

Comparative assessment of bracing systems in steel structures

Mortari, N. N.¹; Silva, T. E. A.²

Graduandas, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

Oliveira Júnior, L. Á.³

Professor Dr., Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

¹ naisamortari2@gmail.com; ² thaisalvespuc@gmail.com; ³ alvarojunior@pucgoias.edu.br

RESUMO: Este trabalho analisou comparativamente três tipos de arranjos de contraventamento em um pórtico de estrutura de aço, para identificar aquele que melhor contribuiu para reduzir os deslocamentos máximos da estrutura, considerando apenas as ações estáticas. A modelagem computacional, por meio do software Diana, foi realizada em duas dimensões e analisados os sistemas de contraventamento em X, diagonal simples e V invertido em dois cenários: contraventamento completo e contraventamento parcial. Os problemas foram analisados pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) considerando a NLF e a NLG acopladas. Os resultados mostraram expressiva redução nos deslocamentos máximos com o contraventamento completo, destacando-se a tipologia X, que proporcionou redução de 66% nesse deslocamento, ao passo que as tipologias diagonal simples e V invertido proporcionaram reduções de 61% e 62%, respectivamente.

Palavras-chaves: contraventamento, estrutura de aço, estabilidade global.

ABSTRACT: This work comparatively analyzed three types of bracing arrangements in a metallic structure frame, in order to identify the one that best contributes to reduce the maximum displacements of the structure, considering only the static actions. Computational modeling, using Diana software, was performed in two dimensions and analyzed the bracing systems in X, simple diagonal and inverted V in two scenarios: complete bracing and partial bracing. The problems were analyzed by the Finite Element Method (FEM) considering NLF and NLG coupled. The results showed a significant reduction in maximum displacements with full bracing, highlighting typology X, which provided a 66% reduction in this displacement, while simple diagonal and inverted V typologies provided reductions of 61% and 62%, respectively.

Keywords: bracing, steel structure, global stability.

Área de Concentração: 03 – Estruturas.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional, as cidades se desenvolveram para se adequarem às novas demandas de habitação e serviços, tornando-se necessária a construção de edifícios verticais cada vez mais altos em razão do pouco espaço que ainda resta e, eventualmente, de planos diretores que restringem a construção de edifícios com certas características em determinadas regiões da cidade.

Esse crescimento vertical, que vem se desenvolvendo ao longo de décadas em várias cidades brasileiras colocou, a princípio, entraves para a execução dessas edificações, pois os projetos requeriam naquela época, bastante tempo para serem desenvolvidos. Com isso, surgiram novas tecnologias, especialmente pacotes computacionais que tornaram esse trabalho mais ágil, o que ampliou as possibilidades do projeto estrutural. Neste sentido, em função das possibilidades dos recursos tecnológicos, foram desenvolvidos em função

da evolução de “*hardware*” e “*software*” de verificação da segurança e da estabilidade de edifícios mais precisos e que passaram a integrar as normas técnicas.

Entre os tipos de estruturas que se desenvolveram significativamente com o aumento da altura dos edifícios, destacam-se as estruturas de concreto armado e as estruturas de aço. Estas últimas, em particular, difundiram-se progressivamente na construção civil na última década com a automação industrial e a globalização da economia, conquistando um segmento importante no setor da construção.

Qualquer tipo de estrutura tem seu campo potencial de aplicação no qual é a mais vantajosa entre as demais possibilidades. Com as estruturas de aço o mesmo acontece. Assim, o projetista de estruturas sempre deve utilizar a solução que melhor atende às necessidades do projeto, considerando os materiais e novas tecnologias disponíveis e que ofereçam eficiência e segurança estruturais, bem como durabilidade.

As estruturas de aço, em especial, devido à característica intrínseca ao próprio sistema de ser capaz de vencer grandes vãos com peças muitas vezes esbeltas, apresentam a desvantagem de se tornarem sistemas muito flexíveis do ponto de vista das ações laterais, como o vento, por exemplo, razão pela qual diversas estratégias são amplamente utilizadas para aumentar a rigidez global da estrutura e diminuir seus deslocamentos laterais e a sensação de movimento que, por vezes, causa desconforto aos usuários da edificação.

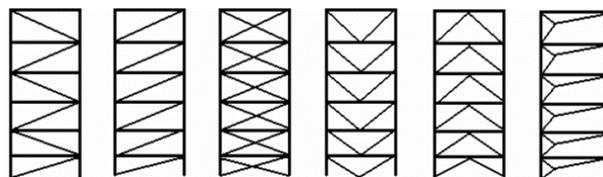
De acordo com Lima (2019), para que uma estrutura resista aos esforços causados pelo vento e seu peso próprio apresentando deslocamentos laterais aceitáveis é necessário executar uma estrutura auxiliar compatibilizada com os demais sistemas, a qual é conhecida como contraventamento. Embora existam outras possibilidades, como os núcleos de rigidez (os espaços reservados às escadas pressurizadas e aos elevadores, etc.), esta talvez seja a mais comumente adotada nas estruturas de aço.

O contraventamento é responsável por reduzir os deslocamentos da estrutura laterais da estrutura, sendo uma das formas mais eficazes para garantir a sua estabilidade a depender da altura do edifício.

É fundamental, durante a elaboração de um projeto estrutural, analisar a estabilidade global da estrutura. O comportamento de uma estrutura depende das condições do terreno, das características dos materiais, de suas dimensões e dos tipos de ligações entre os elementos. Para avaliar se a estrutura suporta as ações que as solicitam a, normalmente se elaboram esquemas estruturais para análise, seja qual for o método, com o objetivo de avaliar os esforços decorrentes dessas solicitações para fins de dimensionamento, verificar se há estabilidade e se os estados limites serão atendidos.

A figura 1 apresenta alguns tipos de contraventamento para estruturas de aço.

Figura 1 – Tipos de sistemas de redução dos deslocamentos laterais.



Fonte: França (2003)

Considerando todas as ações às quais uma estrutura possa ser exposta e para manter sua forma original, é necessário o estudo de arranjos de contraventamento que garantem a sua segurança, ductilidade, integridade física e estabilidade.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar os tipos de contraventamento e apresentar as reações e deformações que a estrutura sofre, comparando a que melhor contribui a sua estabilidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Sistemas Estruturais*

Os sistemas estruturais são formados principalmente por elementos horizontais e verticais sendo eles as vigas, as lajes e os pilares. No entanto, em função do arranjo desses elementos e do comportamento estrutural esperado, outros elementos estruturais podem ser necessários, entre eles citam-se os contraventamentos e os painéis. Os sistemas estruturais mais usados em edifícios são, na maioria das vezes, variações e combinações dos componentes estruturais citados acima.

2.2 *Edificações em aço*

Os pilares, vigas, lajes e sistemas de contraventamento compõem a estrutura de um edifício alto em aço. À associação destes elementos para a formação de uma edificação damos o nome de sistema estrutural. Com a intenção de ser seguro e econômico tanto quanto possível, o sistema estrutural de um edifício tem a função de resistir às ações e às forças laterais e gravitacionais.

A escolha do sistema estrutural de um edifício alto supostamente deveria envolver apenas aspectos relacionados à seleção e ao arranjo dos elementos estruturais destinados a resistir aos esforços verticais e horizontais. No entanto, os sistemas estruturais para edifícios altos são fortemente influenciados por vários fatores, nem todos de origem estrutural. Entretanto,

pode-se citar também o método construtivo, o tratamento arquitetônico, os sistemas de instalações prediais, a natureza e a intensidade do carregamento horizontal, a altura e a esbeltez do edifício, entre outros. Sabe-se que é essencial a necessidade de uma forma estrutural mais apropriada quando o edifício é mais alto e esbelto, pois os fatores estruturais tornam-se ainda mais importantes (FRANÇA, 2003).

2.3 Estrutura contraventada e não-contraventada

Contraventamentos tem a finalidade de reduzir e impedir os deslocamentos horizontais, e são compostos por barras adicionadas às estruturas, fornecendo estabilidade frente à ação dos ventos. Podem ser um travamento de vigas e pilares sendo utilizado na vertical, ou travamento de coberturas sendo utilizado na horizontal (MATOS, 2014).

Existem vários tipos de contraventamento com formas que divergem entre si quando as estruturas são submetidas a forças laterais. No entanto, o termo “*estrutura contraventada*” é aplicado para se referir àquelas estruturas que utilizam sistemas treliçados como a técnica primeira de contraventamento, para garantir a estabilidade lateral da edificação (FRANÇA, 2003).

Segundo Doria (2007), uma estrutura não contraventada acontece quando a rigidez à flexão de vigas e pilares interligados entre si garante a resistência da estrutura às ações laterais. E quando existem diagonais ou paredes de cisalhamento que formam um sistema de contraventamento, que possui elevada rigidez para assegurar a resistência às ações laterais e reduzir os deslocamentos causados por elas, tem-se uma estrutura contraventada.

Nos sistemas que trabalham com elementos lineares formando o contraventamento, criam-se treliças verticais nas quais os membros em diagonal resistem às forças laterais juntamente com as vigas. Neste contexto, a distinção entre os conceitos de estrutura contraventada e não contraventada é feita pela capacidade inerente à própria estrutura de limitar seus deslocamentos laterais mantendo-se estável, sem necessitar de sistemas especificamente construídos para esta finalidade.

2.3.1 Contraventamentos treliçados

Chaves (2009) afirma que para o aumento, em um determinado sistema adotado, da resistência a esforços horizontais, conectam-se vigas e pilares. Assim o contraventamento treliçado produz de forma eficiente um acréscimo de rigidez lateral. Os contraventamentos treliçados, devido a sua forma, estão sujeitos,

principalmente, a esforços axiais de compressão e tração, sendo assim muito utilizados na construção metálica.

Ainda segundo o mesmo autor, para uma solução econômica de uma grande diversidade de altura, podem-se obter estruturas laterais muito rígidas adicionando pouco material e, ainda assim, garantir alta eficiência dos contraventamentos.

A obstrução de janelas e portas, conforme esclarece Chaves (2009), impõe aos arquitetos a obrigação de conceberem um novo arranjo dos ambientes para resolver conflitos gerados com os espaços internos do edifício, tratando-se, segundo este autor, de uma desvantagem do sistema. Na Figura 2 encontram-se dois tipos de contraventamentos treliçados em estrutura de aço. O sistema empregado na 2a é o arranjo em X, enquanto na 2b é empregado o arranjo em Y.

Figura 2 – Contraventamentos treliçados em edifícios de estrutura de aço.



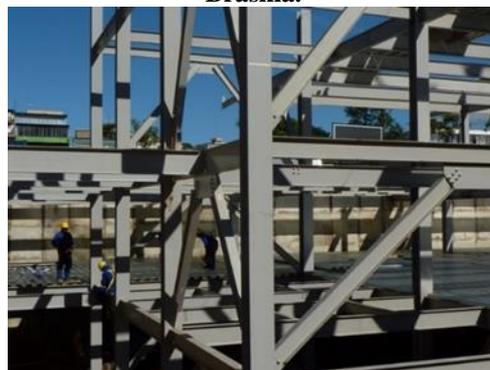
(a) Hotel Arts, Barcelona.

(b) Edifício sede do Itaú, São Paulo, 1995. Engenheiro Ernest Mange.

Fonte: vitruvius.com.br. Acessado em 22/05/2021.

Nas figuras 3a e 3b é possível observar o sistema de contraventamento instalado no Conselho Nacional de Justiça (CNJ), executado em 2013 na cidade de Brasília, com 10.000 m² construídos e 8 pavimentos em estrutura em aço.

Figura 3 – Obra do Conselho Nacional de Justiça, em Brasília.



(a) Detalhe do sistema de contraventamento em estrutura em aço constituída por perfis



(b) Vista do arranjo do sistema de contraventamento.
Fonte: Acervo dos autores.

2.3.2 Estruturas Tubulares

Segundo França (2003), o sistema de estruturas tubulares convencional aperticadas é indicado para plantas retangulares ou quadradas. Este sistema é formado por vigas com pequenos espaçamentos e colunas externas, que atua como tubo em balanço engastado no solo. Para a estrutura tubular ser resistente à flexão e torção, os pórticos, rígidos ou contraventados, são trazidos para a parte externa do edifício em torno de todo perímetro e altura, permitindo a distribuição das cargas gravitacionais entre as colunas internas e externas.

Estruturas tubulares treliçadas são mais adequadas que as tubulares aperticadas para as edificações mais altas. Com as treliças de aço, as colunas podem possuir espaçamentos maiores, permitindo maiores vãos para aberturas de portas e janelas. Este arranjo foi utilizado pela primeira vez em 1969, no John Hancock Building (Figura 4) na cidade de Chicago.

Figura 4 – John Hancock Building.



(a) Vista frontal do contraventamento

(b) Vista em perspectiva do contraventamento

Fonte: <https://www.archdaily.com/67599/ad-classics-john-hancock-center-som>. Acessado em: 23/05/2021

2.3.3 Paredes de cisalhamento

A rigidez da estrutura é assegurada por paredes construídas, em cada andar, nos vãos entre vigas e

colunas. Devido a sua alta rigidez, podem servir como elementos de vedação e serem resistentes às ações laterais, como se fossem as treliças verticais de um pórtico contraventado.

Para edificações de no máximo 30 pavimentos, as paredes de cisalhamento constituem um sistema resistente adequado às ações laterais devido à rigidez horizontal resultante. É uma solução vantajosa para empreendimentos residenciais e hotéis, porque permite que as paredes sejam contínuas ao longo da estrutura (FRANÇA, 2003).

2.3.4 Estrutura de Pórticos rígidos

Carneiro (2008) explica que, por possuir rigidez insuficiente para conter os deslocamentos laterais dos edifícios, sobretudo em edifícios elevados, mantendo esses deslocamentos dentro de limites aceitáveis, os pórticos não são muito utilizados como elementos de contraventamentos. Por si só, em casos de edifícios de pequena altura, poderão garantir a resistência a ações horizontais, ou serem utilizados em conjunto com elementos mais rígidos, incluindo ligações rígidas entre algumas vigas e pilares convenientemente escolhidos ao longo das filas e eixos da estrutura, de forma a melhorar o comportamento desta como um todo. Assim, pretende-se obter um conjunto de pórticos verticais rígidos com a mesma altura do edifício, tendo como objetivo que esta estrutura auxiliar, composta por pórticos verticais rígidos e lajes rígidas, seja capaz de estabilizar a estrutura principal frente às ações horizontais utilizando a rigidez à flexão das vigas e dos pilares que compõem esses pórticos. Por sua vez, as vigas sem função de contraventamento, podem ser rotuladas nos pilares. Ainda, os esforços horizontais que atuarem no plano do piso serão transferidos aos pórticos da estrutura através da rigidez da laje de cada pavimento pelo efeito diafragma, segundo a rigidez de cada pilar.

França (2003) complementa que estruturas de pórticos rígidos são muito utilizadas no Brasil em edifícios em concreto armado, e a sua vantagem é encontrada no seu arranjo retangular aberto, o que permite grande liberdade arquitetônica. De acordo com esse autor, este sistema estrutural é mais interessante para edifícios em concreto armado devido à rigidez inerente às suas conexões, que são ditas monolíticas. No entanto, pórticos rígidos podem ser uma boa opção para edifícios em aço que não sejam muito altos ou particularmente esbeltos. Para construções com cerca de quatro pavimentos este sistema estrutural é bastante empregado. Nestes casos, como os elevadores normalmente não são obrigatórios, a maioria dessas construções não conta com o efeito de núcleo rígido proporcionado pela caixa de elevadores, quer com contraventamento quer com paredes de concreto.

França (2003) explica que a utilização do sistema de pórticos rígidos para estruturas de aço apresenta desvantagem no alto custo das ligações resistentes a momentos fletor e torção. Outra desvantagem é que os pilares e as vigas de um determinado pavimento são influenciados diretamente pela magnitude do esforço cortante externo naquele nível da estrutura, aumentando na proporção de sua aproximação com a base da estrutura, ou seja, nos pavimentos inferiores.

2.4 Estabilidade Global

A verticalização das cidades trouxe uma tendência mundial, que também é frequente no Brasil, salvo raras exceções, de serem projetados e executados edifícios cada vez mais altos. Devido a isso, a avaliação da estabilidade global das estruturas em função da tendência de aumento do número de seus pavimentos tem se tornado uma ferramenta cada vez mais importante no contexto do projeto estrutural, seja qual for o sistema estrutural adotado pelo projetista, a seguir são apresentados alguns conceitos sobre o assunto que merecem comentários.

2.4.1 Não linearidade da estrutura

A rigidez da estrutura depende das propriedades físicas do material e a da geometria dos elementos. Em comportamento linear elástico, a rigidez garantirá a proporcionalidade entre esforços e deslocamentos. Entretanto, para ações que induzem tensões que obrigam a estrutura a se comportar em regime não linear, a rigidez deixa de ser um parâmetro de proporcionalidade entre os esforços e os deslocamentos correspondentes. Nestes casos é necessária uma análise não-linear da estrutura, pois esta oferece uma maior aproximação do comportamento mecânico da estrutura do que se a análise fosse puramente linear, quando seriam obtidos esforços muito maiores que aqueles da estrutura em serviço.

O comportamento não-linear é originado por dois efeitos: a não linearidade física (NLF) e a não linearidade geométrica (NLG). O primeiro está ligado a uma mudança de comportamento da estrutura, que ao atingir tensões que ultrapassam aquela que define o limite elástico, passa a comportar-se de maneira não-linear, manifestando deformações permanentes e, no caso de estruturas de aço, a plastificação por exemplo. O segundo tem relação com uma alteração da geometria da estrutura que desvia ligeiramente as ações verticais de seus eixos de aplicação, induzindo esforços não previstos e provocando um comportamento semelhante à flexão, mas que é causado pelas ações de compressão nos pilares. Essas alterações geométricas também podem ocorrer nas almas e mesas dos perfis metálicos,

também induzindo esforços adicionais, podendo ou não ocasionar plastificação localizada.

2.4.2 Estados Limites

Com o passar do tempo os avanços na tecnologia, nas metodologias construtivas e no cálculo de estruturas, juntamente com a necessidade de diminuir custos e potencializar o uso de espaços cada vez menores nas edificações, desencadeou a tendência de construção de estruturas mais esbeltas e conseqüentemente mais flexíveis, sobretudo no caso das estruturas de aço. Dessa maneira, tornam-se mais preocupantes alguns dos estados limites de serviço para garantir a segurança, a usabilidade e a sensação de conforto dos usuários da estrutura.

Segundo definição que consta na NBR8681 (ABNT, 2003) estados limites de uma estrutura são estados a partir dos quais a estrutura apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção. Podem ser divididos em estados limites últimos, que são aqueles relacionados ao colapso da estrutura, ou estados limites de serviço, que são aqueles relacionados ao comportamento da estrutura em serviço e que podem chegar a comprometer a durabilidade e a vida útil da edificação. Estados limites últimos são estados que, pela sua simples ocorrência, determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção, enquanto estados limites de serviço são estados que, por sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas para o uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimento da durabilidade da estrutura. Na ocorrência de estados limites de serviço, é comum que sejam notadas diversas manifestações patológicas, como por exemplo as fissuras e trincas, entre outras.

2.4.3 Flambagem

As cargas axiais capazes de tornar instáveis as estruturas de aço são, geralmente, chamadas de cargas críticas de flambagem e podem causar a ruptura dos elementos metálicos. Para peças muito esbeltas a flambagem se manifesta no regime elástico e, para peças com elasticidade média também manifestam flambagem, bem como deformações plásticas.

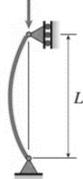
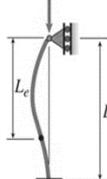
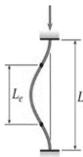
Levando em consideração a esbeltez da barra, esta poderá atingir uma instabilidade longitudinal que levará a ruptura da seção e esse momento de instabilidade é conhecido como flambagem. Enquanto a carga permanece constante a deformação lateral pode crescer a ponto de romper a barra por esforço de flexão.

A teoria de Euler diz que para uma coluna bi rotulada em seus extremos, de comprimento L , submetida a um

par de cargas axiais de compressão aplicadas em suas extremidades, quando aplicada uma carga F deforma-se segundo uma curva senoidal. A Tabela 1 apresenta algumas configurações deslocadas de pilares sujeitos à flambagem, acompanhadas das respectivas equações

para cálculo da carga crítica de Euler e do comprimento de flambagem.

Tabela 1. Carga crítica de Euler (casos ideais – carregamento axial)

Carga crítica	$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{2,046 \pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{4 \pi^2 EI}{L^2}$
Comprimento de flambagem	$L_e = 2L$	$L_e = L$	$L_e = 0,699L$	$L_e = 0,5L$
Configuração deslocada				

Fonte: Autores.

3 METODOLOGIA

3.1 Levantamento bibliográfico

A revisão bibliográfica foi realizada na biblioteca de teses e dissertações do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, em buscas realizadas no Google Acadêmico, em livros e artigos de periódicos nacionais e internacionais obtidos de pesquisas realizadas no Portal de Periódicos Capes. As buscas foram realizadas usando os termos: tipos de contraventamentos em estrutura em aço, estruturas contraventadas, análise de sistemas de contraventamento, “shear walls”, “bracing systems” e “braced structures”. Deste levantamento, foi obtida toda a base teórica relacionada no item Revisão Bibliográfica, bem como informações para a discussão dos resultados que serão encontrados nas modelagens a serem realizadas na próxima etapa do trabalho.

3.2 Modelagem computacional

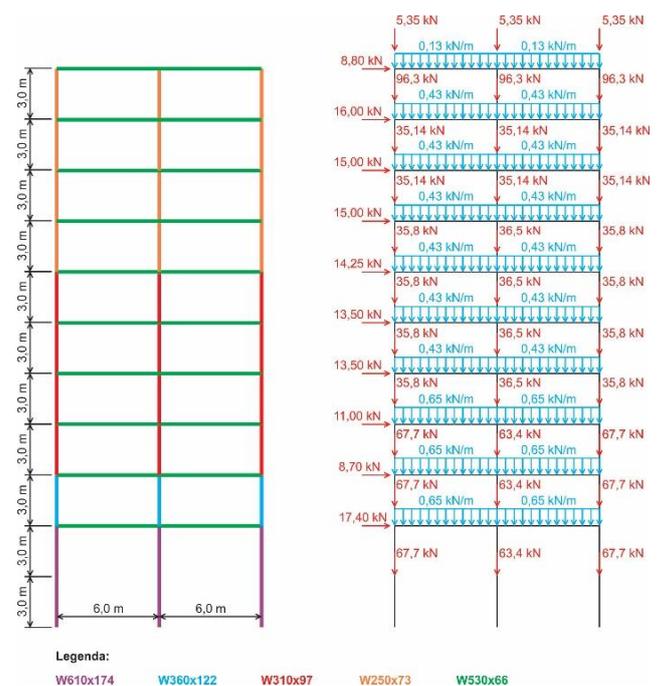
3.2.1 Geometria e malha

A modelagem computacional foi realizada na versão educacional 9.4.4 do programa Diana® tendo sido utilizado o modelo computacional desenvolvido por Sousa *et al* (2016), apresentado na figura 5.

As dimensões e propriedades da seção transversal dos elementos foram extraídas de catálogos de perfis disponíveis comercialmente.

Na modelagem considerou-se apenas a estrutura e seus sistemas de contraventamento, não incluindo outros sistemas componentes do edifício, como as coberturas e o sistema de vedação vertical interna e externa. Para o pórtico foram determinados os sistemas de contraventamento em diagonal simples, X e V invertido. As dimensões e propriedades da seção transversal dos elementos foram extraídos do catálogo de perfis Gerdau e para o contraventamento o perfil utilizado foi o W610x174.

Figura 5 – Características do pórtico adotado.



Fonte: Adaptado de Sousa *et al* (2016).

Para a malha de elementos finitos, foram utilizados elementos finitos de pórtico plano de eixo reto, com 2 nós e 3 graus de liberdade nodais representativos das translações em x e y e da rotação em torno do eixo z , perpendicular ao plano do pórtico, com deslocamentos obtidos por uma função de interpolação linear, sendo, portanto, uma modelagem bidimensional (2D).

3.2.2 Vínculos e carregamentos

Nos modelos, as condições de contorno representam as vinculações da estrutura com o meio externo. Nesta, os nós dos pilares inferiores foram restringidos em todas as suas deslocabilidades para considerar o engastamento destes pilares nas fundações.

Para fins de validação do modelo, nas análises foram considerados os carregamentos indicados por Sousa *et al* (2016). Os carregamentos utilizados no pórtico são usuais de projeto e foram analisadas segundo os procedimentos simplificados apresentados na NBR 8800 (ABNT, 2008).

3.2.3 Configurações das análises e estratégias de solução

O aço foi considerado como material isotrópico em regime elástico linear, sendo fornecido o módulo de elasticidade ($E = 20500 \text{ kN/cm}^2$) e o coeficiente de Poisson ($\nu = 0,3$). Em regime não linear, o material foi representado pelo modelo de von Mises com plasticidade perfeita, sendo fornecida a tensão de escoamento ($f_y = 25 \text{ kN/cm}^2$). As análises foram realizadas com controle de força.

Foram consideradas ainda as não linearidades físicas (NLF) e geométrica (NLG) acopladas. Contudo, para cada forma de não-linearidade, foram adotadas estratégias adequadas de solução numérica. Para resolver o sistema de equações não lineares gerado pelo programa Diana, empregou-se o método de Newton-Raphson convencional (com atualização da matriz de rigidez global dos elementos e, por consequência, da estrutura), com 20 passos de carga e 250 iterações a cada passo, ao qual foi acoplado o método de busca linear com 500 buscas. Para resolver eventuais problemas de instabilidade numérica relacionados à NLG, aos métodos já mencionados foi acoplado o método do comprimento de arco com 200 iterações para evitar fenômenos como o “*snap-back*” (retorno do deslocamento) e o “*snap-through*” (avanço brusco do deslocamento).

3.3 Análise dos resultados

Os resultados gerados pelo programa Diana foram avaliados em duas formas: a primeira, visualmente, no

ambiente de pós-processamento. A segunda, pelos dados tabelados obtidos do processamento. No primeiro caso, foram avaliadas as configurações deslocadas e as tensões, já no segundo caso foi avaliada a influência do sistema de contraventamento na redução dos deslocamentos transversais e, conseqüentemente, na mobilidade do pórtico ao carregamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Configuração deslocada

As figuras 6 e 7 a seguir apresentam as configurações deslocadas do pórtico de referência e respectivos sistemas de contraventamento analisados. Na análise dos deslocamentos foram avaliados dois cenários: a) contraventamento completo (pórtico contraventado em todos os pavimentos acima do primeiro) e b) contraventamento parcial (pórtico contraventado apenas no 5° e 6° pavimentos).

Analisando o cenário de contraventamento completo da estrutura, nota-se que a presença do sistema de contraventamento alterou a forma deslocada do pórtico, reduzindo seus deslocamentos horizontais conforme o sistema de contraventamento adotado. Para o pórtico de referência (pórtico não contraventado) o deslocamento transversal máximo foi de 4,33 cm, enquanto no pórtico contraventado pelo sistema de diagonal simples, houve redução do deslocamento transversal máximo para 1,69 cm, que corresponde a uma redução de 61% do deslocamento transversal máximo observado no pórtico de referência. De maneira análoga, os pórticos contraventados pelos sistemas de V invertido e X produziram reduções da ordem de 62% e 66%, respectivamente. Essas reduções nos deslocamentos transversais ocorrem porque os elementos que constituem o sistema de contraventamento restringem os deslocamentos dos demais elementos, contribuindo para a redução da mobilidade da estrutura como um todo e o sistema de contraventamento em X foi aquele que proporcionou maior redução nos deslocamentos transversais. Essas observações podem ser verificadas na figura 8.

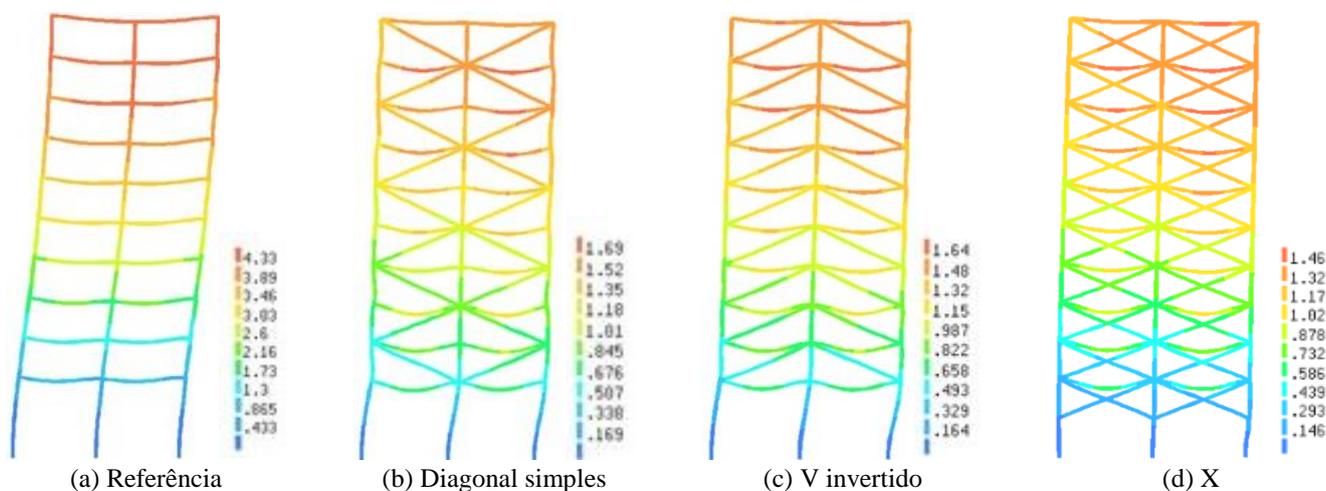
Por sua vez, na análise do cenário de contraventamento parcial da estrutura, nota-se que a presença do sistema de contraventamento exclusivamente no 5° e 6° pavimentos não alterou de maneira expressiva a forma deslocada do pórtico, reduzindo seus deslocamentos horizontais conforme o sistema de contraventamento adotado. Para o pórtico de referência (pórtico não contraventado) o deslocamento transversal máximo foi de 4,33 cm, enquanto no pórtico contraventado pelo sistema de diagonal simples, houve redução do deslocamento transversal máximo para 3,46 cm, que corresponde a uma redução de 20% do deslocamento

transversal máximo observado no pórtico de referência. O pórtico contraventado em V invertido no 5° e 6° pavimentos, apresentaram praticamente o mesmo deslocamento transversal, ao passo que com o contraventamento em X, o deslocamento transversal máximo obtido equivale a 78,5% daquele observado no pórtico de referência. Neste cenário de análise, a capacidade de restringir os deslocamentos pelo sistema de contraventamento é menor do que no primeiro cenário, fato é que a influência da geometria do sistema de contraventamento influenciou em menor grau a forma deslocada do pórtico. Novamente, o sistema de

contraventamento em X foi aquele que proporcionou maior redução nos deslocamentos transversais.

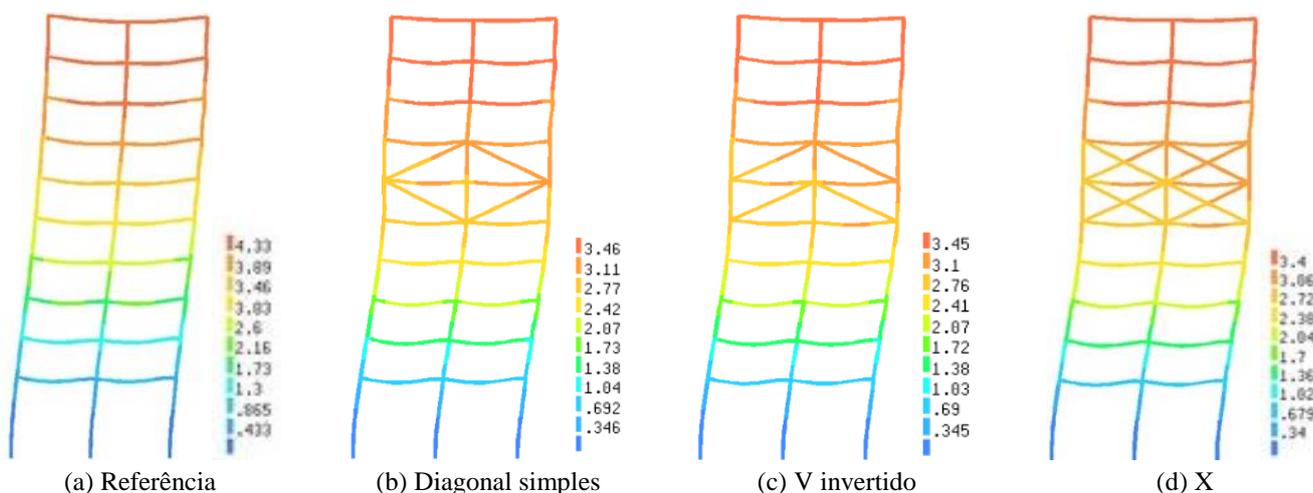
É importante esclarecer que a redução dos deslocamentos transversais é benéfica para o alcance das condições de estabilidade da estrutura, já que em se tratando de estruturas notadamente mais flexíveis do que suas análogas em concreto armado, as estruturas de aço ficam, também, mais suscetíveis a problemas relacionados aos efeitos de segunda ordem, sobretudo para carga de elevadas intensidades, as quais poderão produzir maiores momentos fletores nas fundações.

Figura 6 – Deslocamentos equivalentes para os pórticos com contraventamento completo.



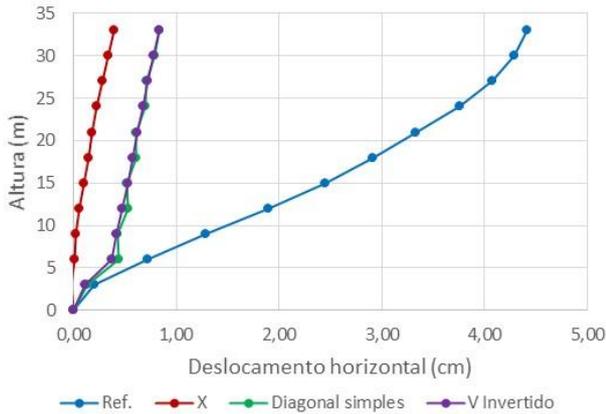
Fonte: Autores.

Figura 7 – Deslocamentos equivalentes dos pórticos com contraventamento parcial.

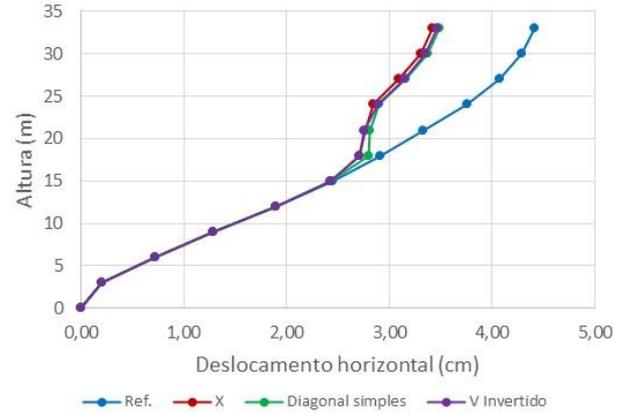


Fonte: Autores.

Figura 8 – Deslocamento horizontal ao nível de cada pavimento.



(a) Contraventamento completo



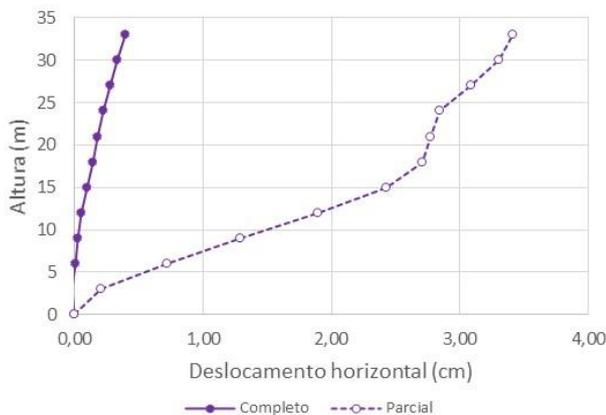
(b) Contraventamento parcial

Fonte: Autores.

4.2 Contraventamento completo e parcial

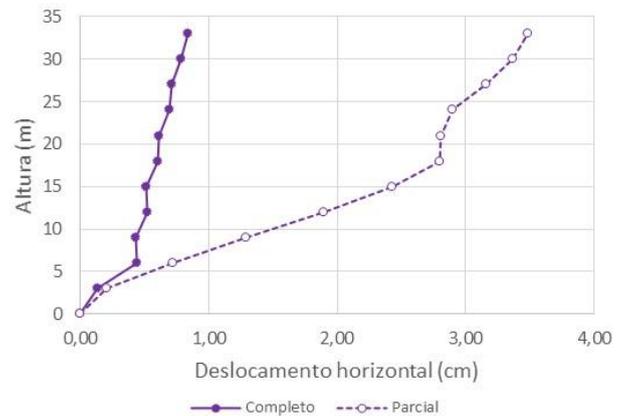
Nas figuras 9 a 11 são apresentados gráficos da altura do edifício (eixo das ordenadas) em função do deslocamento horizontal ao nível de cada pavimento (eixo das abscissas). Esses gráficos comparam as respostas obtidas para as tipologias X, diagonal simples e V invertido, os efeitos dos contraventamentos completo e parcial e mostram, como era esperado, que o contraventamento completo reduziu drasticamente os deslocamentos obtidos no cenário de análise em que o pórtico foi contraventado apenas entre o 5º e o 6º pavimentos. Comparando os contraventamentos completo e parcial, na tipologia X, o contraventamento completo reduziu 88% o deslocamento máximo obtido com o contraventamento parcial. Por sua vez, as tipologias Diagonal simples e V invertido, reduziram o deslocamento máximo em 76%.

Figura 9 – Comparação dos contraventamentos completo e parcial em X.



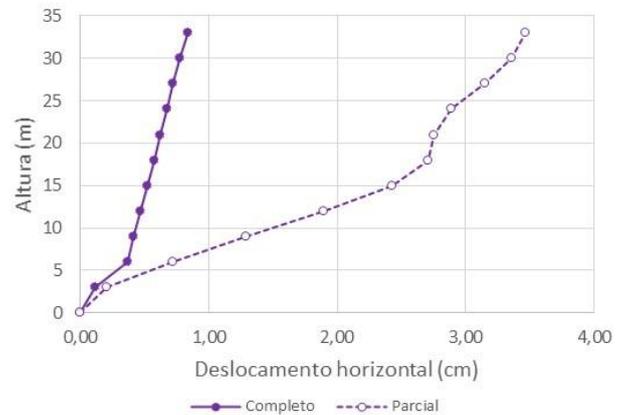
Fonte: Autores.

Figura 10 – Comparação dos contraventamentos completo e parcial em diagonal simples.



Fonte: Autores.

Figura 11 – Comparação dos contraventamentos completo e parcial em V invertido.



Fonte: Autores.

5 CONCLUSÕES

A utilização de arranjos de contraventamento mostra-se eficiente para reduzir os deslocamentos horizontais de estruturas apertadas, contribuindo para a estabilidade global da estrutura. O sistema de contraventamento atua servindo como estrutura auxiliar de caminho das cargas em direção aos apoios, que restringe deslocamentos e redistribui as tensões de forma a aliviar regiões sobrecarregadas e, com isso, reduzir as deformações da estrutura.

Em comparação com o pórtico não contraventado, as tipologias de contraventamento X, Diagonal simples e V invertido proporcionaram reduções no deslocamento máximo de 66%, 61% e 62%, respectivamente, mostrando que o contraventamento em X foi mais eficiente.

Comparando os cenários de contraventamento completo e parcial, a tipologia X mostrou redução do deslocamento máximo em 88%, ao passo que as tipologias Diagonal simples e V invertido reduziram o deslocamento máximo em 76%.

Os resultados mostram que o projetista deve analisar o comportamento da estrutura e identificar a tipologia de contraventamento mais conveniente, bem como a configuração desta tipologia que seja mais econômica e que permita limitar os deslocamentos horizontais a valores aceitáveis conforme os critérios de projeto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: *Ações e segurança nas estruturas - Procedimento*. Rio de Janeiro, p. 2. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: *Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, p. 8-16. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: *Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, 2013.

CARNEIRO, F.; MARTINS, J. G. *Análise de estruturas: Contraventamento de Edifícios*. Porto, Portugal: UFP, 2008, p. 32-34.

CHAVES, J.R.F. *Análise dinâmica de pórticos metálicos contraventados*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2009, p. 11-13.

DE SOUZA, Alex Sander Clemente; PEREIRA, Margot Fabiana; DE NARDIN, Silvana. *Análise inelástica de segunda ordem em pórticos planos de*

aço. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 12, n. 3, 2016.

DIAS, L. A M. *Edificações de aço no Brasil*, Zigurate Editora 1993, p.13-16.

DORIA, A. S. *Análise da estabilidade de pórticos planos de aço com base no conceito de forças*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007, p. 6.

FRANÇA, M. P. A. *Estudo da Eficiência dos Contraventamentos Treliçados em Edifícios com Estruturas de Aço*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003, p. 2-21.

LIMA, G. O. *Estudo comparativo dos parâmetros de estabilidade em dois tipos de sistemas de contraventamento adotados em edifícios de concreto armado*. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 11, 2019, p. 27207-27225.

MATOS, R. C. B. *Sistemas de contraventamentos em Edifícios de Estrutura Metálica*. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2014, p. 14.

SILVA, K. C. *Análise Teórico-Experimental de Barras Comprimidas em Estruturas de aço Espaciais*. Dissertação de mestrado, Ouro Preto, Brasil: UFOP, 1999, p. 25-28.