

Analysis of instability of tall buildings with prestressed and waffle slabs

Análise da instabilidade de edifícios altos com lajes protendidas e lajes nervuradas

V. M. PASSOS^a
vmelopassos@gmail.com

L. A. FEITOSA^a
leofeitososa@gmail.com

E. C. ALVES^a
elcio.calves1@gmail.com

M. S. AZEVEDO^a
macksuel.azevedo@gmail.com

Abstract

The construction system of prestressed flat slabs has been gaining market in Brazil, since it eliminates the use of beams, allows you to perform structures under colons by area and reduces the cycle of concrete slabs. Thus the analysis of global stability of buildings, takes into account the effects of 2nd order, and these additional effects to the structure obtained from the deformation thereof, calculated by the iterative method P-Delta. The Brazilian ABNT NBR 6118: 2014 [2] assesses the overall stability of reinforced concrete structures through practical parameters, which are the parameter α (Alpha) and γ_z (Gamma z) coefficient. In this research we seek to study the global stability of slender buildings consist of flat slabs, with slenderness (ratio of the smaller width with the height of the building) approximately one to six, from the modeling of a building with prestressed slabs nonadherent and waffle slabs. To model will use the commercial software CAD / TQS.

Keywords: global stability, analysis of 2nd order, gamma z, p-delta.

Resumo

O sistema construtivo de lajes planas protendidas vem ganhando mercado no Brasil, pois dispensa o uso de vigas, permite executar estruturas com menos pilares por área e reduz o ciclo de concretagem das lajes. Assim a análise de estabilidade global de edificações, leva em consideração os efeitos de 2ª ordem, sendo estes efeitos adicionais à estrutura obtidos a partir das deformações da mesma, calculadas pelo método iterativo P-Delta. A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 [2] avalia a estabilidade global de estruturas de concreto armado através de parâmetros práticos, sendo estes o parâmetro α (alfa) e o coeficiente γ_z (gama z). Nesta pesquisa busca-se estudar a estabilidade global de edificações esbeltas compostas por lajes planas, com ordem de esbeltez (relação da menor largura com a altura da edificação) de um para seis, a partir da modelagem de uma edificação com lajes protendidas não-aderentes e lajes nervuradas. Para modelagem será utilizado o programa comercial CAD/TQS.

Palavras-chave: estabilidade global, análise de 2ª ordem, gama z, p-delta.

^a Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

1. Introdução

Dentre as tecnologias construtivas de lajes existentes no mercado brasileiro, as lajes planas protendidas e nervuradas se destacam pelo aumento de produtividade e economia de materiais respectivamente. Isto quando comparadas ao sistema de lajes e vigas convencional. Ademais, essas lajes permitem a utilização de vãos livres maiores, redução do consumo de formas, melhor aproveitamento dos materiais e uma maior flexibilidade arquitetônica.

Tendo em vista essas vantagens, propõe-se uma análise da viabilidade da execução de edifícios altos e esbeltos, no que tange à estabilidade global, utilizando-se destes tipos de sistemas construtivos. Nestes tipos de edificações, o contraventamento das mesmas fica a cargo, pelo menos numa primeira análise, do conjunto de pilares que a compõem. Pois, sendo a estrutura desprovida de vigas, não haveria *a priori* a estabilização da edificação por pórticos espaciais. Neste caso, é comum a utilização de pilares-paredes no formato de “U” ou “L” convenientemente posicionados na planta da edificação, conferindo a esta a rigidez necessária em ambas às direções para estabilidade da mesma. Ocorre que lajes protendidas apresentam uma espessura mínima de dezesseis centímetros (Item 13.2.4.1 da ABNT NBR 6118:2014 [2]), sendo comum o uso de pelo menos dezoito centímetros, o que garante o efeito de diafragma rígido e travamento dos pilares, assegurando que todos trabalhem juntos na estabilização da estrutura. No caso de lajes nervuradas, a elevada espessura da laje na região de ligação dos pilares com esta, torna este ponto da estrutura suficientemente rígido para estabilizar a edificação.

A partir da variação de parâmetros tais como a espessura das lajes, seções dos pilares, coeficientes que simulam a não linearidade física dos elementos estruturais, altura do pavimento tipo e resistência característica do concreto, buscou-se avaliar a influência destes na estabilidade global da estrutura proposta.

1.1 Objetivos

O objetivo desta pesquisa consiste na análise de diferentes modelos de cálculo de uma edificação com relação de esbeltez de um para seis, variando em cada modelo o tipo de sistema construtivo de laje adotado: lajes protendidas e lajes nervuradas. Assim, buscar-se-á avaliar os parâmetros de instabilidade da estrutura devido à variação de parâmetros gerais tais como: espessura das lajes, seções dos pilares, coeficientes que simulam a não linearidade física dos elementos estruturais, altura do pavimento tipo e resistência característica do concreto dos elementos entre outros. Para a análise e verificação dos parâmetros de instabilidade, será utilizado software comercial CAD/TQS versão 17.11.8.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Análise não linear

Estruturas de concreto armado apresentam um comportamento não linear relevante, isto é, uma relação não linear entre esforços e deslocamentos, decorrente de sua não linearidade física e geométrica. Tal comportamento é inerente a toda estrutura de concreto armado e deve ser sempre levado em consideração durante a análise estrutural.

A não linearidade física do concreto armado advém do fato deste ser constituído de materiais com propriedades físicas variadas, formando um material anisotrópico, heterogêneo, com módulo de elasticidade que varia em cada ponto da curva do diagrama de tensão-deformação. Adicionalmente, o concreto apresenta uma grande diferença de resistência a esforços de compressão e tração, o que em situação de uso comum, leva à formação de fissuras por tração, reduzindo a capacidade resistente das peças. Além da fissuração, a fluência, a combinação de diferentes esforços e como dito, a própria presença de armaduras também conferem um comportamento não linear ao concreto.

ABNT NBR 6118:2014 [2] utiliza uma simplificação na consideração da não linearidade física. A rigidez dos elementos estruturais é alterada a partir de coeficientes de redução para cada tipo de elemento (vigas, pilares e lajes), de acordo com a influência que este elemento possui para a estabilidade global da estrutura. Esta rigidez reduzida pelo coeficiente é chamada de rigidez efetiva ou rigidez secante.

A norma supracitada torna obrigatória a consideração da não linearidade física e propõe os valores que devem ser adotados para redução da rigidez dos elementos estruturais, sendo estes:

- Lajes: $(EI)_{sec} = 0,3 E_{cl} I_c$
- Vigas:
 - $(EI)_{sec} = 0,4 E_{cl} I_c$ para $A_s \neq A_s'$
 - $(EI)_{sec} = 0,5 E_{cl} I_c$ para $A_s = A_s'$
- Pilares: $(EI)_{sec} = 0,8 E_{cl} I_c$

Onde:

I_c : Momento de inércia da seção bruta de concreto;

E_{cl} : Módulo de deformação tangencial inicial do concreto.

Em sua versão anterior, a ABNT NBR 6118:2007 [1] no seu item 15.7.3 admitia que se o fator de instabilidade global γ_z fosse menor que 1,3 e a estrutura de contraventamento da edificação fosse composta unicamente por pilares e vigas, a rigidez efetiva ou secante de pilares e vigas poderia ser assumida como:

- Pilares e Vigas: $(EI)_{sec} = 0,7 E_{cl} I_c$

No entanto, tal consideração foi subtraída em sua nova versão de 2014. Ocorre que, a fissuração de elementos protendidos (lajes e vigas) é menor quando comparada à fissuração de um elemento de concreto armado. Assim, seria interessante estudar a possibilidade da utilização de coeficientes de redução com valores maiores que os apontados pela norma atual, ou a manutenção dos valores da versão anterior da norma e a extensão do valor de 0,7 para as lajes, quando esta for protendida e atuar como elemento resistente aos esforços horizontais, isto é, compor o sistema de contraventamento global da estrutura.

Ainda que constituída de um material que apresente uma relação tensão-deformação linear, uma estrutura pode ter um comportamento não linear ao sofrer grandes deslocamentos. A deformação lateral de um componente estrutural leva ao aparecimento de momentos fletores adicionais (momentos de segunda ordem), devido à nova posição do esforço vertical. Esse comportamento é chamado de não linearidade geométrica, por não apresentar uma relação linear entre esforços e efeitos.

Para realizar a análise estrutural considerando a não linearidade geométrica, a ABNT NBR 6118:2014 [2] utiliza uma formulação de segurança para a combinação de ações. As ações são majoradas pelo fator g_f / g_{f3} , e em seguida, os esforços solicitantes são majorados pelo fator g_{f3} , sendo este fator igual a 1,1.

2.2 Efeitos de 2ª ordem

A análise de 1ª ordem considera a estrutura com sua configuração geométrica indeformada para a análise estrutural. A partir da consideração da configuração geométrica deformada da estrutura, surgem solicitações adicionais no sistema estrutural denominadas efeitos de 2ª ordem, ou seja, esses efeitos são adicionais à estrutura, oriundos de sua deformação. Portanto, este efeito é responsável pelo comportamento não linear da estrutura. Um das formas de levar em consideração este efeito na estrutura é a utilização do Método Iterativo P-Delta (P- Δ).

O método iterativo P-Delta é utilizado na análise de 2ª ordem das estruturas, o qual transforma os deslocamentos laterais em forças horizontais equivalentes. Ao realizar a análise de 1ª ordem de uma estrutura, considerando sua configuração inicial indeformada, obtêm-se os deslocamentos, os quais serão base para a definição das cargas horizontais fictícias equivalentes ao carregamento de 2ª ordem. A cada análise, novas forças laterais fictícias são obtidas, que tendem a diminuir devido à estrutura atingir uma posição de equilíbrio. A iteração do método só é interrompida quando o efeito da carga fictícia é pequeno comparado ao efeito da carga anterior ou quando for verificado que a estrutura pode não ter estabilidade global.

2.3 Estabilidade global

A estabilidade global das estruturas é definida como sua sensibi-

lidade aos efeitos de 2ª ordem, sendo esta relação proporcionalmente inversa, ou seja, quanto mais sensível a estrutura for aos efeitos de 2ª ordem, menos estável ela será.

A norma brasileira ABNT NBR 6118:2014 dispensa a consideração das solicitações de 2ª ordem se estas não forem em intensidade maiores que 10% das solicitações de 1ª ordem. Assim, é sempre necessária à realização da análise 2ª ordem, independente se estes efeitos serão utilizados para dimensionar a estrutura. A norma prevê o coeficiente γ_z (Gama Z) e o parâmetro α (alfa) para auxiliar na decisão de se considerar os efeitos de 2ª ordem.

O coeficiente de instabilidade γ_z foi introduzido por Franco e Vasconcelos (1991) [5], o qual mensura a sensibilidade da estrutura aos efeitos de 2ª ordem, também podendo ser utilizado para majorar os efeitos de 1ª ordem devido às cargas horizontais para obtenção de efeitos aproximados de 2ª ordem. O coeficiente γ_z é definido por:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{nM_d}{M_{1d}} * \frac{1}{1,1}} \quad (1)$$

Onde:

ΔM_d : É a soma dos produtos de todas as forças verticais que atuam na estrutura, pelos deslocamentos horizontais aplicados

Figura 1 - Arquitetura x estrutura - pavimento tipo - laje protendida - Modelo 01/01

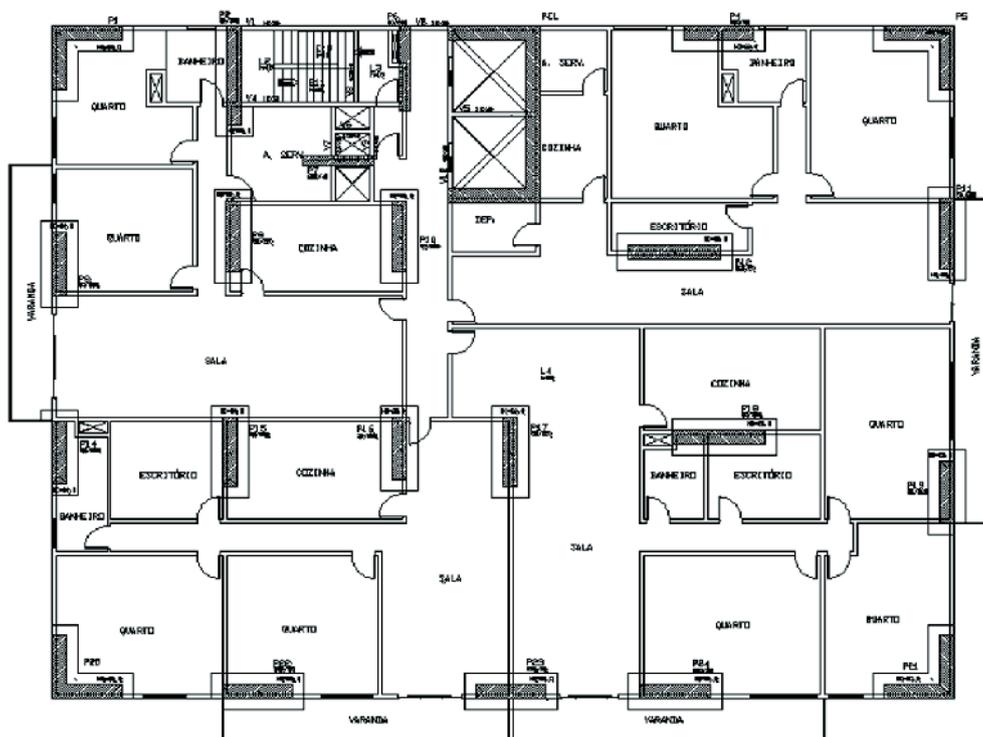
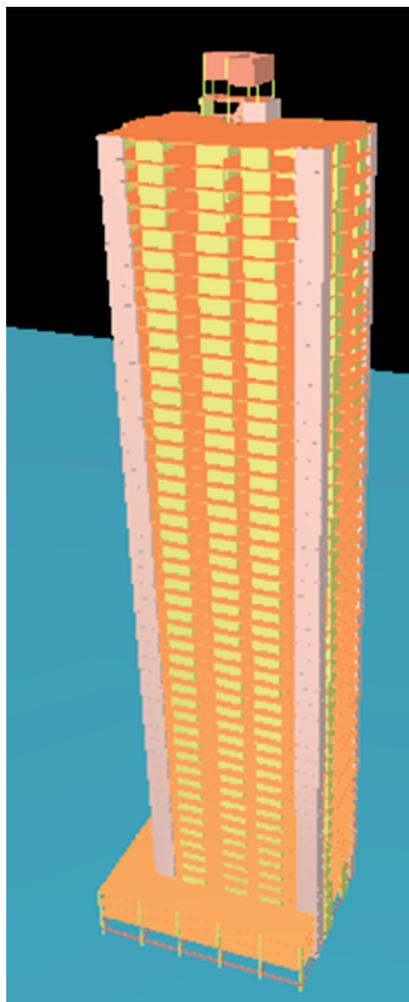


Figura 2 – 3D – Edifício com laje protendida –Modelo 01/01



em seus respectivos pontos, os quais são obtidos na análise de 1ª ordem;

M_{1d} : É o momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos produzidos pelas forças horizontais em relação à base da estrutura. Feitosa e Alves (2014) [6], apresenta um estudo sobre a a instabilidade global de edifícios com relação $h/4$ com lajes lisas. Nesse estudo é apresentada a influência do efeito da não linearidade e o impacto no coeficiente de instabilidade γ_z .

2.4 Principais Fatores que Influenciam na estabilidade global

Dentre os vários fatores que influenciam na estabilidade global de edifícios, destaca-se o carregamento vertical e a rigidez da estrutura como os de maior influência na estabilidade global. O parâmetro γ_z indica essa relevância em sua formulação, pois, quando do aumento do carregamento vertical, verifica-se um aumento no valor do co-

eficiente γ_z para um mesmo carregamento horizontal. Já o aumento do carregamento horizontal não gera um aumento no valor do coeficiente γ_z , pois os esforços de 1ª ordem e 2ª ordem aumentam na mesma proporção, ou seja, $\Delta M_d / M_{1d}$ permanece constante.

Quanto à rigidez da estrutura, quanto mais rígida esta for, menores serão seus deslocamentos e, conseqüentemente, menores serão os momentos de 2ª ordem, resultando na diminuição do coeficiente γ_z .

3. Modelos

Os modelos da edificação ora apresentam lajes planas protendidas, ora apresentam lajes nervuradas. Adotou-se uma relação de esbelteza de um para seis, isto é, para uma largura de 24 metros, medida pela extremidade dos pilares de canto, tem-se uma altura de 144 metros para a edificação. Ressalta-se que esta relação de esbelteza retrata a geometria da torre, não incluindo o embasamento da edificação modelo. A partir de uma planta arquitetônica, a qual foi concebida geometricamente assimétrica, foi feita a modelagem dos edifícios no software CAD/TQS para avaliar a influência dos parâmetros disponíveis no programa sob o parâmetro de instabilidade γ_z e nos deslocamentos laterais.

3.1 Modelo de análise VI do CAD/TQS

O modelo de cálculo VI do CAD/TQS simula o edifício como um pórtico único, o qual é composto por elementos que simulam as lajes, vigas e pilares da estrutura. Assim, as lajes passam a contribuir na resistência aos esforços oriundos do vento, bem como vigas e pilares. As ligações entre vigas e pilares são consideradas como semi-rígidas.

3.2 Modelo de análise VI do CAD/TQS

A TQS Informática LTDA desenvolveu um coeficiente nomeado RM2M1 para representar a intensidade dos esforços de segunda ordem em relação aos esforços de primeira ordem. Para tanto, são considerados os esforços de 2ª ordem oriundos do método iterativo P-Delta. RM2M1 é dado por:

$$RM2M1 = 1 + \frac{M_2}{M_1} \quad (2)$$

Onde:

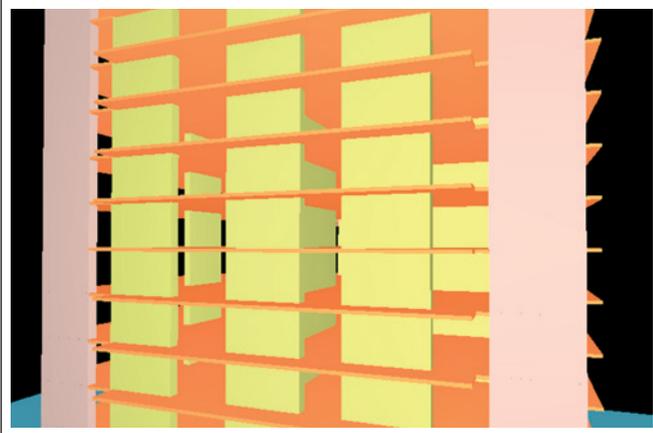
M_1 : É o momento das forças horizontais em relação à base do edifício;

M_2 : É a somatória das forças verticais multiplicadas pelos deslocamentos dos nós da estrutura sob a ação das forças horizontais, resultantes do cálculo de P-Delta em uma combinação não linear.

3.3 Descrição dos modelos

Primeiramente, modelou-se a edificação proposta na Figura 1 (p.15) com laje lisa e variou-se a seção transversal dos pilares até que fosse atingido um valor próximo do limite do coeficiente γ_z preconizado pela ABNT NBR 6118:2014 [2]. Este modelo, ora nomeado 01/01, foi a base dos modelos subsequentes e o valor do γ_z encontrado foi de 1,297 (vento 90°-270°). A Figura 2 (p.16)

Figura 3 – 3D – pavimento tipo – laje protendida – Modelo 01/01



mostra o 3D da estrutura e a Figura 3 mostra o 3D com detalhe da laje lisa protendida.

No Modelo 01/02, alterou-se a espessura do pilar do elevador (núcleo rígido), a fim de avaliar se o acréscimo de rigidez deste geraria uma redução significativa no valor do coeficiente γ_2 .

Para o modelo 01/03, aumentou-se a espessura da laje, pois, no

modelo de análise VI do CAD/TQS, a rigidez à flexão transversal das lajes é considerada no pórtico. Assim, as lajes passam a contribuir na resistência aos esforços horizontais. Deste modo, o aumento da espessura da laje, significaria um aumento na rigidez do sistema de contraventamento. O acréscimo de peso decorrente do aumento da espessura da laje, seria compensado pelo aumento da rigidez da mesma, como afirma FEITOSA e ALVES (2015) [6]. Já no Modelo 01/04, reduziu-se o pé direito dos pavimentos tipo, aumentando assim a rigidez do pórtico, dada à diminuição do comprimento destravado dos pilares.

Como dito anteriormente, em lajes e vigas protendidas o nível de fissuração é menor que no concreto armado. Assim, no Modelo 01/05, aumentou-se o valor dos coeficientes que consideram a não linearidade física desses elementos.

Finalmente, no Modelo 01/06, contemplaram-se todas as alterações dos modelos anteriores a fim de reduzir a seção dos pilares e avaliar a redução de consumo de concreto dos pilares em relação ao consumo total. Os dados dos modelos de lajes lisas protendidas seguem na Tabela 1.

Partindo-se do Modelo 01/01, alterou-se o método construtivo para lajes nervuradas conforme apresentado na Figura 4 (Modelo 02/01), sendo a altura das formas de dezesseis centímetros e capa de cinco centímetros. Variou-se a seção transversal dos pilares e o valor de γ_2 encontrado foi de 1,297 (vento 90°-270°). A Figura 5 mostra o 3D da estrutura e a Figura 6 mostra o 3D com detalhe da laje nervurada.

Figura 4 – Arquitetura x estrutura – pavimento tipo – laje nervurada – Modelo 02/01

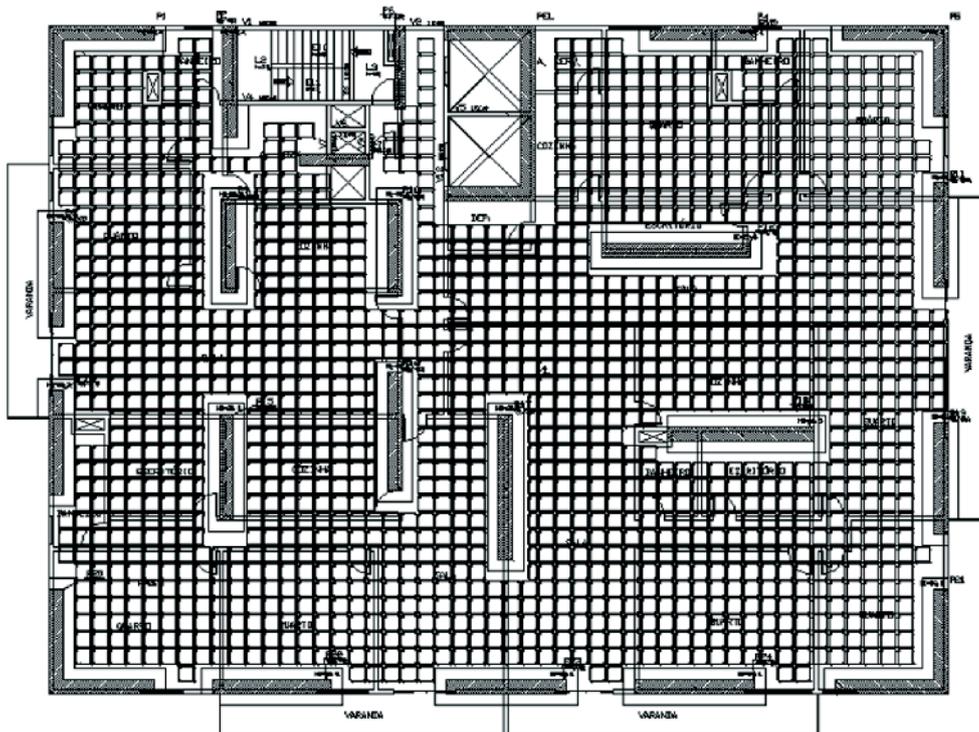


Figura 5 – 3D – edifício com laje nervurada – Modelo 02/01

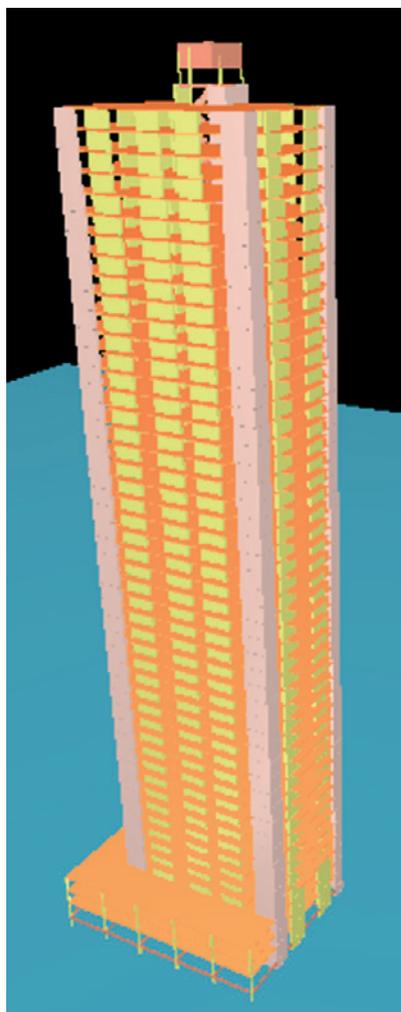
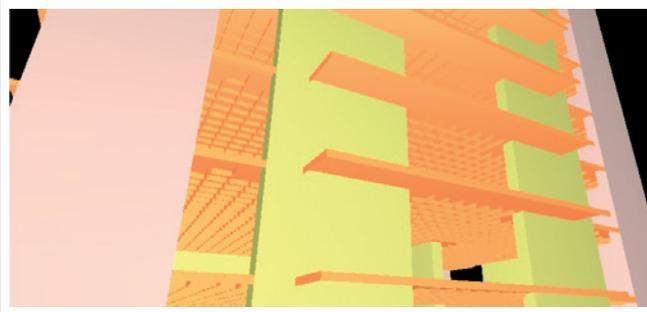


Figura 6 – 3D – pavimento tipo – laje nervurada – Modelo 02/01



Nos Modelos 02/02, 02/03 e 02/04, as alterações foram as mesmas efetuadas anteriormente para os modelos de lajes protendidas. Não foi implementada a alteração dos coeficientes que levam em consideração a não linearidade física, dada à ausência de elementos protendidos nos Modelos 02.

No Modelo 02/05, buscou-se reduzir ao máximo as seções transversais dos pilares mantendo o coeficiente γ_z abaixo do limite preconizado pela norma. Os dados dos modelos de lajes nervuradas seguem na Tabela 2.

4. Resultados e discussões

4.1 Modelos 01/01 a 01/06

A partir do projeto proposto na Figura 1 e dos modelos descritos, analisaram-se os resultados obtidos que seguem concatenados na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5.

Observa-se que o aumento de espessura do pilar do elevador (núcleo rígido) no modelo 01/02, não gerou uma redução significativa no coeficiente γ_z , sendo esta redução de aproximadamente 0,617% (vento 90°-270°) e 0% (vento 0°-180°).

O aumento de espessura da laje considerado no modelo 01/03 teve relevância na redução do coeficiente de instabilidade γ_z , sendo esta redução de aproximadamente 4,472% (vento 90°-270°) e 4,111% (vento 0°-180°). Esta redução demonstra a importância

Tabela 1 – Dados dos modelos de laje protendida

Laje protendida – dados dos modelos								
Modelo	Esp. pilar elevador (cm)	Coef. não linearidade		Esp. laje (cm)	f_{ck} (MPa)			Pé direito pav.tipo (m)
		Lajes	Vigas		Lajes	Vigas	Pilares	
01/01	40	0,3	0,4	18	30	30	40	3,24
01/02	50	0,3	0,4	18	30	30	40	3,24
01/03	40	0,3	0,4	20	30	30	40	3,24
01/04	40	0,3	0,4	18	30	30	40	2,88
01/05	40	0,7	0,7	18	30	30	40	3,24
01/06	50	0,7	0,7	20	30	30	40	2,88

Tabela 2 - Dados dos modelos de laje nervurada

Laje nervurada - dados dos modelos								
Modelo	Esp. pilar elevador (cm)	Coef. não linearidade		Esp. laje (cm)	f_{ck} (MPa)			Pé direito pav.tipo (m)
		Lajes	Vigas		Lajes	Vigas	Pilares	
02/01	40	0,3	0,4	21	30	30	40	3,24
02/02	50	0,3	0,4	21	30	30	40	3,24
02/03	40	0,3	0,4	23,5	30	30	40	3,24
02/04	40	0,3	0,4	21	30	30	40	2,88
02/05	50	0,3	0,4	23,5	30	30	40	2,88

Tabela 3 - Resultados dos modelos 01/01 e 01/02

Modelo 01/01					Modelo 01/02				
Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS		Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS	
Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global	Wind	Gamma Z	Alpha	Local disp.	Global disp.
90° - 270°	1,297	1,262	0,12 (2120)	5,53 (2734)	90° - 270°	1,289	1,254	0,12 (2142)	5,39 (2805)
0° - 180°	1,265	1,186	0,09 (2705)	3,34 (4521)	0° - 180°	1,265	1,187	0,09 (2695)	3,32 (4552)
RM2M1 - 1,330					RM2M1 - 1,324				
Quantitativo dos pilares					Quantitativo dos pilares				
Volume de concreto (m ³)		Área de formas (m ²)			Volume de concreto (m ³)		Área de formas (m ²)		
Pilar	Total	Pilar	Total		Pilar	Total	Pilar	Total	
8561,9	15121,7	36795,4	74365,1		8725,5	15284,1	36735,6	74322,2	
Taxa volume de concreto		Taxa área de formas			Taxa volume de concreto		Taxa área de formas		
56,62%		49,48%			57,09%		49,43%		

Tabela 4 - Resultados dos modelos 01/03 e 01/04

Modelo 01/03					Modelo 01/04				
Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS		Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS	
Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global	Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global
90° - 270°	1,239	1,141	0,12 (2662)	4,45 (3399)	90° - 270°	1,271	1,216	0,11 (2449)	4,74 (3146)
0° - 180°	1,213	1,069	0,07 (3452)	2,66 (5683)	0° - 180°	1,237	1,128	0,08 (3226)	2,76 (5399)
RM2M1 - 1,277					RM2M1 - 1,318				
Quantitativo dos pilares					Quantitativo dos pilares				
Volume de concreto (m ³)		Área de formas (m ²)			Volume de concreto (m ³)		Área de formas (m ²)		
Pilar	Total	Pilar	Total		Pilar	Total	Pilar	Total	
8561,9	15744,2	36765,4	74353,3		8450,1	15714,3	36230,0	77846,2	
Taxa volume de concreto		Taxa área de formas			Taxa volume de concreto		Taxa área de formas		
54,38%		49,45%			53,77%		46,54%		

Tabela 5 – Resultados dos modelos 01/05 e 01/06

Modelo 01/05					Modelo 01/06				
Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS		Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS	
Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global	Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global
90° - 270°	1,172	0,976	0,10 (3328)	3,49 (4336)	90° - 270°	1,275	1,178	0,12 (2160)	5,21 (2859)
0° - 180°	1,162	0,953	0,06 (5474)	2,13 (7113)	0° - 180°	1,298	1,110	0,16 (1517)	3,65 (4089)
RM2M1 - 1,190					RM2M1 - 1,357				
Quantitativo dos pilares					Quantitativo dos pilares				
Volume de concreto (m³)		Área de formas (m²)			Volume de concreto (m³)		Área de formas (m²)		
Pilar	Total	Pilar	Total	Pilar	Total	Pilar	Total	Pilar	Total
8561,9	15121,7	36765,4	74365,1	5346,5	13420,7	25285,9	67476,4		
Taxa volume de concreto		Taxa área de formas			Taxa volume de concreto		Taxa área de formas		
56,62%		49,44%			39,84%		37,47%		

de se considerar a rigidez transversal da laje para a estabilidade global da estrutura.

A partir da redução do pé direito dos pavimentos no modelo 01/04, obteve-se uma redução aproximada no γ_z de 2,005% (vento 90°-270°) e 2,213% (vento 0°-180°).

Observa-se que a maior redução no coeficiente de instabilidade γ_z foi no modelo 01/05 que considera coeficientes de não linearidade física maiores, sendo a redução de aproximadamente 9,368% na direção do vento 90°-270° e de 8,142% na direção do vento 0°-180°. Este resultado corrobora com a hipótese de se estender às lajes protendidas, o aumento no coeficiente de não linearidade física quando esta atuar no sistema de contraventamento da estrutura através da consideração de sua rigidez transversal.

Finalmente, no modelo 01/06 conseguiu-se reduzir as seções dos pilares mantendo o coeficiente γ_z abaixo do limite do coeficien-

te γ_z preconizado pela ABNT NBR 6118:2014 [2]. Comparado ao modelo 01/01, o modelo 01/06 resultou numa redução de aproximadamente 37,5% no volume de concreto utilizado nos pilares e uma redução de aproximadamente 31,3% nas formas utilizadas nos pilares.

4.2 Modelos 02/01 a 02/05

A partir do projeto proposto na Figura 2 e dos modelos descritos, analisaram-se os resultados obtidos que seguem concatenados na Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8.

Assim como no modelo de lajes protendidas, observa-se que no modelo de lajes nervuradas (modelo 02/02) o aumento de espessura do pilar do elevador (núcleo rígido), não gerou uma redução significativa no coeficiente γ_z , sendo esta redução de

Tabela 6 – Resultados dos modelos 02/01 e 02/02

Modelo 02/01					Modelo 02/02				
Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS		Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS	
Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global	Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global
90° - 270°	1,297	1,280	0,14 (1821)	6,12 (2470)	90° - 270°	1,288	1,269	0,14 (1851)	5,94 (2546)
0° - 180°	1,294	1,249	0,12 (2096)	4,04 (3758)	0° - 180°	1,294	1,248	0,12 (2097)	4,01 (3773)
RM2M1 - 1,345					RM2M1 - 1,335				
Quantitativo dos pilares					Quantitativo dos pilares				
Volume de concreto (m³)		Área de formas (m²)			Volume de concreto (m³)		Área de formas (m²)		
Pilar	Total	Pilar	Total	Pilar	Total	Pilar	Total	Pilar	Total
8744,8	13362,8	37497,1	40303,7	8908,4	13525,2	37467,3	40261,1		
Taxa volume de concreto		Taxa área de formas			Taxa volume de concreto		Taxa área de formas		
65,44%		93,04%			65,87%		93,06%		

Tabela 7 – Resultados dos modelos 02/03 e 02/04

Modelo 02/03					Modelo 02/04				
Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS		Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS	
Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global	Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global
90° - 270°	1,253	1,187	0,11 (2187)	5,14 (2939)	90° - 270°	1,244	1,173	0,11 (2268)	4,84 (3079)
0° - 180°	1,255	1,172	0,09 (2704)	3,39 (4467)	0° - 180°	1,247	1,165	0,07 (3340)	3,15 (4734)
RM2M1 - 1,299					RM2M1 - 1,283				
Quantitativo dos pilares					Quantitativo dos pilares				
Volume de concreto (m³)		Área de formas (m²)			Volume de concreto (m³)		Área de formas (m²)		
Pilar	Total	Pilar	Total		Pilar	Total	Pilar	Total	
8744,8	14231,5	37497,1	40287,8		8632,0	13747,2	36957,7	39985,7	
Taxa volume de concreto		Taxa área de formas			Taxa volume de concreto		Taxa área de formas		
61,45%		93,07%			62,79%		92,43%		

aproximadamente 0,694% (vento 90°-270°) e 0% (vento 0°-180°). O aumento da capa da laje no modelo 02/03 resultou numa redução do coeficiente γ_z de aproximadamente 3,392% (vento 90°-270°) e 3,014% (vento 0°-180°). Nota-se que o acréscimo de peso decorrente do aumento da capa da laje foi compensado pelo aumento da rigidez da mesma, como afirma FEITOSA & ALVES (2015) [6].

Com a redução do pé direito dos pavimentos no modelo 02/04, obteve-se uma redução aproximada no γ_z de 4,086% (vento 90°-270°) e 3,632% (vento 0°-180°).

Por fim, comparando com o modelo 02/01, com a redução dos pilares no modelo 02/05 obteve-se uma redução de aproximadamente 10,5% no volume de concreto utilizado nos pilares e uma redução de aproximadamente 6,22% nas formas utilizadas nos pilares. Vale ressaltar que o coeficiente γ_z do modelo 02/05 também

está abaixo do limite do coeficiente γ_z preconizado pela ABNT NBR 6118:2014 [2].

5. Conclusões

A partir da análise dos resultados dos modelos de lajes protendidas e lajes nervuradas, observou-se que o acréscimo de espessura no pilar do elevador (núcleo rígido), não resultou numa redução significativa no coeficiente de instabilidade γ_z .

O aumento da espessura das lajes protendidas e o aumento da capa das lajes nervuradas proporcionaram reduções significativas no coeficiente γ_z . O aumento de carga vertical devido ao acréscimo de espessura das lajes é compensado pelo maior enrijecimento das ligações das lajes com os pilares e também pelo aumento da rigidez transversal à flexão. Vale ressaltar que MARTINS (2001) [8] e FEITOSA e ALVES (2015) [6] obtiveram resultados semelhantes.

A redução do pé direito entre os pavimentos nos modelos de lajes protendidas e lajes nervuradas resultou no decréscimo do coeficiente γ_z , haja vista a diminuição do comprimento destravado dos pilares.

A aplicação de um valor maior do coeficiente que considera a não linearidade física nas lajes protendidas resultou numa redução significativa do coeficiente γ_z , sendo essa redução a maior entre todos os modelos. Assim, como dito anteriormente, é interessante estudar pormenorizadamente a utilização de coeficientes de redução com valores maiores que os apontados pela norma atual, tendo em vista que a fissuração e elementos protendidos é menor quando comparada à fissuração de elementos de concreto armado.

Ao se comparar o volume total de concreto entre os modelos 01/06 e 02/05, nota-se que o volume total de concreto do modelo 01/06 é menor aproximadamente 3,5%. Essa mesma comparação feita com volume de concreto dos pilares mostra que no modelo 01/06 é menor aproximadamente 31,6%. Assim, percebe-se a grande influência da consideração de um valor maior do coeficiente de não linearidade física na laje protendida, possibilitando, para edifícios altos e esbeltos, competir com o sistema de lajes nervuradas em consumo de concreto.

Tabela 8 – Resultado do modelo 02/05

Modelo 02/05				
Coeficientes de instabilidade			Estado limite de serviço - ELS	
Vento	Gama Z	Alfa	Des. local	Des. global
90° - 270°	1,285	1,251	0,12 (2061)	5,39 (2768)
0° - 180°	1,291	1,216	0,10 (2523)	3,50 (4260)
RM2M1 - 1,355				
Quantitativo dos pilares				
Volume de concreto (m³)		Área de formas (m²)		
Pilar	Total	Pilar	Total	
7824,5	13904,5	35163,9	38168,8	
Taxa volume de concreto		Taxa área de formas		
56,27%		92,13%		

6. Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [3] BUENO, M.M.. Avaliação dos Parâmetros de Instabilidade Global em Estruturas de Concreto Armado. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- [4] EMERICK, A.A.. Projeto e Execução de Lajes Protendidas. Interciência, 2005.
- [5] FRANCO, M.; VASCONCELOS, A.C.D.; Avaliação Prática dos Efeitos de 2ª Ordem em Edifícios Altos. Colóquio on the Rio CEB-FIP-ModelCode 90, Rio de Janeiro, 1991.
- [6] FEITOSA, L.A.; ALVES, E.C.. Study of global stability of tall buildings with prestressed slabs. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 8, n. 2, p. 196-224, 2015.
- [7] KIMURA, A.. Informática Aplicada em Estruturas de Concreto Armado. Pini, 2007.
- [8] MARTINS, C.H.. Análise Não Linear de Estruturas Tridimensionais de Edifícios de Andares Múltiplos com Núcleo Resistentes, considerando a Rigidez Transversal à Flexão das Lajes. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.