

Tema: Estruturas de Aço e Mistas de Aço e Concreto

EFEITO DAS IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE PORTA-PALETES SELETIVOS IRREGULARES

Maria Ávila Branquinho¹

Luiz Carlos Márcos Vieira Júnior²

Maximiliano Malite³

Resumo

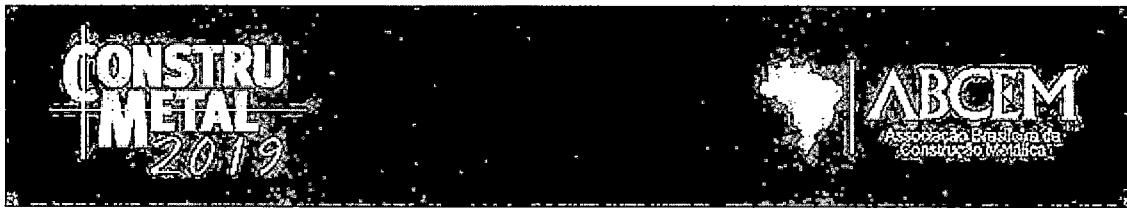
Este trabalho avalia a aplicabilidade do método da análise direta vigente na ANSI/AISI S100:2016 e do método do comprimento efetivo previsto na RMI MH 16.1:2008 no dimensionamento de porta-paletes irregulares. Contrariando sua tendência de ser uma estrutura modular, algumas exigências de projeto ou de estocagem podem prever a instalação de porta-paletes irregulares. O comportamento mecânico de porta-paletes irregulares não é uma tarefa trivial. A complexidade ainda aumenta quando a mudança na geometria está atrelada a diferentes carregamentos. Uma análise numérica avançada efetuada por meio do método dos elementos finitos utilizando elementos finitos de viga é empregada como referência para a comparação dos procedimentos normativos. Não-linearidades física e geométrica, imperfeições geométricas iniciais e comportamento não-linear das ligações longarina-coluna e da base são considerados na análise avançada modelada por elementos de viga. Diferentes combinações de imperfeição local e global foram consideradas. Os efeitos das imperfeições foram avaliados quanto ao comportamento mecânico e ao dimensionamento do porta-paleta irregular. Os resultados indicam um conservadorismo de ambos os procedimentos. O método da análise direta foi o que melhor se adequou aos casos avaliados. Todavia, o conservadorismo observado indica que avanços neste procedimento de dimensionamento devem ser efetuados.

Palavras-chave: Estabilidade estrutural; Análise estrutural avançada; Análise direta; Comprimento efetivo de flambagem.

EFFECT OF INITIAL GEOMETRIC IMPERFECTIONS IN THE STABILITY ANALYSIS OF IRREGULAR STEEL STORAGE RACKS

Abstract

This work evaluates the applicability of the direct analysis method according to ANSI/AISI S100:2016 and the effective length method according to RMI MH 16.1:2008 in the design of irregular pallet racks. Although racks tends to be a modular structure, some design or storage requirements may provide for the installation of irregular pallet racks. The mechanical behavior of irregular rack is not a trivial task. The complexity still increases when the change in geometry leads to different loads. An advanced analysis is carried out for irregular unbraced steel storage rack modelled using finite element model and beam elements to allow comparison of design



procedures. Geometrical and material nonlinearities, as well as initial geometric imperfections semi-rigid beam-to-column and base connections were taken in account. Different combinations of local and global geometric imperfections were considered. The effects of the imperfections were evaluated on the mechanical behavior and on design of the irregular rack. The results indicate a conservatism of both procedures. The direct analysis method agrees better with the advanced analysis results than the effective length method. However, observed conservatism indicates that advances in this design procedure must be made.

Keywords: Stability analysis; Advanced analysis; Notional load method; Effective length method.

¹ Engenheira civil, Mestre, Doutoranda, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil.

² Engenheiro civil, Mestre e Doutor, Professor, Departamento de Estruturas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

³ Engenheiro civil, Mestre e Doutor, Professor Titular, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil.

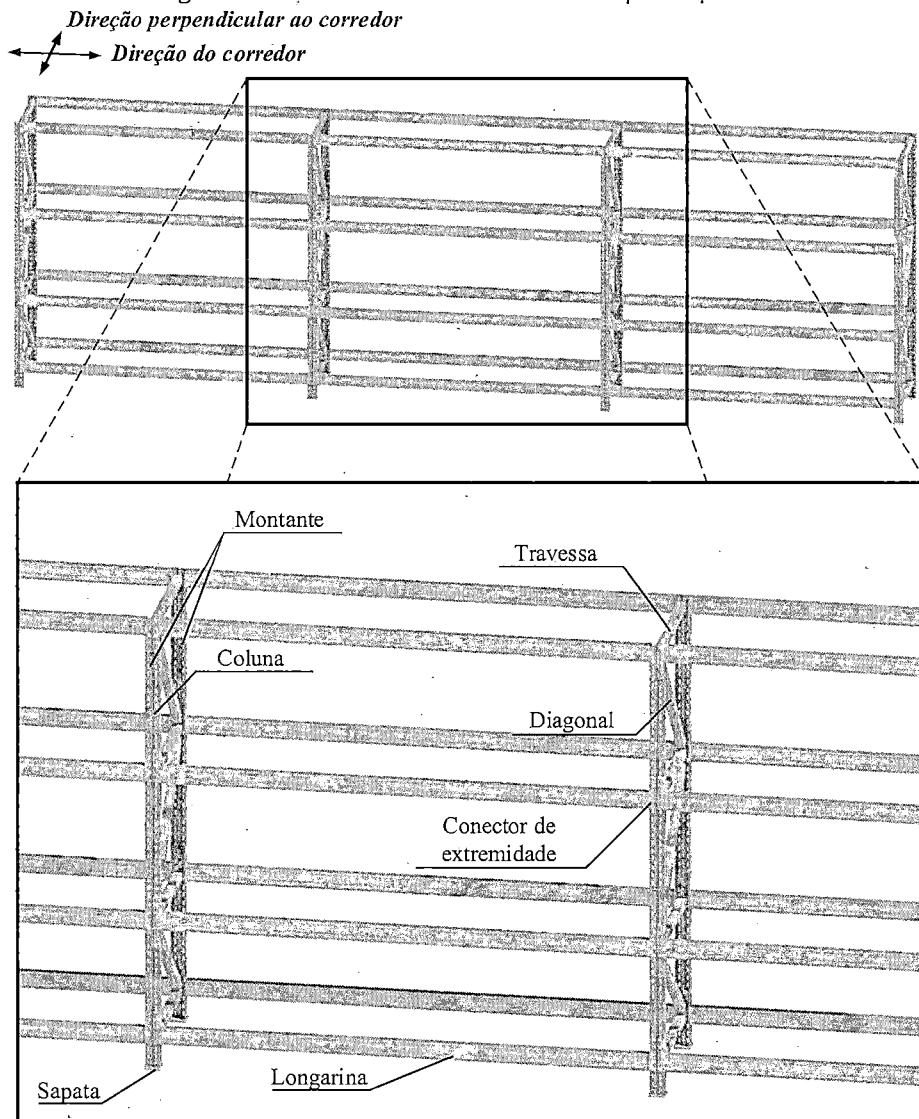
1 INTRODUÇÃO

As estruturas de armazenamento metálicas, também chamadas de “racks” ou porta-paletes, vêm ganhando destaque no mercado por propiciar o estoque de grande quantidade de mercadorias em um espaço limitado. São estruturas caracterizadas por: baixo custo, requerer equipamentos específicos de manipulação (empilhadeiras, e.g.), permitir a estocagem de grande quantidade de produtos e pela leveza de suas estruturas devido ao uso de perfis formados a frio (PFF).

A Figura 1 mostra os principais componentes de uma estrutura porta-paleta. Geralmente, o porta-paleta é composto por: colunas em perfis formados a frio não-compactos e perfurados; ligações longarina-coluna por encaixe; ligações semirrígidas da base e junções de colunas. Como mostra a Figura 1, o porta-paleta seletivo apresenta dois tipos de sistema de contraventamento. Na direção do corredor, trata-se de uma estrutura deslocável, i.e., um esquema estrutural em que a deslocabilidade do pórtico é resistida apenas pelas capacidades dos pilares e vigas e, principalmente, das ligações semirrígidas. Em contrapartida, na direção perpendicular ao corredor, o sistema de contraventamento juntamente com as colunas definem um montante treliçado, tornando sua estabilidade lateral e dimensionamento menos complexos.

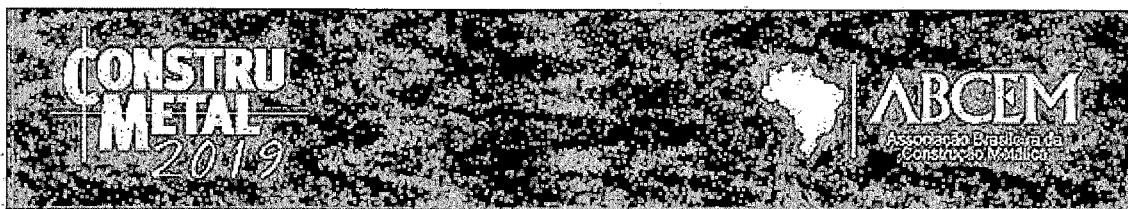
As particularidades das estruturas porta-paletes advém, principalmente, das necessidades de armazenamento industrial. Todavia, o custo desta eficiência recai nas complexidades introduzidas ao seu dimensionamento. Seu dimensionamento torna-se ainda menos trivial quando são avaliados porta-paletes com diferentes valores para as alturas e/ou comprimentos de baia com ou não mudanças nos valores de carregamento.

Figura 1 - Elementos de uma estrutura porta-paleta.



Em geral, os elementos (colunas, longarinas, elementos de contraventamento) são sujeitos à flexão composta. Atualmente, a norma brasileira de sistemas de armazenagem ABNT NBR 15524-2:2007[1] remete às especificações da ABNT NBR 14762:2001[2] e da ABNT NBR 8800:1986[3]. Isto é, limita o dimensionamento dos membros comprimidos ao método do comprimento efetivo.

O método do comprimento efetivo vigora nas especificações americanas desde 1961. Apesar de sua adequabilidade em vários tipos de estruturas, a determinação de um coeficiente de flambagem K específico para as estruturas porta-paletes não é uma tarefa trivial. Efeitos decorrentes das instabilidades global, local e distorcional, das perfurações, das diversas tipologias de ligações por encaixe como também da ligação da base tornam a etapa de dimensionamento um processo complicado.



Segundo a ASCE [4], no método do comprimento efetivo, os efeitos deletérios são contabilizados na curva de dimensionamento à compressão presente nas normas americanas ANSI/AISI S100:2016[5] e ANSI/AISC 360:2016[6], que também é vigente atualmente nas brasileiras ABNT NBR 14762:2010[7] e ABNT/NBR 8800:2008[8]. Assim, cada um dos membros sujeitos à compressão são projetados usando um comprimento efetivo KL , com $K \neq 1$. Por outro lado, no método de análise direta, o comprimento real do membro é usado para o projeto, enquanto são aplicadas grandes imperfeições no sistema, diretamente ou por meio de forças nacionais. Além disso, a abordagem de análise direta prevê uma redução na rigidez dos elementos a depender do valor da razão entre o deslocamento máximo de segunda ordem e o deslocamento máximo de primeira ordem (u_2/u_1). Assim, ASCE [4] indica que o método de análise direta leva em conta os efeitos desestabilizantes (tensão residual, falta de linearidade dos membros, desvios no projeto das ligações, excentricidades accidentais de carga e interações entre membros e sistemas) afetando o termo do momento solicitante nas expressões de interação do $M-N$.

Apesar da norma americana para estruturas de armazenamento (RMI MH16.1:2012[9]) especificar o método de comprimento efetivo para o projeto de racks, o código permite o uso do método de análise direta apresentado nas prescrições da AISC e AISI.

Em contrapartida, a norma brasileira ABNT NBR 15524-2:2007[1] não acompanhou os avanços de dimensionamento observados nas normas brasileiras de perfis metálicos ABNT NBR 8800:2008[8] e ABNT NBR 14762:2010[7]. Para o dimensionamento à compressão, são dois os pontos de falta de conformidade. A ABNT NBR 15524-2:2007[1] não apresenta apenas uma curva de resistência à compressão e é embasada exclusivamente no método do comprimento de flambagem, negligenciando outros métodos simplificados, como o da análise direta.

Nas últimas décadas, alguns estudos foram publicados sobre o dimensionamento de portapaletes (Sarawit e Peköz [10, 11], Dória, Malite e Vieira Jr. [12], Lavall et al. [13], Rasmussen e Gilbert [14] Trouncer e Rasmussen [15, 16]). Sarawit e Peköz [11] compararam o método do comprimento efetivo e o método de análise direta para o dimensionamento de racks composto de perfis formados a frio. Os autores recomendaram o método de análise direta como um método alternativo para o projeto de portapaletes, todavia os modos de falha por flambagem local e distorcional não foram considerados em seu estudo.

Todavia, faltam na literatura trabalhos que exponham a diferença de comportamento mecânico e, consequentemente, no dimensionamento provocada pelas imperfeições geométricas. Este comportamento pode ser ainda mais afetado quando são consideradas racks com diferentes alturas de baia, por exemplo.

Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma investigação sobre o comportamento mecânico de racks irregulares e seus efeitos no dimensionamento causados pelas imperfeições geométricas iniciais. É efetuada uma comparação entre os métodos da análise direta e o método do comprimento efetivo. O método da análise direta utilizado é o previsto na ANSI/AISI S100:2016[5] e o do comprimento efetivo é o do RMI MH16.1:2012[9]. O estudo numérico foi efetuado pelo Método dos Elementos Finitos por meio do software comercial Abaqus. Uma análise numérica avançada é empregada como referência para a comparação dos procedimentos normativos. Não-linearidades física e geométrica, imperfeições geométricas iniciais e comportamento não-linear das ligações longarina-coluna e da base são considerados na análise avançada modelada por elementos de viga.

Como todos os modelos numéricos foram efetuados por meio de elementos finitos de viga, foram desconsiderados os efeitos das perfurações das colunas e instabilidades locais e distorcionais.

O trabalho está organizado em 4 seções. A primeira expõe uma breve revisão das pesquisas envolvendo os principais métodos simplificados de cálculo e sua aplicabilidade aos porta-paletes. A segunda apresenta a metodologia empregada no trabalho (o número de modelos efetuados para cada rack como também as características de cada modelo). Os resultados e discussões acerca da influência das imperfeições geométricas iniciais no dimensionamento são reunidas na terceira seção. Por fim, a última seção expõe as principais conclusões e limitações do trabalho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

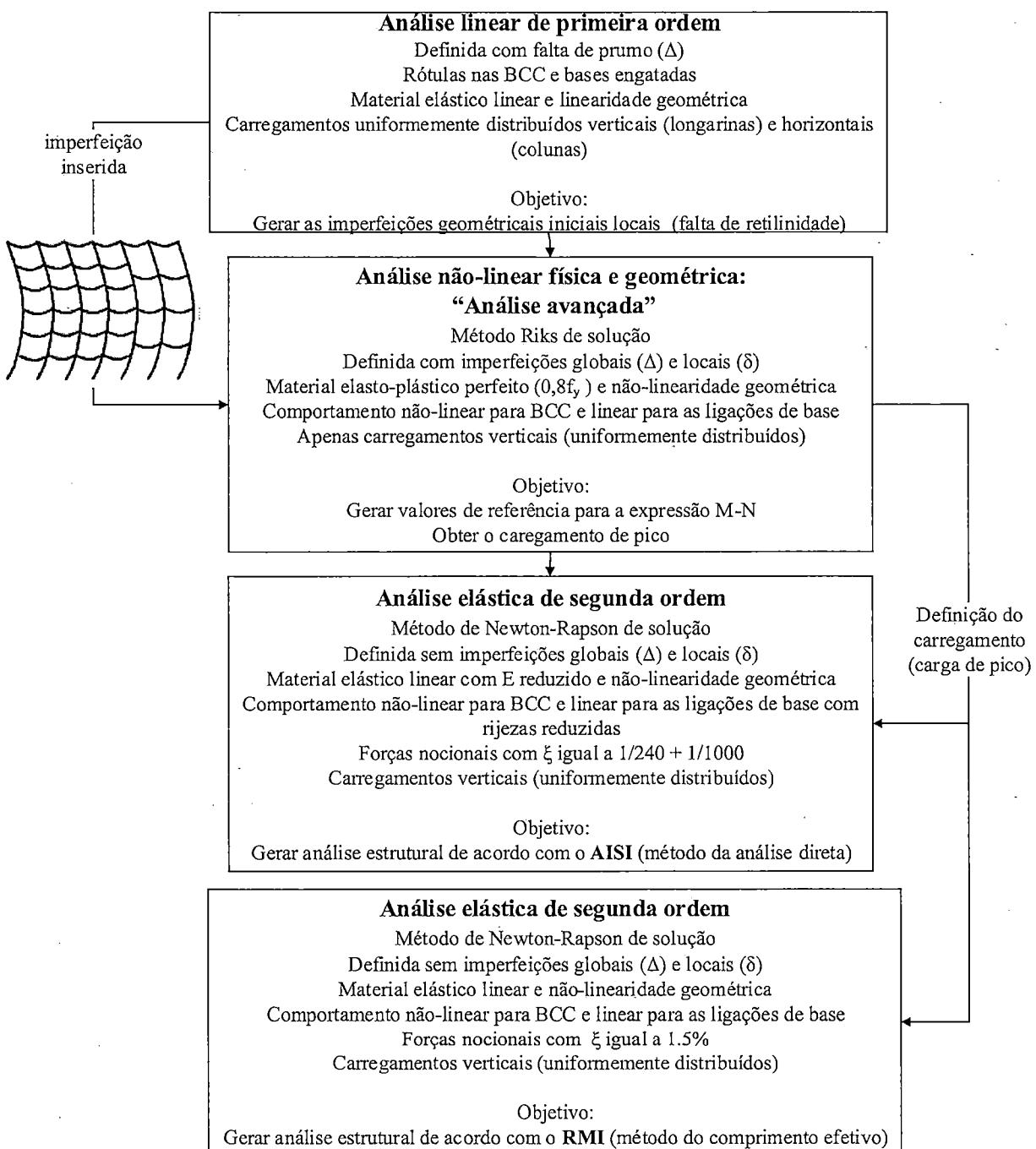
A Figura 2 mostra a metodologia empregada neste trabalho. A fim de avaliar a aplicabilidade dos métodos de projeto da AISI e RMI e a influência das imperfeições geométricas iniciais, três tipos de análise estrutural foram efetuadas. A primeira trata-se da análise avançada. Atualmente, a técnica da análise avançada é vista como uma promessa de uma previsão mais realista do comportamento mecânico e capacidade da estrutura. Neste trabalho, a análise avançada contemplou: não-linearidades física e geométrica, imperfeições geométricas iniciais locais e globais, não-linearidade da ligação semirrígida BCC, comportamento elástico linear para as ligações de base. Em contrapartida, as análises estruturais previstas pelo ANSI/AISI S100:2016[5] e RMI MH16.1: 2012[9] tratam-se de análises elásticas de segunda ordem.

Observando a Figura 2 nota-se que as imperfeições geométricas iniciais se inserem em dois estágios. O primeiro relaciona-se com a análise avançada. A análise avançada é a única análise em que os efeitos de ambas as imperfeições geométricas iniciais são inseridos diretamente. A imperfeição global é inserida diretamente nas coordenadas do porta-palete, enquanto que a imperfeição local é inserida por meio de uma análise prévia.

Neste trabalho, optou-se por inserir a imperfeição local por meio de uma análise estática com carregamentos distribuídos nas colunas e longarinas. O valor destes carregamentos é inserido de forma a obter o valor desejado de imperfeição.

O outro estágio em que as imperfeições se inserem são nas análises AISI e RMI por meio de forças nacionais. Porém essas forças visam descrever apenas os efeitos das imperfeições geométricas iniciais globais.

Figura 2 - Metodologia aplicada no trabalho.



Para a análise AISI, são aplicadas reduções de 10% do módulo de elasticidade longitudinal E , na rigidez elástica da ligação de base e nos valores de momento para construção da curva

momento-rotação da ligação longarina-coluna. Assim, como o parâmetro de redução de rigidez τ_b do ANSI/AISI S100:2016[5] assume valor unitário, foi necessário somar ao fator ζ da força nocional o valor de 1/1000, atendendo o ANSI/AISI S100:2016[5].

A análise avançada foi efetuada pelo método Riks visando obter a capacidade da estrutura, i.e., seu valor de carregamento máximo admitido. Como a análise contemplou um valor de tensão de escoamento de cálculo, assume-se que o valor de carregamento obtido trata-se de uma solicitação de cálculo.

Esta solicitação de cálculo (cargas aplicadas na análise avançada multiplicadas pelo valor do pico) é aplicada nas análises do RMI e da AISI. Com base nesta metodologia, expressões de interação são calculadas com os esforços solicitantes gerados pelo mesmo valor de carregamento nas três análises (avançada, do RMI e do AISI).

A seção 2.1 apresenta as etapas efetuadas para a construção da análise avançada e a seção 2.2 descreve as equações de interação M-N empregadas em cada análise para permitir a comparação dos procedimentos.

2.1 Análise avançada

A validação da análise avançada foi efetuada em etapas contemplando a validação de elementos isolados, pórticos de ligações rígidas e por fim, ligações semirrígidas. A Tabela 1 reúne as etapas efetuadas assim como indica quais características dos porta-paletes estão sendo avaliadas em cada etapa.

Tabela 1 - Etapas da validação da análise avançada.

Etapas	Características de uma estrutura porta-palete				
	Estrutura metálica	Falta de retilinidade	Falta de prumo	BCC	Ligação da base
Etapa I	Coluna isolada biapoiada	X	X		
	Coluna isolada engastada	X	X	X	
Etapa II	Portal de Vogel	X	X	X	
	Ligação BCC (Zhao et al. 2014[17])	X			X
	Ligação da base (Godley, Beale e Feng 1998[18]; Sarawit e Peköz 2002[19])	X			X

2.2 Normas de projeto americanas

A rigor, a falha de uma estrutura porta-palete pode ocorrer: nas ligações, nas longarinas e/ou nas colunas. O presente estudo considera apenas a falha das colunas, seja por instabilidade seja por plastificação. Sujeitas a esforços de compressão e flexão, as colunas foram avaliadas por meio das expressões de interação M-N. A fim de comparar as expressões de interação oriundas do método do comprimento efetivo e da análise direta, uma expressão de interação foi adotada

para a análise avançada. A Equação 1 mostra a expressão de interação M-N aplicada para as análises avançadas.

$$\frac{\bar{P}}{0,80A_gF_y} + \frac{\bar{M}}{0,80S_{fy}F_y} \leq 1,0 \quad (1)$$

onde \bar{P} e \bar{M} são os esforços solicitantes de cálculo de compressão e flexão, respectivamente obtidos no ponto de pico da análise avançada, A_g é a área bruta da seção transversal da coluna S_{fy} é o módulo de resistência plástico da seção transversal e, finalmente, F_y trata-se da tensão nominal de escoamento. Note que, o coeficiente de ponderação da resistência adotado na Equação 1 é o mesmo que aplicado na análise estrutural apresentada na Figura 2. ANSI/AISI S100:2016[5] recomenda o uso do coeficiente 0,8 para as análises ditas “racionais de engenharia” como por exemplo a análise avançada.

2.2.1 ANSI/AISI S100:2016

A Figura 2 expõe os requisitos para uma análise estrutural de acordo o método da análise direta da ANSI/AISI S100:2016[5]. Note que a geometria da estrutura não considera nenhum tipo de imperfeição geométrica inicial diretamente. Em contrapartida, o efeito da imperfeição global é contabilizado pelo uso de forças horizontais equivalentes (forças nocionais) calculadas como mostra a Equação 2.

$$N_i = \xi Y_i \quad (2)$$

onde Y_i é a resultante da carga gravitacional aplicada no nível i e ξ é o fator da carga nocional igual a 1/240 de acordo com a ANSI/AISI S100:2016[5]. O dimensionamento da análise AISI é baseado na análise direta e considera, portanto, o coeficiente K igual à unidade. A Equação 3 mostra a expressão de interação M-N para ambos os métodos de dimensionamento (análise direta e comprimento efetivo).

$$\frac{\bar{P}}{0,85P_{ne}} + \frac{\bar{M}}{0,90M_{ne}} \leq 1,0 \quad (3)$$

onde \bar{P} e \bar{M} são os esforços solicitantes de cálculo de compressão e flexão, respectivamente, obtidos de uma análise estrutural elástica de segunda ordem, P_{ne} e M_{ne} são a força axial de compressão resistente e o momento fletor resistente, respectivamente. Nesta etapa, são aplicados os coeficientes de segurança igual a 0,85 para os membros sob compressão e 0,90 para os membros fletidos, segundo a ANSI/AISI S100:2016[5].

2.2.2 RMI MH 16.1:2008

A análise estrutural indicada pelo RMI é muito similar à do AISI. A diferença fundamental entre elas é o valor da fator ξ . O fator ξ considerado pelo RMI é de 1,5%.

No contexto do dimensionamento, com base no método do comprimento efetivo, o RMI MH 16.1: 2008[9] indica que os porta-paletes com conexões semirrígidas possuem valores de K muito maiores que 1,0 e podem até exceder 2,0 para a flambagem em torno do eixo de maior inércia. Desta forma, o RMI MH 16.1: 2008[9] permite o uso de K igual a 1,7 como um valor padrão que representa um valor médio. Para a flambagem em torno do eixo de menor inércia, o fator de comprimento efetivo pode ser tomado como 1,0 e, finalmente, o valor de K_t é igual a 0,8 (RMI MH 16.1: 2008[9]). De acordo com Sarawit e Peköz [10], o uso de K_t igual a 0,8 é adequado devida a restrição à torção existente na base da coluna. Tal restrição é composta tanto pelos chumbadores quanto pelo atrito da sapata com o piso de concreto.

No presente estudo, foram considerados: (i) K igual a 1,7 para a instabilidade em torno do eixo de maior inércia; (ii) K igual a unidade para a instabilidade em torno do eixo de menor inércia e, finalmente, (iii) K_t igual a 0,8. Estes valores são utilizados na expressão de interação $M-N$ mostrada na Equação 3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

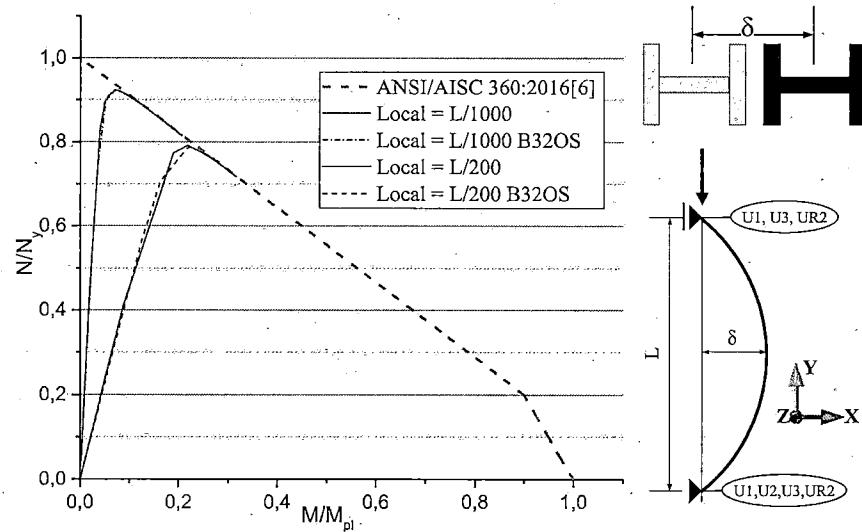
A presente seção reúne os resultados da validação da análise avançada e o estudo do comportamento mecânico e do dimensionamento de porta-paletes irregulares com diferentes tipos de imperfeição.

3.1 Validação da análise avançada

A validação da análise avançada iniciou com a validação de pilares isolados. Foram considerados dois esquemas estáticos para o pilar isolado: biapoiado e engastado na base. Os pilares tem a seção transversal dos pilares do Portal de Vogel (Vogel [20]), i.e., seção HEB300 com comprimento igual a 5000 mm e E e F_y iguais a 20500 MPa e 235 MPa, respectivamente. As tensões residuais foram consideradas adotando a distribuição de Galambos e Ketter [21].

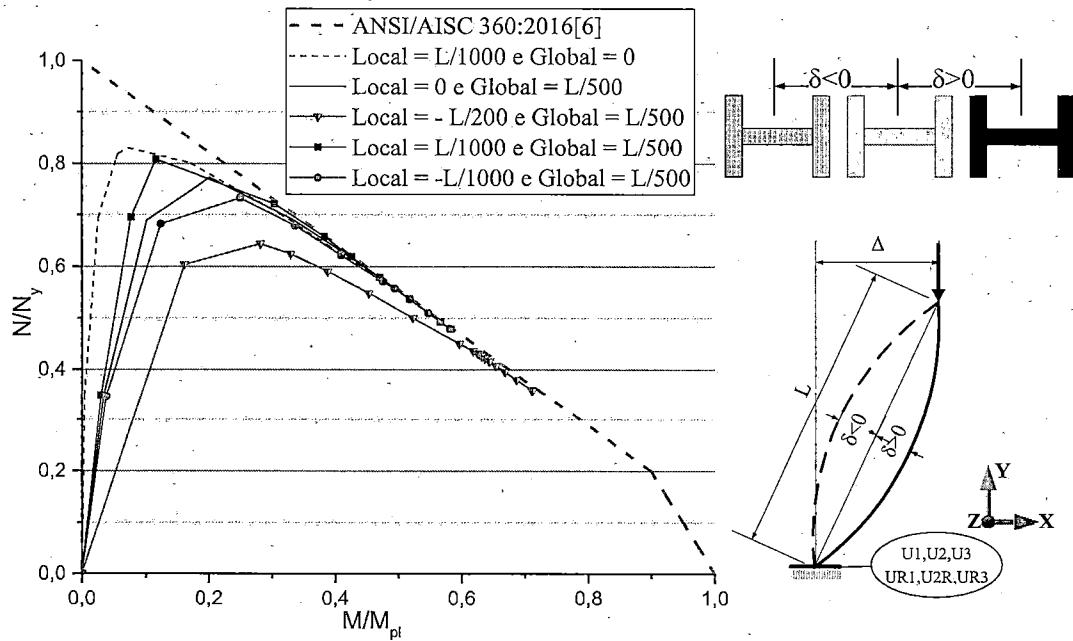
Com estes modelos foi possível avaliar a influência apenas da imperfeição local (com o pilar biapoiado) e a combinação da imperfeição local com a global (com o pilar engastado). Os modelos consideram a não-linearidade física e geométrica; tensão residual e as imperfeições geométricas iniciais. A resolução do problema não linear foi feita pelo método de Riks e as imperfeições locais foram definidas por análises prévias de estabilidade elástica. O modelo foi composto por elementos de viga tridimensionais, B32, para permitir a inserção mais adequada da distribuição de tensões residuais. O elemento B32 possui pontos de integração nas mesas do perfil e não apenas na alma como o B31. A malha foi definida com 12 elementos em cada coluna. As Figuras 3 e 4 mostram os resultados numéricos comparados com a expressão de interação da ANSI/AISC 360:2016[6]. O presente trabalho explora apenas os resultados de flexo-compressão em torno do eixo de maior inércia pois o objetivo é investigar o comportamento mecânico do rack na direção do corredor. Os resultados mostrados corroboram que os modelos são capazes de prever adequadamente o comportamento mecânico de uma barra isolada.

Figura 3 - Validação do pilar isolado biapoiado.



As Figuras 3 e 4 mostram os detalhes dos modelos acerca de suas condições de contorno. A condição biapoiada é definida restringindo os deslocamentos nas direções X, Y e Z (U1, U2 e U3, respectivamente) e a torção (UR2). Da mesma forma, o pilar de base engastada é modelado restringindo os deslocamentos nas direções X, Y e Z e as rotações ao redor dos eixos X, Y e Z (UR1, UR2 e UR3, respectivamente).

Figura 4 - Validação do pilar isolado engastado na base.



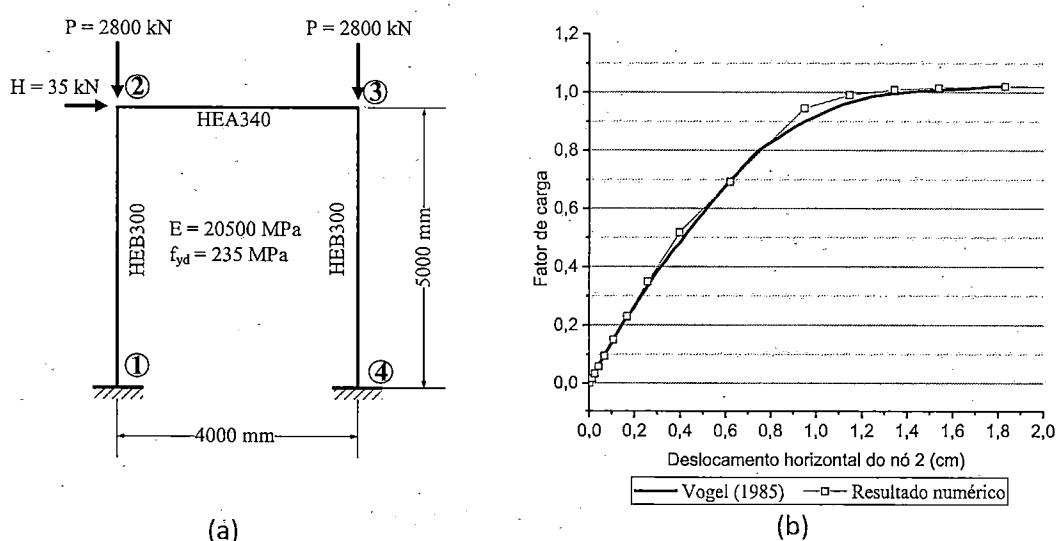
Os resultados do pilar engastado mostram os efeitos da combinação das imperfeições geométricas iniciais locais e globais. A Figura 4 mostra que valores positivos de imperfeição local ($\delta > 0$) provocam efeitos restaurativos na estrutura visto que geram capacidades maiores do que o caso com imperfeição local nula. Em contrapartida, valores negativos de imperfeição local provocam efeitos desestabilizantes. O mesmo resultado foi atestado pela ASCE [4] para colunas isoladas engastadas na base e livre na outra extremidade.

A validação do comportamento mecânico de pórticos é frequentemente efetuada na literatura por meio do Portal de Vogel. O trabalho de Vogel [20] apresenta pórticos para a calibração de análises não-lineares física e geométrica. Apesar de muito utilizados na literatura, eles possuem uma limitação. Trata-se do tipo de seção transversal utilizada pelo Vogel [20]. Os pórticos de calibração são compostos por perfis de seção compacta, que, portanto, não induzem os fenômenos de instabilidade local nem tampouco o distorcional.

Como as instabilidades localizadas (local e distorcional) não estão sendo contempladas neste trabalho, a validação por meio do Portal de Vogel torna-se suficiente. A Figura 5 apresenta o pórtico de calibração e seu resultado frente ao obtido no presente trabalho. A curva mostrada na Figura 5 foi oriunda de uma análise que levou em consideração: não-linearidades física e geométrica, tensões residuais e imperfeições locais e globais, que serão melhor explicadas a seguir. Para o Portal de Vogel foi utilizado o elemento finito B32OS. O elemento B32OS difere do B32 principalmente pela incorporação do empenamento. Cada membro foi discretizado com 12 elementos finitos, assim como nas colunas isoladas.

Quanto à lei de plasticidade, conforme feito por Vogel [20], foi adotado uma material composto por um trecho linear elástico de módulo de elasticidade 205000 MPa, f_{yd} igual a 235 MPa e encruamento linear cuja inclinação é de 2% da fase elástica.

Figura 5 - Validação do Portal de Vogel.



Quanto às imperfeições geométricas iniciais, conforme mostrado para os casos de pilar isolado, diferentes combinações de imperfeição local e global provocam diferentes respostas em uma estrutura. ASCE [4] ressalta que a modelagem das imperfeições geométricas iniciais de sistemas estruturais, em especial a determinação de suas orientações mais adequadas, é uma tarefa muito mais complexa do que à nível de membros isolados.

Vogel [20] não sinaliza qual combinação de imperfeições foi utilizada em seu trabalho. O autor apresenta apenas as amplitudes máximas das imperfeições: $L/400$ para a global e $L/1000$ para a local. Neste sentido, o presente trabalho avaliou 5 tipos de combinações de imperfeição global e local como mostra a Figura 6. Foram comparadas as respostas do pórtico à nível global e à nível de cada membro constituinte do pórtico.

A Figura 6 mostra que, em todos os casos, a imperfeição global foi inserida com o mesmo valor e mesma direção. A imperfeição local, assim como efetuado para o pilar isolado, foi definida por meio de uma análise prévia. Em função das configurações mostradas na Figura 6, dois tipos de análises prévias foram desenvolvidos.

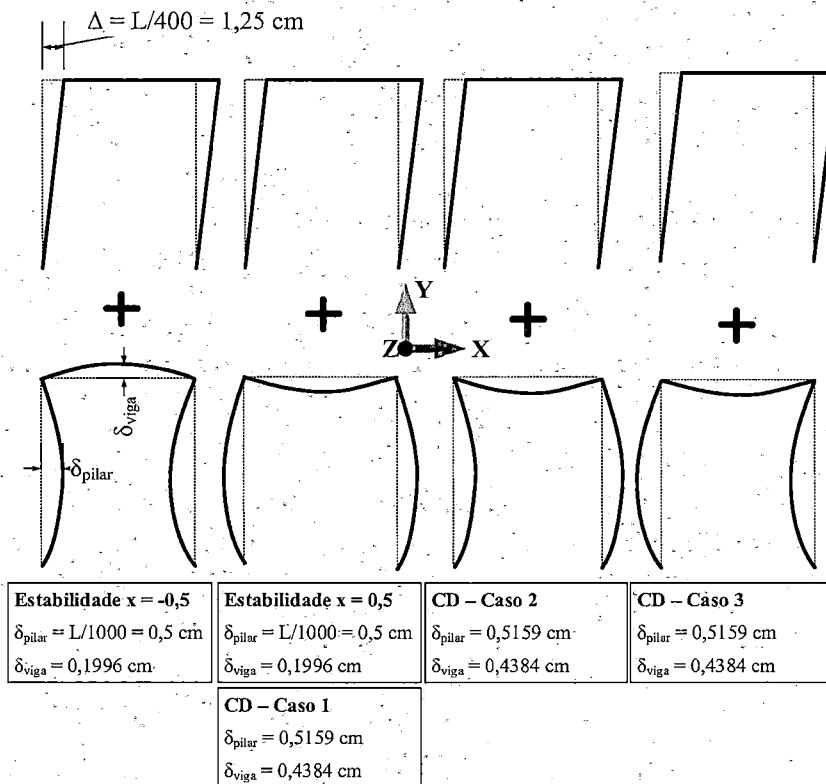
O primeiro trata-se de uma análise de estabilidade elástica (são os casos denominados “Estabilidade $x=0,5$ ” e “Estabilidade $x=-0,5$ ” na Figura 6). Todavia, em contramão à praticidade de se empregar a análise de estabilidade elástica como análise prévia, há uma imprecisão em utilizar este recurso. No pórtico em questão, o uso desta metodologia implica em um imperfeição correta apenas para os pilares. As flechas máximas oriundas da análise de estabilidade são de 1,00 cm para os pilares e de 0,3992 cm para a viga. Para o caso “Estabilidade $x=0,5$ ”, ao se multiplicar esta configuração deformada por 0,5 – valor correspondente a $L/1000$ para os pilares – obtém-se 0,5 cm para os pilares (OK!) e 0,1996 cm para a viga, valor inferior a 0,4 cm ($L/1000$ para o caso da viga).

Desta forma, foi feita uma segunda análise prévia empregando uma análise estática aplicando carregamentos distribuídos. Desta forma, calculou-se o valor da carga necessária para gerar cada amplitude de imperfeição local desejada. São resultado desta análise os casos “CD-Caso 1”, “CD-Caso 2” e “CD-Caso 3” mostrados na Figura 6.

O Portal de Vogel foi validado quanto: (i) comportamento global (diagrama de força *versus* deslocamento mostrado na Figura 5); (ii) plastificação distribuída na seção, (iii) diagramas de força normal e momento fletor. Os resultados desta análise mostraram que o modo de imperfeição geométrica inicial produz maiores efeitos nos valores de momento fletor do que nos de força normal. Dentre os casos avaliados, o caso CD-Caso1 foi o tipo de análise que melhor representou o Portal de Vogel.

Os resultados entre o “CD-Caso 1” e o “Estabilidade $x=0,5$ ” foram muito próximos, mostrando que a amplitude da imperfeição da viga não acarretou muita diferença no comportamento mecânico do pórtico. Desta forma, visando a praticidade, o caso “Estabilidade $x=0,5$ ” pode ser tomado como equivalente ao “CD-Caso 1”.

Figura 6 - Casos de imperfeição geométrica inicial estudados.



O último passo do processo de validação da análise avançada foi a validação das ligações semirrígidas. As ligações semirrígidas foram modeladas por meio de molas rotacionais. Utilizou-se o método "Join-Rotational" do Abaqus para definí-las. A validação da ligação BCC foi efetuada utilizando-se a curva momento-rotação não-linear de Zhao et al. [17] (curva C3-B105-4T). De forma similar também foi validada a ligação da base. Para ela, foi utilizado o comportamento não-linear da curva momento-rotação dada por Godley, Beale e Feng 1998[18]. Entretanto, as seções transversais utilizadas por Godley, Beale e Feng [18] não foram as mesma que Zhao et al. [17]. Desta forma, a ligação da base foi modelada com um comportamento apenas linear elástico descrito por Sarawit e Peköz [19]. A Equação 4 mostra a relação definida por Sarawit e Peköz [19]:

$$M = \left(\frac{7}{20} bd^2 E_c \right) \theta \quad (4)$$

onde b é a largura da coluna paralela ao eixo de flexão, d é a profundidade da coluna (perpendicular ao eixo de flexão) e E_c é o módulo de elasticidade do piso de concreto, adotado igual a 20340 MPa de acordo com Sarawit e Peköz [19].

Desta forma, os modelos validados permitiram prever o comportamento mecânico de (i) barras isoladas; (ii) pórticos de ligações rígidas e (iii) ligações semirrígidas. Sendo assim, os autores entendem que esta metodologia de análise avançada é adequada para representar o comportamento mecânico dos porta-paletes. Além disso, a validação permitiu compreender a grande influência das imperfeições geométricas iniciais tanto em elementos isolados como em pórticos (Portal de Vogel).

3.2 Estudo do porta-paleta irregular: comportamento mecânico e dimensionamento

Neste trabalho a aplicabilidade dos métodos do comprimento efetivo e análise direta foi avaliada em porta-paletes irregulares.

A análise avançada do porta-paleta contemplou: não-linearidades física e geométrica; elementos finitos de viga que considerando os efeitos de empenamento (B32OS) para as colunas, elementos de viga sem empenamento (B32) para as longarinas de seção fechada; molas rotacionais não-lineares para as ligações BCC e molas lineares para as ligações de base; imperfeições geométricas iniciais locais e globais.

A Figura 7 mostra o porta-paleta irregular avaliado. Trata-se de uma estrutura composta por duas regiões: "Região H1" e "Região H2". A Região H1 compreende as baías em que a altura é dada por h_1 . Da mesma forma, a Região H2 trata-se das regiões compreendidas pelas baías de altura h_2 . Neste trabalho, L_b , h_1 e h_2 são iguais a 186 cm, 100 cm e 150 cm, respectivamente.

Além da diferença de altura, a carga uniformemente distribuída em cada longarina da Região H1 pode ser diferente da Região H2 para contemplar os casos que o tipo de produto a ser estocado na Região H2 não é somente mais alto mas também com um peso diferente. A carga aplicada na Região H1 foi denominada de CargaH1 e o carregamento aplicado nas longarinas da Região H2 foi denominado CargaH2.

Os modelos das análises avançada, AISI e RMI possuem as mesmas condições de contorno (Figura 8). Os modelos numéricos contemplam elementos apenas de coluna e longarina, i.e., no plano do corredor. Todavia, o modelo consegue captar os efeitos tridimensionais das longarinas e colunas. Isto é importante pois as falhas das colunas geralmente são caracterizadas por instabilidades de flexo-torção. Desta forma, as condições de contorno apresentadas na Figura 8 são as responsáveis por levar em consideração o que ocorre fora do plano.

Para isso, hipóteses foram assumidas para o projeto do porta-paleta na direção perpendicular ao corredor. Estas hipóteses podem ser vistas na Figura 9 juntamente com as seções transversais utilizadas.

Figura 7 - Pórtico adotado para o estudo.

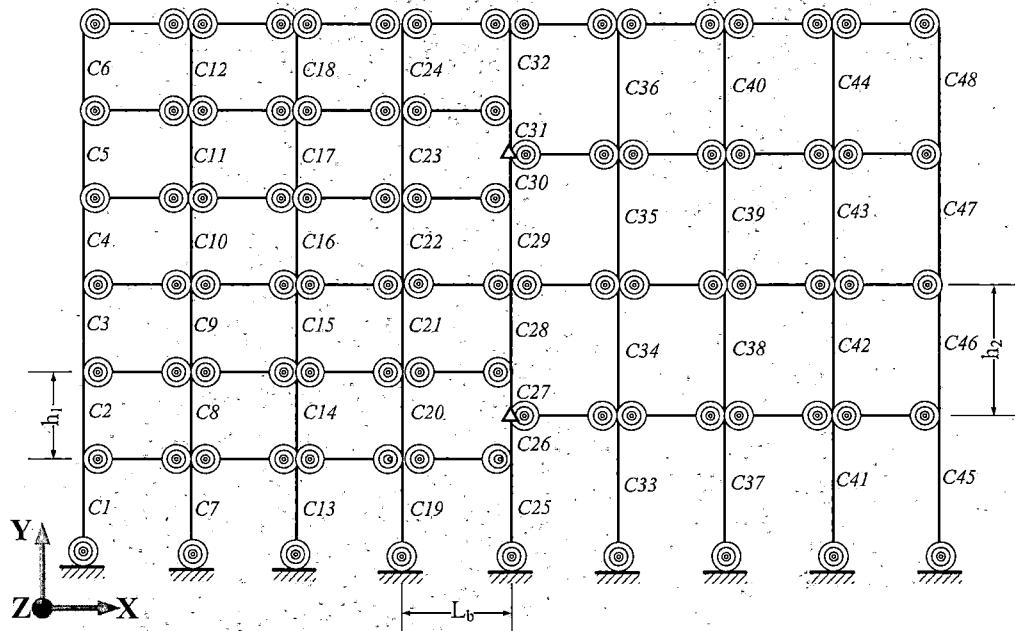


Figura 8 - Condições de contorno do modelo de elementos finitos. Válidas para as análises: avançada, AISI e RMI.

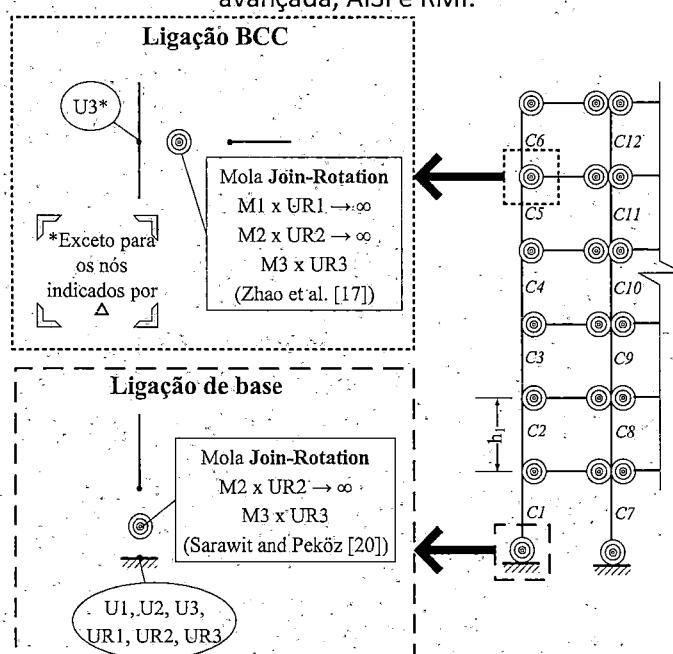
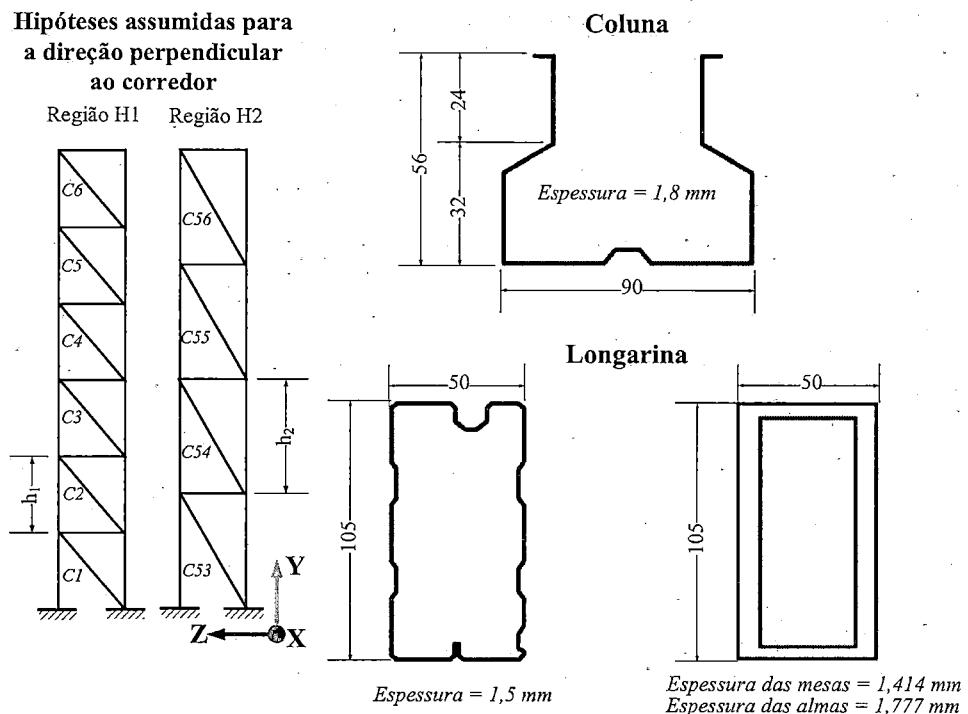


Figura 9 - Condições de projeto assumidos para os modelos e seções transversais utilizadas (dimensões em milímetros).



A Figura 9 mostra as seções transversais utilizadas por Zhao et al. [17]. Foram utilizadas a seção “C3” de Zhao et al. [17] para a coluna e a “B105” para a longarina. Diferentemente da coluna, a longarina sofreu pequenas modificações neste trabalho. A forma original da longarina faz com que, ao carregá-la, sejam impostos também carregamentos torcionais devido à sua assimetria. Desta forma, mantendo ao máximo suas propriedades geométricas, a longarina foi adaptada para uma seção tubular retangular duplamente simétrica mostrada na Figura 9.

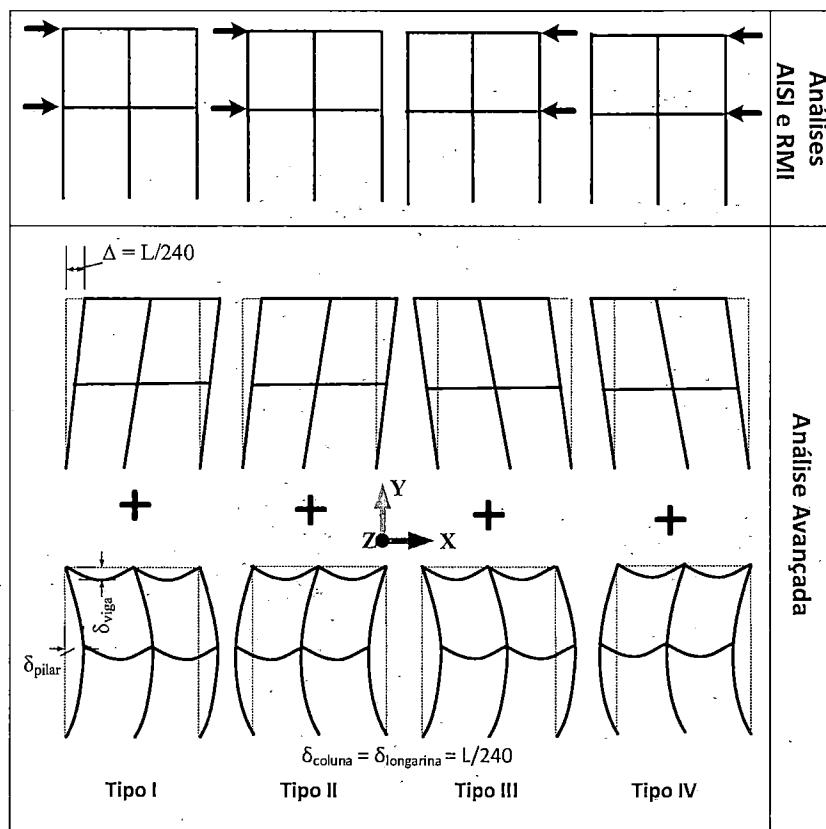
Consequentemente, a lei de plasticidade utilizada para as colunas e longarina também foi oriunda dos resultados experimentais de Zhao et al. [17]. Colunas e longarinas foram modeladas com material elastoplástico perfeito em que o módulo de elasticidade de ambos foi de 200000 MPa e a tensão de escoamento nominal foi de 336 MPa para a coluna e 268 MPa para a longarina.

Por serem pórticos irregulares, a adoção do tipo de imperfeição geométrica inicial não é uma tarefa trivial. Por isso, foram avaliados, para cada pórtico, 4 tipos de imperfeição geométrica inicial compostas por imperfeição global e local como mostra a Figura 10.

Os limites de montagem impostos pela RMI MH16.1:2012[9] foram adotados como os valores das amplitudes das imperfeições. O valor adotado para a falta de prumo e falta de retilinidade foi de L/240.

Dentre as diversas tipologias existentes de imperfeições, o presente trabalho avaliou apenas um tipo de imperfeição global e um tipo de imperfeição local. As imperfeições global e local previstas podem ser vistas na Figura 10. Note que a imperfeição local desconsidera as possíveis junções entre as colunas.

Figura 10 - Combinações de imperfeições geométricas iniciais nos dois estágios em que as imperfeições são consideradas.



A Figura 10 esclarece como as forças nacionais são empregadas. Elas agem no sentido em que a imperfeição global é adotada na análise avançada.

A seguir são apresentados os resultados quanto ao comportamento mecânico e o dimensionamento da estrutura porta-palete da Figura 7 sob as seguintes relações de carregamento: (i) CargaH1 / CargaH2 igual a 5,0, i.e., carregamento distribuído da Região H1 é 5 vezes maior que o da Região H2; (ii) CargaH1 / CargaH2 igual a 0,2, ou seja, o carregamento da Região H2 é 5 vezes maior que o da Região H1.

3.2.1 Efeito das imperfeições geométricas iniciais

A análise avançada efetuada em cada uma das relações de CargaH1 / CargaH2 é responsável por indicar a capacidade da estrutura. O valor de pico multiplicado pelas cargas inseridas na análise avançada gera a carga total admissível para cada região. A Tabela 2 reúne os resultados obtidos de carregamento crítico para cada caso.

Tabela 2 - Valores de carregamento obtidos no pico das análises avançadas.

Tipo	CargaH1/CargaH2	CargaH1 (kN.cm)	CargaH2 (kN.cm)
I	5	0,086979	0,017396
	0,2	0,023189	0,115944
II	5	0,098720	0,019744
	0,2	0,024185	0,120926
III	5	0,098295	0,019659
	0,2	0,022640	0,113201
IV	5	0,095142	0,019028
	0,2	0,022588	0,112939

As Figuras 11 e 12 mostram o efeito das imperfeições geométricas nos valores de carregamento máximos possíveis para cada relação CargaH1/CargaH2. Os resultados da Figura 12 tratam-se da diferença de carregamento de cada caso relativo ao caso Tipo I.

Figura 11 – Comportamento da capacidade de carga nas Regiões H1 e H2 em função da relação de carregamentos e do tipo de imperfeição.

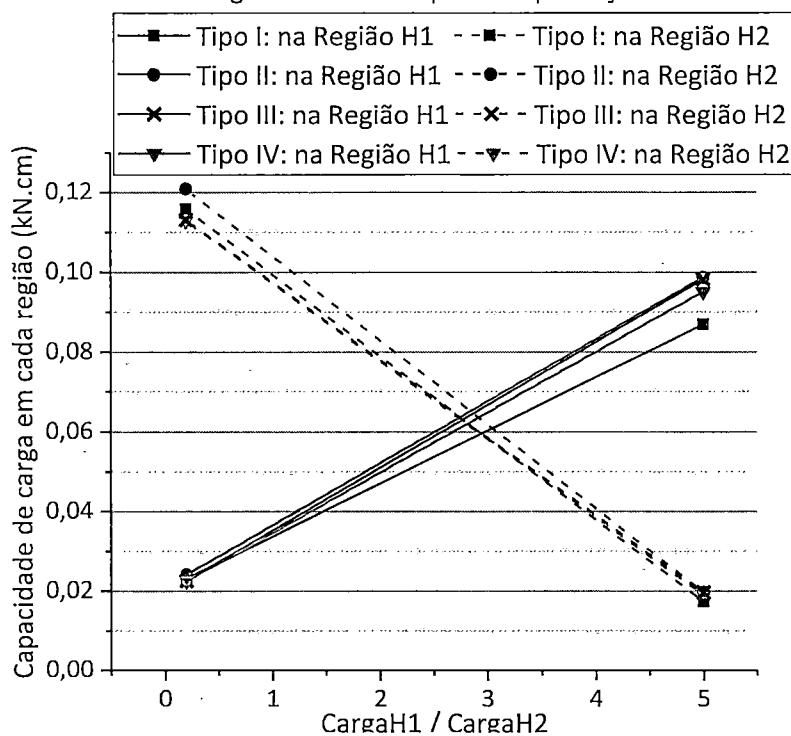
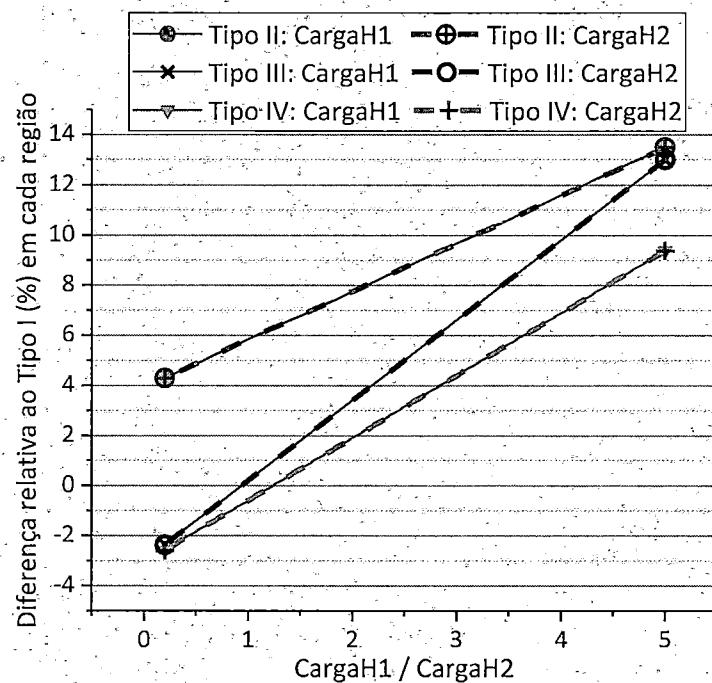


Figura 12 – Comportamento da capacidade de carga na Região H1 (CargaH1) e na Região H2 (CargaH2) em termos de diferenças relativas às capacidades de carga para o Tipo I.



Das Figuras 11 e 12 é possível concluir sobre o comportamento da capacidade de carga em cada região:

- (i) Em termos de diferenças absolutas, os maiores valores de diferença foram encontrados na razão de carregamentos igual a 5 para a Região H1 e igual a 0,2 para a Região H2.
- (ii) Em termos de diferenças relativas ao caso Tipo I, a Figura 12 mostra que o comportamento das Regiões H1 e H2, frente às mudanças de imperfeições geométricas iniciais, é semelhante. Isto é, dada uma alteração do modo de imperfeição, o acréscimo/decréscimo no valor da capacidade de carga observado na Região H1 é praticamente o mesmo, em termos percentuais, que observado na Região H2.

Observando as Figuras 11 e 12 e a Tabela 2, conclui-se que, para as relações de carga estudadas, o tipo de imperfeição que leva a estrutura a sua situação mais crítica é: a imperfeição Tipo I para a razão de cargas igual a 5,0 e o Tipo IV para a razão de cargas igual a 0,2, pois tratam-se das imperfeições em que ambas as regiões obtiveram seus valores mínimos de carga dentre as demais imperfeições.

3.2.2 Comparação das normas de projeto

A Tabela 3 reúne os resultados das análises numéricas efetuadas em termo de dimensionamento.

Tabela 3 – Resultado das expressões de interação M-N.

Porta-palete		Resultado das expressões de interação (Coluna crítica)				$(u_2 / u_1)_{\text{máximo}}$		
Tipo	CargaH1	Análise avançada	AISI		RMI		AISI	RMI
	CargaH2							
I	5	1,0268 (C19)	1,1020 (C7)	1,1217 (C7)	1,6207	1,5366		
I	0,2	0,9566 (C45)	1,3992 (C41)	1,4865 (C33)	1,4666	1,4369		
II	5	0,9933 (C19)	1,2531 (C7)	1,2753 (C7)	1,7585	1,6252		
II	0,2	0,9734 (C41)	1,4597 (C41)	1,5505 (C41)	1,4819	1,4545		
III	5	0,9943 (C7)	1,2462 (C19)	1,2695 (C19)	1,7831	1,6670		
III	0,2	Falha das longarinas da Região H2				1,4478	1,3979	
IV	5	1,0344 (C25)	1,2060 (C19)	1,2284 (C19)	1,7481	1,6032		
IV	0,2	0,9639 (C33)	1,3636 (C41)	1,4498 (C41)	1,4474	1,3994		

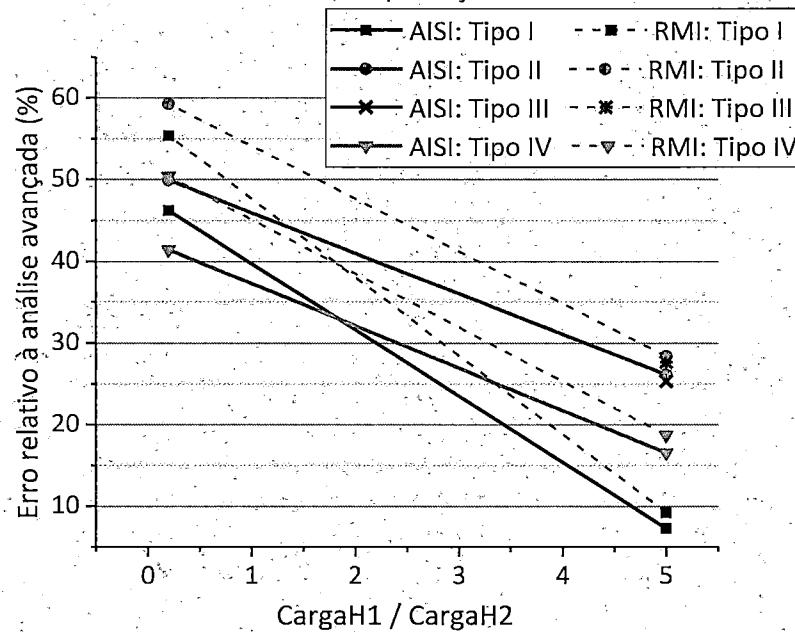
Os resultados das colunas críticas mostrados na Tabela 3 indicam um conservadorismo do método da análise direta e um conservadorismo ainda maior para o método do comprimento efetivo.

Na Tabela 3 é possível observar que em todos os casos estudados, a máxima interação M-N correspondeu aos pilares ao nível do piso. Além disso, nota-se a mudança do comportamento mecânico do pórtico com a alteração das imperfeições por meio das mudanças das colunas críticas. Observa-se também que não necessariamente a coluna crítica da análise avançada foi a mesma que as das análises AISI e RMI. Todavia, as colunas críticas das análises AISI e RMI foram, na maioria dos casos, as mesmas.

Para o caso CargaH1 / CargaH2 igual a 0,2 com imperfeição do Tipo III não foram indicados os resultados das expressões de interação pois a falha do sistema ocorreu nas longarinas da Região H2 ao invés de nas colunas. Isto é, além da coluna crítica se alterar com a configuração de imperfeição adotada, o tipo de falha observado no sistema também muda.

As normas de projeto especificam que o dimensionamento deve ser efetuado com base na condição de imperfeição geométrica inicial mais crítica para a estrutura. Com base no estudo da seção 3.2.1, dentre as imperfeições avaliadas, o dimensionamento seria efetuado com base na imperfeição do Tipo I para a razão de cargas igual a 5,0 e com base no Tipo IV para a razão de cargas igual a 0,2. Todavia, vale lembrar que o método do comprimento efetivo previsto nas normas americanas não permite ser aplicado para casos em que $(u_2 / u_1)_{\text{máximo}}$ for superior à 1,5. A Figura 13 mostra o comportamento do erro relativo à análise avançada obtidos das análises AISI e RMI, respectivamente.

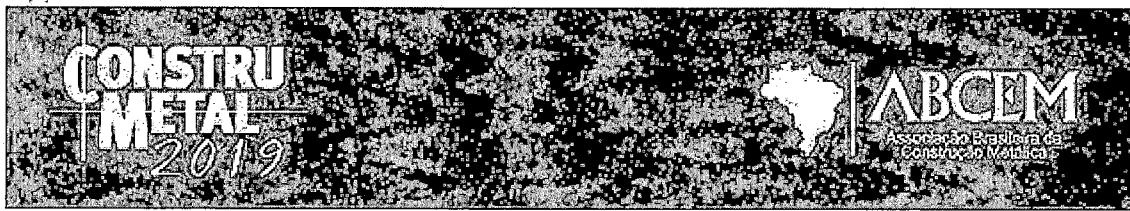
Figura 13 – Erros relativos obtidos para as análises AISI e RMI em função do tipo de imperfeição.



A Figura 13 mostra que todos os erros relativos para a condição CargaH1/ CargaH2 igual a 0,2 foram muito maiores que para o caso em que a razão de carga foi igual a 5,0 tanto nas análises AISI quanto RMI. O comportamento dos erros relativos para a análise AISI foi muito semelhante à obtida na análise RMI com a diferença que, para todos os casos de imperfeição, os erros relativos da análise AISI foram menores.

Como comentado, o método do comprimento efetivo previsto nas normas americanas não permite ser aplicado para casos em que $(u_2/u_1)_{\text{máximo}}$ é superior à 1,5. Nas análises apresentadas neste estudo, apenas o caso de CargaH1 / CargaH2 igual a 0,2 enquadra-se neste requisito, que são justamente os altos valores de erro relativo mostrados na Figura 13.

Além disso, ao comparar os resultados do Tipo I com os do Tipo II, e/ou do Tipo III com o Tipo IV, nota-se que as expressões de interação sofreram alterações em função da imperfeição local considerada. Isto é, apesar das normas de projeto especificarem metodologias para a consideração das imperfeições globais, o conhecimento das imperfeições locais também afeta o comportamento mecânico dos porta-paletes. Os maiores efeitos das imperfeições locais foram observados para a razão de carregamentos igual a 5,0 tanto para as análises AISI quanto RMI, chegando a uma diferença de 19% de conservadorismo. Desta forma, é comprovada a influência dos modos de imperfeições locais nas análises estruturais e, portanto, avanços devem ser efetuados no sentido de propor metodologias práticas para sua consideração na etapa de análise estrutural de forma análoga ao que ocorre com as globais por meio das forças nacionais.



4 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo sobre os efeitos das imperfeições geométricas iniciais no comportamento mecânico e no dimensionamento de um porta-paleta irregular sob diferentes tipos de carregamento. Os modelos numéricos desenvolvidos permitiram captar o comportamento fora do plano das colunas.

Quatro configurações de imperfeição geométrica inicial foram avaliadas. Os resultados apresentados mostram que o tipo de imperfeição geométrica considerado altera:

- (i) A capacidade de carga de uma unidade como mostrou as Figuras 11 e 12.
- (ii) As colunas críticas de uma estrutura;
- (iii) A falha da estrutura como observado no caso de CargaH1 / CargaH2 igual a 0,2. Para as imperfeições do Tipo I, II e IV houve falha nas colunas. Porém, para o Tipo III a falha do sistema ocorreu nas longarinas da Região II.
- (iv) O conservadorismo das normas de projeto. O método do comprimento efetivo previsto pelo RMI MH16.1:2012[9] gerou, para todos os tipos de imperfeição analisados, resultados mais conservadores do que os gerados pelo método da análise direta da ANSI/AISI S100:2016[5]. Ainda assim, o conservadorismo elevado do método da análise direta (de até 50% para o Tipo II e CargaH1 / CargaH2 igual a 0,2) indica que avanços neste procedimento de dimensionamento devem ser efetuados. Além disso, foi atestada a influência dos modos de imperfeições locais nas análises das estruturas porta-paletes, indicando que avanços também devem ser efetuados no sentido de considerá-los na etapa da análise estrutural.

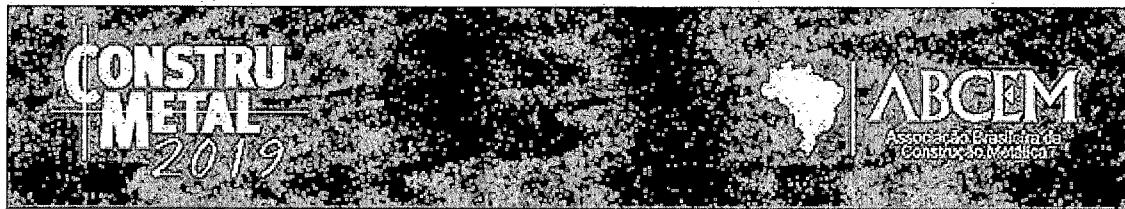
Vale lembrar que devido ao tipo de elemento finito utilizado, os resultados apresentados neste trabalho não consideram os efeitos de instabilidades locais e distorcionais da estrutura.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq) – nº do Processo 140458/2017-4.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15524-2: Sistemas de armazenagem. Parte 2: Diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- 2 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- 3 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites). Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- 4 American Society of Civil Engineers. Effective Length and Notional Load Approaches for Assessing Frame Stability: Implications for American Steel Design, Task Committee on Effective Length, ASCE, New York, N.Y.;1997.



- 5 American Iron and Steel Institute. ANSI/AISI S100. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington, D.C.;2016.
- 6 American Institute of Steel Construction. ANSI/AISC 360. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois;2016.
- 7 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- 8 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- 9 Rack Manufacturers Institute. Specification for the Design, testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks. Charlotte (USA): Rack Manufacturers Institute;2012.
- 10 Sarawit, A.T., Peköz, T. Cold-Formed Steel Frame and Beam-Column Design. Research Report RP03-2, Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members; 2006.
- 11 Sarawit, A.T., Peköz, T. Notional load method for industrial steel storage racks. Thin-Walled Structures.2006; 44, 1280-1286.
- 12 Dória, A.S., Malite, M., Vieira Jr., L.C.M. On Frame Stability Analysis. Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, St. Louis, Missouri;2013.
- 13 Lavall, A.C.C., Silva, R.G.L., Costa, R.S., Fakury, R.H. Advanced analysis of steel frame using the Brazilian Standard. Revista da Estrutura de Aço: 2013; 2 (3) 146-165.
- 14 Rasmussen, K.J.R., Gilbert, B.P. Analysis-Based Design Provisions for Steel Storage Racks. Journal of Structural Engineering.2013; 139 (5) 849-859.
- 15 Trouncer, A.N., Rasmussen, K.J.R. Ultra-light gauge steel storage rack frames. Part 1: Experimental investigations. Journal of Constructional Steel Research.2016; 124, 57-76.
- 16 Trouncer, A.N., Rasmussen, K.J.R. Ultra-light gauge steel storage rack frames. Part 2 – Analysis and design considerations of second order effects. Journal of Constructional Steel Research.2016; 124, 37-46.
- 17 Zhao, X., Wang, T., Chen, Y., Sivakumaran, K.S. Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright connections. Journal of Constructional Steel Research. 2014; 99, 161-175.
- 18 Godley, M.H.R., Beale, R.G., Feng, X. Rotational stiffnesses of semi-rigid baseplates. Proceedings of the Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri U.S.A.;1998.
- 19 Sarawit, A.T., Peköz, T. Design of industrial storage racks. Proceedings of Sixteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, Florida USA, 369-384;2002.
- 20 Vogel, U. Calibrating Frames. Stahlbau, 10, 295-301;1985.
- 21 Galambos, T.V., Ketter, R.L. Columns under Combined Bending and Thrust. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE. 1959; 85, no. EM2, 1-30.

