



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

LORRAYNNE ALVES DOS SANTOS

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS
PAVIMENTOS EM AÇO**

**PALMAS
2021**

LORRAYNNE ALVES DOS SANTOS

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS
PAVIMENTOS EM AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel do Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Dias de
Araújo e Silva

**PALMAS
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S237a Santos, Lorryayne Alves Dos
Análise de estabilidade em edifícios de múltiplos pavimentos em aço /
Lorryayne Alves Dos Santos. – Palmas, TO, 2021.
23 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Dr. Thiago Dias de Araújo e Silva

1. Aço. 2. Estrutura. 3. Estabilidade. I. Silva, Thiago Dias de Araújo e. II.
Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e
pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

LORRAYNNE ALVES DOS SANTOS

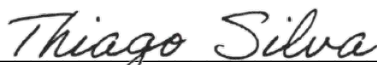
ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM AÇO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel do Curso
Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

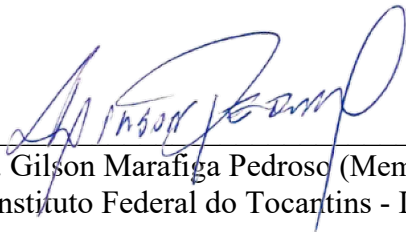
Orientador: Prof. Dr. Thiago Dias de
Araújo e Silva

Aprovado em: 26 de janeiro de 2021

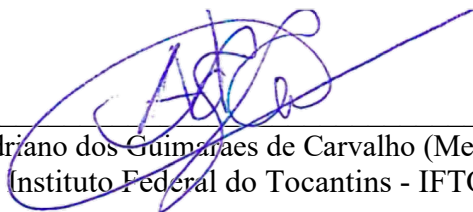
BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Thiago Dias de Araújo e Silva (Orientador)
Instituto Federal do Tocantins - IFTO



Prof. Dr. Gilson Marafá Pedroso (Membro Interno)
Instituto Federal do Tocantins - IFTO



Prof. Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho (Membro Interno)
Instituto Federal do Tocantins - IFTO

SUMÁRIO

1. Introdução	5
2. Materiais e métodos.....	7
3. Resultados e discussões	13
4. Conclusões	22
5. Referências	23

Análise de estabilidade em edifícios de múltiplos pavimentos em aço

Lorraynne Alves dos Santos^{1*}; Thiago Dias de Araújo e Silva² e Ricardo Allen Filgueira Pontes³

¹ Engenharia civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. 1206 Sul, Alameda 26 Lote 29. CEP: 77024-506. Palmas- TO, Brasil, e-mail: allves.eng@gmail.com

^{2,3} Departamento de Construção Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

Stability analysis in multi-storey steel buildings

Resumo

A elevada resistência do aço permite conceber perfis com seções mais esbeltas, contudo, essa esbelteza elevada gera perda de estabilidade. Assim, a análise estrutural torna-se mais complexa uma vez que os efeitos de segunda ordem deverão ser considerados. A dispensa da realização desse tipo de análise só é possível para estruturas classificadas como de nós fixos, conforme a ABNT NBR8800:2008. Assim, este estudo investigou a estabilidade global de um edifício em aço a cada pavimento acrescido, variando as vinculações de apoio, as ligações e a posição dos contraventamentos, utilizando os critérios de estabilidade do EN 1993-1-1: 2010. Concluiu-se que as configurações em X localizadas na região central do pórtico nos eixos 3 e 4 permitem a realização de apenas uma análise linear. Também a utilização de apoios e ligações engastados para modelos sem contraventamento permitem tal condição até 24 metros de altura.

Palavras-chave: Aço. Estrutura. Estabilidade. Efeitos de segunda ordem. Contraventamento.

Abstract

The high strength of the steel makes it possible to design profiles with slimmer sections, however, this high slinness generates a loss of stability. Thus, the structural analysis becomes more complex since the second-order effects must be considered. The exemption from carrying out this type of analysis is only possible for structures classified as fixed nodes, according to ABNT NBR8800: 2008. Thus, this study investigated the overall stability of a steel building with each additional floor, varying the support bindings, the connections, and the position of the braces, using the stability criteria of EN 1993-1-1: 2010. It was concluded that the X configurations located in the central region of the gantry on axes 3 and 4 allow only a linear analysis to be carried out. Also, the use of supports and crimped connections for models without bracing allows this condition up to 24 meters in height.

Keywords: Steel. Structure. Stability. Second order effects. Bracing.

1 Introdução

A elevada resistência do aço nos diversos estados de tensão (tração, compressão, flexão, entre outros) permite que seus elementos estruturais suportem grandes esforços apesar da área relativamente pequena das suas seções, tal característica condiciona a fabricação de peças esbeltas, fazendo com que as estruturas em aço sofram problemas de instabilidade (OLIVEIRA, 2018).

A instabilidade ocorre com o deslocamento lateral dos nós dos pórticos, ocasionando o surgimento de esforços e deslocamentos adicionais, devido ao desaprumo da estrutura. Esses esforços e deslocamentos adicionais são designados como efeitos de segunda ordem, podendo ser globais ($P-\Delta$) ou locais ($P-\delta$). Os mesmos são considerados através de uma análise não-linear, na qual o equilíbrio estrutural é formulado através de uma geometria deformada.

A partir da ABNT NBR 8800:2008 a realização de uma análise não-linear para o dimensionamento final de estruturas de aço tornou-se uma etapa obrigatória para o projeto, com exceção das estruturas de pequena deslocabilidade, também chamadas de nós fixos segundo o EN 1993-1-1: 2010. Contudo, a complexidade da realização deste tipo de análise torna comum a utilização de métodos simplificados, que permitem inserir na verificação estrutural tanto as imperfeições de material quanto a não linearidade geométrica.

Conforme os estudos de Silva et al. (2016) a ABNT NBR 8800:2008 e o EN 1993-1-1: 2010 utilizam um processo de análise com métodos semelhantes, diferenciando-se na etapa de amplificação dos esforços, na qual a norma europeia calcula apenas um coeficiente de amplificação, enquanto a norma brasileira necessita de duas análises para obtenção de dois coeficientes de amplificação dos esforços.

O trabalho desenvolvido pelo autor também demonstrou que em ambas as normativas os resultados encontrados estão adequados e favoráveis aos critérios de segurança em comparação aos resultados obtidos por uma avaliação numérica exata.

Nessa mesma linha de pesquisa, MOURA (2019) avaliou o comportamento da carga crítica de um edifício industrial treliçado em aço, variando as combinações de travamentos e de carregamentos através de análise numérica computacional.

Ainda, Chamberlain e Stumpf (2009) e Chianca (2018) demonstraram que é possível considerar apenas uma análise linear para certas configurações de edifícios industriais, com base nos critérios de estabilidade do EN 1993-1-1 e verificando essa hipótese com o cálculo do fator de carga crítica de flambagem elástica. Tal parâmetro é calculado a partir da carga crítica de Euler, que por sua vez demonstra qual a carga máxima suportada pelo elemento antes que este perca a estabilidade e falhe de forma repentina.

Nas equações abaixo, observa-se que há propriedades inerentes ao material e ao perfil, na qual o comprimento de flambagem é determinado pelo produto entre o coeficiente de

flambagem (K) e o comprimento de flambagem da barra (L).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{(K \times L)^2}$$

Observa-se que é possível aumentar a carga crítica, e assim aumentar o esforço resistente do elemento à perda de estabilidade, através da redução do comprimento de flambagem. Tal redução é possível através do travamento adequado dos elementos, reduzindo a esbeltez e garantindo assim maior rigidez ao conjunto.

Dentro dessa perspectiva, o sistema em contraventamento treliçado é uma das tipologias de travamento mais aplicadas na construção em aço. Essa configuração faz com que as barras do conjunto resistam, predominantemente, aos esforços axiais de tração e compressão, tornando o contraventamento treliçado muito eficiente na resistência aos esforços horizontais (FRANCA, 2003). Apesar de tornar a estrutura mais econômica, esta solução técnica pode prejudicar a arquitetura da edificação quando utilizada de maneira irracional.

Tendo em vista as problemáticas referentes a estabilidade de edifícios de múltiplos pavimentos em aço, este estudo investigou a estabilidade global de um edifício em aço a cada pavimento acrescido, variando as vinculações de apoio, os tipos de ligação e a posição dos contraventamentos. Nesse estudo as verificações quanto aos esforços foram realizadas de acordo com as combinações previstas na ABNT NBR 8800:2008 e os critérios de estabilidade conforme o EN 1993-1-1.

Com isso foi possível verificar para quais configurações a estrutura é classificada como de nós fixos, tornando dispensável a realização de uma análise de segunda ordem.

2 Materiais e Métodos

O edifício comercial em aço deste estudo é um modelo teórico extraído de Bellei, Pinho e Pinho (2008), as dimensões em planta são 30x18 metros, constituído por 8 pavimentos, cada um com pé direito igual a 3 metros, conforme Figura 1. Sua estrutura principal é caracterizada por pórticos rígidos com espaçamento de 6 metros.

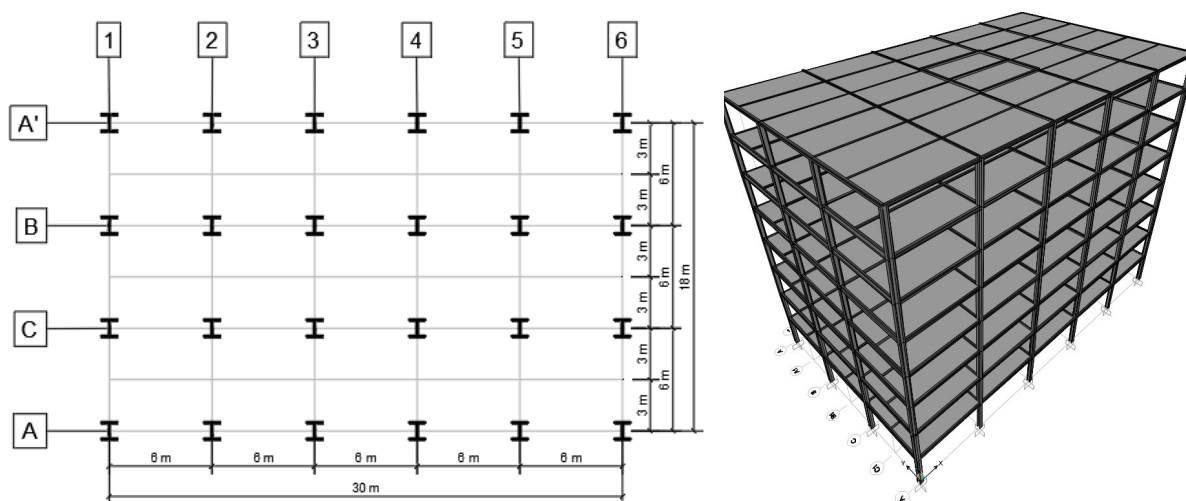


Figura 1 – Planta baixa e modelo 3D. Fonte: Santos (2021)

2.1 Análise linear e dimensionamento no CYPE

O dimensionamento foi realizado no Cype 3D a cada pavimento acrescentado, utilizando perfis estruturais HP para os pilares e W para as vigas, em aço ASTM A572 Grau 50. Já os contraventamentos foram inseridos como tirantes a partir do quarto pavimento, na região central, transversal e longitudinal da edificação. Os modelos foram divididos da seguinte forma tanto no cype quanto no SAP.

Quadro 1 - Características dos modelos de análise

Modelo	Lajes de Pavimento Tipo	Laje de cobertura	Altura (metros)
Modelo 01	0	1	3
Modelo 02	1	1	6
Modelo 03	2	1	9
Modelo 04	3	1	12
Modelo 05	4	1	15
Modelo 06	5	1	18
Modelo 07	6	1	21
Modelo 08	7	1	24

Fonte: Santos (2021)

Os carregamentos considerados para o dimensionamento do edifício seguiram as prescrições normativas da ABNT NBR-6120:2019 e ABNT NBR-6123:1988, conforme expresso nas tabelas seguintes do modelo 02. Os parâmetros dimensionados em tabela complementar sofrem aumento com o acréscimo de altura a cada pavimento, uma vez que dependem da quantidade de pessoas por metro quadrado e do consumo/dia. Assim, para cada modelo foram geradas tabelas como essas com os valores atualizados

conforme o acréscimo de altura e consequente aumento de pessoas/m².

Tabela 1 - Cargas Permanentes (CP)

Tipo	Cálculo	Valor	Unidade	Localização	Identificação
P.P: Estrutura	-	-	-	-	-
P.P: Laje	10 (cm) x 25 (kN/m ³)	2,5	kN/m ²	Pav. tipo e cobertura	CP1
P.P: Revestimento do piso	3 (cm) x 21 (kN/m ³)	0,63	kN/m ²	Pav. tipo e cobertura	CP1
P.P: Argamassa de assentamento	2 (cm) x 21 (kN/m ³)	0,42	kN/m ²	Pav. Tipo	CP1
P.P: Piso cerâmico	2 (cm) x 28 (kN/m ³)	0,56	kN/m ²	Pav. Tipo	CP1
P.P: Forro	2,5 (cm) x 12,5 (kN/m ³)	0,31	kN/m ²	Pav. tipo e cobertura	CP1
P.P: Alvenarias	ABNT NBR 6120	1,23	kN/m ²	Pav. Tipo	CP1
P.P: Impermeabilização da cobertura	3 (cm) x 25 (kN/m ³)	0,5	kN/m ²	Cobertura	CP1
Peso total da água da caixa d'água	Tabela Complementar	6,38	kN/m ²	Cobertura	CP2
P.P: Laje da caixa d'água	12 (cm) x 25 (kN/m ³)	3	kN/m ²	Cobertura	CP2
P.P: Paredes da caixa d'água	Tabela Complementar	2,31	kN/m	Cobertura	CP3

Fonte: Santos (2021)

No software, as cargas com identificação CP1 foram aplicadas em panos, as CP2 foram aplicadas em áreas e a CP3 diretamente sobre as vigas. Na tabela 2 estão demonstradas as cargas acidentais consideradas também aplicadas em panos e em áreas conforme a localização.

Tabela 2 - Cargas Acidentais (CA)

Tipo	Valor	Unidade	Localização	Identificação
Cobertura (acesso para manutenção e inspeção)	1	kN/m ²	Cobertura	CA
Edifícios comerciais, corporativos e de escritórios (Salas de uso geral e sanitários)	2,5	kN/m ²	Pav. Tipo	CA
Escadas e passarelas (Edifícios comerciais, clubes, escritórios, bibliotecas)	3	kN/m ²	Pav. Tipo - região central	CA

Áreas técnicas (Casa de
máquinas de elevador de
passageiros ($v \leq 1,0$ m/s)
Casa de máquinas de elevador)

30

kN/m²

Cobertura - região
central ao lado

CA

Fonte: Santos (2021)

Por fim, a Tabela 3 demonstra as considerações para obtenção dos coeficientes de pressão externa (Figura 2) e determinação da força do vento nas paredes também para o modelo 02 que possui as seguintes características: H (altura) = 6 m, b (largura) = 18 m, a (comprimento) = 30m, p (distância entre pilares) = 6 m.

Tabela 3 - Cargas de Vento (CV)

Parâmetro	Observações	Valor	Unidade
Velocidade Básica (V_0)		30,00	m/s
Fator Topográfico (S_1)		1,00	-
Fator de Rugosidade (S_2)	(Categoria IV -Classe B)	0,78	-
Fator Estatístico (S_3)		1,00	-
Velocidade característica		23,40	m/s
Pressão Dinâmica (q_v)		0,34	kN/m²

Fonte: Santos (2021)

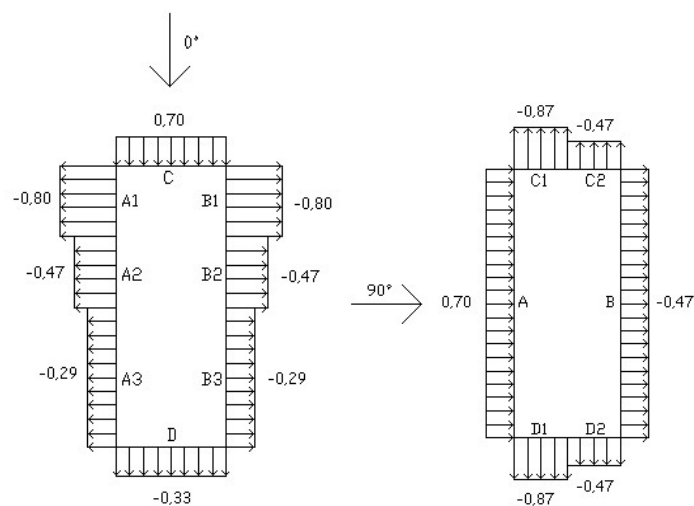


Figura 2 - Coeficiente de pressão externa nas paredes. Fonte: Santos (2021)

Com o acréscimo de altura nos demais modelos, os valores da carga de vento também sofreram alteração. Inseridas as cargas nos modelos, o software fez a combinação das cargas e processou a estrutura indicando os perfis que atendiam, ou não, as verificações quanto aos estados limites últimos e de serviço, conforme a ABNT NBR-8800:2008.

2.2 Variações e classificação no SAP2000

Em relação aos elementos estruturais, estes foram caracterizados como *frame* (barra) e seus perfis foram aqueles determinados no dimensionamento no Cype 3D. As vigas longitudinais receberam as cargas verticais combinadas, os pilares receberam a carga de vento também combinada, o lançamento das cargas ocorreu de forma manual com a consideração da largura de influência. O Quadro abaixo demonstra as quatro combinações de carga aplicadas em todos os modelos.

Quadro 2 - Combinações de carregamentos aplicadas a todos os modelos no SAP2000

Combinações		
Combinação 1	CB1	$(1,4 \times \Sigma CPP) + (1,4 \times \Sigma SP) + (1,4 \times \Sigma V0) + Fheql$
Combinação 2	CB2	$(1,4 \times \Sigma CPP) + (1,4 \times \Sigma SP) + (1,4 \times \Sigma V90) + Fheqt$
Combinação 3	CB3	$(1,4 \times \Sigma CPP) + (1,4 \times \Sigma SP) + Fheql$
Combinação 4	CB4	$(1,4 \times \Sigma CPP) + (1,4 \times \Sigma SP) + Fheqt$
CB	Combinação	
CPP	Cargas permanentes do pavimento	
SP	Sobrecarga do pavimento	
V0	Vento zero	
V90	Vento noventa	
Fheql	Força horizontal equivalente aplicada na longitudinal	
Fheqt	Força horizontal equivalente aplicada na transversal	

Fonte: Santos (2021)

Por sua vez, a força horizontal equivalente foi aplicada nos nós dos pilares no sentido da deformação da estrutura. A inserção dessa força está prevista na ABNT NBR 8880:2008 como uma simplificação para as estruturas de nós fixos, a fim de inserir na análise os efeitos das imperfeições geométricas iniciais.

Essa carga, devida ao desaprumo, corresponde a 0,3% do somatório das forças verticais aplicadas no pavimento e devem ser adicionadas às combinações, inclusive aquelas em que há a atuação das ações do vento.

Após a etapa de modelagem e inserção dos carregamentos, todos os modelos sofreram variações nas ligações entre vigas e vigas com pilares, alternando entre ligações rotuladas e engastadas.

Os tipos de apoio também sofreram variações entre rotulados e engastados nas filas e eixos, de forma individual, associada ou em todos os pórticos do modelo. Alguns exemplos das variações realizadas podem observados nas figuras abaixo.

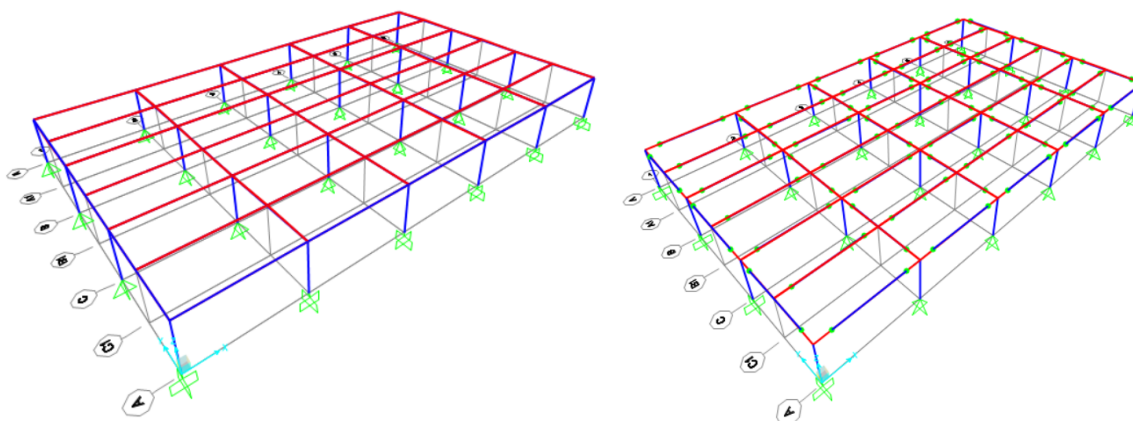


Figura 3 - Variações nos apoios e ligações do modelo 01. Fonte: Santos (2021)

Por fim, a posição e a quantidade de contraventamentos também foram variadas para o caso de maior instabilidade, contudo, limitou-se ao pórtico central dos eixos 3 e 4 onde estão previstos o elevador e a escada, também as extremidades longitudinais e transversais em pórticos alternados, conforme figura 4.

Escolheu-se a tipologia do contraventamento em X e este foi aplicado nos locais descritos anteriormente de forma estratégica e coerente com a realidade executiva do sistema, de forma a minimizar a interferência na arquitetura e conceber ambientes internamente livres e desobstruídos.

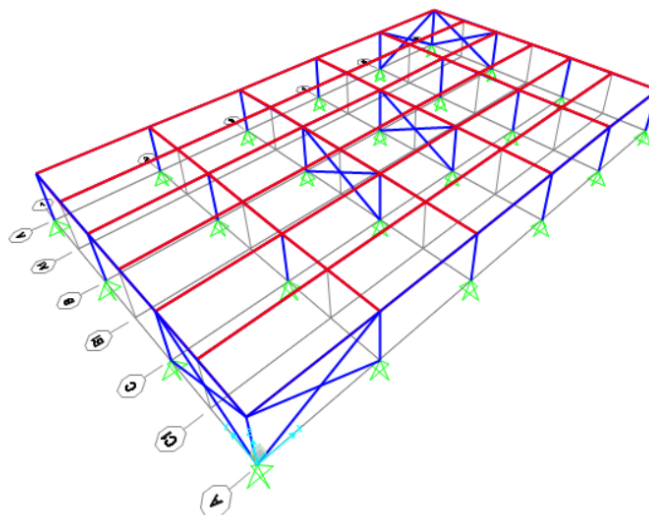


Figura 4 - Posições dos contraventamentos a serem variadas no modelo 01. Fonte: Santos (2021)

Quanto as análises de estabilidade, as mesmas foram caracterizadas como *buckling* (flambagem) no SAP2000, e o resultado do processo de cálculo retornava o valor do alfa crítico (α_{cr}), parâmetro utilizado para os critérios de estabilidade conforme o EN 1993-1-1.

Nesse estudo as estruturas deverão ter valores do alfa crítico (α_{cr}) igual ou superior a 10, para serem consideradas como de nós fixos, permitindo assim que seja realizada apenas uma análise de primeira ordem.

Estruturas com valores $3 < \alpha_{cr} < 10$ são consideradas estruturas de nós móveis, sendo necessário realizar uma análise de segunda ordem, de maneira simplificada através da amplificação dos esforços. Por fim, se $\alpha_{cr} < 3$ a estrutura permanece de nós móveis, porém a análise de segunda ordem deve ser realizada de maneira rigorosa.

3 Resultados e Discussões

Foram gerados 378 modelos e tabelados conforme as variações realizadas, os principais resultados são apresentados nos tópicos seguintes. É importante ressaltar que a análise foi realizada a cada pavimento acrescido e que a partir do terceiro pavimento os pilares não atendem as verificações dos estados limites sem fazer uso de um sistema de contraventamento.

Dessa forma, além das variações citadas anteriormente, os modelos também sofreram variações nos perfis dos pilares de um pavimento para o outro, a fim de atender as recomendações normativas para o dimensionamento de estruturas metálicas e conceber modelos mais econômicos. A tabela 4 abaixo demonstra os perfis utilizados para os pilares em cada um dos modelos.

Tabela 4 - Perfis dimensionados para os pilares de cada modelo

Modelos	Série	Perfil	Peso	
			Perfil (kg)	Peso total (kg)
Modelo 1	H	HP 200 x 53.0	3849.01	3849.01
Modelo 2	H	HP 200 x 53.0	5132.02	8131.34
		HP 250 x 62.0	2999.33	
Modelo 3	H	HP 310 x 79.0	11304.00	19165.93
		HP 310 x 93.0	3368.59	
		HP 310 x 125.0	4493.34	
Modelo 4	H	HP 200 x 53.0	10264.03	17800.03
		HP 310 x 79.0	7536.00	
Modelo 5	H	HP 250 x 62.0	7498.32	
		HP 200 x 53.0	6415.02	
		HP 310 x 93.0	5614.32	
		HP 310 x 110.0	6641.10	

			26168.76
Modelo 6	H	HP 310 x 79.0	22608.00
		HP 310 x 110.0	7969.32
		HP 310 x 125.0	8986.68
			39564.00
Modelo 7	H	HP 310 x 110.0	18595.08
		HP 310 x 93.0	15720.10
		HP 310 x 125.0	20968.92
			55284.10
Modelo 8	H	HP 310 x 125.0	47928.96
		HP 310 x 110.0	21251.52
			69180.48

Fonte: Santos (2021)

3.1 Modelos com ligações engastadas com variação no apoio

Mantendo todas as ligações engastadas e fazendo as variações nos apoios nas filas e eixos, de forma isolada e associada, foram gerados 136 modelos, cada um com quatro resultados para a buckling.

Observa-se que os parâmetros críticos apresentados no Quadro 3 foram os obtidos no primeiro modo de instabilidade, uma vez que o software SAP2000, faz a análise de cargas de flambagem com a consideração do valor absoluto do carregamento em ambas as direções, apontando assim diversos módulos de instabilidade da estrutura.

No Quadro 3 são apresentados os valores de alfa crítico de cada combinação de carga para as variações nos apoios para o modelo 01 na condição de ligações engastadas. Nota-se que apesar das combinações 1 e 2 incluírem as cargas de vento, há pouca diferença entre elas e as combinações 3 e 4, que não consideram a carga de vento.

Quadro 3 - Resultado do modelo 01 para as variações de apoio

RESULTADO PARA AS VARIAÇÕES DE APOIO						
MODELO	ALTURA	VARIAÇÃO DOS APOIOS	CB1	CB2	CB3	CB4
1	3	TOTALMENTE ENGASTADO	109,92	109,90	109,90	109,91
		ENGASTADO NA FILA A	45,28	45,27	45,27	45,27
		ENGASTADO NA FILA A'	45,14	45,14	45,14	45,14
		ENGASTADO NA FILA A-A'	62,18	62,16	62,16	62,16
		ENGASTADO NA FILA B	49,03	49,03	49,03	49,03
		ENGASTADO NA FILA C	49,03	49,02	49,03	49,03
		ENGASTADO NA FILA B E C	72,10	72,10	72,10	72,10
		ENGASTADO NO EIXO 1	39,10	39,10	39,10	39,10
		ENGASTADO NO EIXO 2	41,60	41,60	41,60	41,60
		ENGASTADO NO EIXO 3	41,72	41,72	41,72	41,72
		ENGASTADO NO EIXO 4	41,72	41,72	41,72	41,72
		ENGASTADO NO EIXO 5	41,61	41,62	41,62	41,62
		ENGASTADO NO EIXO 6	39,65	39,65	39,65	39,65
		ENGASTADO NOS EIXOS 1 E 6	50,93	50,94	50,93	50,94
		ENGASTADO NOS EIXOS 2 E 5	55,53	55,53	55,53	55,53

		ENGASTADO NOS EIXOS 3 E 4	56,14	56,14	56,14	56,14
		TOTALMENTE ROTULADO	27,63	27,63	27,63	27,63

Fonte: Santos (2021)

Como o comportamento descrito se repete para os demais modelos, o alfa crítico considerado foi aquele com menor valor entre as combinações. Também, dentre as variações de apoio, selecionou-se as que apresentavam os melhores e os piores valores para o alfa crítico, o Quadro 4 resume os resultados.

Quadro 4 - Valores de alfa crítico para os modelos com ligações engastadas com variações de apoio

RESULTADO PARA AS VARIAÇÕES DE APOIO			
MODELO	ALTURA	VARIAÇÃO DOS APOIOS	α_{cr}
1	3	TOTALMENTE ENGASTADO	109,90
		TOTALMENTE ROTULADO	27,63
2	6	TOTALMENTE ENGASTADO	36,57
		TOTALMENTE ROTULADO	9,46
3	9	TOTALMENTE ENGASTADO	50,48
		TOTALMENTE ROTULADO	14,37
4	12	TOTALMENTE ENGASTADO	20,11
		TOTALMENTE ROTULADO	5,55
5	15	TOTALMENTE ENGASTADO	16,33
		TOTALMENTE ROTULADO	5,52
6	18	TOTALMENTE ENGASTADO	17,09
		TOTALMENTE ROTULADO	6,78
7	21	TOTALMENTE ENGASTADO	15,02
		TOTALMENTE ROTULADO	6,54
8	24	TOTALMENTE ENGASTADO	12,97
		TOTALMENTE ROTULADO	6,04

Fonte: Santos (2021)

Nota-se que todos os modelos totalmente engastados apresentaram alfa crítico maior do que todas as demais condições simuladas. Enquanto que os totalmente rotulados só apresentaram alfa crítico maior do que 10 nos modelos 01 e 03.

De forma geral, todos os modelos com apoio engastado nas filas B ou C, ou em ambas as filas, bem como nos eixos 3 e 4 (simultaneamente), 2 e 5 (simultaneamente)

apresentam até o oitavo pavimento uma estabilidade maior que 10. Já os modelos engastados somente em um dos eixos, seja ele 3, 4, 2 ou 5 apresentam $\alpha_{cr} > 10$ somente até o terceiro pavimento.

Assim, a partir do quarto pavimento, os eixos engastados separadamente bem como as filas A e A' apresentam $3 < \alpha_{cr} < 10$.

Verificou-se que os modelos 01 e 03 na condição de totalmente rotulado apresentam um alfa critico maior que 10. Enquanto o modelo 02 para a mesma condição apresentou um parâmetro crítico inferior a 10. Os modelos foram conferidos novamente e verificou-se que o comportamento diferente desses modelos se dá em razão do tipo do perfil escolhido para os pilares.

Tanto o modelo 01 quanto o 02, utilizam o perfil HP200X53, com a diferença de que o modelo 02 apresenta cargas maiores e na região central possui o perfil HP250X62 e na periférica o HP200X53, conforme a Tabela 1 já apresentada.

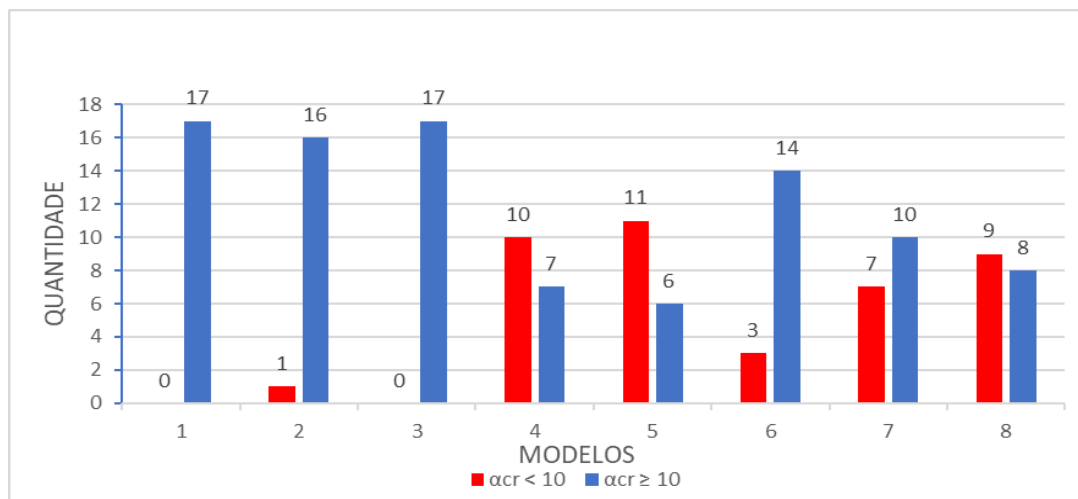
O modelo 03 possui cargas ainda maiores, contudo o perfil HP200X53 já não atendia as verificações do estado limite último a compressão, fato que fez ser necessário a troca por perfis mais robustos, HP310X79, HP310X93, HP 310X125.

No modelo 04, nenhum dos perfis do catálogo do software Cype 3D conseguia atender, tornando necessário contraventar a estrutura. Esses contraventamentos possibilitaram o dimensionamento adequado, inclusive com perfis mais leves, por isso o modelo 04 é mais leve que o 03, mesmo com cargas superiores, conforme Tabela 1.

Contudo os contraventamentos dimensionados no cype quando inseridos no SAP2000, melhoraram significativamente a estabilidade de todos os modelos, comprometendo a análise da variação de apoio. Assim manteve-se os perfis, mas os contraventamentos foram inseridos somente no pior caso de instabilidade, a ser discutido posteriormente

O Gráfico 1 apresentado abaixo, juntamente com a Tabela 1 apresentada anteriormente comprovam que o comportamento se repete sempre que há a utilização de um mesmo perfil para mais de um modelo e um deles apresenta uma carga maior.

Gráfico 1 - Quantidade de condições superiores e inferiores a 10 de cada modelo



Fonte: Santos (2021)

Visto que o modelo 05 foi o que apresentou a maior instabilidade, classificando-o como de nós móveis, apresenta-se abaixo a deformada do mesmo. Contudo, o pior caso deste estudo será mostrado mais a frente, sendo nele as variações das configurações de contraventamento.

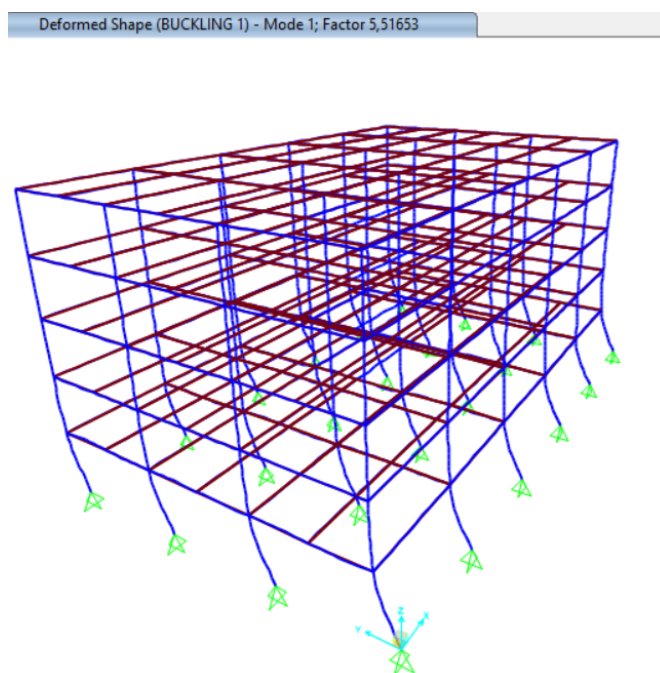


Figura 5 - Modelo 05 na condição de ligações engastadas e apoios totalmente rotulados

3.2 Modelos com ligações rotuladas com variação no apoio

Nesse caso, todas as ligações foram rotuladas e realizou-se as variações nos apoios nas filas e eixos, de forma isolada e associada, da mesma forma que a situação anterior. Com isso foram gerados mais 136 modelos, cada um com quatro resultados para a

buckling, sendo apresentado o menor dentre eles. Também o maior e o menor resultado para a variação realizada podem ser observados no Quadro 5.

Quadro 5 - Valores de alfa crítico para os modelos com ligações rotuladas com variações de apoio

RESULTADO PARA AS VARIAÇÕES DE APOIO			
MODELO	ALTURA	VARIAÇÃO DOS APOIOS	α_{cr}
1	3	TOTALMENTE ENGASTADO	100,97
		TOTALMENTE ROTULADO	25,05
2	6	TOTALMENTE ENGASTADO	31,10
		TOTALMENTE ROTULADO	8,17
3	9	TOTALMENTE ENGASTADO	32,15
		TOTALMENTE ROTULADO	10,35
4	12	TOTALMENTE ENGASTADO	13,93
		TOTALMENTE ROTULADO	4,52
5	15	TOTALMENTE ENGASTADO	10,84
		TOTALMENTE ROTULADO	4,25
6	18	TOTALMENTE ENGASTADO	10,25
		TOTALMENTE ROTULADO	4,70
7	21	TOTALMENTE ENGASTADO	8,67
		TOTALMENTE ROTULADO	4,31
8	24	TOTALMENTE ENGASTADO	7,35
		TOTALMENTE ROTULADO	3,87

Fonte: Santos (2021)

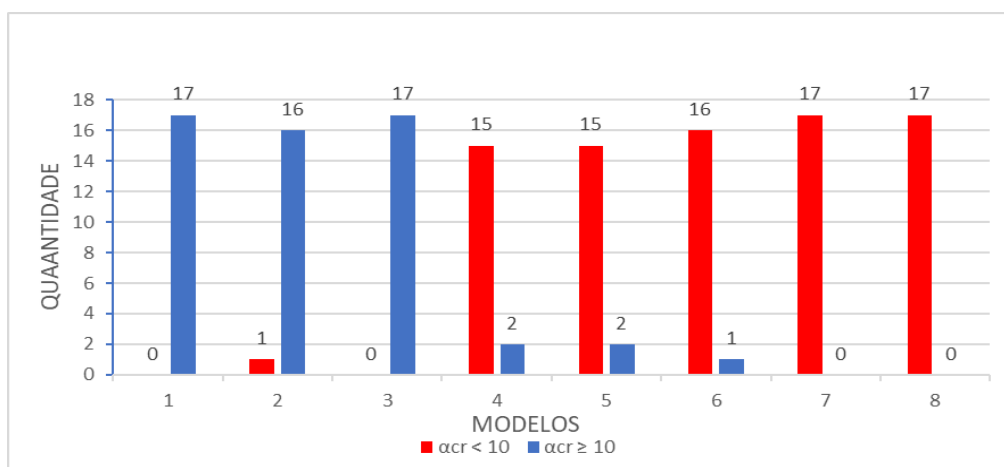
Verifica-se que com as ligações rotuladas os modelos apresentaram valores significativamente menores do que os modelos engastados para as mesmas condições, especialmente em alturas superiores a 12 m.

Quanto as vinculações de apoio, os resultados expressam que os modelos com todos os apoios engastado apresentaram alfa crítico maior do que todas as demais condições simuladas. De forma análoga, os modelos com todos os apoios rotulados apresentaram resultados inferiores, principalmente quando associados com as ligações rotuladas.

Até o modelo 03, as condições retornaram resultados com $\alpha_{cr} > 10$, com exceção do modelo 02 na condição de totalmente rotulado. Do modelo 04 em diante a quantidade de modelos que poderiam ser classificados como de nós fixos reduz drasticamente, com exceção das condições de totalmente engastados (Modelos 04,05 e 06) e engastado na fila B e C (Modelos 04 e 05), todos os demais apresentaram-se nas condições de nós-móveis.

O Gráfico 2 apresentado abaixo, juntamente com a Tabela 1 já apresentada comprovam que o comportamento descrito para a variação dos perfis dos pilares se repete.

Gráfico 2 - Quantidade de condições superiores e inferiores a 10 de cada modelo



Fonte: Santos (2021)

Ademais, nenhum modelo apresentou $\alpha_{cr} < 3$ contudo o modelo 08 (Figura 6) na condição de ligações e apoios rotulados apresentou um alfa crítico próximo, no valor de 3,87. Sendo este o pior caso, nele serão realizadas as variações de contraventamento.

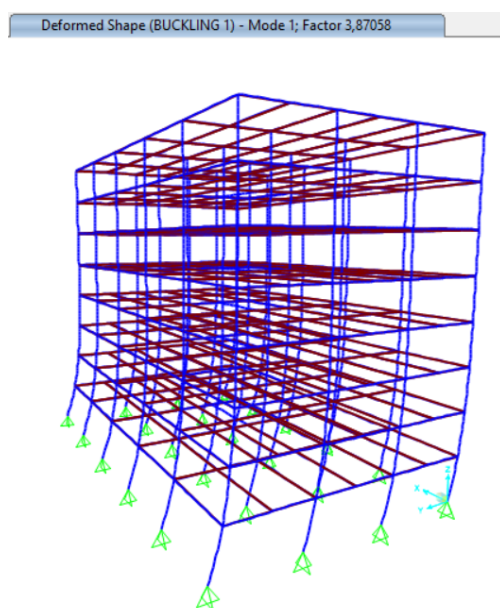


Figura 6 - Modelo 08 na condição de ligações rotuladas e apoios totalmente rotulados. Fonte: Santos (2021)

3.3 Modelos com ligações e apoios rotulados com variação no contraventamento

A partir dos dados anteriores, tomou-se o pior caso de instabilidade para realizar as variações dos contraventamentos, neste caso a condição de ligações e apoios rotulados. Dentre os 96 modelos, cada um com quatro resultados para a buckling, foram selecionados o menor valor de alfa crítico, na melhor e na pior condição, como observado no Quadro 6.

Quadro 6 - Valores de alfa crítico para os modelos com ligações e apoios rotulados com variação no contraventamento

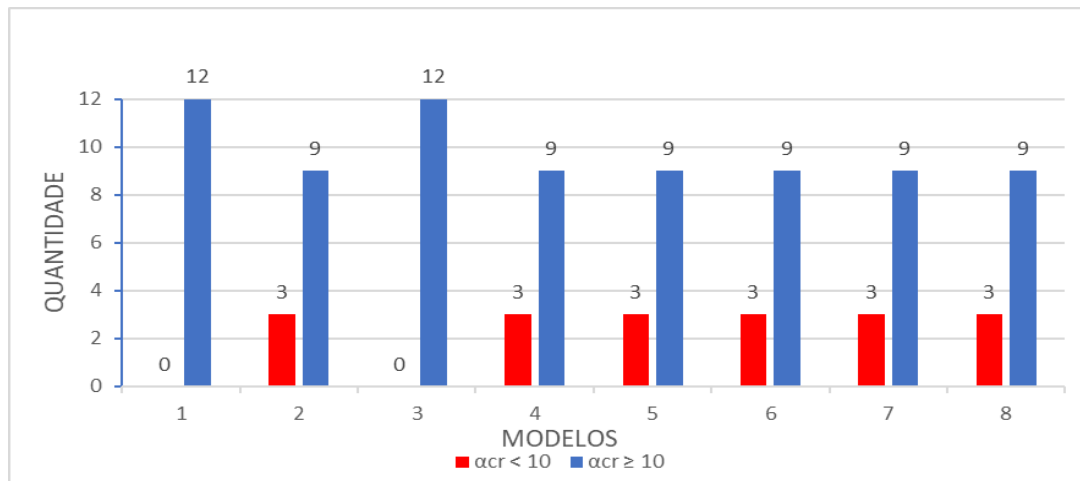
RESULTADO PARA AS VARIAÇÕES DE CONTRAVENTAMENTO			
MODELO	ALTURA	CONTRAVENTAMENTOS	α_{cr}
1	3	ENTRE OS EIXOS 3 e 4, 1 e 6 e FILA A-A'	115,80
		NAS FILAS A-A'	25,05
2	6	ENTRE OS EIXOS 3 e 4, 1 e 6 e FILA A-A'	57,31
		NAS FILAS A-A'	8,17
3	9	ENTRE OS EIXOS 3 e 4, 1 e 6 e FILA A-A'	102,51
		NAS FILAS A-A'	10,36
4	12	ENTRE OS EIXOS 3 e 4, 1 e 6 e FILA A-A'	40,07
		NAS FILAS A-A'	4,53
5	15	ENTRE OS EIXOS 3 e 4, 1 e 6 e FILA A-A'	30,71
		NAS FILAS A-A'	4,25
6	18	ENTRE OS EIXOS 3 e 4, 1 e 6 e FILA A-A'	47,70
		NAS FILAS A-A'	4,70
7	21	ENTRE OS EIXOS 3 e 4, 1 e 6 e FILA A-A'	40,99
		NAS FILAS A-A'	4,31
8	24	ENTRE OS EIXOS 3 e 4, 1 e 6 e FILA A-A'	35,00
		NAS FILAS A-A'	3,87

Fonte: Santos (2021)

Verificou-se que realizando o travamento em apenas um pórtico dos eixos 3 e 4 já seria o suficiente para manter a estrutura estável até 24 m de altura e um parâmetro crítico de carga acima de 10, classificando a estrutura como de nós fixos.

Os 6 modelos que apresentaram $\alpha_{cr} < 10$ foram os que tiveram contraventamentos nas filas A-A' (longitudinal), individualmente ou simultaneamente, conforme evidenciado no quadro acima e no Gráfico 3 que agrupa todos os resultados.

Gráfico 3 - Quantidade de condições superiores e inferiores a 10 de cada modelo



Fonte: Santos (2021)

Apesar da utilização de apenas um pórtico contraventado, comprovou-se que o aumentando na quantidade de contraventamento ao longo das filas A-A' não aumenta o valor do alfa crítico. Comprovando novamente que os contraventamentos são mais eficientes no aumento deste parâmetro quando inseridos na direção da instabilidade, que seria na transversal, a Figura 7 evidencia o resultado descrito.

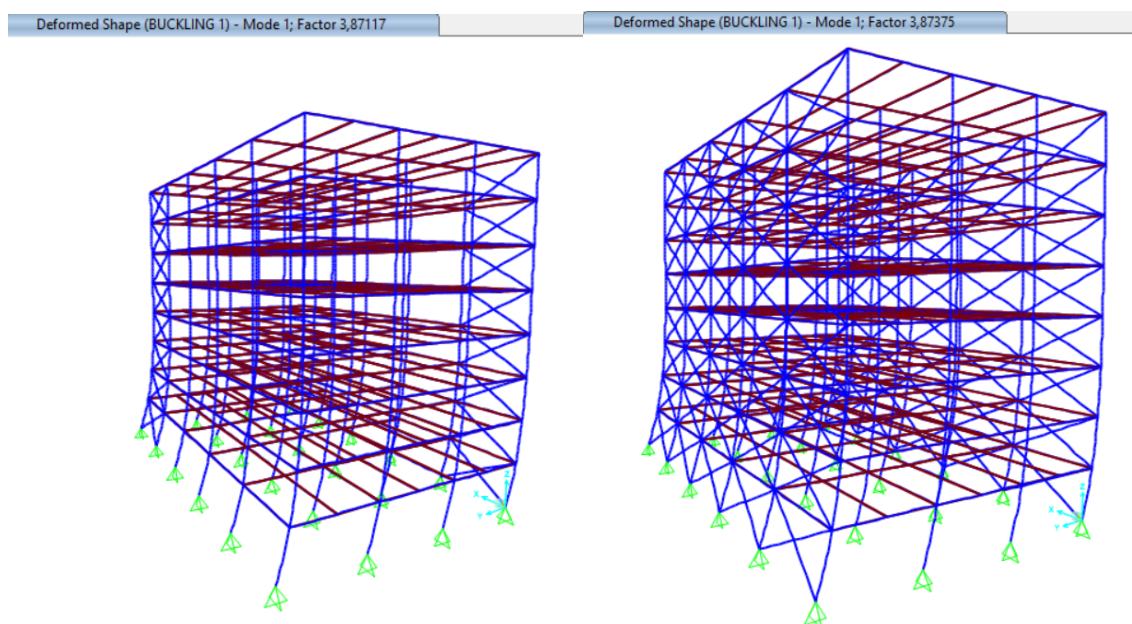


Figura 7 - Modelo 08 com apoios e ligações rotulados com contraventamento nas filas A-A'. Fonte: Santos (2021)

4 Conclusões

Neste artigo verificou-se que as estruturas de contraventamento aumentam significativamente a estabilidade da estrutura, aumentando a rigidez do conjunto e possibilitando valores superiores a 10 para o alfa crítico.

No edifício deste estudo, as configurações de contraventamento que permitem a dispensa de uma análise de segunda ordem são aquelas em X localizadas na região central do pórtico nos eixos 3 e 4 da edificação. Realizando o travamento em apenas um pórtico dessa região já seria o suficiente para manter a estrutura estável e um parâmetro crítico de carga acima de 10, classificando a estrutura como de nós fixos.

Demais configurações de contraventamento associadas a essa, comprovam que quanto maior o número de pórticos contraventados na transversal, que constitui a direção de maior instabilidade, maior o valor do alfa crítico.

Concluiu-se também que a combinação que retorna a maior quantidade de valores menores para o alfa crítico é a combinação que inclui o vento 0 (CB1), confirmando a diretriz normativa da ABNT NBR 8800:2008 de que o vento sempre deve ser incluído na combinação, juntamente com os efeitos das imperfeições geométricas. Contudo as quatro combinações ofereceram resultados parecidos, em alguns casos até iguais.

Quanto as condições de apoio, os resultados demonstraram que é possível dispensar uma análise de segunda ordem utilizando o apoio engastado para modelos com até 24 metros de altura que possuam ligações também engastadas. Já nos modelos com ligações rotuladas, tal condição se mantém apenas para modelos com até 18 metros de altura. Porém, mesmo nesses casos, o contraventamento ainda deverá ser utilizado a fim de permitir, na fase de análise linear, o atendimento as verificações de norma quanto aos esforços.

Da mesma forma, as vinculações entre vigas e entre vigas e pilares de forma engastada contribuem para o aumento da estabilidade do conjunto, uma vez que apresentaram resultados maiores para o alfa crítico do que as ligações rotuladas em um mesmo modelo e para a mesma condição de apoio.

Por fim, o tipo e a seção do perfil utilizado para os pilares influenciam no resultado do alfa crítico, sendo a melhor opção o uso dos perfis HP. Quanto a seção, confirma-se que perfis mais robustos melhoram a estabilidade do conjunto.

5 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 247 p.

_____. NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR 6123: **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. Edifícios de múltiplos andares em aço. 2 ed. São Paulo: Pini, 2008.

CHAMBERLAIN, P. Z. M., STUMPF D. D. Avaliação dos métodos de análises de segunda ordem para edifícios industriais em estruturas de aço. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2009.

CHIANCA, R. C. **Análise da estabilidade de edifícios industriais em aço**. 2018. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal do Tocantins, Palmas, 2018

COMPUTER AND STRUCTURES INC. SAP 2000 Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures. University Ave, Berkley, USA, 2006.

CYPE 3D: **Software para engenharia e construção**. Versão 2014: CYPE Ingenieros, S.A, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1993-1-1: 2010. **Design of steel structures—Part 1.1: General rules and rules for buildings**. Bélgica, 2010.

FRANCA, M. P. A. **Estudo da eficiência dos contraventamentos treliçados em edifícios com estruturas de aço**. 2003, 332 p. Dissertação de Mestrado. Mestre em Ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

MOURA, Thallita Nadiele dos Santos. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS TRELIÇADOS EM AÇO PALMAS 2019**. 2019. 25 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Ifto, Palmas, 2019.

OLIVEIRA, L. C. de. **Estudo Comparativo Entre Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto Aplicadas a Edifícios de Múltiplos Andares**. 2018. 155 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9805/1/CT_COECI_2018_1_08.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2019.

SILVA, T. et al. Análise estrutural de pórticos metálicos: Estudo comparativo entre Eurocódigo EN 1993-1-1:2010 e ABNT NBR 8800:2008. Revista da Estrutura de Aço, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p.59-78, abr. 2016. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/revistacientifica/index.php?s=411>>. Acesso em: 30 abr. 2019.