

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA ESTABILIDADE GLOBAL EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO AS ETAPAS CONSTRUTIVAS

**SANTOS, Rebeca Nogueira<sup>1</sup>;**  
**ROMÃO FILHO, Ricardo Sampaio<sup>2</sup>;**  
**SANTOS, Tatyane Pacifico<sup>3</sup>;**  
**CEDRIM, Matheus Barbosa Moreira<sup>4</sup>.**

<sup>1</sup> Graduando, CESMAC, Maceió-AL (rebeca.n09@hotmail.com).

<sup>2</sup> Mestre, USP, Maceió-AL (rsampaiofilho@cesmac.edu.br).

<sup>3</sup> Doutorado, UFAL, Maceió-AL (tatyane.santos@cesmac.edu.br).

<sup>4</sup> Doutorado, UFAL, Maceió-AL (matheus.cedrim@cesmac.edu.br).

**Resumo.** Normalmente os projetos estruturais são calculados adotando-se estruturas indeslocáveis em sua base (engastes). Todavia, sabe-se que a fundação pode sofrer recalque, ocasionando movimentações na estrutura como um todo e conseqüentemente uma redistribuição de esforços. Diante disso, o estudo associando a superestrutura, a infraestrutura e o maciço de solo como um sistema único torna a resolução mais coerente e realista. A Interação Solo-estrutura (ISE) tem como objeto analisar os efeitos da relação da estrutura com o solo, considerando o comportamento em campo da edificação e possibilitando uma análise mais real do comportamento estrutural. Tomando-se como base o exposto, esse estudo visa avaliar os efeitos desta interação na análise da estabilidade global em edifícios de concreto armado, considerando as etapas construtivas. Para atender esse objetivo, a estrutura de um edifício foi analisada comparando o modelo habitual de projetos estruturais com o efeito da Interação Solo-Estrutura (ISE) e das etapas construtivas. A partir desta comparação, percebeu-se uma discrepância nos parâmetros de estabilidade, no diagrama de momento fletor, nas reações de apoio e na deslocabilidade lateral da estrutura. Ressalta-se então, a importância de considerar os efeitos dessa análise, uma vez que esses resultados são utilizados para dimensionar e detalhar os elementos estruturais das edificações.

**Palavras-chave:** Interação Solo-estrutura, Estabilidade Global, Etapas Construtivas. Concreto Armado.

## **1. INTRODUÇÃO**

O sistema estrutural tem a função de transmitir os esforços que atuam na estrutura ao solo, de modo a não comprometer nenhum elemento que o componha. Além das cargas verticais, a estrutura deve suportar as ações horizontais e os deslocamentos impostos. As ações horizontais podem aumentar o efeito das cargas verticais, gerando um acréscimo de esforço devido a não linearidade geométrica após a situação deformada, que são conhecidos como esforços de segunda ordem. Consequentemente, é importante que o edifício possua um sistema estrutural capaz de limitar os deslocamentos horizontais conferindo rigidez suficiente para reduzir esses efeitos globais de segunda ordem (SANTOS, 2018).

É usual os engenheiros projetistas considerarem, para verificação da segurança ao estado limite último e na obtenção das cargas das fundações, que os pilares estão engastados na fundação, assumindo que os apoios são indesejáveis. O resultado do conjunto das análises realizadas é passado para o engenheiro geotécnico que dimensiona a fundação, determina os recalques, e valida comparando-os com os recalques admissíveis. Em seguida, os resultados da análise do engenheiro geotécnico retornam para o engenheiro de estruturas e assim são desenvolvidos os projetos. Esse tipo de metodologia acaba por se tornar incompatível com o comportamento real da estrutura, pois nesta situação os efeitos resultantes da interação entre o solo e a estrutura são desprezados.

A Interação Solo-estrutura (ISE) tem como objetivo avaliar a relação da estrutura com o solo, tratando a superestrutura, as fundações e o maciço de solo como um único elemento e assim possibilitando uma análise mais real do comportamento da edificação. Ao considerar a ISE é necessário realizar uma análise integrada dos materiais que fazem parte dos sistemas estruturais e dos sistemas geotécnicos ou maciço de solo.

Utilizar metodologias mais criteriosas para a análise de estruturas, como ao considerar os efeitos da interação solo-estrutura, faz com que o comportamento dos sistemas estruturais seja mais próximo à realidade, tornando os projetos mais eficientes e confiáveis. Essa abordagem não é comum atualmente pelo fato de anos atrás não existirem ferramentas para a obtenção desse resultado mais realista, sendo o dimensionamento feito de forma simplificada. Entretanto mesmo com o avanço tecnológico e criação de softwares para este fim, o método de calcular estruturas de maneira convencional continua a ser predominante nos escritórios (ANTONIAZZI, 2011).

Diante do exposto, pode-se notar que o estudo da interação estrutura, fundação e maciço de solo, torna-se cada vez mais relevantes. Deste modo, esse projeto de pesquisa visa avaliar os efeitos da interação solo-estrutura na análise da estabilidade global em edifícios de concreto armado, considerando as etapas construtivas, e assim verificar a consideração dessa interação na magnitude dos esforços nos elementos estruturais, bem como a variação na deslocabilidade lateral do edifício e nos deslocamentos verticais nos apoios.

## **2. METODOLOGIA**

A fim de cumprir os objetivos deste trabalho, foi utilizado o sistema CAD/TQS para modelagem do edifício e sua posterior análise considerando a interação solo-estrutura e as etapas construtiva dentro do conceito de estabilidade global.

### **2.1. Modelagem do edifício**

Para o lançamento da estrutura no TQS, a princípio foram definidos os dados do edifício a ser analisado, tais como: tipo de estrutura; número de pavimentos; altura do pé-direito; cargas

provenientes do vento; critérios e parâmetros de projeto. Nesta pesquisa foi utilizado um modelo arquitetônico básico, visando apenas o material bruto da estrutura. Após sua inserção, houve a primeira concepção estrutural da edificação para melhor locação de pilares e vigas, geometria das lajes e elementos de fundação.

## 2.2. SISEs (Interação Solo-Estrutura)

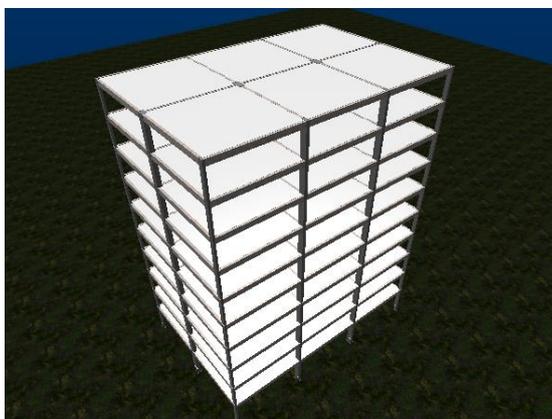
Após a modelagem estrutural, partiu-se para utilização do SISEs (Sistema de Integração Solo-Estrutura) para análise do conjunto. Esse sistema tem como objetivo a determinação dos esforços solicitantes em todos os pontos da superestrutura e da infraestrutura, assim como o efeito no maciço do solo (recalques da fundação). O processamento pode ser resumido em três passos consecutivos: (a) Fornecimento de dados, (b) Processamento da estrutura integrada e (c) Análise dos resultados. Na análise da ISE foi considerada inicialmente as fundações como indeslocáveis (metodologia comumente adotada) e posteriormente seu estudo como deslocáveis (caso real da estrutura).

## 2.3. Etapas Construtivas

Para análise das etapas construtivas foi necessário o conhecimento do cronograma de execução da obra, considerando os períodos de acréscimo dos pavimentos, o histórico de cargas na estrutura e o comportamento do módulo de elasticidade em relação ao tempo de execução dos elementos. O sistema CAD/TQS, durante a análise com efeito incremental, considera a área axial bruta dos pilares, aplicando as cargas verticais progressivamente sobre eles, ou seja, para cada etapa da construção, um aumento das cargas é adicionado ao pavimento, de acordo com os critérios previamente estabelecidos, utilizando o princípio da superposição dos efeitos para a consideração do pavimento superior, processo conhecido como sequencial direto, analisando a montagem e cargas da estrutura de baixo para cima.

## 3. RESULTADOS

Visando o cumprimento dos objetivos, a presente pesquisa considerou, para modelagem do edifício, a estrutura com o sistema construtivo de concreto armado apoiada sobre fundações do tipo sapatas isoladas inseridas em um perfil de solo com predominância de argila siltosa. A geometria do edifício foi modelada em formato retangular, a fim de considerar os efeitos do vento nas duas direções. A figura 1 abaixo, apresenta o modelo em 3D do edifício.



**Figura 1** - Visualização em 3D do edifício.  
Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Após a finalização da modelagem da estrutura, o mesmo edifício foi duplicado dentro da plataforma a fim de obter uma comparação entre o modelo comum e o modelo com ISE, logo, para o segundo edifício, os dados de modelagem foram mantidos, entretanto, foi ativada a integração do SISEs, obtendo assim, um comportamento único entre a superestrutura, as fundações e o maciço de solo.

Dentro desse contexto, houve também a duplicação do edifício comum apresentado acima para inserção do efeito incremental, ou seja, a estrutura sendo analisada conforme a execução da sequência de construção. Em resumo, gerou-se três edifícios dentro do sistema CAD/TQS, o primeiro sujeito à análise comum, semelhante ao método utilizado na elaboração de projetos estruturais, o segundo sujeito à análise com a ativação da Interação Solo-Estrutura (ISE) e o terceiro sujeito à análise das etapas construtivas ao longo do tempo.

### 3.1. ESTABILIDADE GLOBAL

Em relação à estabilidade global dos três edifícios, o sistema CAD/TQS gera relatórios com os parâmetros utilizados para mensurar essa estabilidade. Na tabela 1 é apresentado os resultados obtidos através destes relatórios para cada um dos modelos nas duas direções (90° e 180°).

**Tabela 1. Parâmetros de estabilidade global dos edifícios. Fonte: Dados da pesquisa, 2022.**

ESTABILIDADE GLOBAL						
PARÂMETROS:	GAMA Z		ALFA		FAVt	
DIREÇÕES:	90° - 270°	180° - 0°	90° - 270°	180° - 0°	90° - 270°	180° - 0°
EDF. COMUM	1,10	1,21	0,68	0,90	1,11	1,21
EDF. COM ISE	1,12	1,24	0,81	1,07	1,12	1,24
EDF. COM ETAPAS CONSTRUTIVAS	1,10	1,21	0,68	0,90	1,10	1,21

Percebe-se que os valores do modelo comum e do modelo considerando as etapas construtivas não resultaram em discrepâncias significantes, já o modelo com Interação Solo-Estrutura ativado possuiu um aumento em relação aos demais, representando uma maior instabilidade.

### 3.2. MAGNITUDE DOS ESFORÇOS

Em relação aos esforços solicitantes, foram analisadas as reações de apoio e o momento fletor na direção z na base dos pilares da estrutura. Para a análise das reações de apoio foi utilizado o caso 1, onde este considera apenas o carregamento vertical, tanto permanente como acidental. Já para análise do momento fletor, foram utilizados dois casos distintos para melhor observação do comportamento, o caso 2, que considera além do carregamento vertical a ação do vento na direção 90° - 270°, e o caso 3, que considera o carregamento vertical e a ação do vento na direção 180° - 0°. Os valores das magnitudes dos esforços obtidos nos três modelos estão apresentados nas tabelas abaixo juntamente com o percentual de erro relativo entre as metodologias adotadas e o modelo comum em cada um dos pilares.

A tabela 2 abaixo trata-se das reações de apoio dos três modelos de edifício, considerando o caso 1 (todas as cargas verticais permanentes e acidentais).

**Tabela 2. Reações de apoio (Caso 1). Fonte: Dados da pesquisa, 2022.**

Caso 1	Reações de apoio (tf)				
	COMUM	ISE	Erro (ISE)	ETAPAS	Erro (Etapas)
P1	100,79	101,82	1,01%	101,63	0,83%
P2	252,36	256,17	1,49%	256,02	1,43%
P3	254,27	257,71	1,33%	257,60	1,29%
P4	98,44	99,56	1,12%	99,34	0,91%
P5	265,45	265,87	0,16%	265,98	0,20%
P6	568,08	558,29	1,75%	558,81	1,66%
P7	574,30	564,06	1,82%	564,70	1,70%
P8	260,84	261,65	0,31%	261,73	0,34%
P9	98,77	100,23	1,46%	100,04	1,27%
P10	249,29	252,84	1,40%	252,67	1,34%
P11	252,51	255,51	1,17%	255,42	1,14%
P12	96,88	98,25	1,39%	98,03	1,17%

Percebe-se que os pilares internos (P6 e P7) obtiveram uma diminuição nos seus valores de reação de apoio, além de possuírem o maior erro relativo entre os demais, de 1,5 a 2%. Já os pilares restantes, obtiveram um aumento em suas reações, com variação de erro entre 0 e 1,5%. Tal resultado era previsto, uma vez que com a utilização da interação solo-estrutura há uma redistribuição de esforços consequente das imperfeições geométricas, logo, os carregamentos que outrora iriam ser considerados nos pilares internos foram redistribuídos para os pilares de canto e de borda, resultando em uma maior uniformização de esforços.

A tabela 3 abaixo apresenta os valores do momento fletor na direção z na base dos pilares dos três modelos de edifício, considerando o caso 2 (carregamento vertical a ação do vento na direção 90° - 270°) e o caso 3 (carregamento vertical a ação do vento na direção 180° - 0°).

**Tabela 3. Momento fletor na direção z (Caso 2). Fonte: Dados da pesquisa, 2022.**

	Mz máx. na base (tf.m)					Mz máx. na base (tf.m)				
	Caso 2: Vento na direção 90°-270°					Caso 3: Vento na direção 180°-0°				
	COMUM	ISE	Erro (ISE)	ETAPAS	Erro (ETAPAS)	COMUM	ISE	Erro (ISE)	ETAPAS	Erro (ETAPAS)
P1	1,15	1,06	8,49%	1,19	3,36%	0,94	0,75	25,33%	0,98	4,08%
P2	-0,91	-0,82	10,98%	-0,95	4,21%	2,11	1,70	24,12%	2,14	1,40%
P3	0,92	0,82	12,20%	0,96	4,17%	1,20	1,29	6,98%	1,17	2,56%
P4	-1,18	-1,10	7,27%	-1,22	3,28%	-1,38	-1,41	2,13%	-1,43	3,50%
P5	6,49	5,90	10,00%	6,78	4,28%	5,94	4,65	27,74%	6,23	4,65%
P6	-1,75	-1,63	7,36%	-1,95	10,26%	17,95	13,81	29,98%	18,06	0,61%
P7	2,15	1,98	8,59%	2,36	8,90%	16,35	13,30	22,93%	16,23	0,74%
P8	-6,54	-5,96	9,73%	-6,85	4,53%	-7,09	-7,20	1,53%	-7,39	4,06%
P9	1,08	1,00	8,00%	1,12	3,57%	0,88	0,69	27,54%	0,92	4,35%
P10	-0,90	-0,80	12,50%	-0,93	3,23%	2,10	1,69	24,26%	2,12	0,94%
P11	0,93	0,82	13,41%	0,96	3,12%	1,20	1,29	6,98%	1,18	1,69%
P12	-1,07	-1,00	7,00%	-1,12	4,46%	-1,27	-1,30	2,31%	-1,31	3,05%

No caso 2 há diferença razoável entre os resultados da Interação Solo-Estrutura e das etapas construtivas. Pode-se perceber que enquanto a variação de erro considerando apenas as etapas construtivas foi majoritariamente de 3 a 5%, os valores encontrados com a ISE possuíam erros predominantemente maiores, entre 7 e 14%. Já no caso 3, percebe-se uma discrepância significativamente maior, enquanto os erros relativos das etapas construtivas em relação ao modelo comum foi em torno de 0 a 5%, a ISE possuiu predominância em seus pilares de um erro de 20 a 30%, tornando a direção do vento 180°, neste caso, um fator de grande importância para analisar a estrutura sob esse parâmetro.

### 3.3. DESLOCABILIDADE LATERAL

Em relação ao deslocamento horizontal no topo do edifício, foram analisados dois casos, considerando as duas direções do vento (90° e 180°), através dos pórticos espaciais dos modelos. A tabela 4, apresenta, em média, os resultados obtidos.

Tabela 4 - Deslocabilidade lateral dos edifícios. Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

DESLOCAMENTO LATERAL DO TOPO (cm)		
DIREÇÕES	90° - 270°	180° - 0°
COMUM	2,40	2,42
ISE	2,53	2,56
ETAPAS	1,78	1,80

## 4. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos, percebe-se que houve diferença nas análises quando considerada a interação solo-estrutura e a sequência das etapas construtivas, tanto na avaliação da estabilidade global do edifício, como em seus esforços solicitantes e em sua deslocabilidade lateral. A partir daí, o entendimento da influência dessa magnitude parte da concepção dos engenheiros estruturais para considerar ou não essa metodologia na elaboração de seus projetos, entretanto, sabendo que os resultados desses esforços são a base para o dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais, é de suma importância que estes valores sejam o mais próximo possível da realidade, critério não satisfeito quando se analisa com o modelo comum.

## REFERÊNCIAS

- Antoniazzi, J. P. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2011.
- Iwamoto, R. K. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos (Universidade de São Paulo). São Carlos. 2000.
- Santos, T. P. **Comportamento do sistema estrutural em edifícios altos de concreto armado considerando a influência das modelagens do núcleo rígido**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas. Alagoas, Brasil. 2018.