



XIV Congresso Brasileiro
de Pontes e Estruturas

Análise de estabilidade global em edifícios de concreto armado sob a influência da interação solo-estrutura.

Bernardo Gracioli Sá Gomes¹

Julio Jeronimo Holtz Silva Filho²

¹ Cerne Engenharia e Projetos LTDA / bernardogracioli@poli.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas / julioholtz@poli.ufrj.br

Resumo

Com o desenvolvimento das cidades no Brasil e no mundo, os espaços urbanos têm sido fortemente valorizados, o que tem gerado a tendência da verticalização das construções, que estão se tornando cada vez mais altas a fim de se aproveitar de forma bem otimizada as áreas disponíveis para construção. Nessas edificações, a estabilidade global é um fator chave que influencia não só a sua saúde estrutural, como também o conforto dos seus usuários. Esse aspecto acena para a importância de que seja realizada uma análise bem detalhada dos efeitos globais de segunda ordem das estruturas, bem como dos fatores que contribuem para o seu aumento. Nos projetos usuais de edificações, é comum a simplificação, por parte dos engenheiros estruturais, de que a fundação da estrutura funciona como apoios perfeitamente rígidos. No entanto, essa consideração gera resultados subestimados para os deslocamentos laterais da estrutura que, na realidade, se comporta de maneira diferente. Assim, a forma como se considera o solo e as fundações no projeto pode ser determinante para uma boa análise de estabilidade. Neste trabalho, busca-se avaliar a influência da interação solo-estrutura (ISS) na análise dos efeitos globais de segunda ordem em edificações em concreto armado, o que poderá servir como uma nova via para estudos mais precisos da estabilidade de edifícios. Com auxílio dos *softwares* comerciais Atir STRAP, CAD/TQS e CYPECAD, foram elaborados modelos tridimensionais de uma mesma edificação, com diferentes abordagens para a ISS. Com os resultados obtidos, foi realizada uma análise comparativa dos parâmetros de instabilidade para cada situação, segundo as recomendações da NBR 6118:2014.

Palavras-chave

Interação solo-estrutura; Efeitos de segunda ordem; Estabilidade global; Estruturas de concreto armado.

Introdução

A crescente tendência por construções cada vez mais altas como forma de otimização do aproveitamento de pequenas áreas é um aspecto que abre espaço para uma discussão de extrema importância no projeto de estruturas deste tipo: a análise de estabilidade global. Estruturas esbeltas devem ser projetadas de forma a se garantir o conforto e segurança de seus usuários, e, para isso, é necessário que a concepção dessas edificações contemple soluções que garantam à estrutura sua estabilidade dentro dos padrões de segurança determinados normativamente. Para tal, é necessário que esse estudo seja realizado de forma rigorosa, buscando representar a edificação da forma mais fiel à realidade possível, a fim de se ter uma concepção estrutural baseada em como a estrutura se comportará com todos os aspectos que influenciam na sua estabilidade.

Nos projetos de estruturas de edificações, é comum, por parte dos engenheiros estruturais, a simplificação que consiste em considerar os apoios da estrutura como engastes perfeitos, isto é, apoios rígidos. No entanto, sabe-se que as fundações das edificações não se comportam dessa maneira. Este trabalho busca analisar a estrutura e seu solo de fundação como um conjunto – análise que é comumente chamada de interação solo-estrutura – permitindo assim uma representação a partir de uma modelagem que simule da melhor forma possível a estrutura e suas condições de apoio.

Não linearidade física

Apesar de ser uma comum simplificação considerar que o concreto responde a tensões linearmente, na realidade ele é um material que possui um comportamento não-linear. Isso se deve a diversos fatores, como fissuração, escoamento da armadura, fluência, entre outros (PINTO, 1997).

Em uma análise de tensão-deformação linear, isto é, quando não se considera a não-linearidade física (NLF), para qualquer tensão aplicada no material, obtém-se uma deformação linearmente proporcional a ela. Dessa forma, o módulo elástico, dado pela razão entre a tensão aplicada e a deformação observada é constante, ou seja, segue um gráfico de reta (vide figura 1a). Por outro lado, em uma análise não-linear, para cada tensão que se aplique ao concreto, resultam-se em valores de deformação com uma resposta não-proporcional, formando-se então uma curva (figura 1b), ou seja, o módulo de elasticidade não é mais constante, pois, para cada tensão σ_i aplicada, recebe-se uma diferente resposta E_{c_i} .

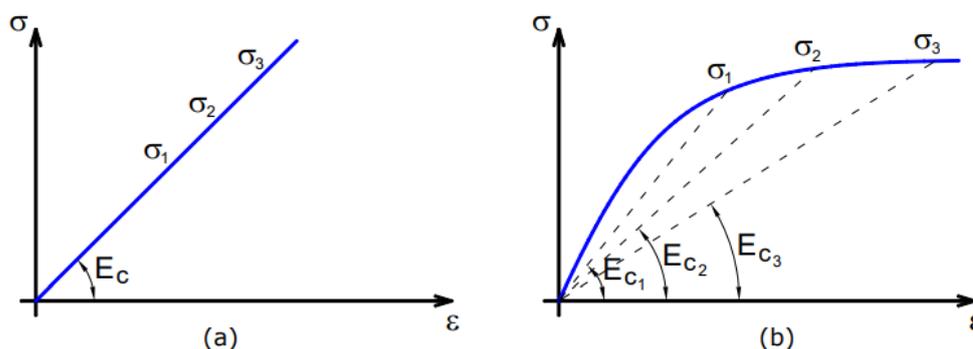


Figura 1 – Diagramas tensão-deformação linear (a) e não-linear (b) do concreto (MONCAYO, 2011).

A análise não-linear de estruturas de concreto é algo que demanda um auxílio computacional importante, o que dificulta sua execução. Por conta disso, a ABNT NBR6118:2014 permite a consideração da NLF, de forma simplificada, por meio da redução das rigidezes dos elementos estruturais. O item 15.7.3 apresenta os valores destes coeficientes redutores, que podem ser utilizados para estruturas reticuladas com no mínimo 4 pavimentos.

Tabela 1 – Redução da rigidez dos elementos estruturais.

Rigidez dos elementos estruturais $(EI)_{sec}$	
Lajes	$0,3 E_{ci}I_c$
Vigas com $As \neq As'$	$0,4 E_{ci}I_c$
Vigas com $As = As'$	$0,5 E_{ci}I_c$
Pilares	$0,8 E_{ci}I_c$

Não linearidade geométrica

Ao ser solicitada horizontalmente uma estrutura apresenta deslocamentos nesta mesma direção. Em edifícios, isso acontece devido a ações como o vento e imperfeições geométricas. Tomando como exemplo um pilar engastado e livre, com uma força horizontal e outra vertical agindo em seu topo. Em um primeiro momento, imediatamente antes das forças atuarem sobre o pilar, ele se encontra na vertical, sem qualquer deslocamento. Quando a força horizontal atua, a estrutura se desloca lateralmente. A força vertical, que antes tinha sua linha de ação no eixo do pilar, agora encontra-se excêntrica. Isto é, ela gera um acréscimo de momento na base do pilar que, quando estava na vertical, não existia.

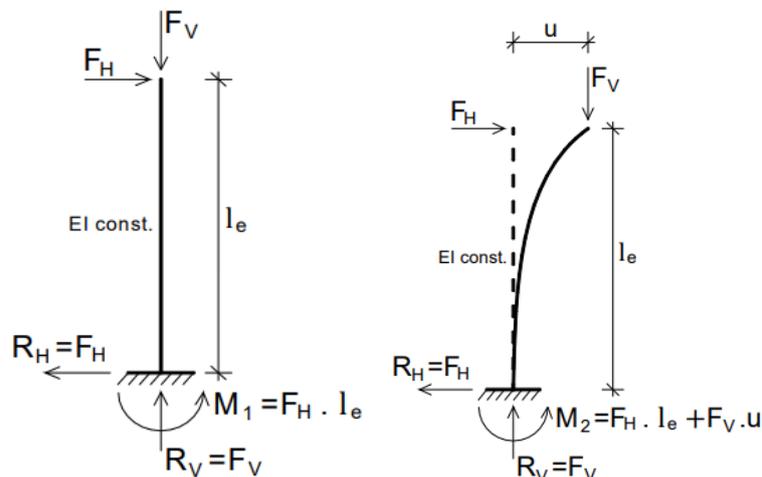


Figura 2 – Análise não-linear geométrica de um pilar (MONCAYO, 2011).

A análise que contempla a não-linearidade geométrica é aquela em que o equilíbrio é estudado não somente com a estrutura na sua posição original, mas também na condição deslocada (PINTO, 1997).

Efeitos de Segunda Ordem

Segundo a NBR6118:2014, efeitos globais de segunda ordem são os esforços provenientes do deslocamento horizontal dos nós da estruturas solicitada vertical e horizontalmente. Uma estrutura inicialmente indeformada, ao ser solicitada, apresenta esforços primários, que causam deslocamentos. Esses esforços primários, devido à deformação da estrutura, gera então acréscimos de esforços com os carregamentos verticais agindo de forma excêntrica. Esses acréscimos são denominados efeitos de segunda ordem.

O fator condicionante para a necessidade de consideração dos efeitos de segunda ordem em projetos de edificações de concreto é o grau de deslocabilidade. Estruturas podem ser classificadas quanto à deslocabilidade como de nós fixos ou de nós móveis. Estruturas de nós fixos são aquelas cujos efeitos de segunda ordem são inferiores a 10% dos efeitos de primeira ordem. Quando este valor é superado, é considerada de nós móveis. As estruturas de nós móveis devem obrigatoriamente contemplar a consideração dos efeitos de segunda ordem no seu projeto.

Estabilidade Global

A NBR6118:2014 define o Estado Limite Último de Instabilidade como quando, do aumento da intensidade de um carregamento, e conseqüentemente das deformações de uma estrutura, há elementos solicitados a flexo-compressão, e o aumento da resistência se torna inferior ao crescimento da sollicitação.

A estabilidade global está diretamente ligada à ordem de grandeza dos efeitos de segunda ordem em relação aos efeitos de primeira ordem. Quando a estrutura é estável, os deslocamentos horizontais convergem a uma posição final de equilíbrio. Quando não há essa convergência, por outro lado, a estrutura é instável.

A NBR6118:2014 apresenta algumas formas de classificar edificações quanto à estabilidade global, a partir do cálculo de parâmetros de instabilidade. Desses parâmetros é que se estuda a necessidade ou não da consideração dos esforços de segunda ordem no projeto do edifício.

Coefficiente γ_z

O coeficiente γ_z foi introduzido como parâmetro de instabilidade por FRANCO e VASCONCELOS (1991). Este parâmetro relaciona os momentos de tombamento das ações horizontais com os momentos de segunda ordem causados pela atuação dos carregamentos verticais na estrutura deslocada. Além de servir para classificar uma estrutura quanto à sua estabilidade, o coeficiente γ_z é também um ponderador das ações para contemplar os efeitos globais de segunda ordem na estrutura. Seu cálculo é realizado a partir da fórmula:

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

Onde:

$M_{1,tot,d}$ é o momento de tombamento da estrutura causado pelo somatório das forças horizontais na estrutura, em suas combinações de cálculo;

$\Delta M_{tot,d}$ é o acréscimo de momento na base da estrutura, caracterizado pela soma dos produtos de todas as forças verticais pelo deslocamento horizontais dos seus respectivos pontos de aplicação originais da análise de primeira ordem.

Quando uma estrutura apresenta valor de $\gamma_z \geq 1,1$, é considerada de nós móveis, sendo então obrigatória a consideração dos efeitos de segunda ordem no projeto. Essa consideração, segundo a norma brasileira, pode ser realizada a partir da majoração dos efeitos de primeira ordem, multiplicando-os por $0,95\gamma_z$. Isso é permitido em estruturas em que o coeficiente é inferior a 1,3. Quando ultrapassado esse valor, são necessárias análises mais complexas.

Parâmetro α

Este é outro parâmetro de instabilidade largamente utilizado por calculistas para a classificação da estabilidade global de estruturas. Foi inicialmente deduzido por BECK e KÖNIG, em 1967, mas foi FRANCO (1985) quem o introduziu como parâmetro de instabilidade.

$$\alpha = H_{tot} \sqrt{N_k / E_{CS} I_c} \quad (2)$$

Sendo:

$$\alpha_1 = 0,2 + 0,1n, \text{ se } n \leq 3$$

$$\alpha_1 = 0,6, \text{ se } n \geq 4$$

Onde:

n é o número de níveis com barras horizontais acima das fundações da estrutura;

H_{tot} é a altura total da edificação, em metros;

N_k é o somatório de todos os carregamentos verticais atuantes sobre a estrutura, em seu valor característico.

$E_{CS}I_c$ é o somatório das rigidezes secantes de todos os pilares na direção em que está sendo considerado o cálculo.

O valor limite $\alpha_1 = 0,6$ é considerado para edificações usuais em concreto armado. Em estruturas associadas de pórticos e pilares-paredes, deve-se tomar $\alpha_1 = 0,6$. Já para edificações contraventadas exclusivamente por pilares-paredes, $\alpha_1 = 0,7$, e nos casos onde o contraventamento é realizado apenas por pórticos, deve-se tomar $\alpha_1 = 0,5$ (item 15.5.2 da NBR 6118:2014).

Interação solo-estrutura

Chama-se de interação solo-estrutura o estudo em conjunto de uma estrutura e do solo sobre o qual ela está fundada. Em projetos convencionais de estruturas de edificações, é comum a consideração de que os apoios são engastes perfeitos. No entanto, isso não reflete a real condição de apoio da estrutura. Sabe-se que o solo é um material deformável, o que faz com que as fundações possam não só transladar como rotacionar. Por conta disso, é de grande importância a análise conjunta da estrutura com o solo, a fim de se ter uma representação o mais eficiente possível de como a edificação se comporta na realidade.

O solo pode ser representado de maneiras diferentes em um projeto. Dos modelos existentes, dois se destacam como as soluções mais convencionais – os modelos de Winkler e os modelos de meio contínuo.

Hipótese de Winkler

Os modelos de Winkler se baseiam na hipótese de que os recalques das fundações são proporcionais às pressões de contato entre a infraestrutura e o solo, conforme a equação análoga à Lei de Hooke:

$$p = k_v w \quad (3)$$

Onde:

p é a pressão de contato [F/L²]

w é o recalque devido à pressão aplicada [L]

Na equação, k_v [F/L³] é o coeficiente de reação do solo. Nesse modelo, o solo tem comportamento semelhante a uma mola que se deforma proporcionalmente ao carregamento que sofre. Por conta disso, também é chamado de modelo de molas.

Meio Contínuo

O modelo de meio contínuo consiste em um meio tridimensional elástico, e se difere da hipótese de Winkler pela seguinte razão: enquanto no modelo de molas os deslocamentos ocorrem apenas na região onde se aplica o carregamento, no modelo de meio contínuo eles não se restringem a essa área.

Parâmetros de cálculo e modelos

As análises realizadas neste trabalho são divididas em três conhecidos softwares comerciais de análise e dimensionamento de estruturas – Atir STRAP, sistema CAD/TQS, e o software espanhol CYPECAD.

Tabela 2 – Propriedades do concreto.

Propriedades do Concreto	
Peso específico	25 kN/m ³
Resistência característica a compressão (f_{ck})	30 MPa
Módulo de elasticidade (1,1 E_{cs})	29522 MPa
Coefficiente de Poisson	0,3

A não-linearidade física do concreto foi considerada de forma aproximada conforme orienta a NBR6118:2014. Os coeficientes adotados são os mesmos já apresentados anteriormente na tabela 1.

Em relação às ações assumidas nos modelos, a tabela 3 resume os valores adotados para cada natureza de carregamento.

Tabela 3 – Carregamentos adotados nos modelos.

Natureza do carregamento		Carga
Peso próprio		25 kN/m ³
Carga Permanente		2,0 kN/m ²
Sobrecarga		2,0 kN/m ²
Carga variável	Vento	V0=35m/s
		S1=S3=1,00
		Categoria IV, Classe B

No primeiro caso – software STRAP – foram elaborados quatro modelos do mesmo edifício, sendo que o primeiro deles não considera os efeitos da interação solo-estrutura (apoios engastados), e os outros três simulam a ISS por meio do uso de molas de Winkler, diferenciando-se entre si para o tipo de solução de fundação (rasas ou profundas).

Já no software TQS, três modelos foram analisados, dos quais o primeiro não considera a ISS, o segundo a considera com solução de fundações rasas, e o último em fundações profundas.

- Modelo S1: Sem ISS – apoios indeslocáveis – STRAP
- Modelo S2A: Com ISS – sapatas isoladas – STRAP
- Modelo S2B: Com ISS – apoios elásticos – STRAP
- Modelo S3: Com ISS – estacas – STRAP
- Modelo T1: Sem ISS – apoios indeslocáveis – CAD/TQS
- Modelo T2: Com ISS – sapatas isoladas – CAD/TQS
- Modelo T3: Com ISS – estacas – CAD/TQS
- Modelo C1: Apoios 100% engastados – CYPECAD
- Modelo C2: Apoios 80% engastados – CYPECAD
- Modelo C3: Apoios 60% engastados – CYPECAD
- Modelo C4: Apoios 40% engastados – CYPECAD
- Modelo C5: Apoios 20% engastados – CYPECAD
- Modelo C6: Apoios articulados – CYPECAD

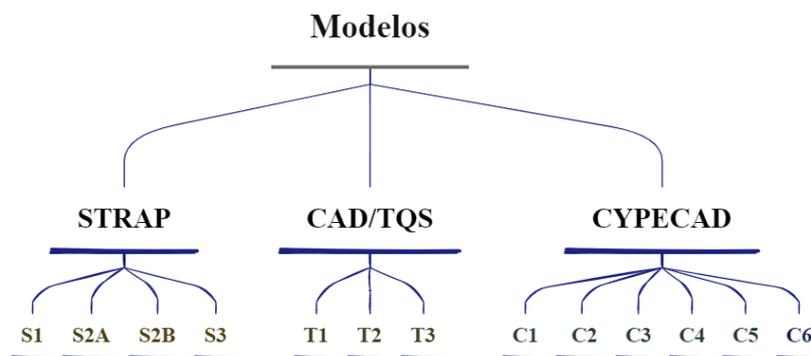


Figura 3 – Modelos analisados no trabalho.

A edificação estudada se trata de uma estrutura em concreto armado, com soluções em lajes maciças, vigas e pilares, com 11 pavimentos no total, integralizando uma altura, do apoio à cobertura, de 31,50 metros. As figuras 4 e 5 apresentam a planta de fôrmas e esquema de elevação da estrutura, bem como as vistas tridimensionais dos modelos.

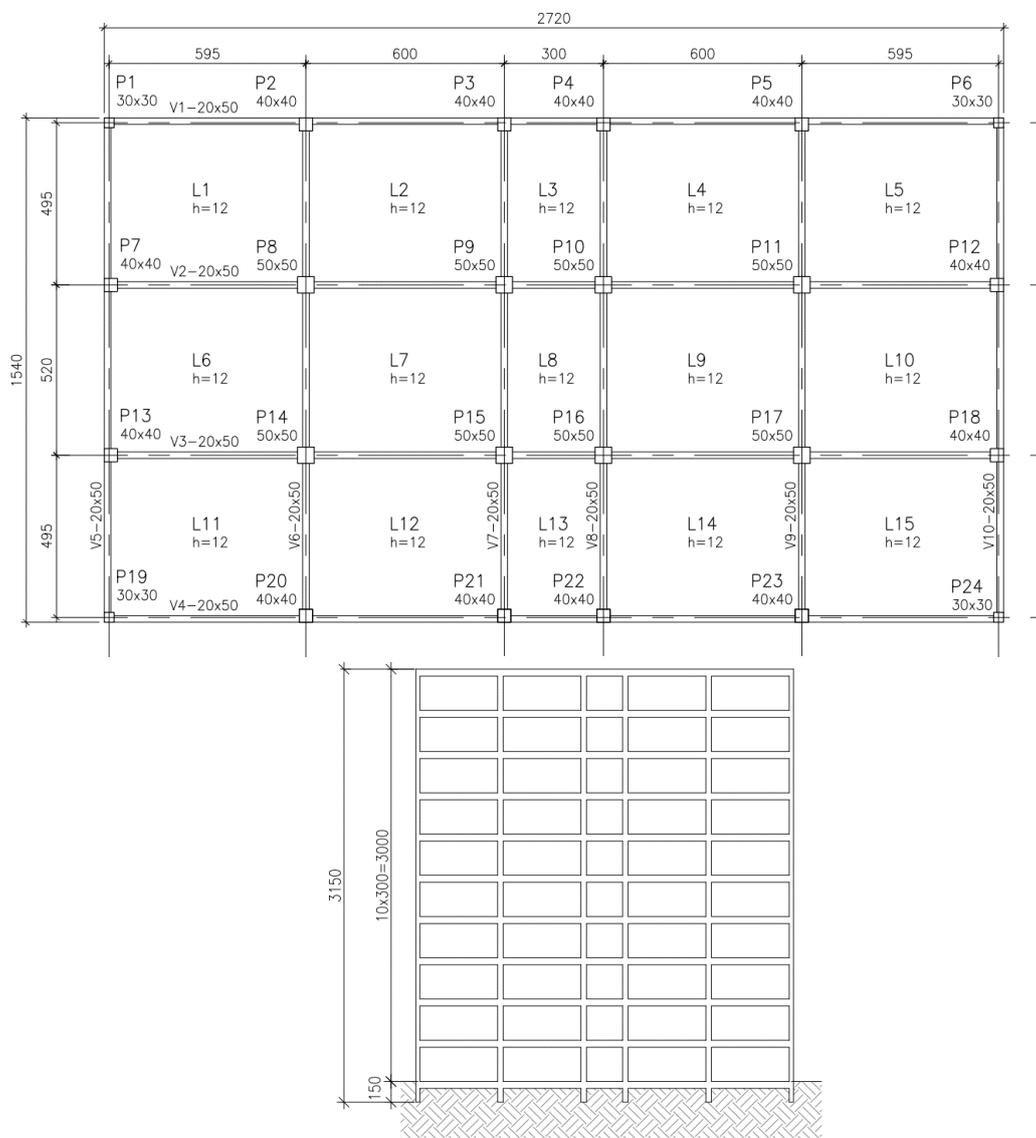


Figura 4 – Planta de fôrmas e elevação da estrutura.

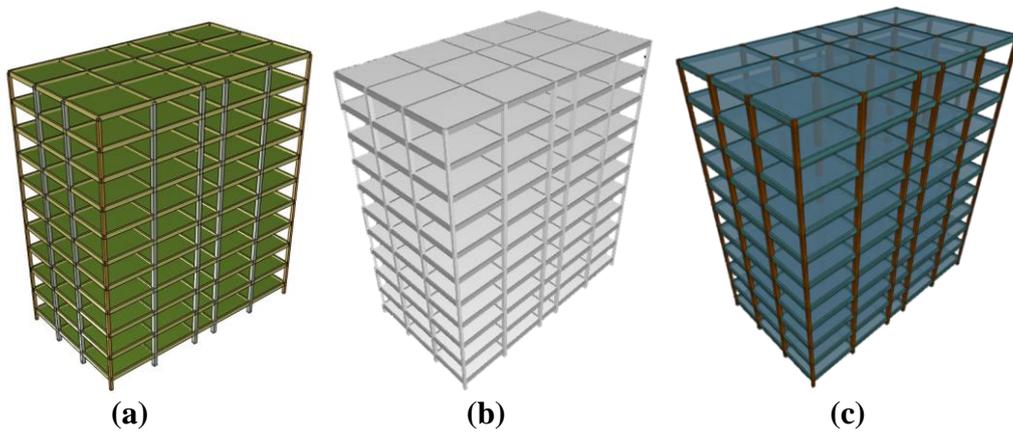


Figura 5 – Vistas renderizadas dos modelos – (a) STRAP; (b) CAD/TQS; (c) CYPECAD.

Resultados

Após o processamento dos modelos computacionais elaborados em cada software, são apresentados os valores obtidos de seus parâmetros de instabilidade.

Tabela 4 – Parâmetros e instabilidade – Resumo.

Modelo	Coeficiente γ_z		Parâmetro α	
	Direção x	Direção y	Direção x	Direção y
S1	1,092	1,097	0,455	0,472
S2A	1,100	1,101	0,479	0,495
S2B	1,114	1,116	0,489	0,509
S3	1,104	1,107	0,486	0,500
T1	1,082	1,084	0,481	0,487
T2	1,108	1,111	0,535	0,548
T3	1,103	1,106	0,532	0,543
C1	1,048	1,051	0,375	0,384
C2	1,048	1,051	0,376	0,385
C3	1,048	1,051	0,377	0,386
C4	1,049	1,052	0,378	0,388
C5	1,050	1,054	0,381	0,391
C6	1,053	1,057	0,388	0,398

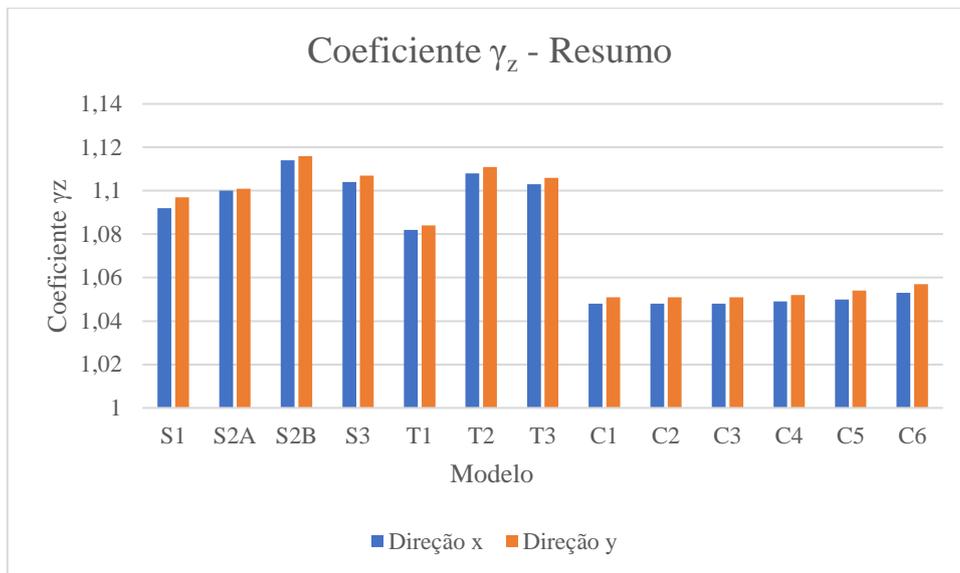


Figura 6 – Coeficiente γ_z - Resumo.

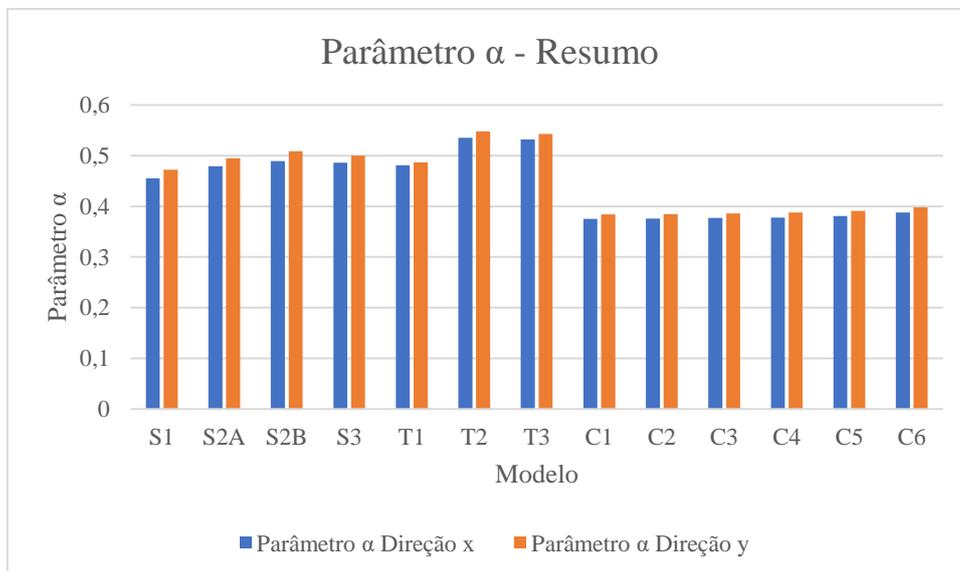


Figura 7 – Parâmetro α - Resumo.

A partir dos valores de parâmetros de instabilidade obtidos pelos modelos analisados, é possível observar algumas conclusões importantes no trabalho.

Em todas as análises que não levaram em conta a ISS, a estrutura foi classificada como de nós fixos. Por outro lado, os modelos que consideraram esses efeitos se mostraram todos mais deslocáveis, dentro das análises de cada software. Dessas últimas, todas foram classificadas, pelo menos por um dos dois parâmetros de instabilidade analisados, como estruturas de nós móveis, sendo assim necessária a consideração dos efeitos de segunda ordem.

Dentre os modelos onde a ISS foi levada em conta, em geral, os modelos do TQS se mostraram mais deslocáveis do que seus equivalentes no STRAP. Há dois fatores a que podem ser atribuídas essas diferenças. Um deles é o fato de que esse software adiciona o peso próprio dos elementos de fundação ao carregamento vertical no cálculo dos parâmetros de instabilidade, o que aumenta seus valores. O segundo fator, especificamente nos modelos com fundações em estacas, é que os valores dos coeficientes de reação considerados pelo TQS são diferentes dos valores típicos existentes na bibliografia, que foram adotados no STRAP.

Os modelos C1 a C6, do software CYPECAD, apresentou resultados consideravelmente menores dos parâmetros de instabilidade em relação aos outros dois programas. Essa discrepância pode ser explicada devido ao fato de que a consideração da NLF é realizada de forma diferente, seguindo um critério que não é mais aceito atualmente pela norma.

Conclusões

A estabilidade global é um fator chave na concepção de projetos de edificações altas. Por conta disso, é sempre necessário que sejam realizadas análises que sejam confiáveis. A determinação dos parâmetros de instabilidade é mais eficaz quando se analisa não somente a superestrutura da edificação, mas o conjunto formado por ela e o solo em que está fundada. Com isso, é possível obter resultados a favor da segurança, garantindo um projeto mais confiável.

Neste trabalho, foi possível constatar que a simplificação de se utilizar apoios rígidos nos projetos de estruturas é contra a segurança no que diz respeito à estabilidade global das edificações. Os resultados obtidos nas análises mostraram que, ao se lançar mão desta hipótese, uma estrutura pode acabar sendo considerada como de nós fixos, enquanto, numa análise mais fiel à realidade, ela seria classificada como de nós móveis. No primeiro caso, a estrutura não precisaria ter em seu projeto a contemplação dos efeitos de segunda ordem. Ou seja, esses efeitos acabariam sendo negligenciados quando na verdade deveriam ser levados em conta, tornando o projeto menos seguro e confiável.

Em relação aos softwares utilizados, ambos o STRAP e TQS obtiveram resultados satisfatórios. Enquanto isso, o CYPECAD apresentou parâmetros de instabilidade consideravelmente abaixo dos outros modelos, indo contra a segurança. Foi constatado que esse software possui uma análise de estabilidade obsoleta, que utiliza critérios de consideração da NLF não mais vigente na norma brasileira atual.

Referências

- ANTONIAZZI, J. P. Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, 1988, NBR6123: Forças devidas ao vento em edificações - Procedimento, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, 2003, NBR6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, 2014, NBR6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, 2019, NBR6122: Projeto e execução de fundações, Rio de Janeiro.
- CYPE INGENIEROS S.A., 2021. CYPECAD – Manual do utilizador.
- GOMES, B. G. S. Análise de estabilidade global em edifícios de concreto armado sob a influência da interação solo-estrutura. 2022. 117 f. Projeto de Graduação – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Poli-UFRJ.
- MONCAYO, W. J. Z. Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado. 2011. 221 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC-USP.
- PINTO, R. S. P. Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado. 1997. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC-USP.
- TQS INFORMÁTICA. TQS Docs. São Paulo, 2016. Disponível em: <http://docs.tqs.com.br/>.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R., 2004. Fundações. Vol. completo. Editora Oficina de Textos, São Paulo.