



AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CONSTRUTIVOS E INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA NA ESTABILIDADE GLOBAL DA ESTRUTURA

Olivia Catelan Marques

oliviacmarques@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 577 - Goiabeiras – Vitória – ES

Cep: 29075-910

Leonardo de Almeida Feitosa

leofeitosa@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 577 - Goiabeiras – Vitória – ES

Cep: 29075-910

Elcio Cassimiro Alves

elcio.calves1@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 577 - Goiabeiras – Vitória – ES

Cep: 29075-910

Resumo. Com o aumento da execução de edifícios cada vez mais esbeltos, torna-se necessário a verificação cada vez mais precisa da estabilidade global. A tendência é cada vez mais analisar as estruturas como um todo, considerando a interação dos diversos elementos, inclusive com o solo. Uma vez que uma gama de fatores que podem influenciar é grande, as normas brasileiras e os programas computacionais comerciais tornam-se mais complexos, bem como os métodos de análise e dimensionamento. O efeito construtivo busca aproximar da realidade a estrutura de um edifício, levando o em conta todas as etapas de construção no dimensionamento. Assim, ele considera não só os carregamentos referentes ao peso próprio, mas também todos aqueles inerentes ao processo de construção de edifícios. A interação solo-estrutura procura otimizar a previsão dos recalques diferenciais, uma vez que não considera a uniformização da rigidez da estrutura. Com o intuito de analisar efeitos que possam influenciar no parâmetro de instabilidade γ_z do edifício, esse trabalho busca comparar a influência dos efeitos construtivos, tipo de fundação e a interação solo estrutura, por meio do software CAD/TQS.

Palavras-chave: estabilidade; global, gama z, efeito construtivo, interação solo-estrutura

INTRODUÇÃO

As estruturas estão se tornando cada vez mais esbeltas e econômicas, tornando assim maiores as solicitações que as mesmas estão sujeita. Assim, a análise da estabilidade e os efeitos de segunda ordem passam a assumir importância fundamental no projeto estrutural.

Na análise das estruturas, nem sempre são considerados os efeitos construtivos, ou análise incremental, que consiste no calculo dos deslocamentos a medida que a estrutura vai sendo montada ou construída, diferente da análise convencional, como mostra Gorza (2000), onde os carregamentos são considerados como todos aplicados simultaneamente na estrutura. Como a análise convencional não condiz com a realidade, o estudo dos efeitos construtivos se torna extremamente relevante.

Em estruturas esbeltas, ações como o vento provocam grandes efeitos, produzindo esforços adicionais à estrutura. Assim, segundo Paixão e Alves (2016), a avaliação da estabilidade global da estrutura é um dos fatores mais importantes para a concepção do edifício, uma vez que garante a segurança da estrutura mediante a perda de sua capacidade resistente causada pelo aumento das deformações em decorrência das ações.

Para a análise da estabilidade global de uma edificação, não é apenas a superestrutura que é relevante, os efeitos de deslocamento das fundações também é um fator relevante.

Os projetos estruturais são baseados na hipótese dos apoios da edificação serem indesejáveis, e os cálculos das fundações são baseados nessa premissa. Por outro lado, os projetos são baseados levando-se em consideração apenas as cargas de fundação e as propriedades do terreno, com a hipótese que cada elemento da fundação trabalha isoladamente. Com isso, é criada uma enorme diferença entre o terreno e a estrutura (GUSMÃO, 1990). A interação solo-estrutura vem de encontro a essa disparidade, buscando resultados mais reais. Estudos como o de Alves e Feitosa (2016), Passos et al. (2016) apontam a importância de estudar o comportamento da estabilidade global para diferentes tipos de lajes em edifícios esbeltos.

Assim, esse trabalho procura avaliar a influência dos efeitos construtivos no cálculo de uma edificação em concreto armado e a interação solo-estrutura, para entender melhor as influências de calculo na estrutura completa. O parâmetro analisado será σ_z . Com isso, este trabalho procura aumentar o embasamento teórico de dois assuntos de grande importância no universo da engenharia estrutural e a correlação entre eles. Para análise do efeito incremental bem como a interação solo estrutura será utilizada o CAD/TQS versão 19 que tem implementado sem seus pacotes essas ferramentas de análise.

1.1 Análise Incremental

Nos projetos de edifícios, normalmente, a análise da estrutura é feita considerando que toda a estrutura já existe, e assim, suas ações impostas. Dessa forma, os esforços são obtidos na análise de um estado limite que majora as ações que os materiais estão envolvidos. A princípio, essa hipótese é válida apenas para ações horizontais devidas ao vento e para as ações verticais aplicadas à estrutura quando a mesma está totalmente concluída. Mas para ações que são impostas gradualmente em vários estágios de construção, estas análises globais não são muito precisas (PRADO E CORRÊA, 2002).

Na análise incremental, segundo Gorza (2000), deve-se ter em mente que as cargas atuantes de um andar não podem gerar tensões e deslocamentos em um andar superior ao mesmo tempo. Assim, ao se analisar um determinado andar, e os deslocamentos do andar inferior já tiverem ocorrido, deve-se utilizar o princípio da superposição dos efeitos.

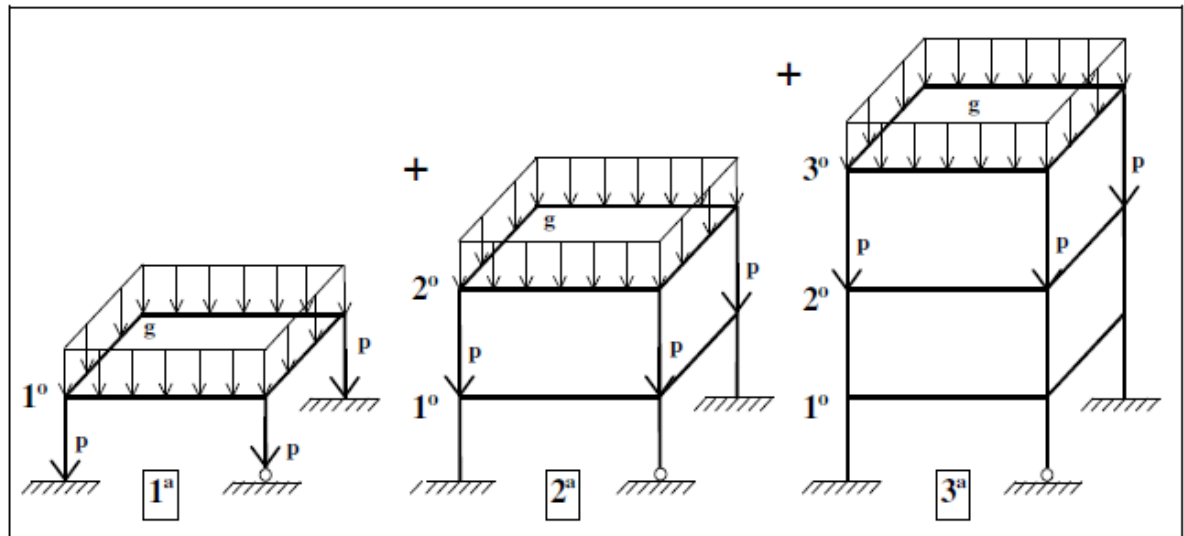


Figura 1. Etapas de carregamento considerando os efeitos construtivos.

Fonte: Gorza, 2000

A análise incremental ainda é um aspecto pouco explorado pelos projetistas estruturais, mesmo que já comprovado em pesquisas anteriores sua importância na análise dos deslocamentos de 2ª ordem. Pesquisas sobre esse assunto ainda carecem de projetos, o que torna difícil sua divulgação no meio.

Trabalhos como o de Prado e Corrêa (2002) e Coelho (2003), comprovam que a consideração do efeito construtivo no desenvolvimento da construção gera dimensionamentos mais racionais, aproximando os esforços dos reais. Além disso, mostram diferenças dos valores encontrados no parâmetro de instabilidade γ_z pelo método tradicional.

1.2 Interação Solo-Estrutura

Os projetos estruturais são baseados na hipótese dos apoios da edificação serem indesejáveis, e os cálculos das fundações são baseados nessa premissa. Por outro lado, os projetos são baseados levando-se em consideração apenas as cargas de fundação e as propriedades do terreno, com a hipótese que cada elemento da fundação trabalha isoladamente. Com isso, é criada uma enorme disparidade entre o terreno e a estrutura. Outra consequência desse efeito, é a existência de recalques diferenciais menores que os estimados convencionalmente, devido a solidariedade existente entre os elementos da estrutura que confere rigidez aos mesmos (GUSMÃO, 1990).

Em seu trabalho, Danziger et al. (2005), explica que a interação solo-estrutura condiciona a forma como uma estrutura reage às solicitações, apresentando cargas nas

fundações em função das condições particulares do solo suporte e do tipo de estrutura. Ela mostra que o modelo de cálculo estudado apresentou valores diferentes do calculista, os quais não representam de forma adequada o comportamento da estrutura.

Savaris et al. (2010), explicam que o mecanismo, conhecido como interação solo estrutura (ISE), acontece da interação entre o comportamento da estrutura e os recalques de fundação. Com isso, é verificado a sua influência na redistribuição de esforços normais nos pilares, ou seja, medida que a edificação é construída, ocorre uma transferência de cargas dos pilares que tendem a recalcar mais para aqueles que tendem a recalcar menos.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 a interação solo-estrutura só deve ser contemplada em casos mais complexos da análise estrutural. Fora essa orientação, a norma não contempla o assunto, deixando a cargo do projetista a escolha de usar ou não o método de análise.

1.3 Parâmetros de Instabilidade γ_z

Na análise de 1ª ordem considera-se a estrutura com sua condição geométrica indeformada, mas para edificações esbeltas essa consideração não é suficiente. Ao se considerar a configuração geométrica deformada da estrutura, surgem solicitações adicionais no sistema estrutural denominadas efeitos de 2ª ordem, ou seja, são efeitos adicionais à estrutura, oriundos de suas deformações.

O coeficiente γ_z é determinado pela primeira iteração do processo de análise de segunda ordem, considerando que a sucessão de efeitos irá obedecer uma progressão geométrica decrescente de razão constante. Assim, ele explica que a formulação é baseada na seguinte lógica:

"Efetuando-se uma análise de 1ª Ordem, o momento de 1ª Ordem M_1 é calculado com relação à base da edificação, além dos respectivos deslocamentos horizontais dos nós da estrutura, formando assim, a primeira configuração deformada da mesma. Em virtude da nova posição deformada, as cargas verticais passam a gerar momentos de 2ª Ordem (ΔM) e conseqüentemente novos deslocamentos horizontais (...). Este processo se repete gerando acréscimos de momentos que diminuem com a continuidade da iteração até se tornarem insignificantes (no caso de estruturas estáveis). A soma de todos estes acréscimos de momentos e mais o momento de 1ª Ordem M_1 é chamado momento de 2ª Ordem M_2 , como visto anteriormente. $M_2 = M_1 + \Delta M_1 + \Delta M_2 + \dots + \Delta M_{j-1} + \Delta M_j$ ". (FEITOSA, 2016)

Para a ABNT NBR 6118:2014, o módulo de rigidez equivalente da estrutura é determinado a partir da aplicação dos carregamentos horizontais. No entanto é impossível encontrar uma expressão que relacione o modulo de rigidez equivalente e o deslocamento do topo, uma vez que essas forças variam de edifício para edifício.

O cálculo do coeficiente γ_z é definido por:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}}$$

Onde:

$M_{1,tot,d}$ - é o momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais da combinação considerada, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura;

$\Delta Md_{tot,d}$ - é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, na combinação considerada, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem.

2 MODELOS DE ANÁLISE

Os modelos analisados possuem mesmo projeto arquitetônico, com: térreo, garagem e 21 pavimentos tipo. Para avaliar esses parâmetros, foram criados 04 modelos para análise, como mostra a Tabela 1:

Tabela 1. Modelos utilizados para análise

MODELO	TIPO DE LAJE	TIPO DE FUNDAÇÃO	EFEITO CONSTRUTIVO	INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA
01	MACIÇA	DIRETA	-	-
02	MACIÇA	DIRETA	X	-
03	MACIÇA	DIRETA	-	X
04	MACIÇA	DIRETA	X	X

As características adotadas foram:

Pé direito tipo e garagem: 3,06m;

Pé direito térreo: 4,14m;

Elementos de fundação direta: sapata;

Modelo com lajes maciças: vigas, lajes e sapatas em concreto armado 30MPa;

Vento:

Velocidade básica: 30 m/s;

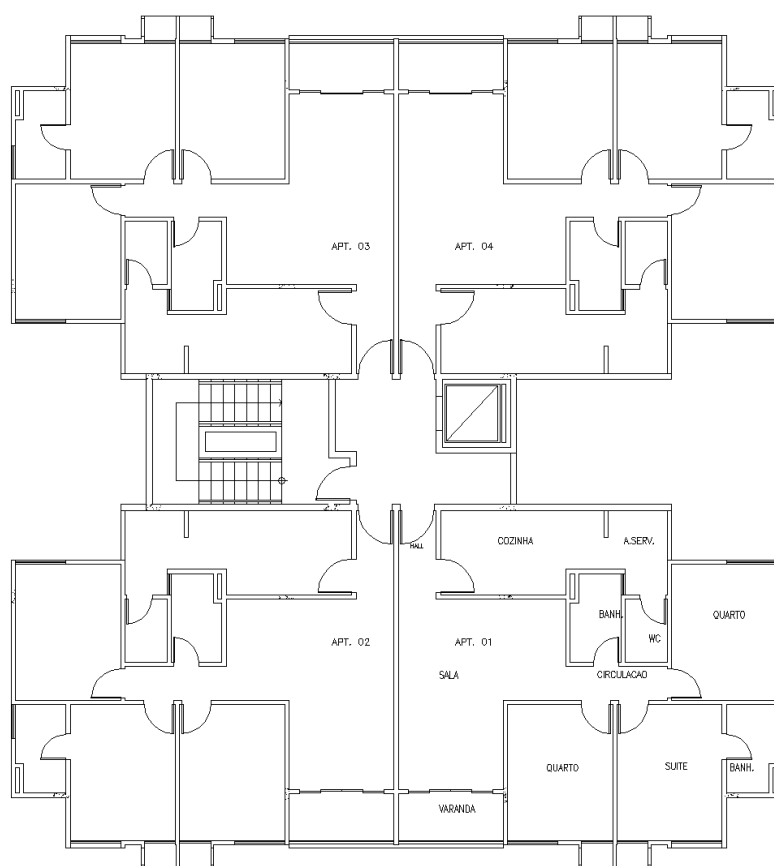
Fator topográfico: 1,00;

Categoria de rugosidade: IV;

Classe: C;

Fator estatístico: 1,00;

A Figura 2 apresenta a planta arquitetônica do pavimento tipo e a Figura 3 mostra o modelo estrutural adotado para o edifício.



PLANTA ARQUITETONICA – PAV. TIPO

Figura 2. Layout arquitetônico do pavimento tipo

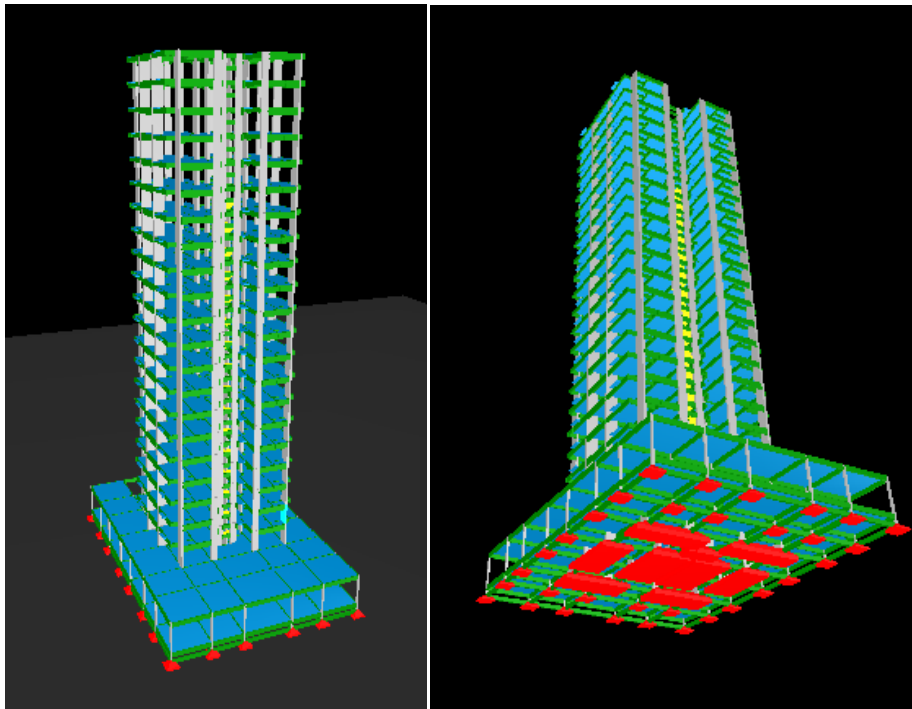


Figura 3. Vista 3D da edificação

Fonte: Autor

No software CAD/TQS é possível que o usuário defina seu histórico de carregamento. Assim, é determinado um tempo para que cada fase aconteça e quantidade de pavimentos que será construído ao mesmo tempo. Para esse trabalho, foi determinado que apenas um pavimento fosse construído e o tempo de uma fase seria 7 dias. Abaixo, as cargas consideradas no efeito construtivo são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2. Modelos utilizados para análise

HISTÓRICO DE CARREGAMENTO NO EFEITO CONSTRUTIVO		
Nº de pavimentos construídos ao mesmo tempo:		1
Nº de dias que representam uma fase construtiva:		7
CASOS DE CARREGAMENTO	PARCELA (%)	FASE
Todas permanentes e acidentais dos pavimentos	0	0
	100	Final
Peso próprio	100	0
	0	Final
Cargas permanentes	0	0
	30	1
	70	2
	0	Final
	0	0
Cargas acidentais	0	0
	30	1

	70	2
	0	Final
Temperatura (1)	0	0
	100	Final
Temperatura (2)	0	0
	100	Final
	0	0
Retração	70	1
	30	2
	0	Final
Vento 90°	0	0
	100	Final
Vento 270°	0	0
	100	Final
Vento 0°	0	0
	100	Final
Vento 180°	0	0
	100	Final
Vento 45°	0	0
	100	Final
Vento 135°	0	0
	100	Final
Vento 225°	0	0
	100	Final
Vento 315°	0	0
	100	Final

Para análise do efeito incremental será considerada a curva de incremento do Módulo de Elasticidade conforme apresentada na Figura 4. O software CAD/TQS permite que o usuário faça alterações do módulo de elasticidade do concreto de acordo com a idade do mesmo. A tabela abaixo mostra, em porcentagem, quanto o material adquire do seu valor final de resistência característica a compressão, com o passar do tempo.

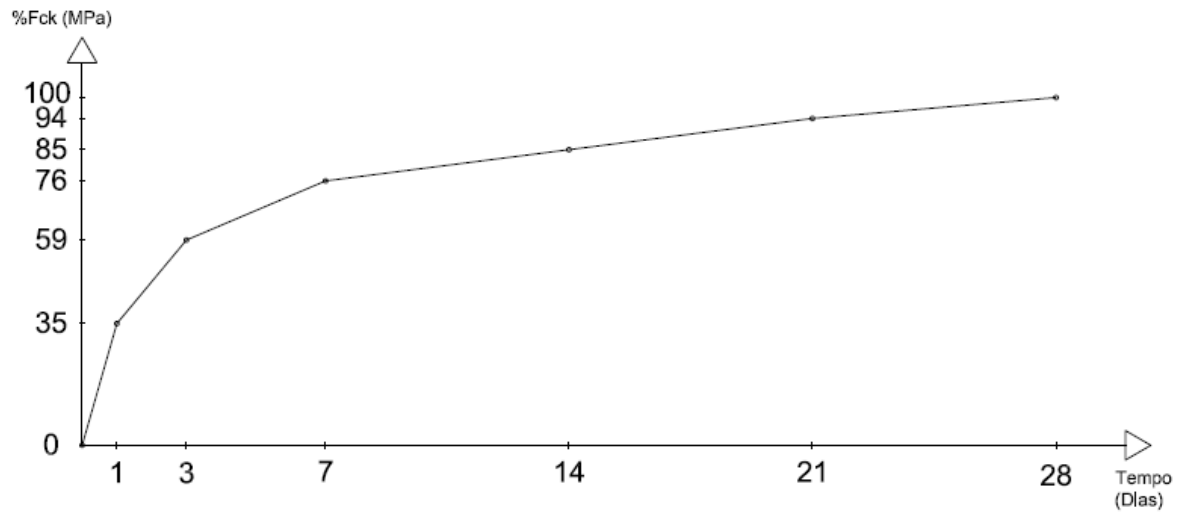


Figura4 . Curva de incremento do Módulo de elasticidade

Para a análise da interação solo-estrutura, foi utilizado perfil de solo apresentado na Figura 5.

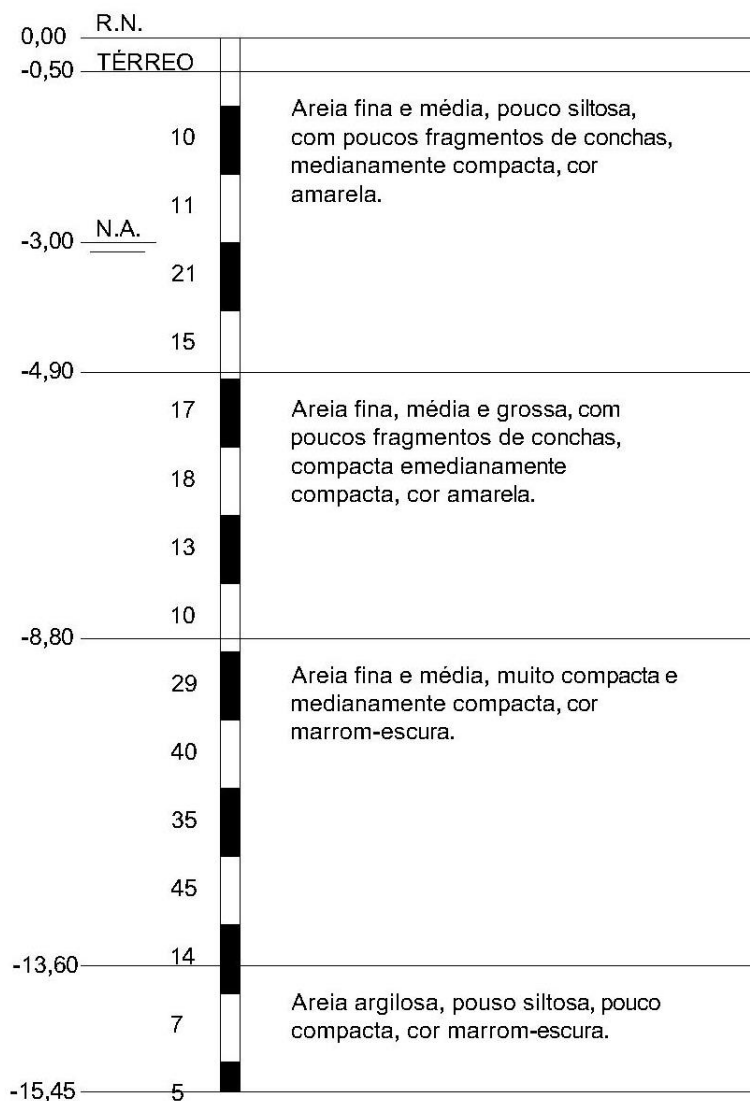


Figura 5. Perfil de solo utilizado
Fonte: Autor

RESULTADOS E ANÁLISES

Para a análise dos resultados, foram avaliados os valores encontrados de γ_z , que deveriam apresentar valores menores que 1,3, segundo ABNT NBR 6118:2014 para estruturas de nós móveis.

Foi usado um modelo como parâmetro de comparação, Modelo 01. Esse modelo foi dimensionado para atender ao valor de γ_z esperado por norma. Assim, utilizando as mesmas características, os outros modelos variaram de acordo com o uso, ou não, dos parâmetros de efeito construtivo e ISE. Assim, pode-se avaliar as influências, de forma mais clara, de cada um na edificação. As Tabelas 3,4,5 e 6 mostram os resultados encontrados.

Tabela 3. Resultados da análise do Modelo 01

MODELO 01		
VENTO	γz	Desloc. Max (cm)
90°	1,218	2,45
270°	1,218	2,45
0°	1,136	1,58
180°	1,136	1,58
45°	1,179	2,88
135°	1,173	2,53
225°	1,179	2,88
315°	1,173	2,53

Tabela 4. Resultados da análise do Modelo 02

MODELO 02		
VENTO	γz	Desloc. Max (cm)
90°	1,218	2.45
270°	1,218	2.45
0°	1,136	1.58
180°	1,136	1.58
45°	1,179	2.88
135°	1,173	2.53
225°	1,179	2.88
315°	1,173	2.53

Tabela 5. Resultados da análise do Modelo 03

MODELO 03		
VENTO	γz	Desloc. Max (cm)
90°	1,27	2.92
270°	1,27	2.92
0°	1,18	2.08
180°	1,18	2.08
45°	1,228	3.54
135°	1,219	3.11
225°	1,228	3.54
315°	1,219	3.11

Tabela 6. Resultados da análise do Modelo 04

MODELO 04		
VENTO	γz	Desloc. Max (cm)
90°	1,27	2.92
270°	1,27	2.92
0°	1,18	2.08
180°	1,18	2.08
45°	1,228	3.54
135°	1,219	3.11
225°	1,228	3.54
315°	1,219	3.11

A tabela 7 mostra a comparação entre os modelos, percentualmente, em relação ao modelo de referência (Modelo 01).

Tabela 7. Resultados comparativos com o Modelo 01 para γz

TABELA COMPARATIVA COM BASE NO MODELO 01 (γz)				
VENTO	MODELO 01	MODELO 02	MODELO 03	MODELO 04
90°	1	1	1,043	1,043
270°	1	1	1,043	1,043
0°	1	1	1,039	1,039

CILAMCE 2017

180°	1	1	1,039	1,039
45°	1	1	1,042	1,042
135°	1	1	1,039	1,039
225°	1	1	1,042	1,042
315°	1	1	1,039	1,039

CONCLUSÃO

Para os modelos com o uso do Efeito Incremental (EI), não foi possível ver sua relevância, uma vez que os valores finais de γ_z não foram alterados com sua utilização. De acordo com o relatório fornecido pelo programa CAD/TQS, alguns valores nas combinações, para γ_z , sofrem alterações variadas, porém o resultado final não se altera. Assim, em relação ao EI, não foi possível avaliar sua influência para os modelos analisados.

Já para os modelo com o uso do Sistema de Interação Solo-Estrutura (SISE), pode-se verificar que a utilização do mesmo possui relevância, uma vez que altera o valor do parâmetro γ_z da edificação. A variação média dos valores foi na ordem de 4,04% a mais em relação aos valores dos modelos que não utilizaram o SISE.

Esse valor se mostra relevante caso o dimensionamento busque a otimização em sua modelagem, ou seja, o projetista trabalharia com o limite permitido por norma, aproveitando ao máximo as características da estrutura. Partindo dessa premissa, e adotando que a forma mais correta seria com o uso do SISE, a não utilização do mesmo pode acarretar estruturas com um valor de γ_z acima do limite determinado por norma.

Para todos os modelos, o deslocamento estrutural estava dentro do previsto, de 4,08 cm (H/1700), assim como o limite de γ_z de 1,30.

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo mais complexo do EI, avaliando um maior número de modelos, com características variáveis, a fim de entender o funcionamento real dessa ferramenta no TQS.

O SISE também pode, e deve, ser estudado mais a fundo, buscando avaliar quais mudanças na estrutura apresentam valores mais críticos na variação do γ_z .

REFERÊNCIAS

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

ALVES, E.C., FEITOSA, L.A. *Análise da estabilidade global de edifícios altos em lajes lisas considerando a interação solo estrutura*. 16f. Anais do 58º congresso Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte, 2016.

COELHO, A.O.L. *Influência das etapas de construção e carregamento na análise de pórticos planos em edifícios altos*. 255f. Dissertação - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

DANZIGER, B.R., CARVALHO, E.M.L., COSTA, R.V., DANZIGER, F.A.B. *Estudo de caso de obra com análise da interação solo estrutura*. 12f. Revista Engenharia Civil. nº 23, p. 43-54, 2005.

FEITOSA, L.A., *Estudo da estabilidade global de edifícios de múltiplos andares com lajes lisas*. 182f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

GORZA, L.S., *Análise incremental construtiva de edifício metálicos de andares múltiplos usando o método dos elementos finitos*. 328f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.

GUSMÃO, A.D., *Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações*. 189f. Tese - Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

PAIXÃO, J.F.M., ALVES, E. C *Análise de estabilidade global em edifícios altos com lajes nervuradas*. 16f. Anais do 58º congresso Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte, 2016.

PRADO, J.F.M.A., CORRÊA, M.R.S. *Estruturas de edifícios em concreto armado submetidas a ações de construção*. 29f. Cadernos de Engenharia de Estruturas, n. 19, p. 51-79, São Carlos, 2002.

PASSOS, V. M. ; FEITOSA, L. A. ; ALVES, E. C.; AZEVEDO, M. S . *Instability Analysis of Tall Buildings with Prestressed and Waffle Slabs*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 9, p. 244-252, Abril 2016.

SAVARIS, G., HALLAK, P.H., MAIA, P.C.A. *Influence of Foundation Settlements in Load Redistribution on Columns in a Monitoring Construction – Case Study*. Revista IBRACON de estruturas e materiais, Vol 3, nº 3, p. 346 - 356, set, 2010.