-se que à direita é possível observar seus comportamentos sem a consideração da ISE.

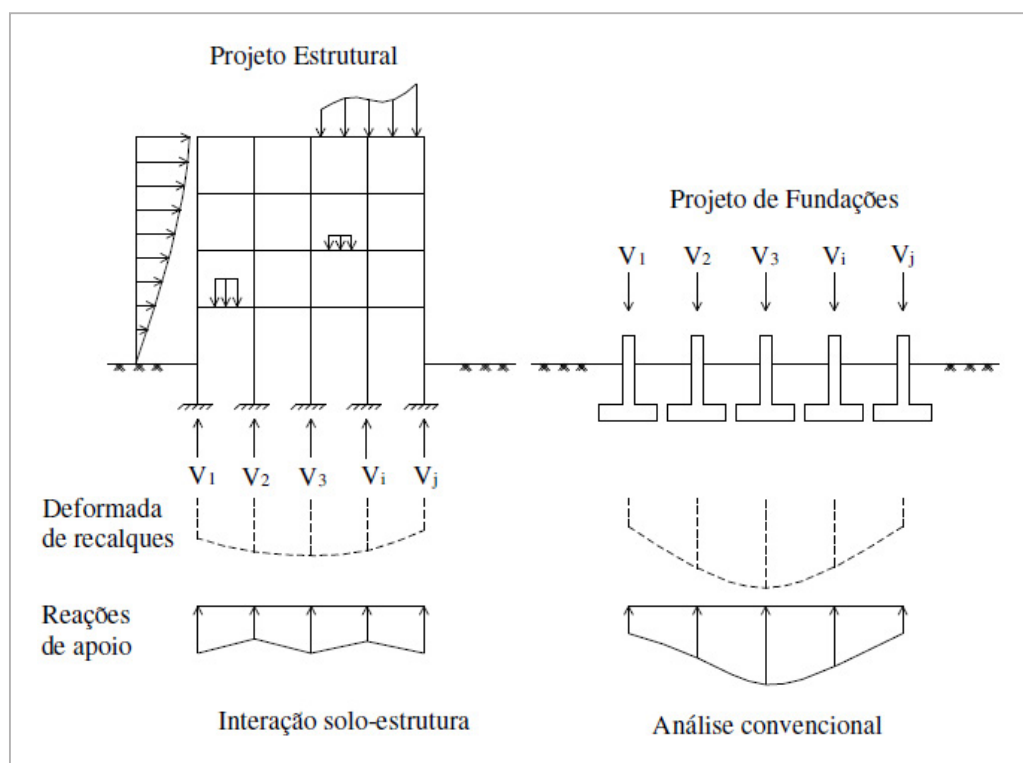


Figura 12 – Modelo de elaboração de projetos estruturais e de fundações

Fonte: Colares (2006).



Já com relação a consideração da ISE em situações com ocorrência de cargas sísmicas, Chen *et al.* (2023) realizaram estudos físicos e numéricos de uma estação de metrô em estrutura pré-fabricada com dois andares e três vãos, de forma a avaliar seu desempenho sísmico. Como resultados, observaram que a camada superior da estação de metrô sofreu mais dano do que a camada inferior, e que a coluna da camada superior foi a parte mais frágil na resistência sísmica de toda a estrutura da estação.

Cortez *et al.* (2022) apresentam o estudo do comportamento de um edifício sujeito a carga sísmica e de tsunami em sequência, considerando os efeitos da ISE através de análise dinâmica. Como resultados, observaram que o comportamento da estrutura considerando a ISE se apresenta mais condizente com a realidade, observando comportamentos como a rotação da fundação e permitindo a inclusão de forças de flutuação induzidas pelo tsunami, podendo ser críticas para a estabilidade global do edifício.

#### FATORES QUE INFLUENCIAM O MECANISMO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Com relação à superestrutura e à infraestrutura, diversos fatores afetam o mecanismo da ISE, com maior ou menor intensidade, sendo alguns dos principais: o número de andares, o processo construtivo e a disposição dos elementos estruturais (forma da planta baixa da edificação), as características do maciço de solo (configuração e a profundidade da superfície indeformável), dentre outros (Colares, 2006).

Reis (2000) realizou a verificação dos efeitos gerados por edificações vizinhas em fundações superficiais apoiadas em maciço de solo de argila mole, através de um estudo paramétrico variando a distância entre as edificações. Com isso, observou-se que a presença de edificações vizinhas aumentava os valores de recalques e, conforme aumentava-se a distância entre elas, observou-se também a diminuição dos valores de recalques. Ribeiro (2005) analisou a situação de um bloco isolado assentado sobre um meio elástico, linear e semi-infinito e, posteriormente, a situação de dois blocos (idênticos ao primeiro) próximos entre si e assentados sobre o mesmo meio contínuo. Como conclusão, observou-se que o segundo caso levou a deslocamentos aproximadamente 7% maiores que os do primeiro caso. Destaca-se que estes trabalhos não são pioneiros na descoberta do efeito de grupo.

Meyerhof (1953) apresentou os efeitos da rigidez relativa estrutura-solo (fator que determina o desempenho da construção em relação aos recalques total e diferencial) e os efeitos causados às fundações devido aos recalques (absolutos e diferenciais) e momentos fletores. Apresentou também fórmulas que possibilitam a consideração de uma edificação mais simples do que a real e com rigidez equivalente, sendo considerado um dos trabalhos pioneiros na consideração da ISE. Neste mesmo sentido, Antoniazzi (2011) define que a rigidez relativa se trata da relação entre a rigidez do solo e a rigidez da superestrutura, tendo sido melhor definida por Meyerhof (1953), conforme a Equação 1 a seguir.

$$K_{SS} = \frac{K_e}{K_S} = \frac{n \cdot \Sigma \frac{E_{sup} \cdot I}{l^4}}{E_S} \quad (1)$$

onde:

$K_{SS}$  - Rigidez relativa estrutura-solo;

$K_e$  - Rigidez da superestrutura;

$K_S$  - Rigidez do solo;

$n$  - Número de pavimentos;

- $l$  - Comprimento dos vãos entre pilares;  
 $I$  - Inércia da seção transversal de cada viga;  
 $E_{sup}$  - Módulo de elasticidade da superestrutura;  
 $E_S$  - Módulo de elasticidade do solo.

De forma a consolidar o trabalho de Meyerhof (1953), Lopes e Gusmão (1991) observaram que conforme se aumenta a rigidez relativa estrutura-solo ( $\lambda$ ) há redução dos valores de recalques, principalmente com relação ao recalque diferencial, como mostra a Figura 2.

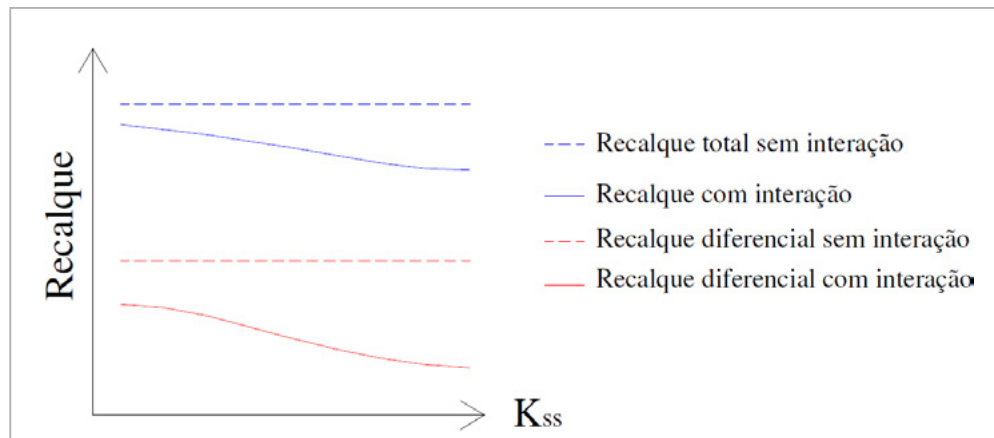


Figura 13 – Recalque x rigidez relativa estrutura-solo

Fonte: Lopes e Gusmão (1991).

Quanto ao número de pavimentos, seu aumento conduz a estrutura global a uma maior rigidez relativa. Entretanto, essa relação não apresenta linearidade, pois a contribuição por parte dos primeiros pavimentos se mostra consideravelmente maior que a dos últimos (Colares, 2006).

Lopes e Gusmão (1991) realizaram também em seu trabalho a verificação da influência do número de pavimentos da edificação, através da fixação do valor de  $\lambda$  e da variação do número de pavimentos do pórtico. Os autores observaram que os valores dos recalques diferenciais foram reduzidos. Realizando o aumento gradativo do número de pavimentos constataram que a influência exercida pelos primeiros andares era maior.

É usual a consideração de que os carregamentos só atuarão na estrutura após a finalização de sua construção (Antoniuzzi, 2011; Bahia, 2015). Todavia, conforme mencionado anteriormente, a rigidez relativa da estrutura aumenta de forma considerável conforme o número de pavimentos, e desta forma, a sequência construtiva da edificação é também um fator importante no mecanismo da ISE (Antoniuzzi, 2011). Conclui-se, portanto, que a consideração da sequência construtiva consiste na aplicação gradual das cargas na estrutura, ou seja, aplicando-se os carregamentos conforme cada pavimento é construído. Desta forma, os esforços providos da estrutura vão sendo somados a cada etapa (Antoniuzzi, 2011).

Gusmão e Gusmão Filho (1994) realizaram o monitoramento do início ao fim de obras na cidade de Recife - PE, e observaram o aumento dos recalques conforme o acréscimo das forças atuantes nos pilares. Em contrapartida, conforme o progresso da construção, houve também aumento da rigidez relativa da estrutura, tendendo assim a menores incrementos dos recalques (uniformização) e redistribuição das cargas.

Desta maneira, Danziger, Danziger e Crispel (2000) destacaram em seu trabalho a importância da realização do monitoramento de recalques desde o início da construção, com o objetivo de garantir o controle e desempenho das fundações;

visto que, nos procedimentos nacionais de engenharia de fundações, é comum a medição dos recalques apenas quando surgem problemas visuais ou de funcionalidade, não sendo uma prática rotineira da engenharia. Como exemplo disto, Santos e Seixas (2021) realizaram em seu estudo o monitoramento geodésico através de uma rede planialtimétrica de caráter local, evidenciando que métodos modernos para previsão de recalques como este vem ganhando bastante destaque nos últimos anos devido sua capacidade de fornecer informações mais precisas até mesmo em tempo real.

## Metodologia

De forma a analisar o modelo estrutural de uma residência unifamiliar, visando a obtenção das informações de redistribuição de esforços nos pilares através da comparação do modelo com e sem a consideração da ISE, são apresentados, primeiramente, as etapas do cálculo da ISE. A Figura 3 apresenta um fluxograma descrevendo todas as etapas do procedimento de cálculo da ISE.



Figura 14 – Fluxograma do procedimento de cálculo e análise considerando a ISE

Fonte: Elaboração própria.

Conforme a Figura 3, na primeira etapa foi realizada a definição e modelagem tridimensional da estrutura completa (superestrutura e fundação), considerando inicialmente os apoios como engastados de forma a obter os esforços internos da superestrutura. A segunda etapa consistiu no dimensionamento dos EEF e obtenção dos dados de recalques nos mesmos. Com os devidos dados obtidos das cargas da superestrutura e dos recalques nas fundações, a terceira etapa consistiu na realização do cálculo dos coeficientes de molas considerando as dimensões das fundações e os parâmetros dos perfis de solos. Na quarta etapa foi realizada uma nova análise dos esforços na superestrutura; porém, utilizando os coeficientes de molas obtidos na etapa anterior para a consideração de apoios deslocáveis. Por fim, na quinta etapa foi realizado um novo cálculo dos recalques nas fundações, com os novos valores de cargas da superestrutura, tratando-se assim de um procedimento iterativo que terminou através da obtenção da convergência para os resultados de carga e de recalque.

Neste trabalho foi feito uso do *software* comercial TQS, que vem sendo desenvolvido desde 1986 pela empresa brasileira TQS Informática LTDA e destinado à elaboração de projetos estruturais de edificações em concreto armado, protendido, pré-moldado e em alvenaria estrutural.

Para a análise da ISE, o TQS conta com o Sistema de Interação Solo-Estrutura (SISEs) que permite que as fundações e a sua interação com o solo sejam analisadas conjuntamente. Para a análise e geração de resultados, os dados geotécnicos são baseados em sondagens do solo, que devem ser inseridas pelo engenheiro usuário, havendo diversos métodos de cálculos disponibilizados no sistema. No SISEs, o modelo de pórtico espacial passa a não ser considerado com apoios engastados na base e começa a incorporar a fundação que se apoia em molas de translação (TQS Informática, 2021).



Os principais diferenciais presentes na análise estrutural com o SISEs são: menores momentos nas bases dos pilares; estimativa de recalque na base da edificação; estimativa mais realista de deslocamentos da estrutura; análise mais completa da estrutura e consideração da rigidez do solo em que se apoia a edificação.

### Descrição da estrutura analisada

O objeto de estudo do modelo de ISE no trabalho em questão corresponde a uma residência unifamiliar de dois pavimentos, como ilustrado pela Figura 4 a seguir.

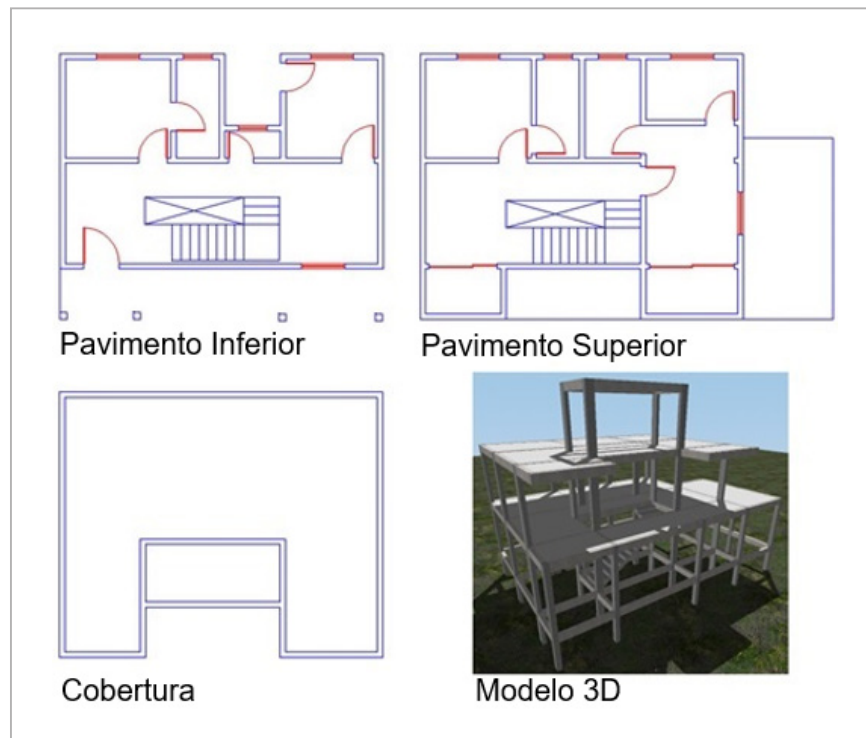


Figura 15 – Plantas baixas e modelo 3D da residência unifamiliar em estudo  
Fonte: Elaboração própria.

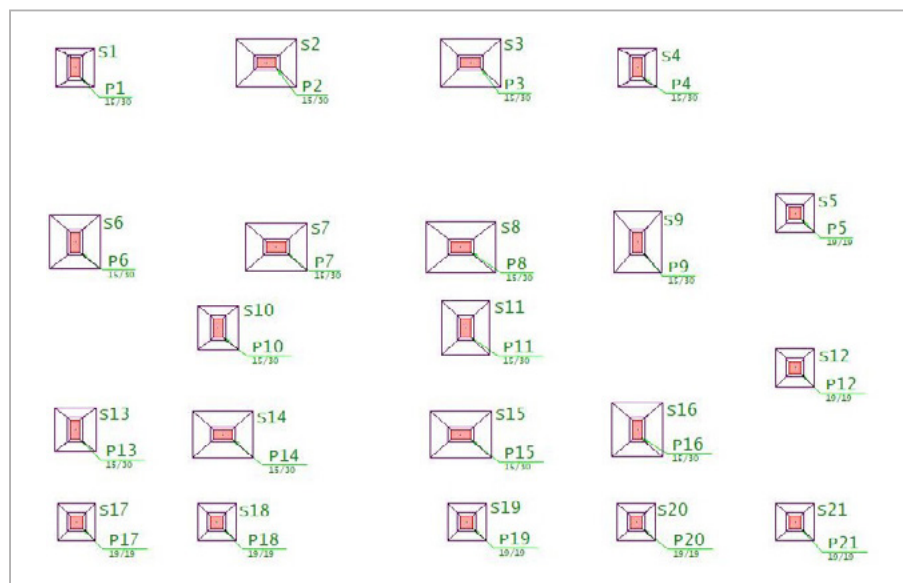


Figura 16 – Planta de fôrma da fundação  
Fonte: Elaboração própria.

A estrutura é em concreto armado e sua fundação é do tipo sapata isolada, conforme a Figura 5, sendo utilizado fck de 25 MPa para todos os elementos estruturais. A escolha desse tipo de fundação se deu pela estrutura e tipo de solos definidos, sendo uma fundação comumente utilizada para residências, devido a apresentarem menores áreas e menores cargas impostas, além também de serem mais econômicas. Além disso, por se tratar de uma edificação com estrutura convencional (pilares, vigas e lajes) similar a edificações de múltiplos pavimentos, adotou-se a fundação em sapatas isoladas para proceder com a análise da ISE, por se tratar de uma fundação que transmite carga ao solo por compressão da base, simplificando a análise das distribuições de tensões em comparação com fundações profundas, em que parte da carga é dissipada por atrito lateral.

### Descrição dos maciços de solos

O primeiro (Solo A) é caracterizado como majoritariamente argiloso com boa capacidade de carga. O segundo (Solo B) é caracterizado como majoritariamente arenoso com boa capacidade de carga. E, por fim, o terceiro (Solo C) é caracterizado como majoritariamente argiloso com baixa capacidade. Todos os solos considerados são característicos da Região Metropolitana de Goiânia, sendo provenientes de ensaios de sondagem do solo. Todas as sapatas foram dimensionadas com altura de 20 cm e cota de assentamento a 1,5 m de profundidade, tendo sido devidamente verificada de forma a garantir a integridade estrutural do elemento, não apresentando problemas. A Figura 6 apresenta, em sequência, os laudos de sondagem SPT (*Standard Penetration Test*) dos solos.

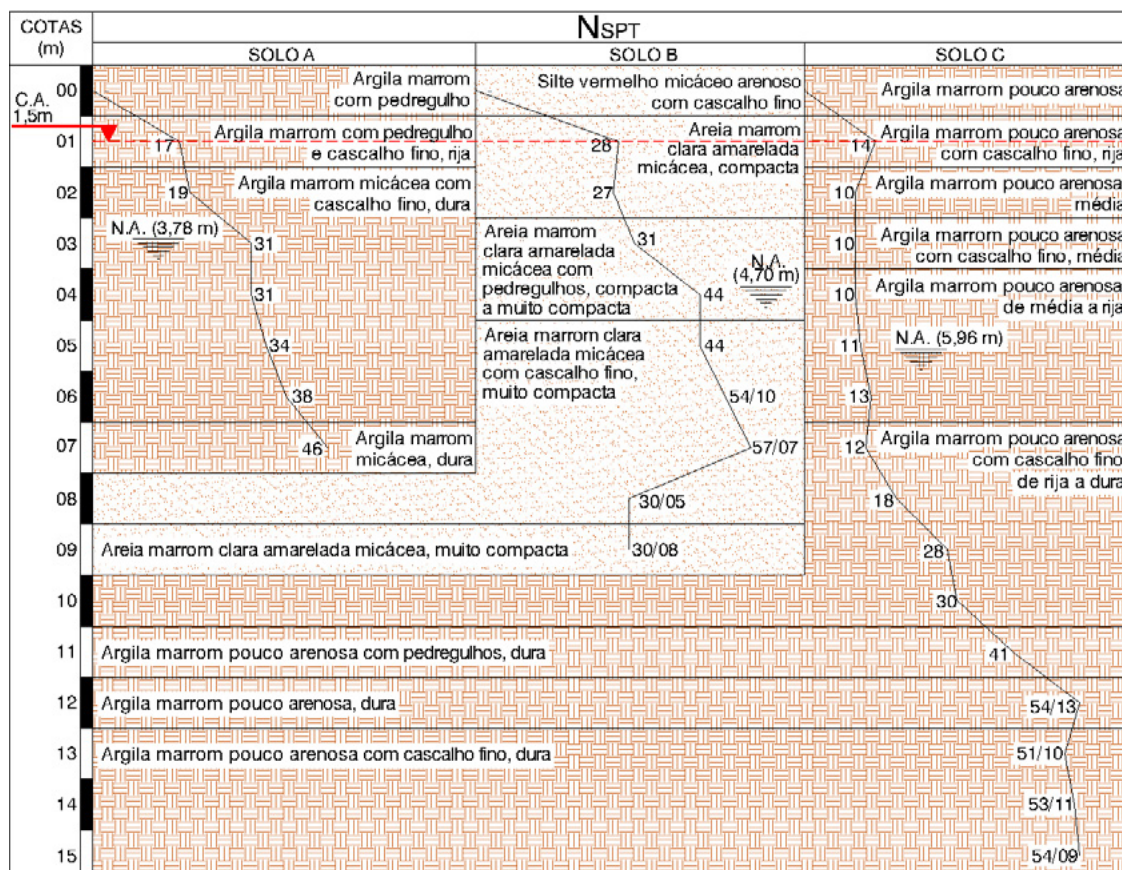


Figura 17 – Perfis de sondagem SPT dos três maciços de solos  
 Fonte: Elaboração própria.

A tensão admissível dos solos foi calculada a partir de correlações empíricas com os valores da sondagem SPT, conforme formulação específica para o caso de sapatas, considerando o bulbo de tensões (NSPT médio). Para os solos A e C foi utilizada a correlação empírica apresentada na Equação 2. Já para o solo B, se tratando de um solo arenoso, foi utilizada a correlação desenvolvida por Teixeira (1996), apresentada na Equação 3.

$$\sigma_s \cong \frac{N_{SPT}(\text{Médio})}{50} \quad (MPa) \quad (2)$$

$$\sigma_a = 0,05 + (1 + 0,4B) \frac{N_{SPT}}{100} \quad (MPa) \quad (3)$$

onde:

- $\sigma_s$  - Tensão admissível do solo;
- $N_{SPT}$  - Índice de resistência de penetração do solo;
- $\sigma_a$  - Tensão admissível do solo para areias desenvolvido por Teixeira (1996);
- B - Dimensão lateral (em metros) de uma sapata quadrada.

O procedimento de cálculo consistiu, primeiro em um cálculo da tensão admissível, considerando apenas o NSPT da cota de assentamento. Depois calculou-se a área necessária da sapata através da razão entre a carga média dos pilares (93,03 kN) e a tensão admissível calculada. Com a área da sapata, o valor B foi obtido considerando uma sapata quadrada, sendo o bulbo de tensões equivalente a duas vezes essa dimensão. Por fim, foi recalculada a tensão admissível do solo, considerando o NSPT médio para a extensão calculada do bulbo de tensões. Desta forma, os valores de tensão admissível obtidos para os maciços de solo A, B e C foram, respectivamente, 0,35 MPa, 0,39 MPa e 0,24 MPa na cota de assentamento.

## Resultados

Observou-se através da análise das reações de apoio que houve redistribuição de esforços verticais entre os pilares quando considerada a ISE. Por exemplo, para o solo A houve alívio de 15,65% do pilar P16, este um pilar central, e acréscimo de 23,54% no P20, este um pilar periférico, conforme mostra a Tabela 1. Foi possível observar ainda que as diferenças foram mais acentuadas para o solo A. Tal constatação pode ser justificada pelos maiores valores de NSPT neste solo, sendo uma argila com boa capacidade de carga. Os valores de cargas, apresentados a seguir na Tabela 1 foram obtidos somente após o processamento final da estrutura, posteriormente a retirada de todos os erros graves contidos no modelo estrutural.

Pilar	Posição	Fz (tf)						
		Sem ISE	Com ISE			Diferença (%)		
		Solo A/B/C	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C
P1	Periférico	6,29	6,79	6,72	6,54	7,95	6,84	3,97
P2	Periférico	13,17	13,28	13,65	13,19	0,84	3,64	0,15
P3	Periférico	11,76	12,19	11,70	11,85	3,66	-0,51	0,77
P4	Periférico	6,01	6,23	6,32	6,39	3,66	5,16	6,32
P5	Periférico	3,55	3,94	3,86	3,71	10,99	8,73	4,51
P6	Periférico	10,79	10,47	10,48	10,61	-2,97	-2,87	-1,67
P7	Central	16,98	16,65	16,58	16,94	-1,94	-2,36	-0,24
P8	Central	18,17	17,78	16,67	17,19	-2,15	-8,26	-5,39

Pilar	Posição	Fz (tf)						
		Sem ISE	Com ISE			Diferença (%)		
		Solo A/B/C	Solo A	Solo B	Solo C	Solo A	Solo B	Solo C
P9	Periférico	13,48	13,58	13,82	13,22	0,74	2,52	-1,93
P10	Central	8,42	8,83	8,73	9,07	4,87	3,68	7,72
P11	Central	9,96	10,26	11,28	11,16	3,01	13,25	12,05
P12	Periférico	5,14	4,72	4,80	5,01	-8,17	-6,61	-2,53
P13	Periférico	8,58	6,98	7,15	7,89	-18,65	-16,67	-8,04
P14	Central	16,23	14,62	15,32	14,41	-9,92	-5,61	-11,21
P15	Central	16,44	15,25	15,75	15,53	-7,24	-4,20	-5,54
P16	Central	11,31	9,54	9,77	10,54	-15,65	-13,62	-6,81
P17	Periférico	2,58	4,53	4,16	3,47	75,58	61,24	34,50
P18	Periférico	6,18	6,53	6,30	6,51	5,66	1,94	5,34
P19	Periférico	6,24	6,88	6,55	6,53	10,26	4,97	4,65
P20	Periférico	4,63	5,72	5,46	5,15	23,54	17,93	11,23
P21	Periférico	3,31	3,76	3,63	3,47	13,60	9,67	4,83

**Tabela 1 – Reações de apoio (Fz) obtidas do modelo estrutural com e sem a consideração da ISE**

Fonte: Elaboração própria.

Houve também a necessidade do redimensionamento das seções das sapatas, conforme análise com ou sem a consideração da ISE, sendo apresentadas as mudanças de dimensões nos números coloridos das células na Tabela 2, sendo a cor verde para diminuição de seção e vermelha para aumento de seção.

SAPATA	SOLO A				SOLO B				SOLO C			
	SEM ISE		COM ISE		SEM ISE		COM ISE		SEM ISE		COM ISE	
	A (cm)	B (cm)	A (cm)	B (cm)	A (cm)	B (cm)	A (cm)	B (cm)	A (cm)	B (cm)	A (cm)	B (cm)
S1	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	75	75
S2	95	75	95	75	90	80	90	80	95	75	115	95
S3	95	75	95	75	85	80	80	70	90	70	110	90
S4	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	75	75
S5	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
S6	85	80	70	70	85	80	70	65	95	65	105	85
S7	95	75	95	80	95	75	95	70	105	85	130	110
S8	110	80	100	85	95	75	95	75	105	85	130	110
S9	95	75	95	75	90	80	90	80	95	75	115	95
S10	70	65	65	65	70	65	75	60	85	65	100	80
S11	85	75	70	70	85	75	80	70	95	65	110	90
S12	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	70	70
S13	70	65	60	60	70	65	60	60	85	65	95	75
S14	95	75	95	75	95	80	95	80	100	80	120	100
S15	95	75	95	75	95	80	95	80	100	80	125	105
S16	85	80	70	65	85	80	70	65	95	75	105	85
S17	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
S18	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	75	75
S19	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	75	75
S20	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	70	70
S21	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

**Tabela 2 – Dimensões das sapatas de fundação**

Fonte: Elaboração própria.



Observou-se que para o Solo A, na sapata S11, proveniente de um pilar central, ocorreu a diminuição em suas dimensões. Percebeu-se o mesmo com o Solo B para a mesma sapata. Já para o Solo C, houve apenas o aumento de suas dimensões, o que possivelmente ocorreu devido à arquitetura do modelo estrutural, com menor simetria em planta.

Com relação aos maciços de solos considerados, notou-se que nas sapatas provenientes do Solo A houve maior redistribuição de cargas que para o Solo B. Possuindo, em comparação, maiores dimensões nas sapatas periféricas e menores nas sapatas centrais, que pode ser justificado devido as próprias características do solo, sendo os valores de NSPT do Solo B maiores. Já com relação ao Solo C, suas sapatas obtiveram maiores dimensões devido à baixa capacidade de carga do solo.

Outro aspecto observado foram os recalques médios gerados a partir dos diferentes maciços de solos através da análise do modelo estrutural com a ISE, conforme é apresentado na Figura 7 a seguir. A plotagem se deu pelo SISEs do TQS, através dos resultados gráficos de isovalores de fundações diretas, apresentando a bacia de recalques da área total.

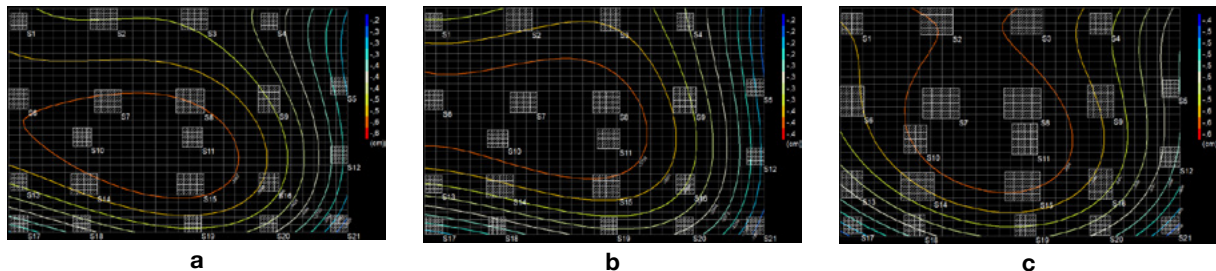


Figura 18 – Bacia de recalques nas sapatas após análise com a ISE: a) Solo A; b) Solo B; c) Solo C  
Fonte: Elaboração própria.

Algumas observações a partir da análise das imagens: nível máximo de recalques semelhante em (a) e (c); mas, mais bem distribuídos em (c) que em (a); valores menores em (b); a bacia de recalques varia seu formato segundo variação no tipo de solo; entretanto, não se observou um padrão.

Constatou-se ainda que os recalques seguiram concentrados na parte central da edificação. Porém para os solos A e B observou-se que os recalques foram também mais acentuados em direção ao lado esquerdo da edificação, nas proximidades da sapata S6. Enquanto, para o solo C, os recalques foram mais acentuados em direção ao lado superior da edificação em planta, próximo da sapata S2, podendo ser justificado em função das dimensões finais da sapata após a análise da ISE, obtendo-se dimensões maiores que para a mesma nos solos A e B.

Análises com relação ao consumo de materiais dos EEF também foram realizadas, sendo observado uma diminuição no volume de concreto de -6,58% para o solo A e de -7,14% para o solo B. No entanto, para o solo C houve aumento de 36,11%. Com relação à área de fôrma, houve diminuição de -3,11% para o solo A e de -3,46% para o solo B; já para o solo C houve aumento de 19,61%. Vale salientar que um método construtivo bastante difundido é o de realizar a escavação do terreno nas dimensões finais dos EEF, sem o uso de fôrmas, servindo apenas para comparativo no presente trabalho.

Dando ênfase ao solo C, observou-se que suas sapatas necessitaram de aumento em suas dimensões após a análise considerando a ISE. Esse fato ocasionou um aumento no volume de concreto e de área de fôrma, acarretando maiores custos em sua execução. Portanto, a utilização de análises mais rigorosas permite o



dimensionamento de elementos estruturais mais condizentes com a realidade e, desta forma, garantias de melhor desempenho e durabilidade para edificações. Por fim, notou-se que dependendo da capacidade de carga do solo a análise da ISE se torna mais ou menos relevante; mas, ainda sim, conferindo uma etapa de grande importância no dimensionamento e análise de estruturas. Ressalta-se que o foco do presente trabalho foi realizar a compatibilização e análise dos EEF, realizando o redimensionamento das áreas das fundações, não sendo o foco a análise do redimensionamento dos demais elementos estruturais.

## Conclusões

Após análise dos resultados obtidos, observou-se sutilmente o alívio de pilares centrais e o acréscimo de carga nos pilares periféricos. Essa redistribuição, mesmo que não necessariamente resulte em economia, permite o correto dimensionamento dos elementos estruturais, o que garante uma maior segurança às estruturas, sendo um quesito mais importante do que a economia, além de evitar a necessidade de reparos estruturais a curto prazo decorrentes de patologias nas fundações.

Os resultados observados de maneira menos significativa podem ser justificados pela baixa carga da edificação, além de sua tipologia sem perfeita simetria, sendo um dos objetivos do presente trabalho: a análise de uma situação mais condizente com a realidade. Portanto, a consideração da ISE é essencial para garantir um projeto mais adequado, proporcionando maior durabilidade às edificações. Vale ressaltar que, embora o foco do trabalho tenha sido nos EEF, futuros estudos devem abordar o redimensionamento dos demais elementos estruturais levando em conta a ISE.

A necessidade de integração entre os projetistas estruturais e de fundações ainda se apresenta como uma dificuldade significativa para a consideração da ISE, visto que são necessários os dados do solo, do dimensionamento das fundações, dos métodos de previsão de recalques e de capacidade de carga. Infelizmente, essa integração não ocorre na maioria das vezes, acarretando resultados mais distantes da realidade.

Para finalizar, observou-se que o *software* comercial *TQS* apresentou-se bastante didático. Foi possível compreender todas as etapas do dimensionamento estrutural e, caso surgisse algum problema no dimensionamento, era só ir diretamente na fonte do erro para a correção. É importante relatar que a análise considerando a ISE no *TQS* foi um pouco mais demorada que a análise convencional. Isso ocorreu devido à necessidade da geração do modelo estrutural no *SISEs*, sendo necessário realizar sua exportação de volta para o projeto estrutural. E, somente após essa etapa, realizar a análise global da estrutura e corrigir as dimensões das sapatas de fundação. Caso houvessem erros graves em sua análise, uma etapa iterativa, ou seja, necessário importar novamente no *SISEs*, para gerar o modelo estrutural e exportar, novamente, para o projeto estrutural, a fim de solucionar os erros graves do projeto.

No modelo sem a ISE, foi necessário apenas realizar as correções nas dimensões das sapatas de fundação até sanar todos os erros graves, chegando assim ao encerramento do dimensionamento. Além do mais, o *software* apresentou bastante recursos de análises e de relatórios, propiciando diversas possibilidades de correlações, como, por exemplo, os resultados gráficos e alfanuméricos disponíveis através da análise no *SISEs*, que seriam a envoltória (esforços/deslocamentos) para os coeficientes de reação vertical e horizontal máximos e mínimos; bacia de recalques (área total) e outros relatórios.

## Referências

- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). *NBR 6122 – Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, 2022.
- ALMEIDA, A. P. R. P. de; MENDONÇA, D. V. C. de; BRANDÃO, E. V. *Interação solo-estrutura e análise de redistribuição de cargas em pilares devido a recalques*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- ANTONIAZZI, J. P; ALVA, G. M. S; SOARES, J. M. D. *Procedimento para a consideração da interação solo-estrutura em edifícios com fundações em sapatas isoladas*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. *Anais [...]*. São Paulo: Ibracon, 2010. p. 161-171.
- ANTONIAZZI, J. P. *Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- ARAÚJO, G. S. *et al.* Análise das patologias em uma edificação unifamiliar devido a recalques diferenciais. *Revista UniAraguaia*, v. 15, n. 2, p. 103-113, 2020.
- AYDIN, E. *et al.* Influence of soil-structure interaction (SSI) on optimal design of passive damping devices. *Structures*, v. 28, p. 847-862, dec. 2020.
- BAHIA, G. de A. D. *Avaliação do desempenho de fundações em edificação no DF com a utilização de técnicas de interação solo-estrutura*. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- BORGES, E. de M; BARREIRA, C. C. M. A; COSTA, E. P. V. da S. M. da. Habitação social e desenvolvimento urbano sustentável: o caso da Região Metropolitana de Goiânia. *Geo UERJ*, n. 30, p. 122-144, 2017.
- CHAMECKI, S. Consideração da rigidez da estrutura no cálculo dos recalques da fundação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 1., 1954, Porto Alegre. *Anais [...]*. Porto Alegre: ABMS, 1954. v. 1, p. 35-80.
- CHEN, J. *et al.* Physical and numerical modeling of seismic soil-structure interaction of prefabricated subway station structure. *Engineering Structures*, v. 290, p. 116364, 2023.
- COLARES, G. M. *Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- CORTEZ, C. *et al.* Performance of an RC building under seismic and tsunami actions in sequence via nonlinear dynamic analysis including soil-structure interaction. *Engineering Structures*, v. 272, p. 114942, 2022.

D'AGOSTINI, G. R. *Estudo comparativo de sapatas isoladas e radier flexível como fundações em casas populares: estudo de caso*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

DANZIGER, F. A. B.; DANZIGER, B. R.; CRISPEL, F. A. A medida dos recalques desde o início da construção como um controle de qualidade das fundações. *In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA*, 4., 2000, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo, 2000. v. 1, p. 191-202.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. *Déficit Habitacional no Brasil – 2016-2019*. Belo Horizonte: FJP, 2021. Disponível em: [http://novosite.fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2021/04/21.05\\_Relatorio-Deficit-Habitacional-no-Brasil-2016-2019-v2.0.pdf](http://novosite.fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2021/04/21.05_Relatorio-Deficit-Habitacional-no-Brasil-2016-2019-v2.0.pdf). Acesso em: 12 jun. 2021.

GONÇALVES, P. M. A. S; FERREIRA, T. J. *Comparação do desempenho, em termos de recalque e custo, de fundações em estacas hélice contínua monitorada e em estacas de grande diâmetro escavadas com lama, em edifícios altos em Goiânia*. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

GUSMÃO, A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A. Avaliação da Influência da interação solo-estrutura. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ANÁLISE ESTRUTURAL E FUNDAÇÕES*, 10., 1994, Foz do Iguaçu, PR. *Anais [...]* São Paulo: ABMS, 1994. v. 1, p. 68-74.

LIS, L. Déficit habitacional do Brasil cresceu e chegou a 5,876 milhões de moradias em 2019, diz estudo. *G1*, Brasília, 4 mar. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/03/04/deficit-habitacional-do-brasil-cresceu-e-chegou-a-5876-milhoes-de-moradias-em-2019-diz-estudo.ghtml>. Acesso em: 22 jul. 2021.

LOPES, F. R; GUSMÃO, A. D. On the influence of soil–structure interaction in the distribution of foundation loads and settlements. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 10., Firenze, 1991. *Proceedings [...]*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991. v. 2, p. 505-509.

MARQUES, O. C *et al.* Analysis of constructive effect and soil-structure interaction in tall building projects with shallow foundations on sandy soils. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 1, e14103, 2021.

MEYERHOF, G. G. Some recent foundation research and its application to design. *The Structural Engineer*, v. 31, n. 6, p. 151-167, 1953.

OLIVERA, K. A. T. *et al.* *Da ocupação do conjunto habitacional à produção do lugar: O caso do Setor Vila Novo Horizonte em Goiânia-GO*. Goiânia: Observatório Geográfico de Goiás, 2004. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/215/o/Oliveira\\_karla\\_annyelly\\_teixeira\\_ocupacao\\_conjunto\\_habitacional.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/215/o/Oliveira_karla_annyelly_teixeira_ocupacao_conjunto_habitacional.pdf) Acesso em: 22 jul. 2021.

REIS, J. H. C. *Interação solo-estrutura de grupos de edifícios com fundações superficiais em argila mole*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

RIBEIRO, D. B. *Análise da interação solo-estrutura via acoplamento MEC-MEF*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

RITTER, M. G. *et al.* Análises de interação solo-estrutura em edifícios com fundação profunda. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 13, n. 2, p. 248-273, 2020.

ROBERTO, L; SOLA, F. Influencia de la interacción dinámica suelo-estructura en la respuesta dinámica de las estructuras. *Construcción y Tecnología en Concreto*, v. 3, n.2, p. 20-23, 2013.

SANTOS, W. J. dos; SEIXAS, A. de. Medições geodésicas para detecção de movimentos em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, p. 1-14, 2021.

SILVA, F. M. de S. e; ALVES, J. B. B; ANDRADE, D. T. M. de. Comparativo de custo de construção entre métodos tradicional e painéis pré-moldados de uma residência unifamiliar. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 10, p. 5178-5200, 2023.

SILVA, W. Q. *Análise não linear geométrica do acoplamento solo-estrutura através da combinação MEC-MEF*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

TEIXEIRA, A. H. Projeto e execução de fundações. *In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA*, 3., 1996, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo, 1996. v. 1, p. 227-264.

TQS INFORMÁTICA. *TQS docs: interação solo-estrutura*. São Paulo, 2021. Disponível em: <http://docs.tqs.com.br/Docs/PrintAllReport/3139?language=pt-BR>. Acesso em: 4 jul. 2021.