

Estudo da influência das imperfeições geométricas iniciais no comportamento de pórticos semi-rígidos de aço

Study of the influence of initial geometric imperfections on the behavior of semi-rigid steel frames

Victor Painçal Rodrigues(1); Bruno Eizo Higaki(2)

1 Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana “Padre Sabóia de Medeiros” – FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil. E-mail: v_1810@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6486-6140>

2 Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana “Padre Sabóia de Medeiros” – FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil. E-mail: bruno.higaki@fei.edu.br

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 8, n. 1, p. 69-89, janeiro-junho, 2021 - ISSN 2358-6508

[Recebido: agosto 5, 2019; Aceito: agosto 19, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2021.v8i1.3470>

Endereço correspondente / Correspondence address

Av. Mahatma Gandhi, 116 – Interlagos, São Paulo – SP,
Brasil.

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora: Richard Thomas Lermen

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui! / click here!](#)

Resumo

Neste trabalho analisou-se a influência das imperfeições geométricas iniciais na estabilidade de pórticos planos semi-rígidos de aço. Para isso, foi analisado via método dos elementos finitos a introdução das imperfeições geométricas iniciais por meio da modelagem dos nós em uma posição inicial deslocada. Verificou-se que com a introdução de imperfeições geométricas iniciais houve um pequeno aumento dos valores de momentos fletores nos pórticos estudados, porém não suficientes para tornarem-se significativos na análise. Um fator notado como mais relevante foi à consideração da semi-rigidez das ligações viga-pilar.

Palavras-chave: Imperfeições geométricas iniciais. Pórticos semi-rígidos de aço. Elementos Finitos.

Abstract

In this work, the influence of the initial geometric imperfections on the stability of semi-rigid plane steel frames was analyzed. The finite element method was used in the analysis and the initial geometric imperfections was considered by modeling nodes in deformed shape position. It was verified that the introduction of initial geometric imperfections increased the bending moments values in the frames studied, but not enough to become significant in the analysis. It was observed that the consideration of the semi-rigidity of the beam-pillar connections are more relevant in the results.

Keywords: Initial geometric imperfections. Semi-rigid steel frames. Finite elements.

1 Introdução

Os frequentes investimentos na industrialização vêm otimizando custo, tempo e qualidade na construção civil brasileira. Com isso, o emprego das estruturas metálicas em edifícios residenciais e comerciais aparece como uma solução de múltiplos desafios.

Com as recentes evoluções de softwares na área de engenharia criou-se a oportunidade de novos programas serem empregados no estudo de diversas estruturas, possibilitando a realização de análises mais complexas e realistas da resistência e deslocabilidade do sistema estrutural. Assim sendo, análises mais precisas podem proporcionar desde uma estrutura mais segura a uma economia no projeto.

No decorrer das décadas de 1990 e 2000 foram realizadas diversas pesquisas sobre o comportamento não linear das estruturas como em Foley e Vinnakota, (1999) desenvolveu-se um elemento finito para uso na análise de segunda ordem inelástica de estruturas de aço planas, já em Chan e Chui (2000) apresentaram estudos de procedimentos numéricos simples e eficientes em análises avançadas de estruturas de aço e em Chan, Huang, Fang (2005) onde um procedimento com elementos finitos é proposto e é estudado o comportamento não linear de estruturas com conexão de base semi-rígidas e vários modos de imperfeições iniciais, estes autores colocaram em evidência questões como a não linearidade geométrica e não linearidade de material. Estas pesquisas contribuíram para o aprimoramento da qualidade da análise estrutural empregada.

Outras pesquisas realizadas na última década abordando o tema da não linearidade das estruturas podem também ser citadas como Iu e Bradford (2012) onde é apresentada uma formulação capaz de capturar diferentes tipos de não linearidades geométricas e materiais em aplicações gerais de estruturas de aço e, assim, oferecendo um meio eficaz de avaliar o comportamento não linear das estruturas, Saritas e Koseoglu (2015) apresenta um elemento que é utilizado para a análise de estruturas de aço, considerando a presença de conexões semi-rígidas de viga para coluna, em Nguyen e Kim (2016) é apresentado um procedimento com elemento finito baseado em deslocamentos considerando o comportamento inelástico não linear e os efeitos das imperfeições geométricas são discutidos.

Destas análises dois tipos de imperfeições geométricas iniciais são necessárias serem consideradas: a imperfeição global representando o desaprumo da estrutura e imperfeição local representando a falta de retilinearidade dos elementos de barra constituintes.

Uma importante simplificação adotada na análise estrutural é quanto ao comportamento das ligações que usualmente são consideradas como idealmente rígidas ou idealmente flexíveis. Porém, o comportamento das ligações influencia diretamente nos deslocamentos globais da estrutura. Para isso, foram realizadas pesquisas sobre

o comportamento das ligações representadas por curvas momento-rotação para diferentes tipos de ligações empregadas como em Al-Bermani and Kitipornchai (1992). Atualmente ainda muitas pesquisas são realizadas para aperfeiçoamento do estudo das ligações como, Bahaz et al. (2018), Silva et al. (2018) que analisa a rigidez inicial de uma junta inovadora composta por seções de aço formadas a frio e Zhao Z et al. (2018) em que é proposto um modelo de análise que pode considerar juntas semi-rígidas e inelasticidade ao mesmo tempo com alta precisão, e pode ser convenientemente incorporado no software de elementos finitos em geral.

Segundo a NBR 8800:2008 - Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios - Os efeitos das não linearidades geométricas e as imperfeições iniciais geométricas e de material devem ser levados em consideração nos cálculos, por meio de procedimentos baseados em uma classificação quanto a deslocabilidade da estrutura. Sendo assim, os cálculos podem ser feitos por meio de teorias exatas, aproximadas ou com adaptações de teoria geometricamente linear.

Também, segundo a NBR 8800:2008, as estruturas de pequena e média deslocabilidade devem ter os efeitos das imperfeições geométricas iniciais levadas em conta diretamente nas análises, por meio da modelagem do deslocamento horizontal interpavimento ou por meio de forças nocionais.

Este artigo objetiva abordar a influência das imperfeições geométricas iniciais em pórticos de aço para determinar como afetam os deslocamentos, esforços e a capacidade de carga final da estrutura. Sendo empregada uma análise considerando os efeitos das não linearidades geométricas e considerando a semi-rigidez das ligações viga-pilar.

1.1 Análise Estrutural

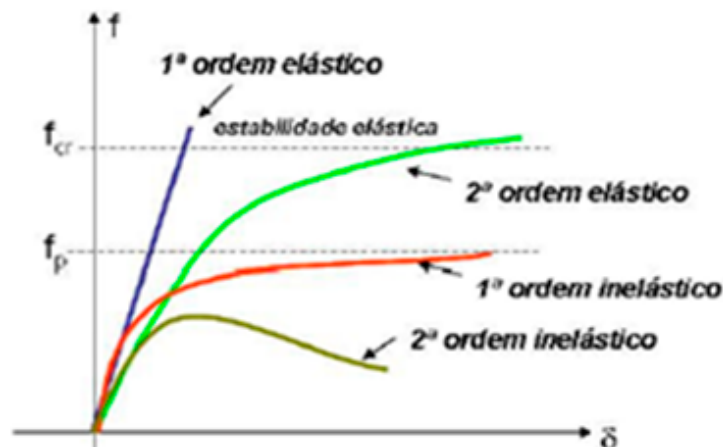
A análise estrutural é uma das etapas mais importantes do projeto, pois a determinação de esforços solicitantes e os deslocamentos da estrutura dependem de fatores como rigidez, deformabilidade, imperfeições iniciais de material e geométricas, do tipo de ligações na transferência de cargas dentre outros fatores.

Quanto à estabilidade das estruturas a análise estrutural pode ser realizada considerando formulação do equilíbrio da estrutura em sua posição indeformada (análise linear geométrica) ou considerando a formulação do equilíbrio na posição deslocada da estrutura (análise não-linear geométrica).

Quanto ao material da estrutura, pode-se também considerar diferentes comportamentos na análise estrutural. O modelo elástico considera um comportamento do material linear e que os esforços não ultrapassam a tensão de escoamento, sendo válida da lei de Hooke. Já o modelo elasto-plástico considera um comportamento não linear do material e que ao atingir a tensão de escoamento ocorrerão deformações permanentes, alterando o comportamento da estrutura no estudo dos esforços.

O gráfico ilustrado na Figura 1 representa a relação entre os carregamentos aplicados e o deslocamento horizontal da estrutura para os diferentes tipos de análises. A análise plástica não linear geométrica é a mais rigorosa, portanto, é a que mais se aproxima do comportamento real da estrutura.

Figura 1. Resposta estrutural em função do tipo de análise



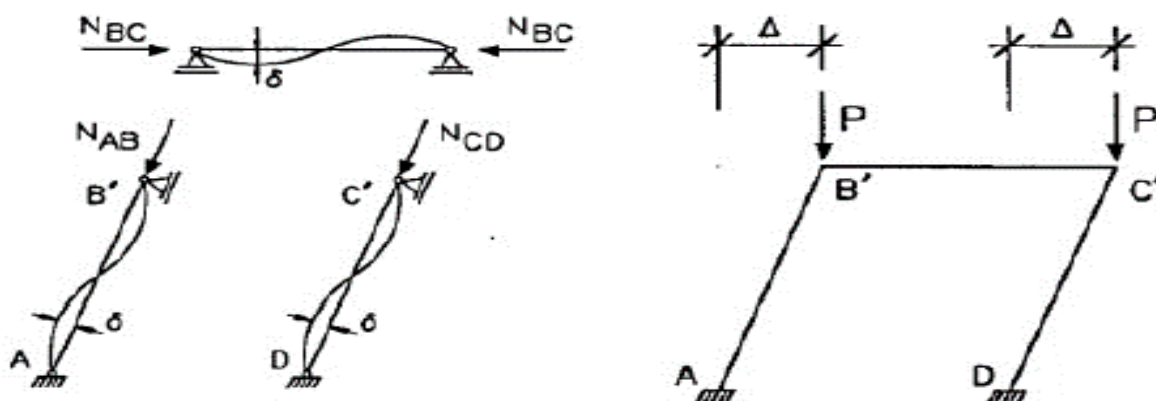
Fonte: Souza, 2009.

Os efeitos das não linearidades geométricas são oriundos dos deslocamentos da estrutura que, com os esforços aplicados, geram esforços e deslocamentos adicionais.

Estes efeitos podem ser divididos em dois tipos: aqueles que acontecem pelos deslocamentos dos nós da estrutura e são denominados efeitos globais de segunda ordem ($P-\Delta$), e aqueles que ocorrem nas barras da estrutura e que são denominados efeitos locais de segunda ordem ($P-\delta$). Os efeitos globais são causados por forças verticais sobre deslocamentos horizontais dos nós. E os efeitos locais são causados por forças de compressão em barras não retilíneas.

A Figura 2 ilustra de forma simplificada efeitos locais e globais.

Figura 2. Representação dos efeitos ($P-\Delta$) e ($P-\delta$)



Fonte: Silva, 2004.

Mesmo sendo conhecidos os métodos mais precisos para realização dos cálculos os acréscimos obtidos nos resultados finais podem não ser significativos. Portanto, é de

responsabilidade do engenheiro adotar um método de análise adequado para a situação em questão, evitando o uso de variáveis sem influência nas análises.

1.2 Ligações Semi-Rígidas

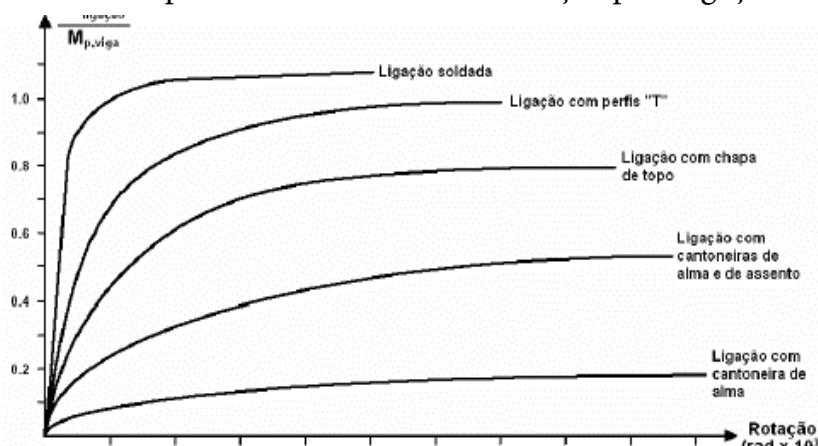
Nos projetos de estruturas metálicas em geral as ligações são consideradas com um comportamento idealizado, no qual admite-se que elas podem se comportar como uma das formas: perfeitamente rígidas (engaste) quando há a completa transmissão de momento fletor e impossibilidade de giro relativo entre os elementos ou perfeitamente flexíveis (rótula perfeita) quando não há transmissão de momento fletor e possibilidade do giro relativo entre os elementos. Uma aproximação intermediária do comportamento de ligações é avaliá-las como semi-rígidas, à medida que, as diferenças nas transferências de esforços tornam-se aspectos relevantes.

Para realizar a conexão entre vigas e pilares são utilizados elementos de ligação como, chapas, cantoneiras, parafusos e soldas. Assim, devido às descontinuidades e as não linearidades do material não é possível obter-se ligações com comportamento perfeitamente rígido para transferência de esforços entre os elementos estruturais, sendo necessária uma análise mais rigorosa das ligações.

O comportamento das ligações pode ser representado através de uma relação entre o momento fletor e a rotação relativa entre os elementos conectados. A relação se dá, pois, uma parcela do momento é transformada em rotação e se perde em termos de energia nas deformações da ligação, diminuindo o momento original, este comportamento pode ser chamado de momento-rotação.

Eurocode 3 Parte 1 –8:2005 inclui um modelo analítico simplificado para representar o comportamento de conexão semi-rígida baseado nas características da articulação do momento-rotação ($M-\phi$) (BAHAZ et al., 2018).

Dado a existência de diversos tipos de ligações formadas por componentes de rigidez diferentes, observam-se comportamentos momento x rotação diferentes para cada tipo de ligação. Esta relação pode ser representada em curvas de momento-rotação para cada ligação. A Figura 3 ilustra o comportamento momento x rotação de algumas ligações típicas utilizadas em estruturas metálicas.

Figura 3. Exemplos de curva momento-rotação para ligações usuais

Fonte: Maggi, 2004.

O dimensionamento de ligações com seu comportamento semi-rígido está se tornando cada vez mais popular. Isto requer o conhecimento do comportamento momento-rotação completa não-linear da ligação, que é também um parâmetro de projeto (BAHAZ et al., 2018).

1.3 Imperfeições Geométricas Iniciais

As barras de aço utilizadas em estruturas não são perfeitamente retas devido às imperfeições de fabricação e montagem. Em geral, dois tipos de imperfeições geométricas iniciais podem ser levadas em conta na análise: (i) falta de retilinearidade dos elementos e (ii) deslocamento horizontal dos nós (fora de prumo). Na análise, o padrão de uso de imperfeições iniciais é frequentemente escolhido para criar o pior cenário possível maximizando seus efeitos desestabilizantes sob as cargas aplicadas. No entanto, ambos a não retilinearidade inicial e fora-do-prumo são aleatórios. E uma modelagem racional de imperfeições geométricas só pode ser alcançada usando métodos probabilísticos. A modelagem de imperfeições geométricas é muito mais complicada para uma estrutura como um todo do que para uma única coluna, porque não apenas a magnitude, mas também, o padrão (forma e direção) da imperfeição afeta a resposta geral da estrutura (SHAYAN; RASMUSSEN; ZHANG, 2014).

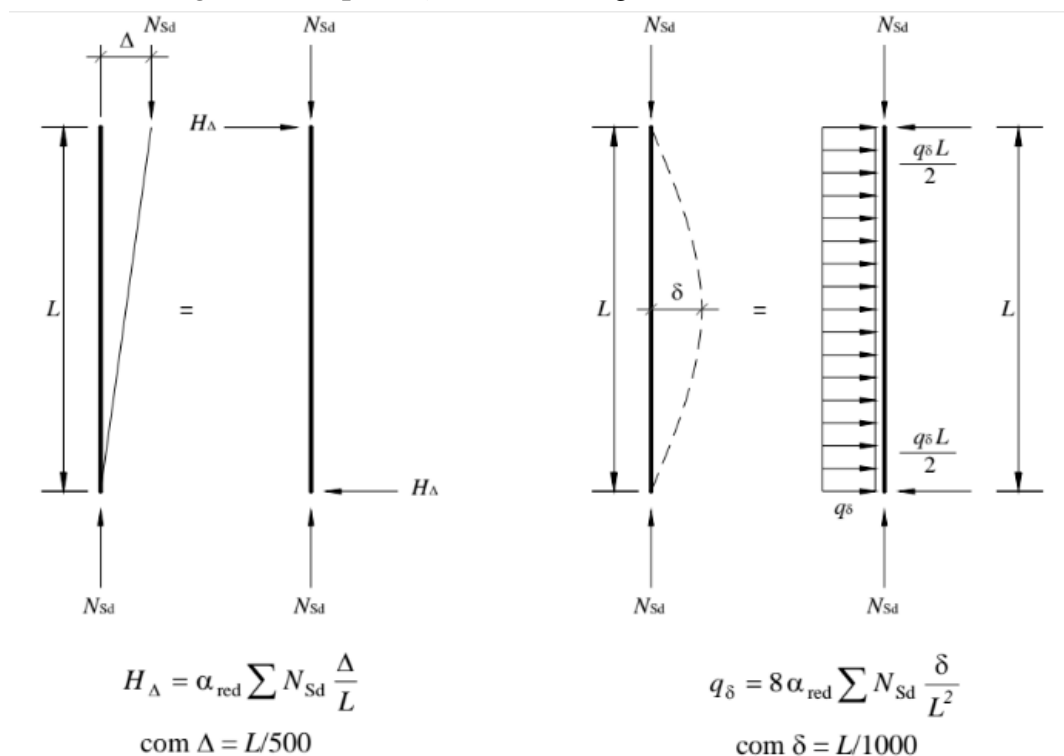
Presume-se que a consideração das imperfeições gera várias possibilidades de configurações iniciais a serem estudadas em diversas estruturas com diferentes vãos e alturas (ALVARENGA, 2006).

Segundo Chan (2005) as Imperfeições geométricas iniciais reduzem as cargas limite de instabilidade das estruturas em geral e o efeito não pode ser ignorado.

De acordo com a norma NBR8800:2008 as forças nocionais são dadas como forças concentrada (H_{Δ}) e distribuída (q_{δ}), que são utilizadas para causar os deslocamentos global (Δ) e local (δ) respectivamente. Esses deslocamentos representam as imperfeições iniciais das barras.

A Figura 4 ilustra como essas forças são aplicadas nas barras, os respectivos deslocamentos e formulações.

Figura 4. Imperfeições iniciais segundo NBR8800:2008



Fonte: ABNT, 2008.

2 Método de Pesquisa

Foram definidas duas estruturas planas para serem analisadas numericamente, utilizando o software ANSYS Mechanical APDL que é baseado no método dos elementos finitos, considerando inicialmente o comportamento semi-rígido das ligações sem a consideração das imperfeições iniciais. Após isso, as estruturas foram novamente analisadas considerando também as imperfeições geométricas iniciais.

A introdução de imperfeições iniciais no trabalho será realizada por meio da modelagem dos nós da estrutura em uma posição deslocada inicialmente.

Todas as análises foram realizadas considerando a não linearidade geométrica e material elástico.

Para as análises por meio do ANSYS, foi utilizado o elemento de viga BEAM 188 com função de forma quadrática e adotado material de módulo de elasticidade 20500 kN/cm^2 e coeficiente de Poisson 0,3. As ligações semi-rígidas foram modeladas com o elemento de mola não linear COMBIN39. Esse elemento foi utilizado com apenas um grau de liberdade, rotação em torno do eixo perpendicular ao plano da estrutura. Os outros graus de liberdade referente às translações e rotações em torno de outros eixos, X e Y, foram compatibilizados entre os nós da viga e pilar. Assim, para

simular as ligações foram definidas e ajustadas as constantes de rigidez da ligação para esse elemento de mola adquirir o valor de fator de rigidez desejado. Para isso foram calculadas as constantes de rigidez utilizando a formulação de Batho e Rowan para os valores de 1, 0,8 e 0,5 de fator de rigidez ():

$$r_j = \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot E \cdot I}{S_j \cdot L}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: r_j é o fator de rigidez;

S_j é a rigidez da ligação [kNcm/rad];

$\frac{E \cdot I}{L}$ é a rigidez a flexão da viga em questão.

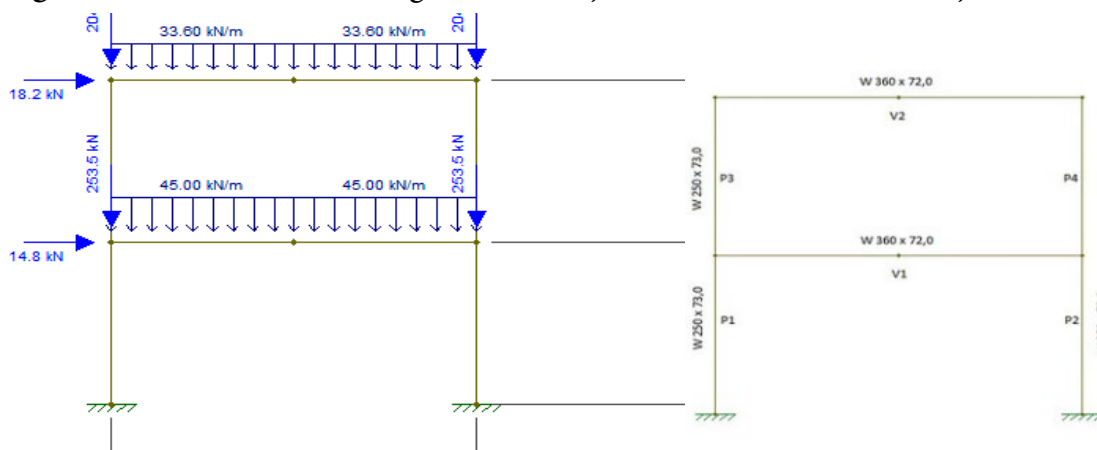
Ao final realizou-se um estudo de deslocabilidade em que foram refeitas as análises multiplicando os carregamentos por um fator de carga de 1 a 10, realizando-se a análise até a perda de estabilidade da estrutura.

2.1 Pórtico I

O primeiro pórtico estudado é composto por 2 pavimentos, com vão de 10 metros e pé direito de 5 metros. Os pilares são em perfil W 250 x 73,0, e as vigas em perfil W 360 x 72,0, para a discretização da estrutura foram utilizados 20 elementos para cada pilar e 40 para cada viga.

A Figura 5 ilustra o pórtico com a sua estrutura, carregamentos aplicados, seção transversal e referência de barras.

Figura 5. Pórtico I com carregamentos, seção transversal e identificação de barras



Fonte: Autor.

Para fator de 1 ($r_j = 1$), considerou-se uma ligação idealizada perfeitamente rígida. Para fator de 0,8 considerou-se o valor de rigidez inicial de $S_j = 4.961.574$ kNcm/rad. e para o fator de 0,5 considerou-se $S_j = 1.240.394$ kNcm/rad.

Foram obtidos os deslocamentos da estrutura em análises linear e não linear geométrica para os três valores de rigidez da ligação estudados e foram classificados de acordo com a NBR8800: 2008, conforme indicados na Tabela 1, todas as estruturas foram classificadas como de média deslocabilidade.

Tabela 1. Classificação do pórtico quanto à deslocabilidade

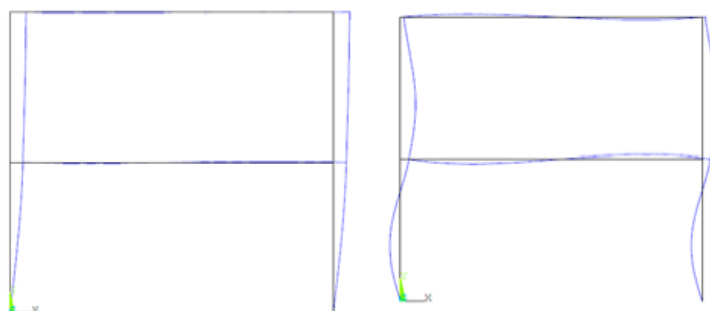
Rigidez	δ_1/δ_2^a	Classificação
1,0	1,19	Média
0,8	1,23	Média
0,5	1,33	Média

Fonte: Autor.

A forma utilizada para aplicação das imperfeições geométricas iniciais foi a modelagem dos nós da estrutura em uma posição deslocada inicialmente, para isso foi utilizado o programa ANSYS que por meio de uma análise de autovalor/autovetor obteve-se os modos de instabilidade da estrutura. Com isso são escolhidos modos de instabilidade que condizem com as imperfeições geométricas iniciais esperadas no pórtico estudado e posteriormente a geometria inicial foi atualizada de acordo com os modos escolhidos para as próximas análises. Os modos de instabilidade escolhidos foram ajustados para a magnitude das imperfeições para se aproximar da utilizada na norma, sendo deslocamento de $L/500$ para imperfeições globais e de $L/1000$ para imperfeições locais.

A Figura 6 ilustra uma configuração de instabilidade que representa os nós deslocados globalmente, ou seja, deslocamento horizontal dos nós, e os nós deslocados de maneira local, ou seja, deslocamento que representa barras não retilíneas.

Figura 6. Estrutura com nós deslocados globalmente e de maneira local



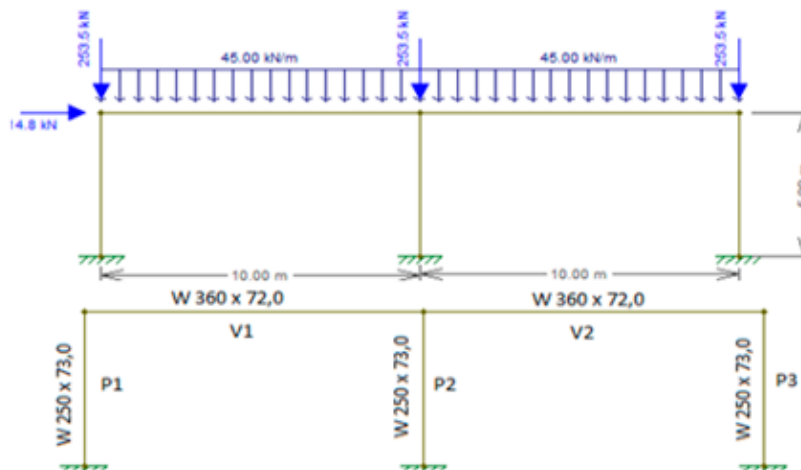
Fonte: Autor.

2.2 Pórtico II

O segundo pórtico estudado é composto por um pavimento, com dois vãos de 10 metros e pé direito de 5 metros. Os pilares são em perfil W 250 x 73,0, e as vigas em perfil W 360 x 72,0, para a discretização da estrutura foram utilizados 20 elementos para cada pilar e 40 para cada viga.

Os valores de rigidez da ligação () foram calculados novamente para cada fator de rigidez. Para fator de 1 ($= 1$), considerou-se uma ligação idealizada perfeitamente rígida. Para fator de 0,8 considerou-se o valor de rigidez inicial de $= 4.961.574 \text{ kNcm/rad}$. e para o fator de 0,5 considerou-se $= 1.240.394 \text{ kNcm/rad}$. A Figura 7 ilustra o pórtico com a sua estrutura e carregamentos aplicados.

Figura 7. Pórtico II com carregamentos, seção transversal e identificação de barras



Fonte: Autor.

A classificação do pórtico quanto à deslocabilidade para os três valores de rigidez de ligação utilizados estão representados na Tabela 2. Nota-se que com a alteração do valor de rigidez a estrutura tem diferentes classificações de deslocabilidade, passando de média para grande deslocabilidade.

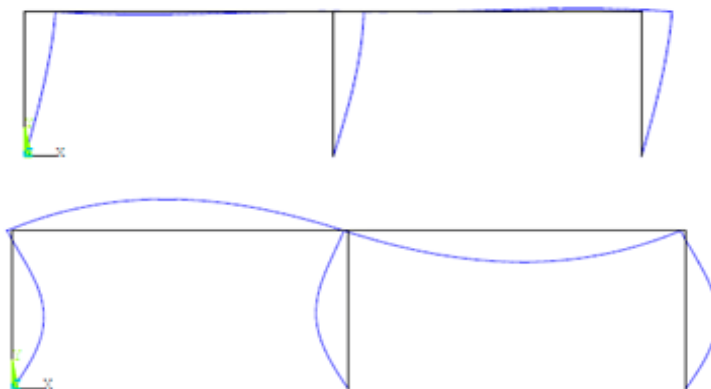
Tabela 2. Classificação do pórtico quanto à deslocabilidade

Rigidez	δ_1^a/δ_2^a	Classificação
1	1,23	Média
0,8	1,31	Média
0,5	1,48	Grande

Fonte: Autor.

A Figura 8 ilustra uma configuração de instabilidade que representa os nós deslocados globalmente, ou seja, deslocamento horizontal dos nós, e os nós deslocados de maneira local, ou seja, deslocamento que representa barras não retilíneas.

Figura 8. Estrutura com nós deslocados globalmente e de maneira local



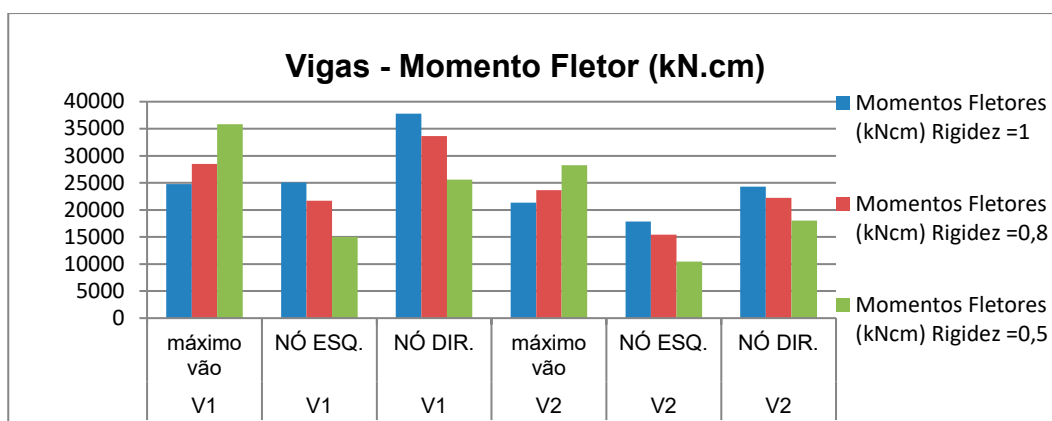
Fonte: Autor.

3 Resultados do Pórtico I

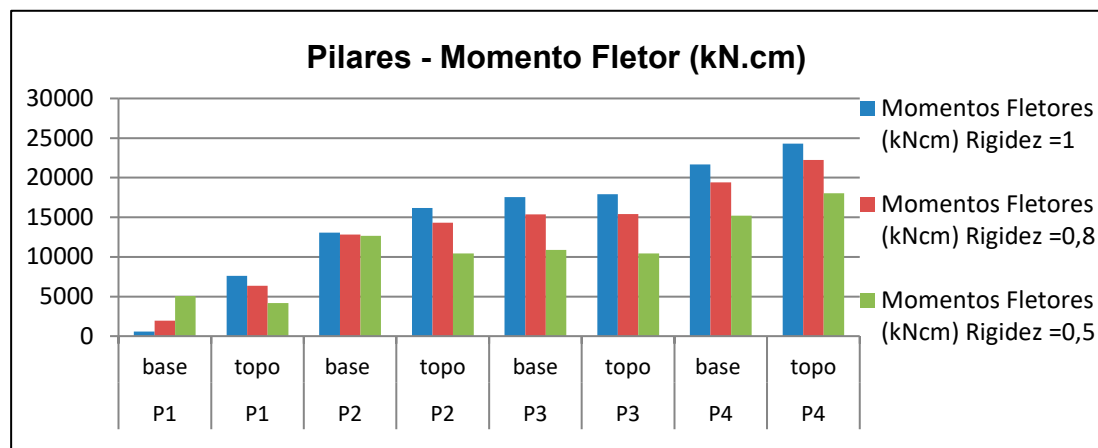
Nas comparações das análises não lineares mudando a rigidez das ligações e sem a consideração das imperfeições se destacam as variações quando se diminui a rigidez da ligação de 1 para 0,8 e de 1 para 0,5 resultando em aumentos respectivos de 15% e 45% no valor do momento positivo do vão da viga inferior. Essas variações se destacam devido ao alto valor do esforço no local indicado.

Com a variação de rigidez das ligações também se destacam reduções de 12% e 36% no esforço máximo dos pilares do primeiro andar para variações de rigidez 1 para 0,8 e 1 para 0,5 respectivamente. A Figura 9 ilustra o gráfico de comparação de esforços variando a rigidez da ligação e sem a consideração de imperfeições geométricas iniciais para as vigas. A Figura 10 ilustra a comparação para os pilares.

Figura 9. Diferença entre análises variando a rigidez – Vigas

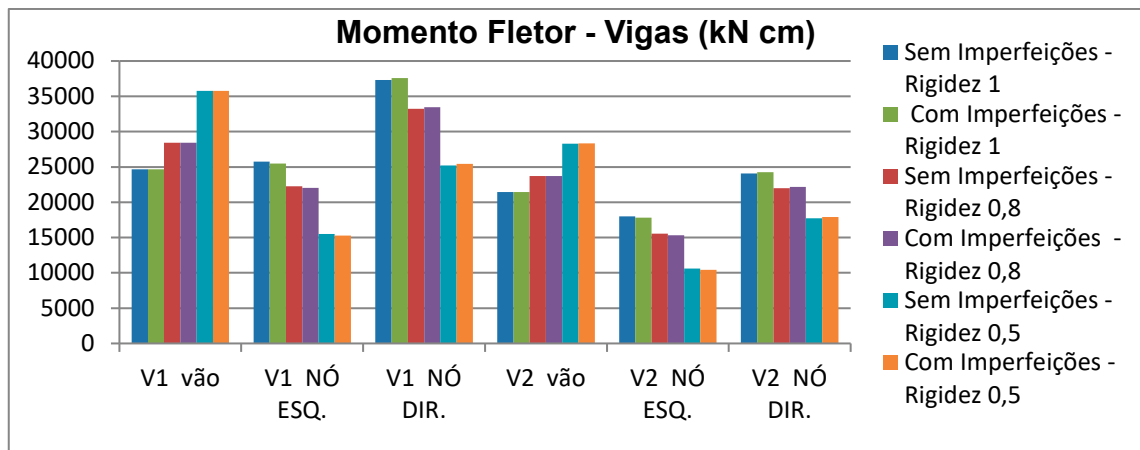


Fonte: Autor.

Figura 10. Diferença entre análises variando a rigidez – Pilares

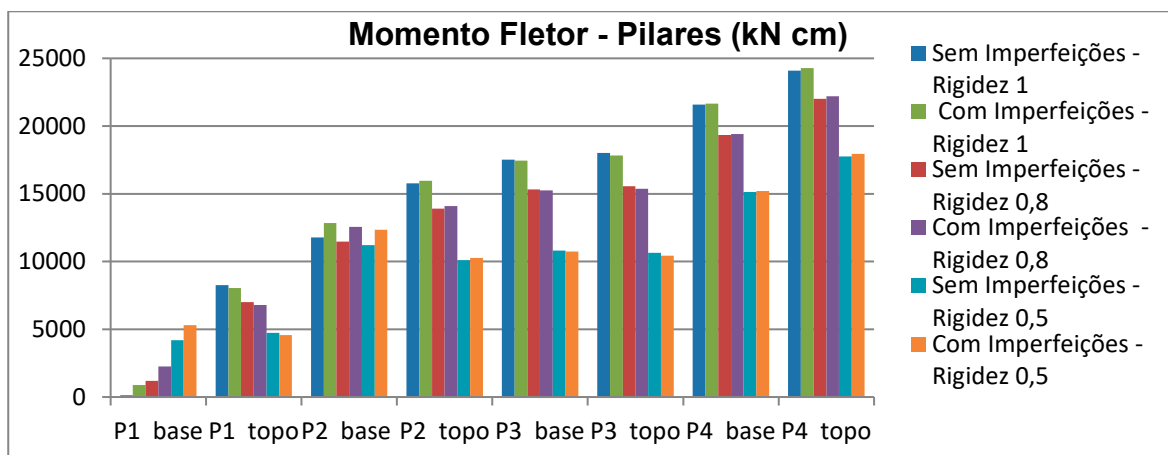
Fonte: Autor.

Entre as análises sem imperfeições geométricas iniciais e com imperfeições geométricas iniciais nas barras mais solicitadas a variação foi menor do que 5%. Logo, com a introdução de imperfeições geométricas iniciais não há aumento significativo dos momentos fletores. A Figura 11 ilustra o gráfico de comparação de esforços sem imperfeições geométricas iniciais e com imperfeições geométricas iniciais para as vigas. A Figura 12 ilustra a mesma comparação para os pilares.

Figura 11. Diferença entre análise sem imperfeições em relação a análises com imperfeições geométricas iniciais – Vigas

Fonte: Autor.

Figura 12. Diferença entre análise sem imperfeições em relação a análises com imperfeições geométricas iniciais – Pilares



Fonte: Autor.

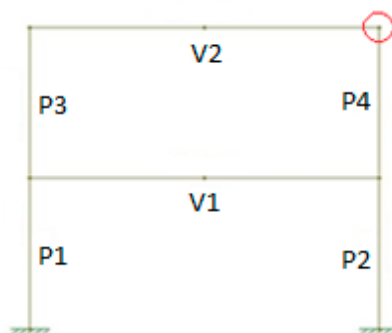
Para análise de deslocabilidade realizou-se a multiplicação dos carregamentos do pórtico por um fator de carga variando do valor de 1 a 10 e foram obtidos os resultados de deslocamento horizontal máximo do pórtico realizando esta análise considerando não linearidade geométrica e para os três valores de rigidez.

Percebe-se a perda de estabilidade da estrutura quando a curva de deslocamento x fator de carga deixa a fase linear (fase em que o deslocamento aumenta linearmente em relação ao aumento de carga), adquirindo em seguida deslocamentos maiores para o mesmo aumento de carga. Assim, quando as curvas tendem a um patamar horizontal se define o fator de carga limite.

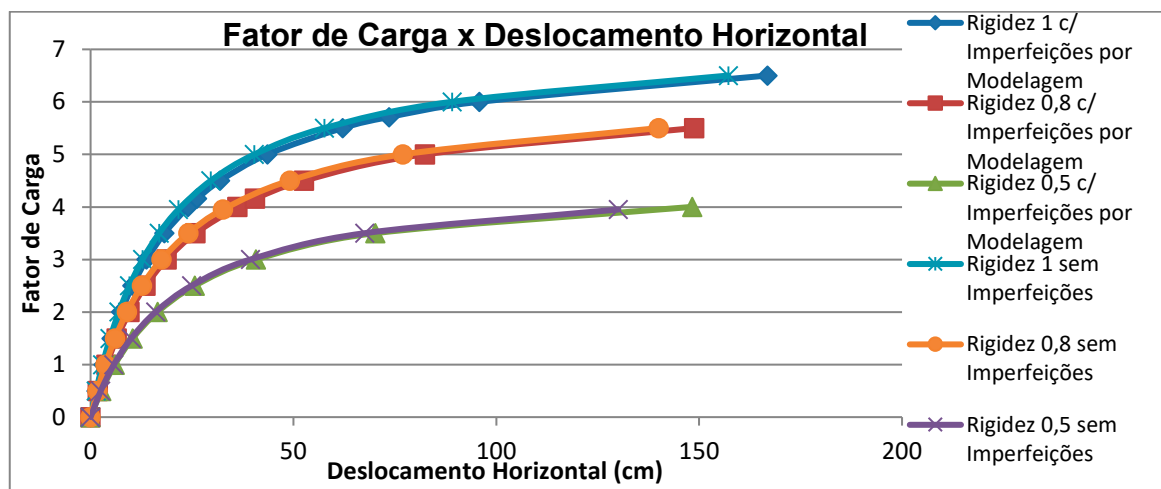
O gráfico de deslocamento horizontal ao longo do tempo em que se aumentam as cargas está ilustrado na Figura 13. No gráfico é apresentado o deslocamento com introdução de imperfeições e sem imperfeições geométricas iniciais. A Figura 14 ilustra o nó da barra analisada.

Não foram observadas alterações no fator de carga nas comparações entre modelagens sem e com a introdução de imperfeições geométricas iniciais. Notou-se que a rigidez da ligação tem maior influência no comportamento da estrutura.

Figura 14. Indicação do nó



Fonte: Autor.

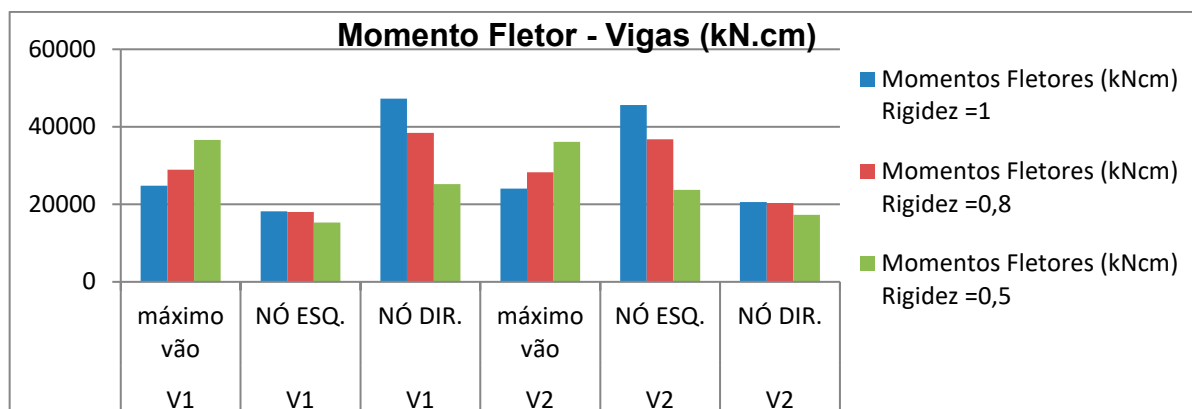
Figura 13. Deslocamento Horizontal máximo – Sem imperfeições e c/ Imperfeições

Fonte: Autor.

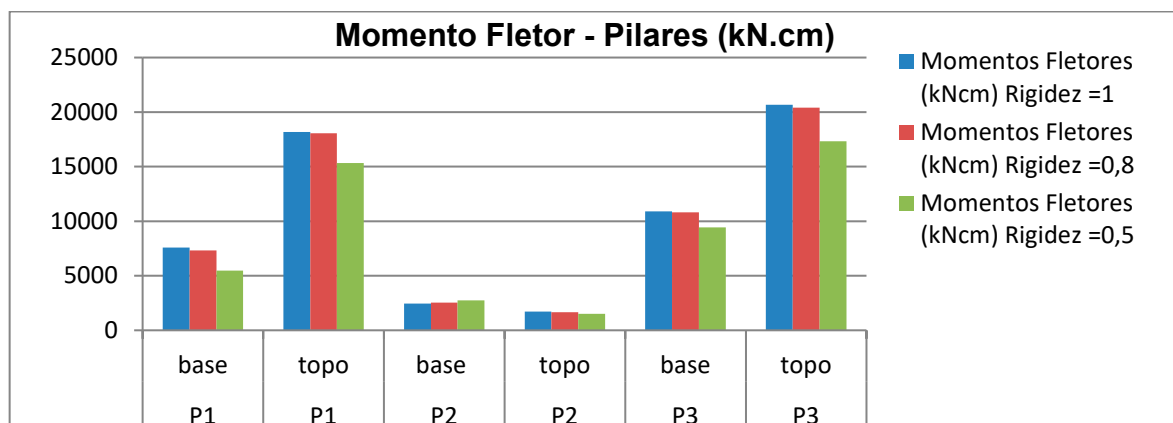
4 Resultado do Pórtico II

Nas comparações das análises não lineares variando a rigidez e sem a consideração das imperfeições se destacam as variações quando se diminui a rigidez da ligação de 1 para 0,8 e de 1 para 0,5 resultando nos respectivos aumentos 17% e 48% no valor do momento positivo do vão da viga inferior. Essas variações se destacam devido ao alto valor do esforço no local.

Com a variação de rigidez das ligações também se destacam reduções de 3% e 28% no esforço máximo dos pilares do primeiro andar para variações de rigidez 1 para 0,8 e 1 para 0,5 respectivamente. A Figura 15 ilustra o gráfico de comparação de esforços variando a rigidez da ligação sem a consideração de imperfeições geométricas iniciais para as vigas. A Figura 16 ilustra a comparação para os pilares.

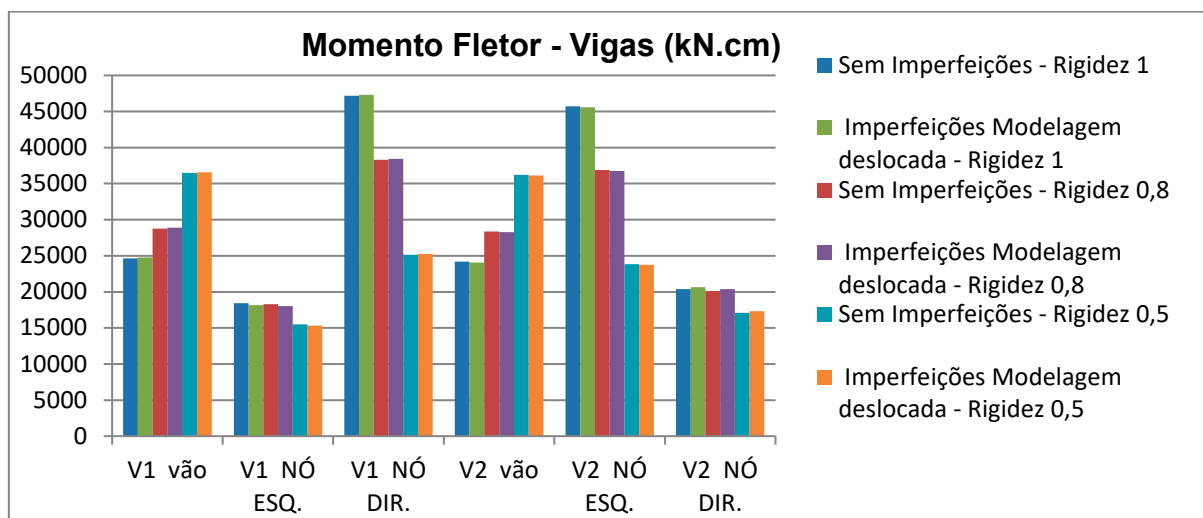
Figura 15. Diferença entre análises variando a rigidez – Vigas

Fonte: Autor.

Figura 16. Diferença entre análises variando a rigidez - Pilares

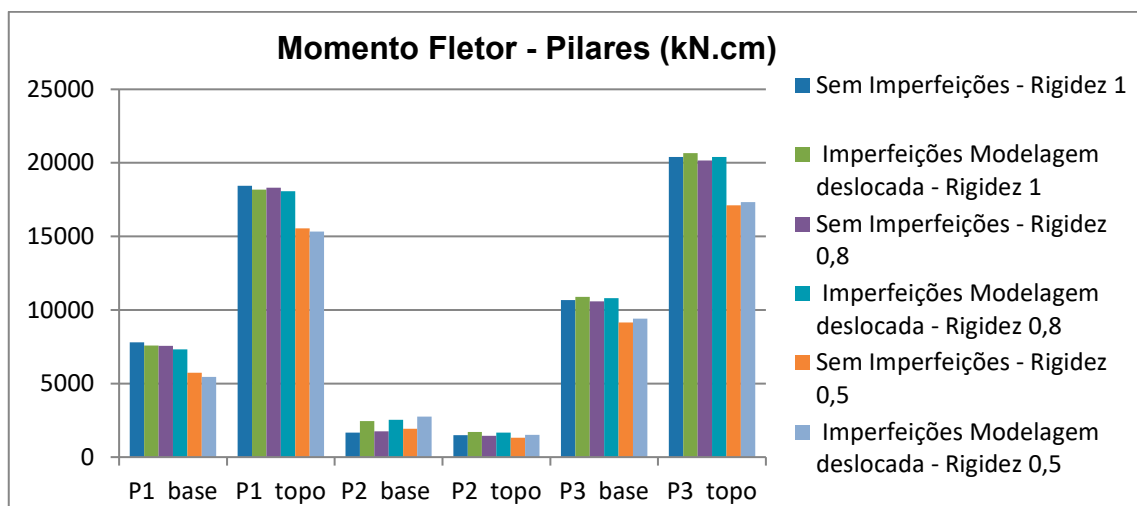
Fonte: Autor.

Entre as análises sem imperfeições geométricas iniciais e com imperfeições geométricas iniciais nas barras mais solicitadas a variação foi menor do que 6%. Logo, com a introdução de imperfeições geométricas iniciais não há aumento significativo dos momentos fletores. A Figura 17 ilustra o gráfico de comparação de esforços sem imperfeições geométricas iniciais e com imperfeições geométricas iniciais para as vigas. A Figura 18 ilustra a mesma comparação para os pilares.

Figura 17. Diferença entre análise sem imperfeições em relação a análises com imperfeições geométricas iniciais – Vigas

Fonte: Autor.

Figura 18. Diferença entre análise sem imperfeições em relação a análises com imperfeições geométricas iniciais – Pilares

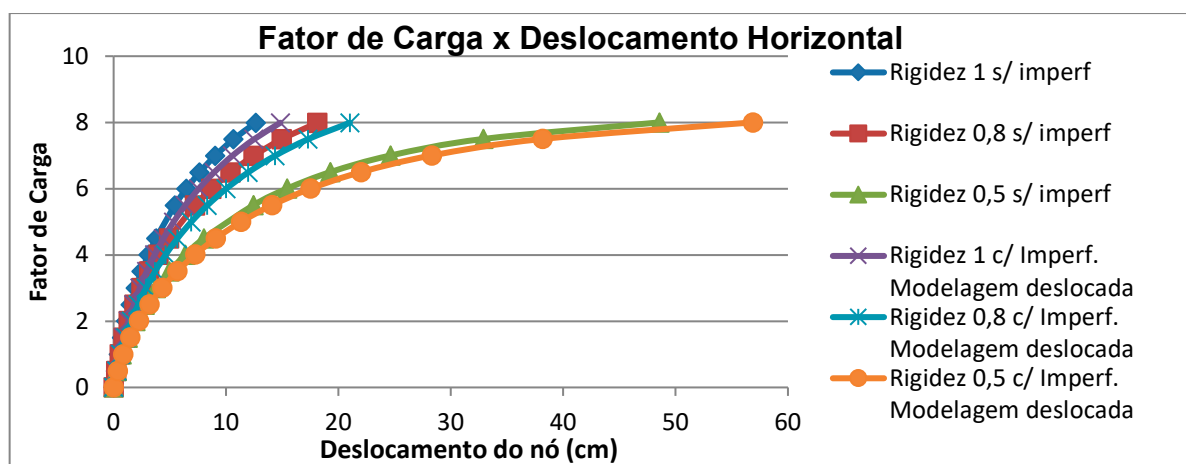


Fonte: Autor.

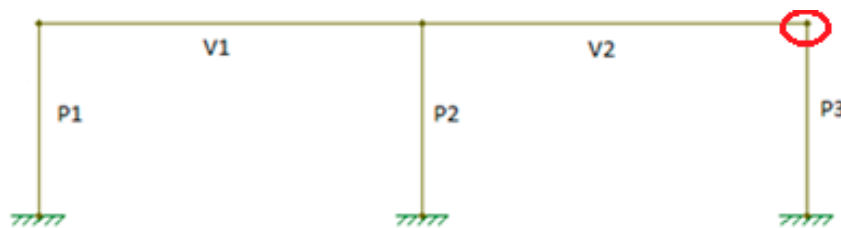
Em relação à análise de deslocabilidade da estrutura está ilustrado na Figura 19 o gráfico de deslocamento horizontal do nó superior do pilar P3 ao longo do tempo em que se aumentam as cargas com introdução de imperfeições e sem imperfeições geométricas iniciais. A Figura 20 ilustra a indicação do nó analisado.

Não foram observadas alterações no fator de carga nas comparações entre modelagens sem imperfeições e com a introdução de imperfeições geométricas iniciais. Porém também se pode notar que a rigidez da ligação tem maior influência no comportamento da estrutura.

Figura 19. Deslocamento Horizontal máximo – Sem imperfeições e com Imperfeições



Fonte: Autor.

Figura 20 - Indicação do nó

Fonte: Autor.

4 Considerações finais

O artigo teve como principal abordagem a influência das imperfeições geométricas iniciais em pórticos de aço, produzindo-se as seguintes conclusões:

- ♦ Como o primeiro pórtico foi classificado como de média deslocabilidade para os três valores de rigidez utilizados se esperava variações consideráveis com a introdução das imperfeições geométricas iniciais e como o segundo pórtico foi classificado como média deslocabilidade para os valores de rigidez 1 e 0,8 e grande deslocabilidade para rigidez 0,5 também se esperava variações consideráveis. Comparando as análises sem imperfeições geométricas iniciais com as análises com imperfeições geométricas iniciais, obteve-se que para o primeiro pórtico estudado a maior variação foi um aumento de 10% nos valores de momento fletor, porém no geral a introdução de imperfeições geométricas iniciais não gerou grande influência nos resultados e para o segundo pórtico a maior variação foi de 15%, porém também no geral a introdução de imperfeições geométricas iniciais não gerou grande influência nos resultados. Essas variações foram para os três valores de rigidez e para ambos os modos de consideração de imperfeições geométricas iniciais (por modelagem em posição deslocada e com introdução de forças nocionais). Logo, com estas variações, não se verifica um aumento significativo dos momentos fletores nos pórticos estudados.

No trabalho também foram abordados, a comparação da análise de primeira ordem com análise de segunda ordem; a diminuição do fator de rigidez das ligações e o método de consideração das imperfeições geométricas iniciais e concluiu-se que:

- ♦ Para a comparação da análise de primeira ordem com análise de segunda ordem, temos que a variação mais significativa foi o aumento de 2% nas barras mais solicitadas, esta foi a maior variação, tanto para análises com imperfeições quanto para análises sem imperfeições. Pode-se notar que, as variações não foram elevadas. Assim, apesar dos pórticos serem classificados como de média ou grande deslocabilidade, as variações não foram elevadas.

- ♦ Em relação a diminuição do fator de rigidez de ligação pode-se verificar uma grande variação da distribuição de esforços nas duas estruturas. Ao reduzir o valor de rigidez nota-se o aumento do valor de momento fletor no meio do vão das vigas “V1” e “V2” e ao mesmo tempo, a redução dos resultados nas extremidades das mesmas, portanto é possível se concluir que a variação da semi-rigidez das ligações é um fator mais relevante que a consideração das imperfeições. Observa-se então, que com a rigidez de 0,8 se evita os valores mais altos de momento fletor nas vigas tanto no meio do vão quanto nas extremidades.
- ♦ Comparando análises com imperfeições por modelagem em posição deslocada e com introdução de forças nocionais, a maior variação significativa em esforços de alto valor foi de 4%. Logo, mesmo com a diferença em alguns valores, não há grandes diferenças na maneira de consideração das imperfeições geométricas iniciais.

As conclusões limitam-se apenas aos pórticos estudados no trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Universitário FEI e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- ABNT NBR 8800:2008. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.
- AL-BERMANI; KITIPORNCHAI Elastoplastic nonlinear analysis of flexibly jointed space frames. *Journal of Structural Engineering*, v. 118, n. 1, p. 108–127, 1992.
- ALVARENGA, Arthur Ribeiro de; SILVEIRA, Ricardo Azoubel da Mota. A configuração geométrica inicial na análise avançada de portais planos de aço. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 59, n. 2, p. 185-197, jun. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672006000200008>
- BAHAZ, A. et al. Analysis of the Behaviour of Semi Rigid Steel End Plate Connections. *Matec Web Of Conferences*, v. 149, p. 02058-02058, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201814902058>
- CHAN, S.L.. Non-linear behavior and design of steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, n. 57, p. 1217-1231. 2001.
- CHAN, S. L.; HUANG, H. Y.; FANG, L. X.. Advanced Analysis of Imperfect Portal Frames with Semirigid Base Connections. *Journal Of Engineering Mechanics*, v. 131, n. 6, p. 633-640, jun. 2005. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2005\)131:6\(633\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2005)131:6(633)).
- FOLEY, C.M.; VINNAKOTA, S.; Inelastic behavior of multistory partially restrained steel frames. *Part I, J. Struct. Eng.*, v. 125, n. 8, p. 854–861, 1999.
- IU, C.K.; BRADFORD, M.A.; Higher-order non-linear analysis of steel structures. Part II: refined plastic hinge formulation. *Adv. Steel Constr.*, v. 8, n. 2, p. 183–198, 2012.
- NGUYEN, P.-C.; KIM, S.-E.; Advanced analysis for planar steel frames with semi-rigid connections using plastic-zone method, *Steel Compos. Struct.*, v. 21, n. 5, p. 1121–1144, 2016.
- RADGOLCHIN; MOEENFARD A constraint model for beam flexure modules with an intermediate semi-rigid element. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 122, p. 167–183, 2017.
- SARITAS, A.; KOSEOGLU, A.; Distributed inelasticity planar frame element with localized semi-rigid connections for nonlinear analysis of steel structures. *Int. J. Mech. Sci.*, 96, p. 216–231, 2015.
- SHAYAN, Shabnam; RASMUSSEN, Kim J.r.; ZHANG, Hao. On the modelling of initial geometric imperfections of steel frames in advanced analysis. *Journal Of Constructional Steel Research*, v. 98, p.167-177, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.016>
- SILVA, Adriano Toledo et al Cold formed steel semi rigid joints. *REM, Int. Eng. J.*, Ouro Preto, v. 71, n. 4, p. 497-504, Dec. 2018. Available from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-167X2018000400497 &lng=en&nrm=iso. <https://doi.org/10.1590/0370-44672017710121>

SOUZA, Alex Sander Clemente de. *Análise da Estabilidade de Edifícios de Andares Múltiplos em Aço*. Iniciação Científica – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ZHAO Z; LIU H; LIANG B; SUN Q Semi-rigid beam element model for progressive collapse analysis of steel frame structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, v. 172, n. 2, p. 113–126, 2019. <https://doi.org/10.1680/jstbu.17.00132>