



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Mestrado em Engenharia Civil



Guilherme Cássio Elias

Análise de painéis contraventados de sistemas de
armazenagem industriais

Ouro Preto - MG
Fevereiro - 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DE PAINÉIS CONTRAVENTADOS DE SISTEMAS DE
ARMAZENAGEM INDUSTRIAIS

GUILHERME CÁSSIO ELIAS

ORIENTADORA: Prof.^a Dr.^a Arlene Maria Cunha Sarmanho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construções Metálicas.

Ouro Preto, fevereiro de 2018

E422a Elias, Guilherme Cássio.
Análise de painéis contraventados de sistemas de armazenagem industriais
[manuscrito] / Guilherme Cássio Elias. - 2018.
101f.: il.: color; graf; tabs.

Orientador: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Construções metálicas. 2. Perfis formados a frio. 3. Sistemas de

CDU: 624.014

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

**ANÁLISE DE PAINÉIS CONTRAVENTADOS DE SISTEMAS DE
ARMAZENAGEM INDUSTRIAIS**

AUTOR: GUILHERME CÁSSIO ELIAS

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 23 de fevereiro de 2018, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


Prof. Arlene Maria Cunha Sarmento, D. Sc. – UFOP (Presidente)


Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG


Prof. Vinícius Nicchio Alves, D. Sc. – Sem filiação


Prof. André Tenchini da Silva, D. Sc. – UERJ

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre guiar e iluminar meus passos.

Aos meus pais, Arlindo e Elza, e meu irmão, Euslei, por todo o incentivo e apoio imensuráveis.

A minha orientadora Arlene pela confiança, dedicação, paciência e exemplo pessoal e profissional.

Aos amigos do Laboratório de Estruturas: Luiz, Vinícius, Ellen, Ana Flávia, Escanio, Daniel, Messias, JB, Roquete, Gabriel, Ana Amélia, Letícia, Juliane, André, Gilney, João, Dequinha e Celso, por toda ajuda e por tornarem mais leve esta caminhada.

Aos amigos e familiares pela torcida e por compreenderem os momentos de ausência.

A FAPEMIG e CAPES pelo apoio.

A Águia Sistemas pela parceria.

RESUMO

Os sistemas de armazenagem industrial, conhecidos também como *racks*, são estruturas utilizadas para armazenar produtos manufaturados. São fabricados em perfis formados a frio com chapas finas, que em função da versatilidade, economia e leveza são adequados à fabricação dos elementos que compõem os sistemas. No sistema de armazenagem a estabilidade do conjunto no plano transversal está associada a painéis contraventados. O objetivo deste trabalho é a realização de análises teóricas e experimentais dos painéis contraventados de sistemas de armazenagem, constituídos por colunas formadas por perfis formados a frio cuja seção transversal é do tipo *rack*. Foi avaliada a influência dos contraventamentos nos painéis quando comparados às colunas isoladas, ou seja, sem os contraventamentos. Foram analisados 198 ensaios experimentais, dentre painéis contraventados e colunas isoladas, realizados no Laboratório de Estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias (DECIV/EM/UFOP) e as cargas últimas experimentais obtidas foram comparadas entre as seções transversais e comprimentos considerados. Além da capacidade de carga, foram analisados também os deslocamentos relacionados aos modos de flambagem observados nos protótipos, pois devido à elevada esbelteza característica dos perfis formados a frio, estes ficam sujeitos aos fenômenos de instabilidade local, global e distorcional, assim como o acoplamento entre os modos. A análise teórica das colunas foi realizada considerando adaptações de prescrições normativas e os valores encontrados de capacidade de carga foram comparados com os resultados experimentais. Da análise dos deslocamentos e cargas últimas experimentais, observou-se que o comprimento total da coluna e o comprimento destravado dado pela posição dos contraventamentos são fatores que influenciam diretamente nos modos de flambagem. Além disso, a análise teórica considerando adaptações normativas ressaltou a necessidade de novas curvas de flambagem que considerem as perfurações nas seções transversais das colunas, a forma da seção transversal (tipo *rack*) e o acoplamento entre os modos de flambagem, e o mesmo para os painéis contraventados, cuja fixação dos contraventamentos não é levada em consideração nos projetos.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, Perfis formados a frio, Sistemas de armazenagem industriais, *Racks*, Instabilidade estrutural.

ABSTRACT

Industrial storage systems, also known as racks, are structures used to storage manufactured products. They are built using thin-walled cold-formed sections, that provide versatility, economy and lightness to the composing elements of the systems. In the storage systems, the stability of the set in the transverse plane is associated to braced frames. This work aims to perform a theoretical and experimental analysis of storage systems' braced frames, composed by uprights with rack cold-formed cross-sections. The influence of the frames' bracing was evaluated through the comparison with the isolated uprights, that is, elements without any bracing. The experiments were performed in the Structures Laboratory Prof. Altamiro Tibiriçá Dias (DECIV/EM/UFOP); 198 experimental data were analyzed, including braced frames and isolated uprights and the experimental ultimate loads were compared between the cross-sections and the considered lengths. Besides the load capacity, displacements related to the buckling modes were also analyzed. Because of the high slenderness in cold-formed steel sections, these prototypes can be subjected to local, global and distortional instability, as well as the combination between these modes. The uprights' theoretical analysis was made considering adaptations to the design prescriptions, and the bearing capacity values were compared to the experimental data. From the analysis of displacements and ultimate experimental loads, it was observed that the upright's total length and the length given by the bracing's positions were factors that directly influenced the buckling modes. Moreover, the theoretical analysis, considering adaptations to the design prescriptions, emphasized the necessity of new buckling curves that consider the perforations in the uprights' cross-sections, the cross-section shape (rack sections) and the combination between the buckling modes, besides the braced frames, which bracing's fixation is not considered in projects.

Keywords: Steel structures, Cold-formed steel sections, Industrial storage systems, Racks, Structural instability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Perfis formados a frio.....	10
1.2	Flambagem local, distorcional e global.....	11
1.3	Sistemas de armazenagem industrial.....	12
1.4	Componentes do sistema de armazenagem.....	16
1.5	Revisão bibliográfica.....	19
1.6	Objetivos.....	27
1.7	Justificativa.....	27
1.8	Metodologia.....	28
1.9	Estrutura da dissertação.....	29
2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	30
2.1	Geometria da seção e comprimentos.....	30
2.2	Nomenclatura adotada.....	33
2.3	Montagem do ensaio.....	35
2.4	Instrumentação e aquisição de dados.....	39
2.5	Metodologia do ensaio.....	43
3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS.....	46
3.1	Colunas de 800 mm de comprimento.....	46
3.1.1	Painel contraventado de 800 mm de comprimento.....	46
3.1.2	Coluna isolada de 800 mm de comprimento.....	49
3.2	Colunas de 1400 mm de comprimento.....	50
3.2.1	Painel contraventado de 1400 mm de comprimento.....	50
3.2.2	Coluna isolada de 1400 mm de comprimento.....	55
3.3	Colunas de 2000 mm de comprimento.....	56
3.3.1	Painel contraventado de 2000 mm de comprimento.....	56
3.3.2	Coluna isolada de 2000 mm de comprimento.....	60
3.4	Colunas de 2400 mm de comprimento.....	62
3.4.1	Painel contraventado de 2400 mm de comprimento.....	62
3.4.2	Coluna isolada de 2400 mm de comprimento.....	66

4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DA CAPACIDADE RESISTENTE.....	69
4.1	Colunas CDR 80.....	69
4.2	Colunas CDR 90.....	71
4.3	Colunas CDR 100.....	72
4.4	Colunas de 800 mm e 1400 mm de comprimento	73
4.5	Colunas de 2000 mm e 2400 mm de comprimento	75
5	ANÁLISE TEÓRICA	77
5.1	Método da Resistência Direta.....	77
5.2	Análise de flambagem elástica	82
5.3	Capacidade resistente - seção sem furo.....	87
5.4	Capacidade resistente - seção com furo	89
5.5	Comparações dos resultados teóricos e experimentais.....	91
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
	REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 Perfis formados a frio

Os perfis formados a frio são obtidos a partir do dobramento ou perfilagem de chapas de aço, em temperatura ambiente. Essas chapas devem ser finas, com espessura de até 8 mm (NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio), para que seja garantida a trabalhabilidade necessária ao processo de fabricação.

São muitas as vantagens deste tipo de perfil quando comparados às seções laminadas a quente ou soldadas. Dentre elas, têm-se a grande quantidade de seções transversais possíveis de serem obtidas, a versatilidade de aplicação, a facilidade na produção, manuseio e transporte, além da reduzida massa de seus elementos.

Dentre as seções em perfis formados a frio têm-se por exemplo, o U enrijecido, caixa, seção tipo *rack*, entre outras. Estas seções estão apresentadas na Figura 1.1.

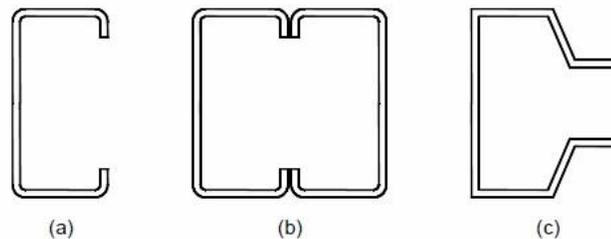


Figura 1.1: Seções usuais em perfis formados a frio: (a) U enrijecido; (b) Caixa; (c) Rack. (Fonte: Faria, 2016)

Os perfis formados a frio são formados por uma associação de placas que compõem a seção transversal dos mesmos. O comportamento destas placas esbeltas envolve a solução de equações de equilíbrio complexas de difícil utilização em normas de projeto. Faz-se uso portanto, de métodos simplificados de solução. Os dois principais métodos são o Método da Largura Efetiva (von Karman, 1932 e Winter, 1947 apud Sarmanho, 1991) e o Método da Seção Efetiva (Batista, 2009 e 2010). Ambos os métodos são previstos em normas de projeto de perfis formados a frio. Tem-se ainda, o Método da Resistência Direta (Schafer, 2006), que utiliza análise da estabilidade pelo Método das Faixas Finitas (CuFSM) (Schafer e Ádani, 2006), Teoria Generalizada de Viga – GBT

(GBTul) (Bebiano *et al.*, 2008) e também pelo método dos elementos finitos como solução de problemas de autovalor e autovetor.

1.2 Flambagem local, distorcional e global

Como são utilizadas chapas finas, os perfis formados a frio apresentam elevadas relações de largura e espessura das paredes que os compõem, o que os deixa suscetíveis aos fenômenos de instabilidade, como a flambagem local, distorcional e global (Faria, 2016).

A flambagem local é caracterizada pela perda de estabilidade da placa, onde as paredes da seção transversal do perfil alteram sua forma com deslocamentos laterais senoidais, mantendo-se inalterados os ângulos entre as paredes, como pode ser visto na Figura 1.2.

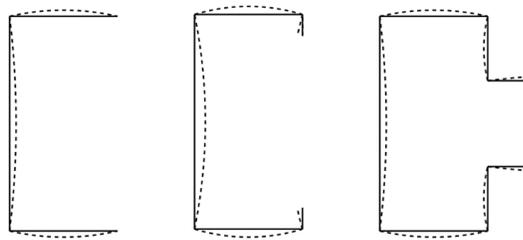


Figura 1.2: Flambagem local em seções U simples, U enrijecido e tipo *rack*

Na flambagem distorcional, o modo apresenta alterações na seção transversal com deslocamentos de pelo menos um dos vértices, conforme Figura 1.3.

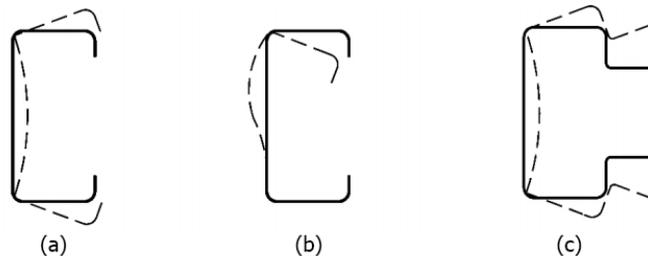


Figura 1.3: Flambagem distorcional: (a) U enrijecido sob compressão uniforme; (b) U enrijecido sob flexão simples; (c) Seção tipo *rack* sob compressão uniforme. (Fonte: NBR 14762)

A flambagem global, Figura 1.4, é caracterizada pela perda de equilíbrio do elemento decorrente de deslocamentos laterais ao longo do comprimento do mesmo, podendo ser por flexão, torção, ou por flexo-torção, onde os dois primeiros modos ocorrem simultaneamente.

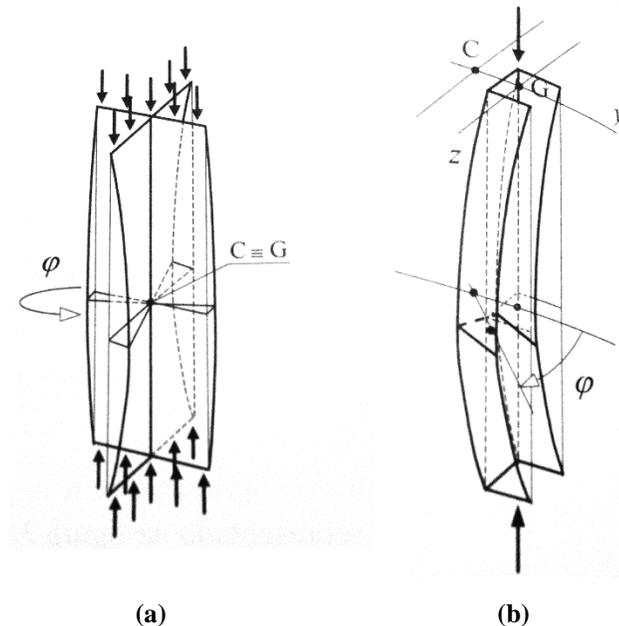


Figura 1.4: Flambagem global (a) por torção e (b) por flexo-torção. (Fonte: Silva *et al.*, 2016)

É importante destacar ainda que pode ocorrer um acoplamento entre estes fenômenos de instabilidade, que podem levar a um comportamento pós-crítico que deteriora a capacidade de carga dos elementos (Neiva, 2017).

1.3 Sistemas de armazenagem industrial

Os sistemas de armazenagem industrial, conhecidos como *racks*, são estruturas utilizadas para armazenar produtos manufaturados. Começaram a ser utilizados por volta do ano 1930 (Godley, 1991) e variam de pequenas estantes carregadas manualmente até estruturas de mais de 30 metros de altura com carregamento automatizado. São, em geral, construídos em perfis formados a frio com seções especialmente desenvolvidas para facilitar sua montagem, com perfurações ao longo da altura das colunas para fixar as ligações (Freitas *et al.*, 2003). Os *racks* apresentam praticidade na montagem e desmontagem, além de oferecer diversas opções de arranjos de estocagem considerando as características de cada produto e espaço de armazenagem. Na Figura 1.5 são apresentados exemplos destes sistemas.



Figura 1.5: Sistemas de armazenagem industrial. (Fonte: Águia Sistemas, 2018)

A escolha do tipo de sistema de armazenagem industrial é decisiva para se obter um melhor aproveitamento do espaço de estocagem e permitir o fácil acesso às cargas armazenadas. As variações encontradas estão relacionadas à altura entre vigas (chamadas de longarinas), profundidade do sistema e modo de armazenamento, dentre outros.

Os sistemas estáticos são os mais indicados para armazenar produtos que não possuam alta rotatividade. Os mais comuns são o *porta-pallets* e o *drive-in*. O sistema *porta-pallets*, ilustrado na Figura 1.6, permite a verticalização do espaço útil, possibilitando o acesso direto a todos os itens armazenados com o uso mínimo de operações da empilhadeira (Campos, 2003).

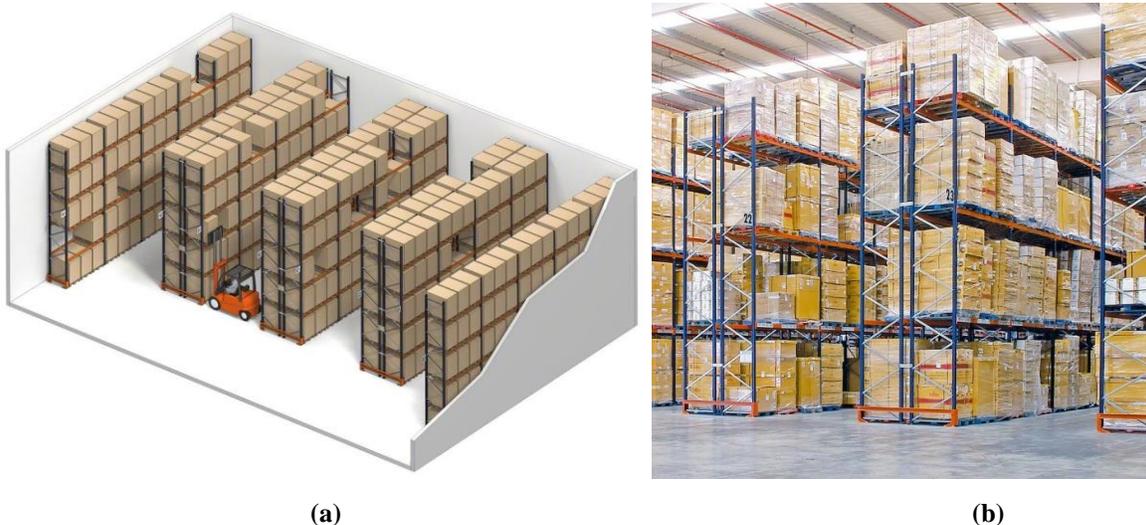


Figura 1.6: Sistema de armazenagem industrial do tipo *porta-pallets*: (a) Esquema ilustrativo; (b) Sistema real. (Fonte: Mecalux, 2018)

O sistema *drive-in* (Figura 1.7) possibilita um melhor aproveitamento da área disponível, pois permite que a empilhadeira transite internamente armazenando os paletes ao longo da profundidade do sistema. A quantidade de corredores de acesso é reduzida, o que possibilita um aproveitamento do espaço significativamente maior que utilizando o sistema *porta-pallets*.

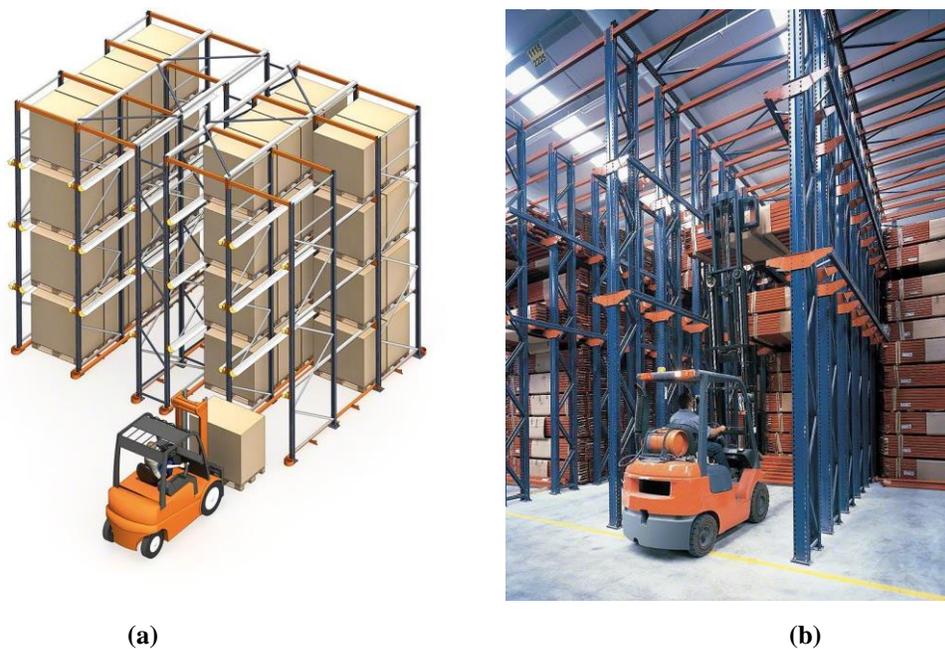


Figura 1.7: Sistema de armazenagem industrial do tipo *drive-in*: (a) Esquema ilustrativo; (b) Sistema real. (Fonte: Mecalux, 2018)

O sistema do tipo *porta-pallets* apresenta uma maior simplicidade operacional e estabilidade estrutural devido à existência das vigas/longarinas, se comparado com o sistema *drive-in*. Já neste sistema as vigas/longarinas transversais não são utilizadas, para que seja viabilizado o deslocamento da empilhadeira em seu interior. Portanto, este sistema é estabilizado pela rigidez da ligação entre a coluna e a longarina, pela rigidez da placa de base (Freitas *et al.*, 2010) e também pelos contraventamentos.

Existem também os sistemas dinâmicos de armazenagem (Figura 1.8) cuja utilização é mais comum em estocagem de produtos com alta acessibilidade e alta densidade de armazenagem. Os tipos mais comuns são o sistema *flow-rack*, *push-back* e o sistema de armazenagem dinâmica, que possui um sistema de trilhos de roldanas que promovem o movimento dos paletes para o interior do sistema. Estes mecanismos seguem a filosofia *first-in first-out* (primeiro que entra, primeiro que sai).



(a)



(b)

Figura 1.8: (a) Sistema de armazenagem dinâmico; (b) Sistema tipo *push-back*.

(Fonte: Mecalux, 2018)

Neste trabalho são estudados os sistemas de armazenagem estáticos do tipo *porta-pallets* e *drive-in*.

1.4 Componentes do sistema de armazenagem

Os principais componentes de um sistema de armazenagem estático estão detalhados na Figura 1.9, sendo eles as colunas, as vigas, os contraventamentos, as ligações e as placas de base.

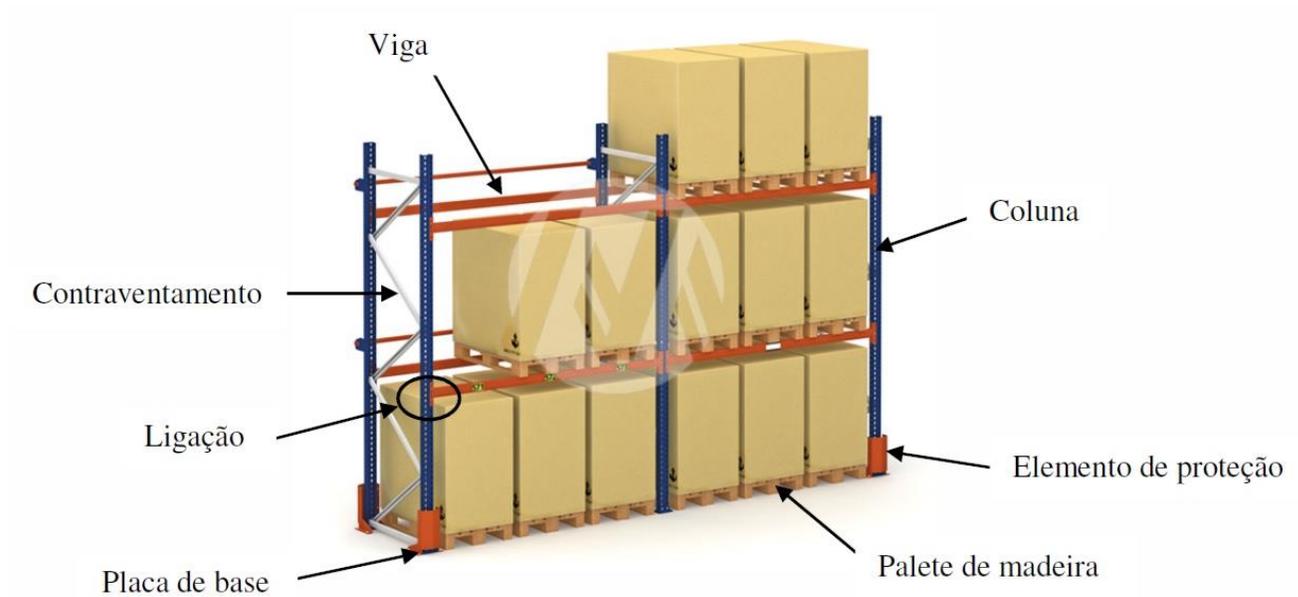


Figura 1.9: Componentes do sistema *porta-pallets*; vista tridimensional. (Fonte: Mecalux, 2018)

As vigas são também chamadas de longarinas e têm a finalidade de receber o carregamento dos paletes, transmitindo-o às colunas e à base por meio das ligações. Podem ser fabricadas em seção aberta ou fechada, sendo a fabricação da seção aberta por meio da conformação a frio mais simples em relação à seção fechada porém mais suscetível a problemas de instabilidade. Para o carregamento no sistema tipo *porta-pallets*, são utilizados geralmente dois ou três paletes por viga, embora tal configuração possa ser alterada em função da necessidade do cliente. Na

Figura 1.10 é detalhada a conexão da longarina com a coluna por meio dos conectores de extremidade da mesma, chamados de garra.

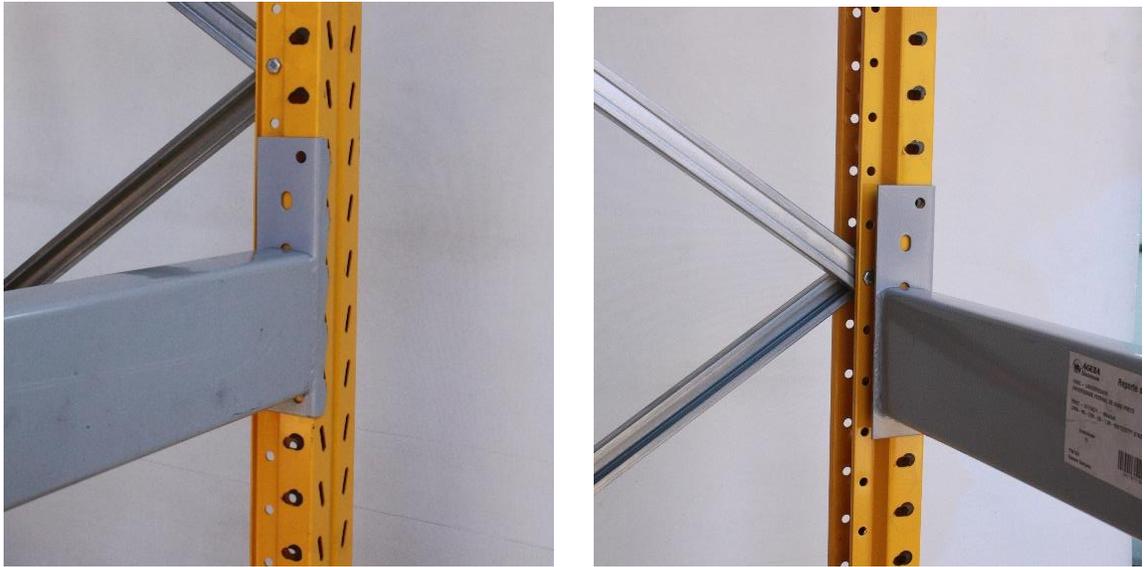


Figura 1.10: Ligação da longarina com coluna

As colunas constituem os painéis contraventados, que transferem a carga resultante das unidades de carga armazenadas nas vigas para o piso. As seções comumente usadas nas colunas são as abertas do tipo U enrijecido e *rack* (conhecido também como garrafa). Na Figura 1.11 estão detalhados os elementos da seção transversal da tipologia *rack*. As seções do tipo *rack* são mais vantajosas que as do tipo U enrijecido por apresentarem os flanges de ligação para a conexão dos contraventamentos, tornando a montagem do sistema mais rápida e econômica. As colunas são normalmente sujeitas à carga axial e momento fletor. As cargas transferidas pelas vigas são transmitidas às colunas por meio de ligações semirrígidas.

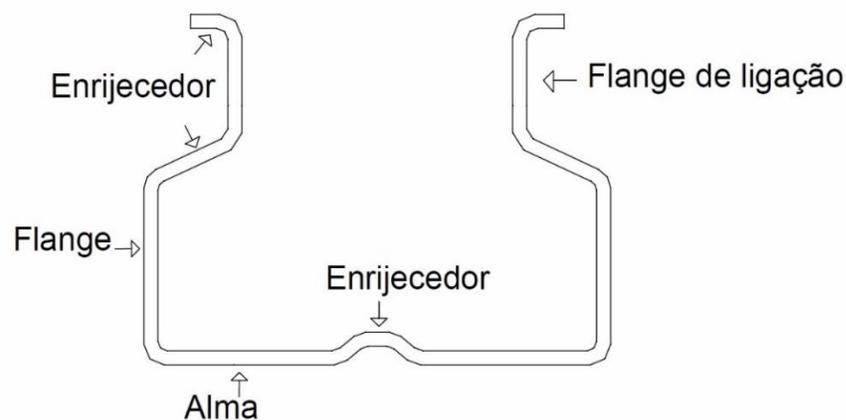


Figura 1.11: Elementos da seção transversal do perfil *rack*.

Os contraventamentos são peças estruturais que podem apresentar seções do tipo cantoneira e U enrijecido. No sistema de armazenagem do tipo *porta-pallets*, os contraventamentos são fixados em suas faces laterais. Dependendo da necessidade, é possível também inserir contraventamentos verticais de fundo no sistema e também horizontais internos aos planos de carga. Os contraventamentos verticais de fundo têm a desvantagem da perda de acessibilidade aos produtos por um dos lados dos *racks*; e os contraventamentos horizontais internos têm como consequência aumento do custo e tempo na montagem da estrutura. No sistema de armazenagem do tipo *drive-in*, devido à ausência de vigas/longarinas transversais, os contraventamentos são dimensionados para garantir a estabilização do sistema.

Os tipos mais comuns de colunas contraventadas quanto à posição dos contraventamentos são em formato de X, em formato de K com diagonais regulares e irregulares, em formato de Z e K com barras horizontais. Estes modelos estão representados, respectivamente, na Figura 1.12, de acordo com a norma europeia BS EN 15512:2009 – Steel static storage systems – Adjustable pallet racking systems – Principles for structural design.

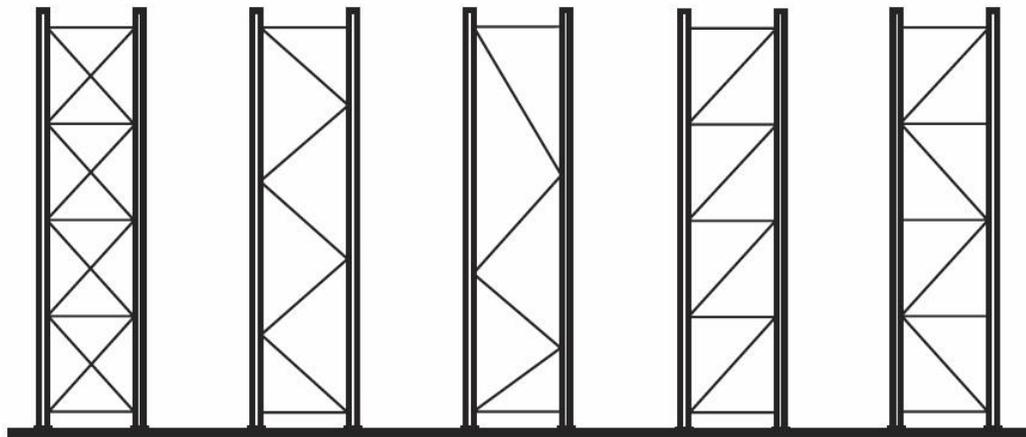


Figura 1.12: Painéis contraventados. (Fonte: BS EN 15512)

As placas de base têm função de fixar as colunas e distribuir a carga para o piso de apoio. São compostas por chapas finas e fixadas no piso por meio de parafusos/chumbadores. O nivelamento do piso é de suma importância para minimizar os efeitos das imperfeições geométricas. Caso sejam detectados desníveis elevados no piso, devem ser acrescentadas placas niveladoras.

1.5 Revisão bibliográfica

O crescente aumento do uso das estruturas de armazenagem industrial no cenário mundial atual, leva à necessidade de um maior aprofundamento dos estudos relacionados ao comportamento e estabilidade dos perfis formados a frio que compõem os sistemas de armazenagem, assim como dos seus elementos constituintes e da estrutura como um todo. Um estudo sobre as principais pesquisas e avanços relacionados ao assunto foi realizado e é apresentado a seguir.

Oliveira (2000) estudou o sistema de armazenagem do tipo *drive-in* por meio de um programa experimental com o objetivo de avaliar os valores de rigidez das ligações entre a longarina e a coluna e entre o braço (viga curta em balanço ligada às vigas de túnel) e a coluna. Os resultados encontrados apresentaram boa correlação com os valores fornecidos pelas prescrições do Rack Manufacturers Institute (RMI, 1997). Foi realizado também uma análise numérica linear do sistema *drive-in*, onde foram comparados dois modelos: um com as ligações rígidas e outro com as ligações semirrígidas, utilizando rigidez obtida experimentalmente. Concluiu-se que o emprego do modelo rígido conduziu a valores subestimados para os deslocamentos. Além disso, as solicitações obtidas nestes dois modelos foram comparadas com o valor da resistência do contraventamento de fundo e da coluna, calculados segundo as prescrições do RMI. Observou-se que nos contraventamentos de fundo a resistência nos dois modelos foi menor que a solicitação, enquanto que nas colunas, o modelo com ligações semirrígidas apresentou resistência menor e o mesmo não aconteceu com a rígida.

Harris e Hancock (2002) analisaram a estabilidade de *racks* do tipo *porta-pallets* através de um programa experimental a fim de verificar a influência da rigidez das ligações considerando o ensaio da viga em balanço. Concluiu-se que as ligações perdem rigidez durante o carregamento da estrutura, que altera seu comportamento.

Vazquez (2002) realizou uma análise teórico-experimental sobre os modos local, distorcional e global de colunas constituídas por perfis de chapa dobrada com seção tipo *rack*. Os resultados experimentais foram comparados aos teóricos obtidos para a carga última e concluiu-se que a flambagem distorcional não apresentou reserva de resistência pós-crítica, além de apresentar alta suscetibilidade às imperfeições geométricas iniciais. Com isso, observou-se que as colunas sujeitas a este fenômeno de instabilidade necessitam de um tratamento específico, com utilização de curvas de resistência mais conservativas que as curvas prescritas na NBR 14762:2001.

Campos (2003) realizou análises numéricas e experimentais de sistemas de armazenagem industrial do tipo *drive-in*. Comparou os tipos de análises que melhor representam o comportamento deste tipo de estrutura, concluindo que a análise não-linear é mais adequada em função da não-linearidade desta tipologia, e a análise tridimensional é recomendada devido à interação entre os seus elementos. Analisou também a diferença de deslocamentos das colunas frontais do sistema em relação às colunas de fundo, concluindo que ocorre perda de influência do plano de contraventamento dos fundos nas colunas frontais.

Sarawit e Pekoz (2003) estudaram o comportamento dos sistemas de armazenagem industrial através das análises dos componentes dos *racks* visando melhorias das prescrições de dimensionamento existentes. Analisaram as placas de base e concluíram que o modelo da época era conservador, propondo uma nova equação para o dimensionamento. Avaliaram as ligações entre vigas e colunas, chegando à conclusão de que para o esforço cortante os ensaios não eram apropriados para avaliar o efeito do cisalhamento. Por fim, simularam numericamente um pórtico de colunas contraventadas para avaliar seu comportamento global. Comparou-se a influência dos modos local e distorcional da coluna na resistência do *rack* como um todo. Concluíram que o valor da rigidez da ligação e a modelagem da base influenciam no comportamento dos *racks*.

Teh *et al.* (2004) fizeram uma comparação entre simulações 2D e 3D de sistemas de armazenagem do tipo *porta-pallets*. Após as análises, concluíram que a simulação 3D é capaz de captar interações entre os diversos modos existentes em estruturas deste tipo. Já a 2D não consegue avaliar com eficácia o comportamento estrutural do sistema, apesar de ser a mais utilizada em análises e dimensionamentos.

Souza (2005) estudou o sistema de armazenagem do tipo *drive-in*, avaliando o comportamento global do sistema e a interação de seus componentes. Foram realizados ensaios experimentais de um *rack* composto por dois corredores, sem contraventamento de fundo, com carregamento vertical simulando a ação imposta pelos paletes e carregamento horizontal induzindo o efeito da falta de prumo da estrutura. A ligação da placa de base foi simulada como rótula, engaste e ligação semirrígida. Os resultados dos ensaios experimentais foram comparados com os valores numéricos, obtidos via Método dos Elementos Finitos. Concluiu-se que o comportamento real da estrutura se aproxima do modelo rígido. Além disso, foi observado que para as ligações entre garra e coluna, a consideração de engaste produz valores não conservadores, mostrando que a semirrígidez da ligação entre longarinas e colunas deve ser considerada.

Ribeiro (2006) realizou um estudo experimental de colunas curtas com seção tipo *rack* de diferentes espessuras, com e sem furos, com objetivo de avaliar a influência das perfurações na capacidade de carga e nas deformações sofridas pela estrutura durante os ensaios. Concluiu que a capacidade de carga é influenciada fortemente pela presença dos furos e que as regiões próximas às perfurações apresentaram maiores níveis de deformações. Também observou que as prescrições da NBR 14762 no cálculo de carga nominal de colunas perfuradas apresentam valores satisfatórios e com maior segurança que os métodos indicados pelo RMI.

Souza *et al.* (2006) realizaram uma análise numérica de colunas que constituem os sistemas de armazenagem industrial do tipo U enrijecido sob compressão axial e com enrijecedores intermediários na alma. A análise foi realizada via Método dos Elementos Finitos, com obtenção das cargas críticas de flambagem e modos associados (análise linear) e do comportamento pós-crítico (análise não-linear). Concluiu-se que apesar de proporcionar grande rigidez às seções, o acréscimo de enrijecedores intermediários induzem à intensificação do modo de flambagem distorcional.

Godley e Beale (2008) realizaram um estudo sobre a influência da folga dos contraventamentos de estruturas de sistema de armazenagem industrial do tipo *porta-pallets* na capacidade de carga das mesmas. Para incluir a folga corretamente nas suas análises experimentais, os autores propuseram que a inclinação relativa à descarga nas curvas de momento *versus* rotação obtida dos testes, fosse utilizada para determinar a rigidez ao cisalhamento do painel contraventado. E ainda, a rigidez média poderia ser utilizada se a diferença entre a rigidez positiva e a negativa fosse de no máximo 10%, caso contrário a rigidez mais baixa deveria ser utilizada. Concluíram que testes de carga cíclica são mais eficientes para identificar a folga em um painel de sistema de armazenagem, constituído pelas colunas e contraventamentos. Ao se utilizar outros métodos, há um risco significativo de se subestimar a carga de flambagem da estrutura.

Koen (2008) realizou estudos relacionados ao comportamento de colunas contraventadas quando submetidas à compressão, por meio de ensaios experimentais. Foi observado que os modos de falha variaram de acordo com o comprimento analisado. Nos comprimentos menores, de 1350 mm e 1950 mm, observou-se a flambagem por flexão do elemento e nos comprimentos maiores, de 2550 mm e 3150 mm, a ocorrência de flambagem por flexo-torção. Além disso, observou que para os painéis contraventados de 3150 mm, as restrições de torção devido aos contraventamentos aumentaram a capacidade de carga na ordem de 30 % em relação às colunas sem contraventamento.

Ng *et al.* (2009) realizaram um estudo dos métodos de restrição ao colapso progressivo em estruturas do tipo *rack*, por meio de um modelo numérico capaz de prever o comportamento do colapso deste tipo de estrutura. Após as análises, concluiu-se que o colapso progressivo da estrutura geralmente ocorre quando o *rack* é carregado no seu estado limite último e um único painel contraventado for removido por impacto. Os resultados das análises dinâmicas mostraram que a velocidade do impacto tem menos efeito sobre o comportamento da estrutura do que a magnitude da força do impacto. O estudo mostrou ainda que uma maneira econômica de reduzir a ocorrência de colapso é a inserção de reforço de contraventamentos na direção longitudinal da estrutura, no nível mais baixo com carregamento.

Rasmussen e Gilbert (2009) estudaram os componentes dos sistemas de armazenagem industrial através de análises experimentais de acordo com a norma europeia EN 15512:2009. Realizaram o ensaio da coluna curta, da viga em balanço (ligação viga-coluna), da ligação placa de base, de cisalhamento e de flexão das colunas. O estudo esclareceu o ensaio para medir a rigidez da placa de base, além da proposição de um método alternativo para determinar com precisão o deslocamento global das colunas que compõem o sistema.

Freitas *et al.* (2010) realizaram uma análise geral de *racks* tipo *drive-in*, avaliando a influência de cada um de seus componentes na estabilidade global. Observou-se o comportamento da placa de base por um modelo de elemento finito, determinando a relação momento *versus* rotação; seu comportamento foi inicialmente linear com alto valor de rigidez, diminuindo progressivamente após um valor limite de momento. Quanto ao comportamento do sistema *drive-in*, observou-se que considerar as conexões viga-coluna e placa de base rígidas, leva a resultados não conservadores, sugerindo que essa prática seja evitada em projetos.

Baldassino e Zandonini (2011) fizeram ensaios experimentais de elementos das estruturas de *racks* utilizados em sistemas de armazenagem industriais. Foram feitos ensaios da coluna curta, como previsto na norma europeia EN 15512:2009 e também dos painéis contraventados. Este último teve como objetivo alternativa à avaliação teórica, através de aplicação de uma força de cisalhamento a um segmento de armação vertical composto por dois painéis contraventados. Determinou-se a rigidez de cisalhamento elástico inicial da estrutura. Os autores concluíram que a avaliação teórica da rigidez ao cisalhamento supera substancialmente o valor experimental, devido a fatores como excentricidades dos membros e flexão dos parafusos não serem levados em consideração nos métodos teóricos.

Gilbert e Rasmussen (2011a, 2011b) realizaram ensaios experimentais de impacto em um sistema *drive-in*, e uma análise numérica em elementos finitos, fazendo uma boa correlação entre ambos resultados. Um estudo paramétrico também foi realizado com o objetivo de identificar fatores que influenciam os sistemas de armazenagem em relação ao impacto, apresentando um modelo simplificado de uma empilhadeira que permitiu calcular a força de impacto do veículo na estrutura. Concluiu-se que o impacto da empilhadeira em pontos mais baixos da estrutura são mais propensos a induzir a falha do sistema do que o impacto em pontos mais altos. Além disso, os sistemas de armazenagem projetados para armazenar paletes mais leves foram mais sensíveis ao impacto que os sistemas projetados para armazenarem cargas maiores.

Miranda (2011) avaliou numericamente por meio do Método dos Elementos Finitos o comportamento e rigidez das ligações utilizadas em estruturas de sistemas de armazenamento industrial do tipo *porta-pallets*, baseando-se nas prescrições do RMI. Os modos de colapso numérico e experimental coincidiram e a diferença entre os valores de rigidez da ligação obtidos numérica e experimentalmente ficou abaixo de 10%.

Souza (2013) realizou uma análise teórico-experimental em perfis formados a frio do tipo *rack* sob compressão centrada, com objetivo de avaliar a influência das perfurações na ocorrência dos modos local, distorcional e global de flambagem. Foram utilizadas a Teoria Generalizada de Vigas (GBT) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) no estudo numérico. O carregamento foi considerado centrado e as condições de apoio simularam rótulas (colunas biapoiadas). Após a comparação dos resultados numéricos e experimentais, concluiu-se que o modelo numérico realizado via MEF pode ser validado, uma vez que a dispersão máxima dos dados encontrada foi de 5,4%.

Tilburgs (2013) realizou um estudo geral sobre as estruturas de aço utilizadas nos sistemas de armazenagem, exaltando a necessidade de serem sistemas flexíveis para o uso, e, portanto, ajustáveis às necessidades. Ao longo do estudo o autor enfatizou os desafios encontrados na prática, onde os engenheiros se deparam com problemas decorrentes ao uso de perfis formados a frio, como as colunas serem continuamente perfuradas para permitir a montagem da estrutura e a variada gama de ligações semirrígidas que podem ser utilizadas, além do fato de cada fabricante produzir diferentes formas e detalhes para o seu produto, tornando difícil impor regras gerais válidas para vários fabricantes. O autor apresentou também um comparativo entre as normas em vigor, ressaltando a publicação da norma europeia EN 15512:2009 como um fato importante para a área.

Bernuzzi *et al.* (2015) realizou um estudo publicado em duas partes das normas vigentes na Europa sobre os sistemas de armazenagem industrial. A primeira parte apresenta a seleção do método de análise elástica de primeira ou segunda ordem, dependendo da deformabilidade do *rack* para cargas horizontais. Foi feita análise numérica considerando três tipos de seções transversais para as colunas, e também três tipos de disposição dos contraventamentos na direção transversal do painel contraventado: em formato de X (com duas diagonais se cruzando), com apenas uma diagonal e em formato de K. Observou-se que as forças e momentos internos das partes que constituem o sistema, são significativamente influenciados pelos efeitos dos deslocamentos laterais. A segunda parte diz respeito ao projeto dos *racks*, no que se refere à consideração dos estados limites de resistência e estabilidade dos painéis. Concluiu-se que ao analisar-se painéis contraventados com seção transversal simétrica, a influência do empenamento não pode ser desconsiderada, pois não o considerar pode levar a uma superestimação do deslocamento lateral da estrutura da ordem de 37%.

Dinde e Talikoti (2015) analisaram a estrutura do tipo *rack*, avaliando a influência de cada um dos componentes do sistema sobre a estabilidade global do mesmo. Modelos analíticos das colunas contraventadas e das colunas sem reforço foram criados em software por meio do Método dos Elementos Finitos. Foram preparados três modelos de painéis contraventados variando a disposição do contraventamento. O primeiro composto por quadros articulados com uma barra diagonal de contraventamento, o segundo com duas barras diagonais formando um X e o terceiro formando V invertidos. As análises foram realizadas considerando forças sísmicas, e concluiu-se que os painéis contraventados com disposição do contraventamento em formato de X apresentaram resultados melhores que os outros dois, no que diz respeito às forças axiais e deslocamentos máximos das colunas para a configuração de carregamento adotado.

Faria (2016) desenvolveu um estudo numérico e experimental de perfis formados a frio com seção do tipo *rack* com perfurações ao longo do seu comprimento. O estudo teve como objetivo a avaliação dos modos de instabilidade local e distorcional, considerando a influência dos furos no comportamento estrutural do perfil. Concluiu-se que a existência dos furos acarreta em uma redução da carga última das colunas, uma vez que a área líquida das colunas perfuradas é menor que a área bruta.

Kanyilmaz *et al.* (2016) estudaram a influência dos contraventamentos da direção longitudinal de sistemas de armazenagem industrial, na estabilidade das estruturas quando estão

sujeitas a comportamentos sísmicos. No trabalho são apresentados resultados de testes experimentais realizados em diferentes tipologias de estruturas tipo *rack*, totalmente carregadas. Concluiu-se que para considerar esse tipo de solicitação, no projeto deve ser levado em consideração uma sobre tensão suficiente para as conexões entre contraventamento e coluna, a fim de evitar falhas na conexão, por meio de cisalhamento dos parafusos ou flexão dos mesmo. E ainda, propuseram que a torção global do sistema pode ser minimizada por meio da redução de excentricidade de carregamento ou da redução da distância entre o plano de contraventamento vertical e as colunas, ou ainda utilizando uma configuração horizontal de contraventamento, onde ambos os painéis contraventados do sistema ficam conectados, assegurando-se uma transferência de carga eficiente entre eles.

Petrone *et al.* (2016) estudaram por meio de um programa experimental os painéis contraventados da direção transversal dos sistemas de armazenagem, em escala real. Foi avaliado a espessura e dimensões da placa de base e a seção transversal das colunas. Observou-se que a resposta de deformação da conexão da coluna com a placa de base possui um comportamento de deformação estável, sem perda de resistência brusca. O rasgamento dúctil é observado na solda entre o suporte e a placa de base.

Shah *et al.* (2016) realizaram um estudo geral sobre o estado da arte das ligações nos sistemas de armazenagem industrial. Reforçaram a importância das ligações entre vigas e colunas, de natureza sem parafusos, para a estabilidade do sistema na direção longitudinal às colunas contraventadas. O estudo levou a algumas conclusões, sendo as principais que a força e a rigidez da conexão entre vigas e colunas dependem das dimensões da viga, da espessura da coluna, e da geometria do conector; a eficiência da conexão aumenta com o aumento destes parâmetros. E os principais modos de falha observados nos ensaios experimentais do sistema, foram o rasgamento do material da coluna e o escoamento da ligação viga-coluna.

Thombare *et al.* (2016) abordaram a análise numérica linear e não-linear de estruturas de armazenagem tipo *rack*, especificamente dos painéis contraventados que constituem as estantes que armazenam os paletes. O sistema foi simulado por modelos tridimensionais por meio do Método dos Elementos Finitos. Foram utilizadas barras espaçadoras na abertura das colunas, e observou-se que são eficazes para melhorar a resistência das mesmas. Uma redução da carga última das colunas com contraventamento foi observada ao se aumentar o comprimento destravado das colunas, devido ao aumento na esbeltez.

Neiva (2017) estudou a influência das tipologias das perfurações na estabilidade e cargas últimas das colunas de perfis formados a frio submetidos a carregamentos centrado e excêntrico. O estudo teve como objetivo a determinação dos modos críticos de estabilidade seguida de uma análise não-linear para obtenção da carga última. Concluiu-se que tanto as perfurações verticais como as inclinadas influenciam na carga crítica das colunas, reduzindo seu valor. E notou-se que a influência da excentricidade de carregamento é mais perceptível na carga máxima, reduzindo significativamente seu valor. Destaca-se que a não-linearidade física foi considerada introduzindo os efeitos da plasticidade do aço e a não-linearidade geométrica introduzindo-se imperfeições utilizando amplitudes relativas aos modos de flambagem obtidos na análise linear.

Dai *et al.* (2018) realizaram um estudo sobre o comportamento das ligações entre viga e coluna dos sistemas de armazenagem industrial submetidas à flexão. Foram analisadas as deformações e modos de falha, assim como a rigidez torcional, resistência ao momento e rotação das ligações, e comparações de desempenho entre ligações parafusadas e sem parafusos. Os resultados mostraram que as ligações consideradas semirrígidas apresentaram modo de falha dúctil. Concluiu-se que dois fatores importantes determinaram os modos de falha das ligações: a proporção entre a espessura da coluna e a espessura do conector final da longarina, e as forças relativas entre a longarina e a coluna. Os principais parâmetros geométricos que influenciaram a rigidez e a resistência das conexões aparafusadas foram a espessura da coluna, altura da longarina e quantidade de garras da ligação.

1.6 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral a determinação da influência dos contraventamentos na capacidade resistente das colunas dos painéis contraventados que constituem os sistemas de armazenagem industrial quando comparados às colunas isoladas, ou seja, sem os contraventamentos.

Como objetivos específicos, podem ser destacados:

- Obtenção da capacidade de carga experimental dos painéis contraventados dos sistemas de armazenagem, constituídos por colunas formadas por perfis formados a frio com seção transversal tipo *rack*, considerando variações no comprimento e seção transversal das mesmas;
- Determinação da capacidade de carga experimental também das colunas isoladas, ou seja, sem os contraventamentos;
- Análise dos modos de instabilidade e sua relação com a carga última, por meio da análise dos deslocamentos das colunas.
- Análise teórica da capacidade de carga das colunas considerando adaptações de prescrições normativas e sua comparação com resultados experimentais.

1.7 Justificativa

Os perfis formados a frio, em função da sua versatilidade de aplicação, facilidade na produção, manuseio e transporte, têm apresentado uma crescente utilização no mercado nacional e internacional. Uma de suas aplicações é em sistemas de armazenagem industrial, também chamados *racks*, onde os elementos que os constituem são fabricados a partir de chapas finas de aço conformados a frio. No entanto, em função das configurações do sistemas e as características da seção transversal dos sistemas de armazenagem os fenômenos de instabilidade locais, globais e distorcionais são observados e justificam a necessidade de aprofundar os estudos relacionados a essa aplicação.

Somado a isso, as normas de projeto atuais consideram em suas formulações a influência dos modos de flambagem na capacidade de carga resistente para seções sem perfurações. No

entanto, as colunas que constituem os sistemas de armazenagem apresentam perfurações ao longo de seu comprimento para fixação das longarinas. Este trabalho vem contribuir para as atuais frentes de pesquisas no assunto, na análise das cargas últimas das colunas com furos e com os contraventamentos, assim como a influência dos contraventamentos no comportamento e estabilidade do sistema.

Devido à grande diversidade de uso destes sistemas e considerando que a evolução constante da construção metálica no cenário atual propicia a introdução de novas tecnologias e aprimoramento das existentes, torna-se cada vez mais necessário que os projetos se ajustem às necessidades dos clientes, para abranger o maior número de tipos e produtos a serem armazenados. Este trabalho vem contribuir também no aperfeiçoamento de prescrições normativas relacionados ao tema.

1.8 Metodologia

Na primeira etapa do trabalho, foram analisados os painéis contraventados por meio de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” (DECIV / Escola de Minas / UFOP), utilizando prensa servo-hidráulica (INSTRON SATEC 5569) com controle de deslocamentos. Foi desenvolvida uma montagem experimental que possibilitou a realização dos ensaios, que contemplaram painéis contraventados com colunas de diferentes dimensões de seções transversais tipo *rack*. Variaram-se também os comprimentos das colunas, sendo realizados testes em 4 (quatro) comprimentos diferentes. Os comprimentos das colunas foram escolhidos respeitando os limites de esbeltez como disposto na norma EN 15512:2009 e as seções transversais foram escolhidas dentre as usuais no mercado. A partir dos ensaios determinou-se a capacidade resistente e o comportamento das colunas contraventadas. Foram realizados também ensaios experimentais das colunas sem os contraventamentos, com as mesmas dimensões de seção e comprimento dos painéis contraventados.

Com os resultados encontrados nos ensaios experimentais, comparou-se o comportamento das colunas e dos painéis contraventados quanto aos deslocamentos observados e quanto às cargas últimas. Foram analisados os modos de flambagem e a influência dos contraventamentos, fazendo também uma relação entre estes considerando as diferentes seções transversais ensaiadas.

Realizou-se também uma análise teórica das atuais normas relacionadas aos perfis formados a frio e aos sistemas de armazenagem. Utilizando formulações normativas adaptadas para perfis com perfurações, calcularam-se as capacidades de carga das colunas ensaiadas, e os resultados encontrados foram analisados e comparados, propondo-se sistemáticas de projeto para as tipologias de seção ensaiadas.

1.9 Estrutura da dissertação

No capítulo 2 é apresentado o programa experimental realizado, assim como a definição das geometrias das seções transversais e comprimentos das colunas e painéis contraventados estudados. São descritas também a metodologia dos ensaios, a instrumentação realizada e a aquisição dos dados experimentais.

No capítulo 3 são apresentados os valores dos deslocamentos medidos nos protótipos em diversos pontos do comprimento e da seção, e é realizado uma análise dos resultados experimentais.

No capítulo 4 têm-se os resultados de carga última das colunas isoladas e painéis contraventados obtidos do programa experimental. É apresentada uma análise comparativa das colunas e painéis contraventados, relacionando a posição dos contraventamentos e dimensões das seções transversais com as cargas últimas obtidas.

No capítulo 5 é apresentada uma análise teórica das principais normas de dimensionamento de perfis formados a frio e sistemas de armazenagem. A capacidade de carga das colunas é determinada por meio do Método da Resistência Direta (MRD) do Anexo C da NBR 14762:2010 com adaptações para consideração das perfurações e os resultados encontrados são comparados àqueles obtidos experimentalmente.

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais da pesquisa, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram realizados com protótipos em escala real com o objetivo de determinar a capacidade de carga dos painéis contraventados dos sistemas de armazenagem formados por perfil formado a frio com seção transversal do tipo *rack* e o aço com tensão de escoamento (f_y) igual a 300 MPa. Também foram ensaiadas as colunas isoladas, ou seja, sem os contraventamentos. Foi realizado um total de 216 ensaios, dentre painéis contraventados e colunas isoladas.

Neste capítulo será apresentado como foram definidos os parâmetros para as dimensões dos protótipos e a nomenclatura adotada, assim como a montagem e metodologia do ensaio.

2.1 Geometria da seção e comprimentos

Foi considerada a seção transversal do tipo *rack* para as colunas, com três diferentes larguras de alma. São elas as CDR 80, CDR 90 e CDR 100, conforme nomenclatura utilizada pelo fabricante, com larguras da alma de respectivamente 80 mm, 90 mm e 100 mm. As seções são mostradas na Figura 2.1.

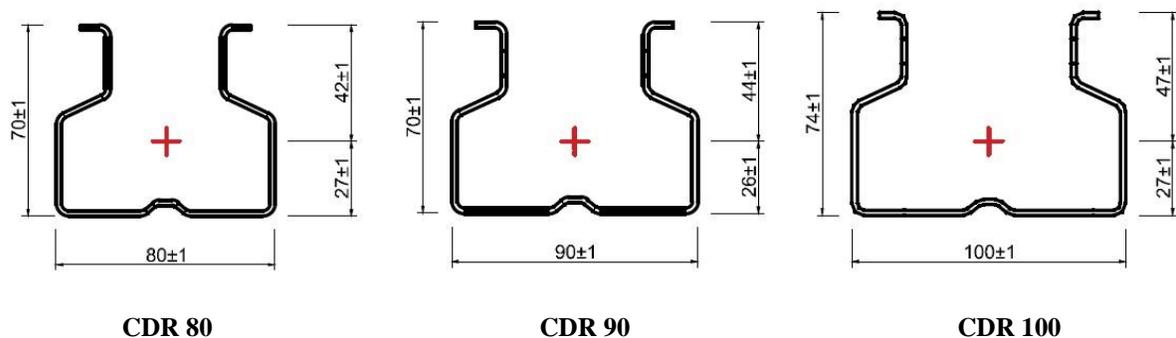
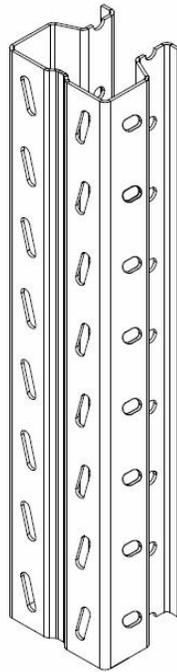


Figura 2.1: Seção transversal considerada (dimensões em mm)

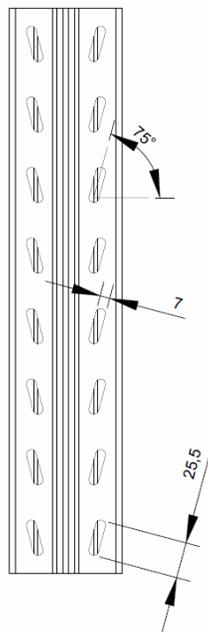
Na Figura 2.2 está mostrada a seção tipo *rack* estudada com os furos representados. Os furos inclinados são utilizados para fixação das longarinas nos sistemas de armazenagem e os furos oblongos são utilizados para fixação de outros elementos do sistema, como os extensores. Os furos arredondados dos flanges de ligação são utilizados para fixar os contraventamentos. Segundo

especificações do fabricante, os furos têm dimensão fixa, portanto não variam para as diferentes seções.

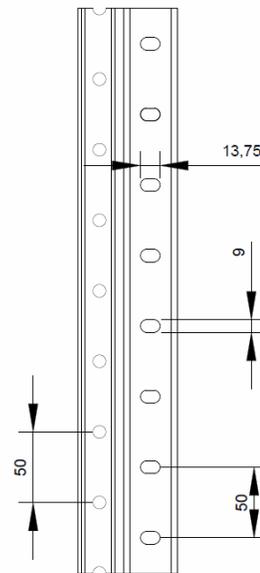
Na Figura 2.2 (a) tem-se uma vista isométrica da coluna, na Figura 2.2 (b) tem-se uma vista frontal e na Figura 2.2 (c) uma vista lateral.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.2: Seção tipo *rack* estudada (dimensões em mm)

Além das três diferentes larguras de alma, consideram-se diferentes espessuras para a seção transversal das colunas. São elas: para a largura de 80 mm, espessuras de 1,80 mm, 2,00 mm e 2,25 mm; para as larguras de 90 mm e 100mm, espessuras de 2,00 mm, 2,25 mm, 2,65 mm e 3,00 mm totalizando onze configurações de seção transversal. Cada configuração de seção transversal da coluna foi definido como uma série de ensaio. Na Tabela 2.1 estão mostradas as séries de ensaio, onde b_w é a largura da alma e t a espessura da seção transversal.

Tabela 2.1: Definição das séries de ensaio

b_w (mm)	t (mm)	Série
80	1,80	1
	2,00	2
	2,25	3
90	2,00	4
	2,25	5
	2,65	6
	3,00	7
100	2,00	8
	2,25	9
	2,65	10
	3,00	11

Para cada série de ensaio, foram considerados alguns comprimentos de colunas, definidos de acordo com as prescrições da norma europeia EN 15512:2009. O menor comprimento tem apenas uma barra de contraventamento diagonal e o maior comprimento foi definido com base na esbeltez não dimensional do elemento (Equação 2.1), que deve ser igual a 1,5 tanto quando o modo de falha é o modo distorcional, quanto flexo-torção. Este parâmetro é calculado conforme a Equação 2.1 e a Equação 2.2.

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$\lambda = \frac{L}{i} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

λ é a esbeltez correspondente ao modo de flambagem fora do plano;

$\bar{\lambda}$ é a esbeltez não dimensional do elemento;

E é o módulo de elasticidade do aço;

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

i é o raio de giração (Equação 2.3);

I é o momento de inércia;

A_g a área bruta da seção transversal.

$$i = \sqrt{\frac{I}{A_g}}$$

Equação 2.3

Os comprimentos intermediários foram determinados de forma a serem aproximadamente equidistantes do menor e do maior, considerando a melhor configuração para os comprimentos destravados. O menor comprimento considerado foi de 800 mm e o maior de 3000 mm. Os comprimentos intermediários foram 1400 mm, 2000 mm e 2400 mm.

Este trabalho se concentrou na análise de quatro comprimentos, são eles 800 mm, 1400 mm, 2000 mm e 2400 mm, ficando o comprimento de 3000 mm como sugestão de trabalhos futuros devido a limitações da prensa de ensaios.

2.2 Nomenclatura adotada

Como foram estudadas diversas seções diferentes, procurou-se criar uma nomenclatura que facilitasse a identificação das colunas e os parâmetros que foram variados. Por exemplo, o painel contraventado identificado como *CF_2400_100_3,0_(2)_A* refere-se ao protótipo ensaiado com as seguintes características:

- CF refere-se à finalidade à qual o ensaio foi realizado, que é a determinação das curvas de flambagem;
- 2400 refere-se ao comprimento da coluna, em milímetros;
- 100 indica a largura da alma da coluna, também em milímetros;

- 3,0 a espessura da seção transversal, em milímetros;
- (2) refere-se à ordem de realização do ensaio dentro da mesma série, neste caso o segundo ensaiado;
- A refere-se à posição do painel contraventado na realização do ensaio, quanto ao posicionamento dos contraventamentos nas colunas e em qual coluna foi aplicada a carga.

A posição dos contraventamentos em um painel contraventado pode ocorrer de maneira assimétrica em relação às duas colunas. São posicionadas uma barra horizontal inferior e uma superior no painel e o comprimento destravado dado pela distância entre os pontos onde estão posicionados dois contraventamentos diagonais é fixa de 1200 mm. Nos casos onde o comprimento destravado não atinge 1200 mm, são utilizadas barras horizontais de contraventamentos na parte superior do painel contraventado, como é o caso do comprimento de 2400 mm.

Quando é observada assimetria, deve-se realizar ensaio do painel contraventado posicionando a aplicação de carga em ambas as colunas que o constitui, definidos como lado A e lado B. No mínimo dois ensaios devem ser realizados para cada lado. Na Figura 2.3 tem-se a definição de lado A e lado B para o comprimento de 1400 mm.

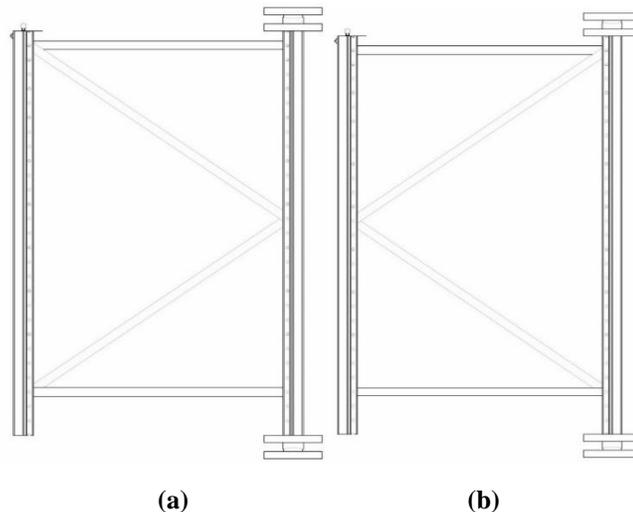


Figura 2.3: Painéis contraventados com colunas de 1400 mm: (a) Lado A; (b) Lado B

Na Tabela 2.2 está exemplificada a nomenclatura utilizada neste trabalho.

Tabela 2.2 – Nomenclatura dos protótipos utilizados.

Descrição: CF_QQQQ_WWW_XX_(Y)_Z	
CF	Sigla referente ao ensaio para determinação das curvas de flambagem, comum a todos os protótipos
QQQQ	Comprimento da coluna (L): 800 mm, 1400 mm, 2000 mm e 2400 mm
WWW	Largura da alma da coluna (b_w): 80 mm, 90 mm e 100 mm
XX	Espessura da seção transversal (t): 1,8 mm, 2,0 mm, 2,25 mm, 2,65 mm e 3,0 mm
(Y)	Ordem de realização do ensaio dentro da mesma série, iniciando do 1 até o último realizado
Z	Posição da coluna quanto ao posicionamento dos contraventamentos: A e B

2.3 Montagem do ensaio

A montagem do ensaio inicia-se com o posicionamento do painel contraventado na prensa servo-hidráulica. As colunas são carregadas axialmente conforme esquema disponível na norma europeia EN 15512:2009, mostrado na Figura 2.4.

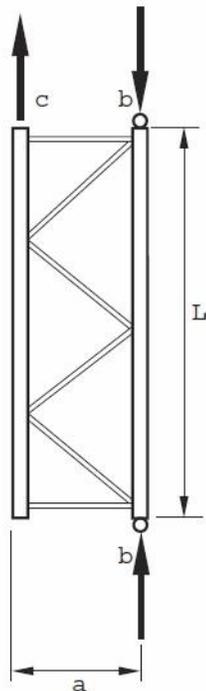


Figura 2.4: Alternativa de disposição para ensaio de compressão em painel (Fonte: EN 15512)

De acordo com o esquema da Figura 2.4, o painel contraventado é formado por duas colunas ligadas com contraventamentos horizontais e diagonais, fixados a uma distância de 1000 mm (indicado por a), conforme padrão do fabricante. O comprimento das colunas foi definido conforme apresentado anteriormente.

As condições de apoio (indicadas por b na Figura 2.4) foram rótulas nas extremidades da coluna, posicionadas sobre a rótula inferior e sob a rótula superior da prensa de ensaios.

Na coluna livre do painel contraventado, foi posicionado um contrapeso com massa igual à do painel a ser ensaiado (indicado como c na Figura 2.4), com o intuito de fornecer estabilidade e segurança durante a realização do ensaio, bem como simular uma força reativa relacionada a uma situação sem carregamento da coluna livre.

Na Figura 2.5 é apresentado um esquema geral do ensaio.

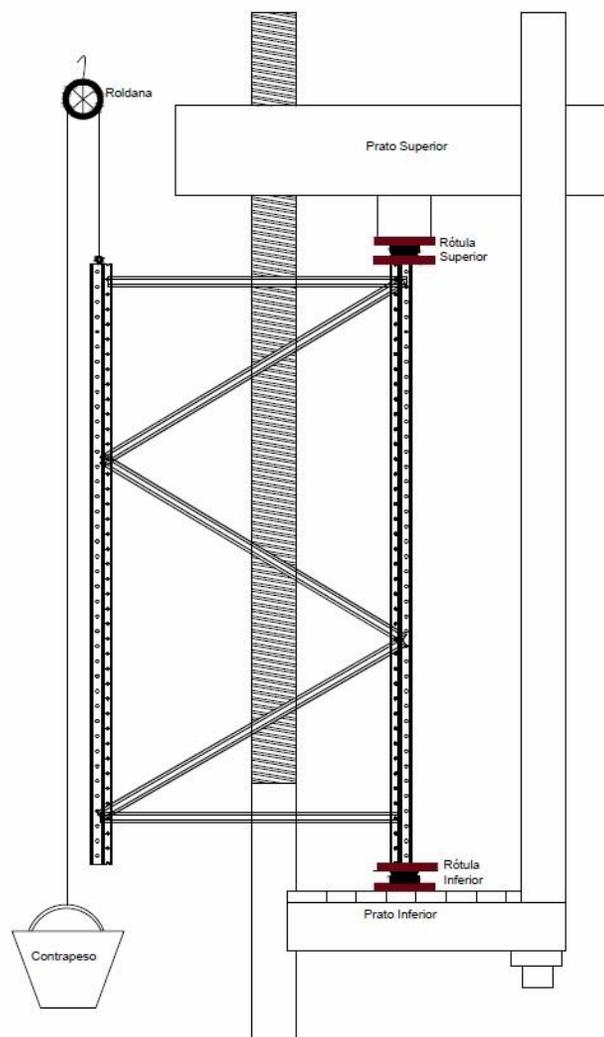


Figura 2.5: Esquema geral do ensaio com painel contraventado de 2000 mm posicionado

Na Figura 2.5 é mostrado o painel contraventado posicionado na prensa servo-hidráulica, as rótulas de apoio, e a indicação do contrapeso posicionado no centro geométrico da coluna livre em que foi utilizado uma roldana para a colocação do contrapeso.

Na Figura 2.6 tem-se uma foto real do ensaio, com o painel contraventado identificado por *CF_2400_80_2,0_(2)_A* posicionado na prensa servo-hidráulica.



Figura 2.6: Foto do ensaio do painel contraventado

Na Figura 2.7 é mostrado o esquema de ensaio para a coluna isolada, que é similar ao do painel contraventado a menos do contrapeso que não é utilizado.

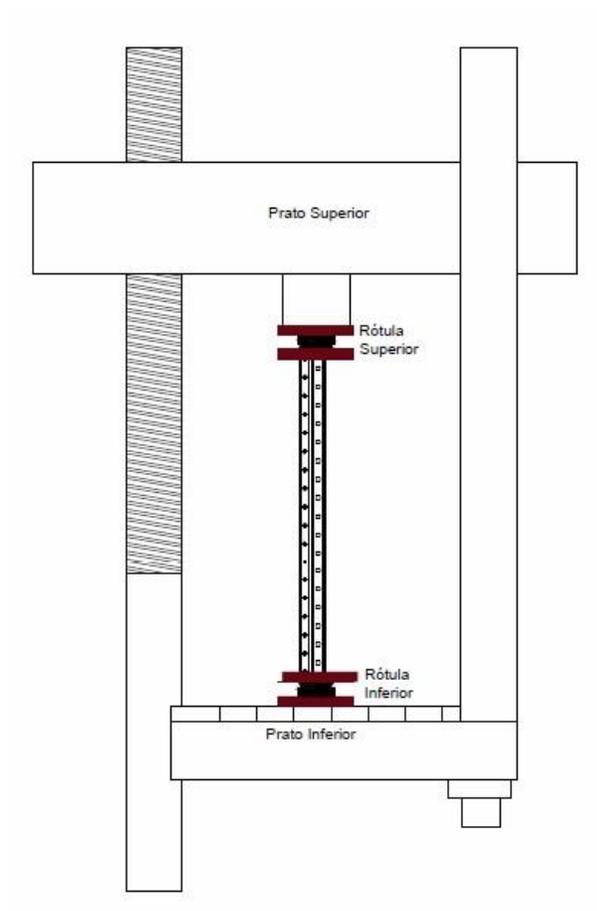


Figura 2.7: Esquema geral do ensaio da coluna isolada

A seguir, na Figura 2.8 tem-se em detalhe a rótula inferior utilizada nos ensaios experimentais.



Figura 2.8: Vista em detalhe da rótula utilizada nos ensaios

2.4 Instrumentação e aquisição de dados

A instrumentação dos painéis contraventados foi realizada por meio de transdutores de deslocamentos (LVDT's – *linear variable differential transducer*) e a aquisição dos dados via sistema automático de aquisição da HBM - Spider8. A posição dos LVDT's em cada ensaio foi escolhida de forma a possibilitar a avaliação dos deslocamentos associados à flambagem global e ao modo distorcional da coluna. Para isso, foram posicionados LVDT's nos flanges de ligação da seção transversal da coluna e no centro da alma, para medirem os deslocamentos decorrentes do modo distorcional e global, respectivamente. A altura em que foram posicionados foi definida de acordo com o comprimento total da coluna e com o comprimento destravado ao longo da altura da coluna.

Nos painéis contraventados de 800 mm de comprimento, foram posicionados dois LVDT's nos flanges de ligação da seção transversal da coluna, um de cada lado, a uma altura correspondente à metade da distância entre os pontos em que estão posicionados os contraventamentos. Outros dois LVDT's foram posicionados também nos flanges da ligação, um de cada lado, a uma distância correspondente a um quarto do comprimento destravado. Dois LVDT's foram posicionados na alma da coluna, um também a meia altura e outro a um quarto de altura considerando o comprimento livre entre os contraventamentos. Na Figura 2.9 é mostrado o posicionamento dos LVDT's no painel com 800 mm de comprimento.

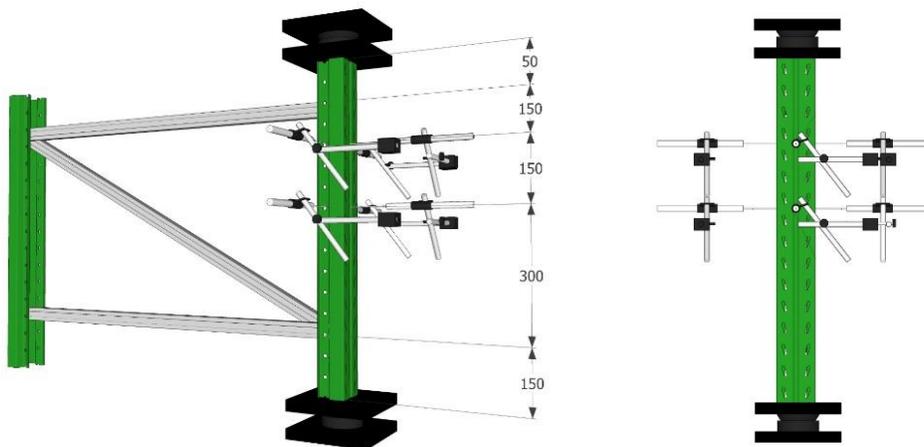


Figura 2.9: LVDT's posicionados no painel de 800 mm de comprimento

Nos painéis contraventados com 1400 mm de comprimento (Figura 2.10), foram posicionados para a posição A dois LVDT's no ponto onde estão posicionados os contraventamentos diagonais, um em cada flange de ligação da seção transversal da coluna. Outros quatro foram posicionados nos pontos médios dos comprimentos destravados, dois superiores e dois inferiores, nos flanges de ligação. Outros três LVDT's foram posicionados na alma da coluna, nas mesmas alturas dos LVDT's posicionados nos flanges de ligação. Na posição B do painel, foi posicionado a mesma quantidade de LVDT's na coluna, com as alturas correspondentes ao ponto médio e a um quarto do comprimento destravado.

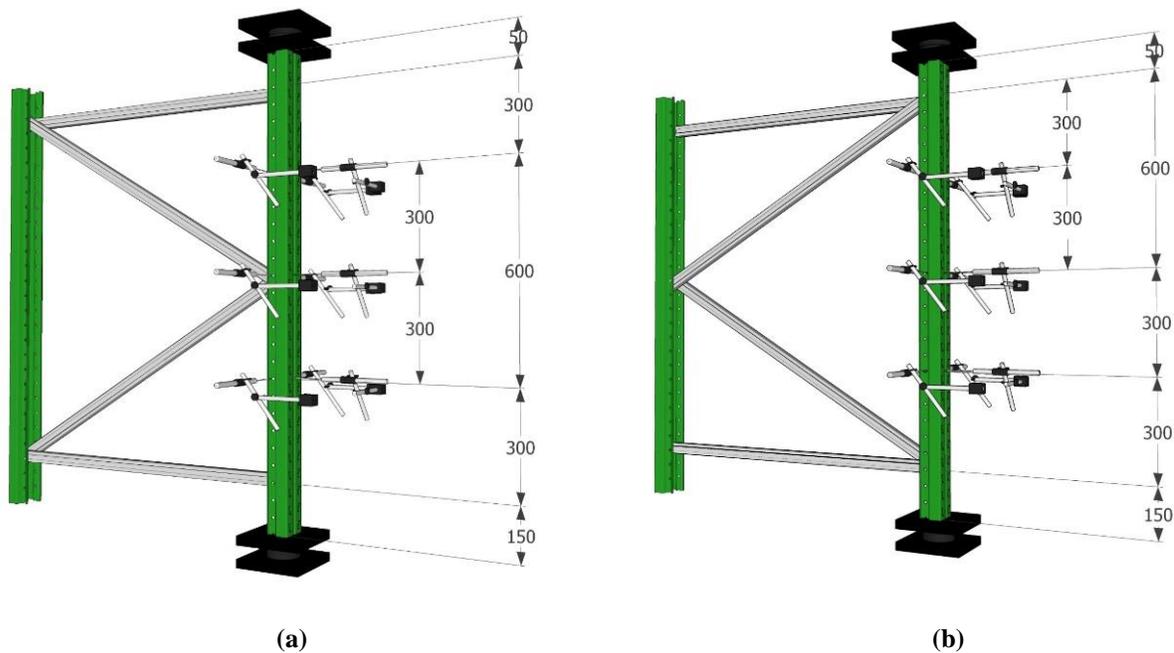


Figura 2.10: LVDT's posicionados no painel de 1400 mm de comprimento: (a) Lado A; (b) Lado B

Nos painéis com 2000 mm de comprimento (Figura 2.11), tanto para a posição A quanto para a posição B, os LVDT's foram posicionados nos pontos médios dos comprimentos destravados, ficando três na metade inferior e três na metade superior, sendo dois posicionados nos flanges de ligação, um de cada lado, e outro na alma.

Nos painéis contraventados de 2400 mm de comprimento (Figura 2.12), os LVDT's foram posicionados da mesma forma que no comprimento de 2000 mm.

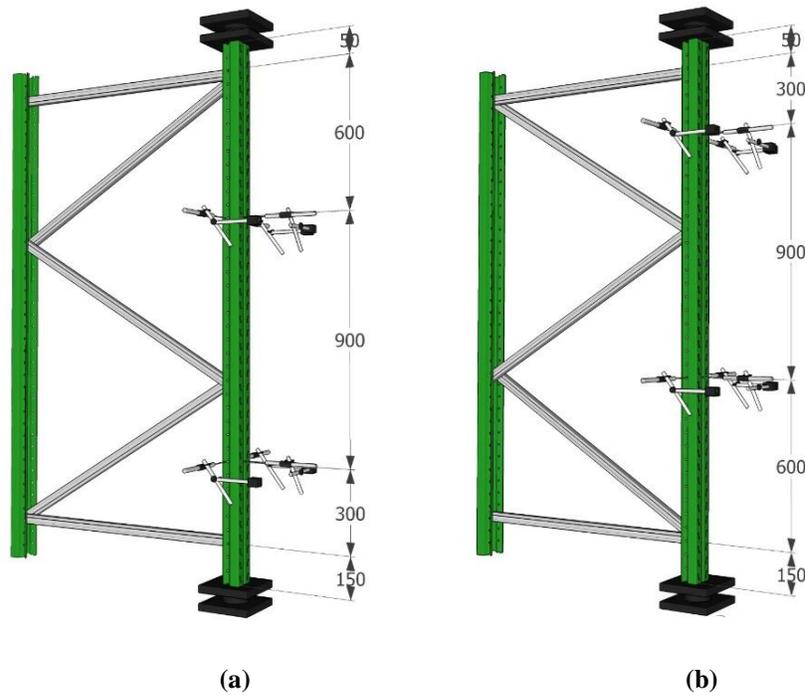


Figura 2.11: LVDT's posicionados no painel de 2000 mm de comprimento: (a) Lado A; (b) Lado B

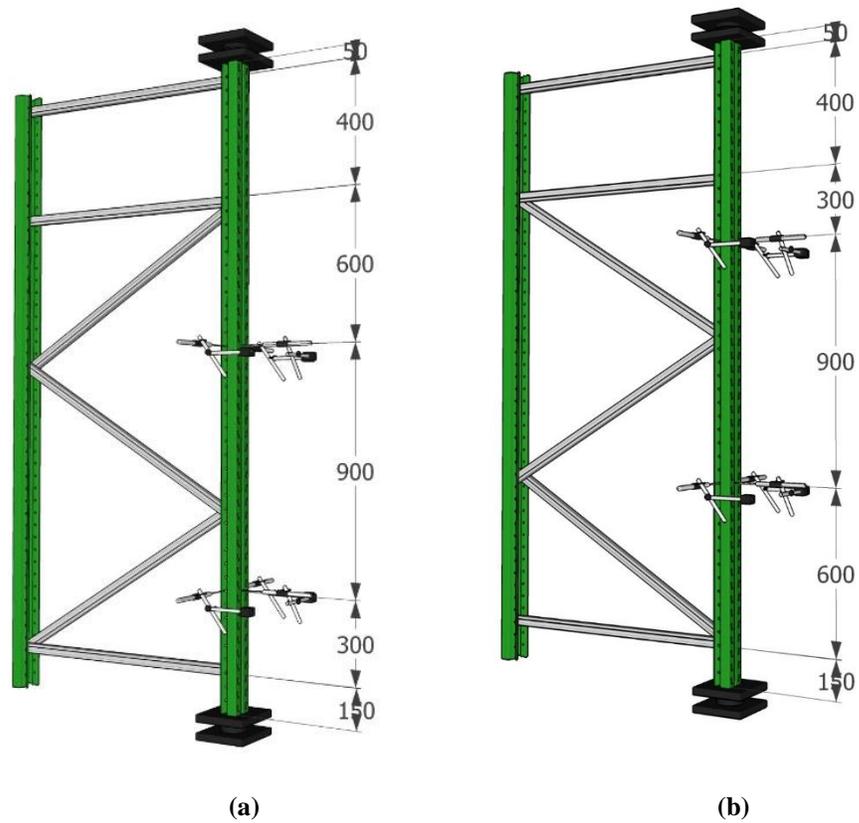


Figura 2.12: LVDT's posicionados no painel de 2400 mm de comprimento: (a) Lado A; (b) Lado B

Nas colunas isoladas os LVDT's foram posicionados da mesma forma que nos painéis contraventados, porém considerou-se o comprimento total da coluna para definir a altura dos LVDT's. Ou seja, foram posicionados dois LVDT's a meia altura e dois LVDT's a um quarto de altura nos flanges de ligação da coluna, um de cada lado, e um LVDT à meia altura na alma, como mostrado na Figura 2.13.

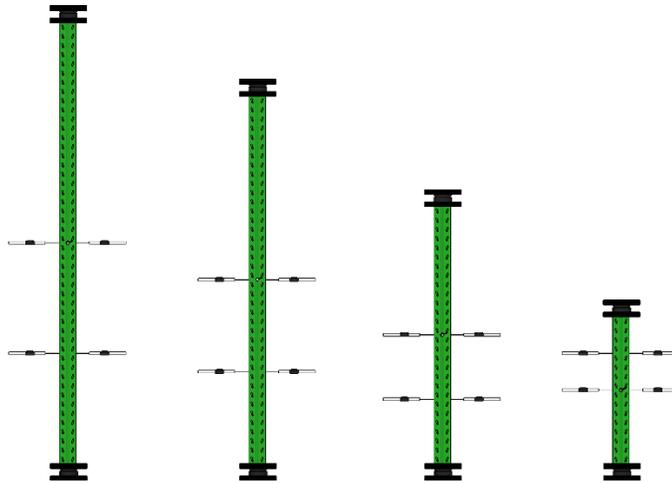


Figura 2.13: LVDT's posicionados nas colunas isoladas de 2400, 2000, 1400 e 800 mm de comprimento

A nomenclatura adotada para cada LVDT é apresentada no capítulo de resultados experimentais.

A aquisição dos dados obtidos quanto ao carregamento aplicado pela prensa servo-hidráulica foi realizado por meio de sistema automático de aquisição controlado pelo software Partner. O software fornece a visualização gráfica e numérica dos dados do ensaio, possibilitando o acompanhamento e armazenamento dos dados para posterior análise de resultados.

O ensaio é realizado com controle de deslocamentos e velocidade do ensaio foi definida em duas zonas de controle: a primeira com velocidade de 1 mm/min até atingir 500 N de carga e a segunda com velocidade de 0,2 mm/min até o fim do ensaio.

No início de cada ensaio é realizada uma sincronização entre a aquisição de dados relacionados ao deslocamento da prensa e aos deslocamentos dos protótipos medidos pelos LVDT's, para compatibilizar os resultados obtidos pelos dois sistemas de aquisição.

2.5 Metodologia do ensaio

A coluna onde é aplicado o carregamento é centrada nas rótulas de ensaio com o uso de papel milimetrado com a marcação do centro geométrico da seção. O papel é fixado na rótula em que tem centro geométrico marcado e alinhado com o eixo da prensa de ensaios. Estando o painel contraventado posicionado na prensa servo-hidráulica, inicia-se a aplicação do carregamento a partir de controle de deslocamentos. Obtém-se uma curva de carga versus deslocamento que apresenta comportamento ascendente, sendo que o deslocamento axial medido refere-se ao movimento vertical da prensa quando da aplicação de carga.

O critério de parada é após atingir a carga última quando a curva carga *versus* deslocamento declina. Na Figura 2.14 é apresentado como exemplo o painel *CF_2400_90_2,65_(2)_A* próximo ao final do ensaio, indicando uma curvatura na coluna carregada.



Figura 2.14: Painel contraventado *CF_2400_90_2,65_(2)_A*

É possível observar o modo de flambagem da coluna a partir das imagens dos ensaios realizados. Na Figura 2.14 vê-se claramente o efeito da flexão da coluna e na Figura 2.15, com uma visão lateral da coluna, pode-se observar a torção em torno do seu eixo. Portanto, no exemplo em questão observou-se a flambagem global da coluna por flexo-torção.



Figura 2.15: Pannel *CF_2400_90_2,65_(2)_A* após realização do ensaio

A curva carga *versus* deslocamento do exemplo em questão, com deslocamento relacionado ao movimento vertical do prato inferior da prensa, está mostrada na Figura 2.16, com a carga última P_u encontrada de 174,66 kN.

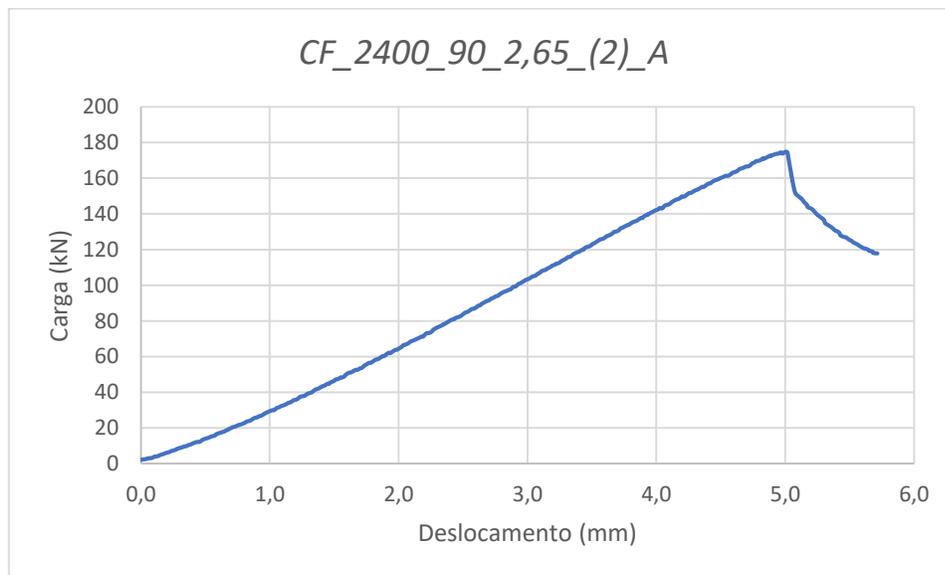


Figura 2.16: Gráfico obtido no ensaio do pannel *CF_2400_90_2,65_(2)_A*

O programa experimental contemplou também a análise das colunas isoladas, com a realização de ensaios das colunas com as mesmas dimensões citadas nos itens anteriores, porém sem a presença dos contraventamentos. A coluna identificada como *CF_2400_90_2,65_(coluna)* está mostrada na Figura 2.17 com uma imagem obtida após a realização do ensaio, onde observa-se o efeito da flexo-torção da coluna.



Figura 2.17: Ensaio da coluna *CF_2400_90_2,65_(coluna)*

A curva de carga *versus* deslocamento, relacionada ao movimento da prensa está representada na Figura 2.18, com a carga última P_u encontrada de 147,2 kN. Pode-se observar que a carga da coluna isolada foi menor que da coluna contraventada, mostrada no item anterior.

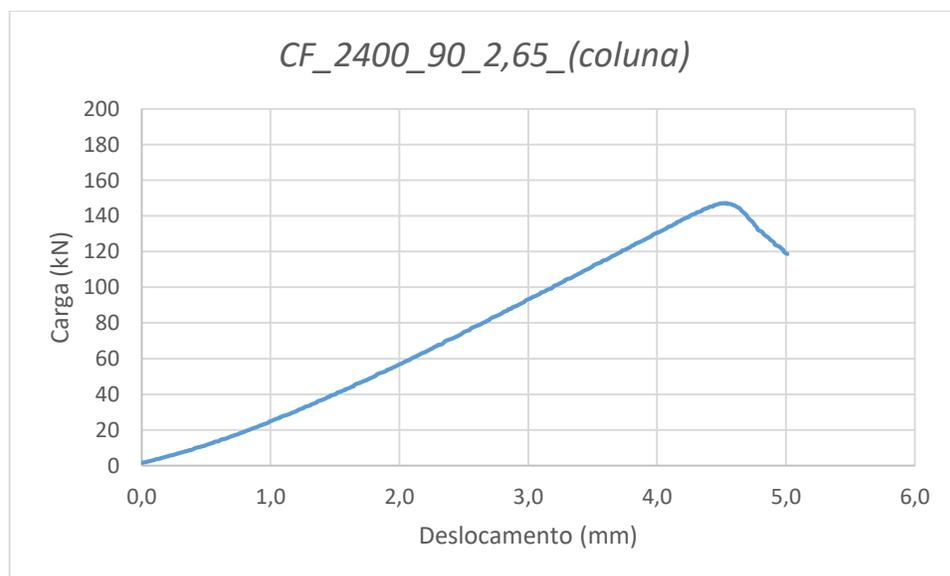


Figura 2.18: Gráfico obtido no ensaio da coluna *CF_2400_90_2,65_(coluna)*

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos para os deslocamentos referentes aos painéis contraventados e às colunas isoladas, em seguida é realizada comparação entre os resultados obtidos. A análise foi realizada baseando-se nos resultados medidos pelos LVDT's, cujo posicionamento foi definido de forma a possibilitar a avaliação dos deslocamentos associados à flambagem global e ao modo distorcional da coluna. A apresentação dos resultados foi organizada segundo os comprimentos de colunas (800 mm, 1400 mm, 2000 mm, 2400 mm).

Foi realizado um total de 216 ensaios. 18 ensaios foram desconsiderados nas análises por apresentarem distorções nos valores encontrados, sendo realizados novos ensaios em substituição. 198 ensaios foram considerados para as análises, sendo 154 são de painéis contraventados e 44 são de colunas isoladas.

Os resultados de deslocamentos são apresentados neste capítulo referentes a alguns ensaios mais representativos, sendo uma série de painel contraventado e coluna isolada de cada comprimento.

3.1 Colunas de 800 mm de comprimento

3.1.1 Painel contraventado de 800 mm de comprimento

Nos painéis formados por colunas de 800 mm de comprimento, devido à simetria observada na posição dos contraventamentos em ambas as colunas, o ensaio foi realizado em apenas um dos lados, como mostrado na Figura 3.1, onde o lado ensaiado é aquele em que estão representadas as rótulas para os apoios superior e inferior na prensa servo-hidráulica.

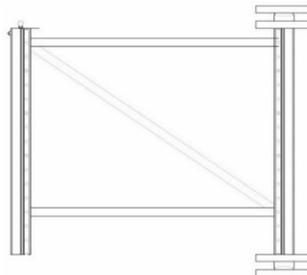


Figura 3.1: Painel contraventado com colunas de 800 mm

O primeiro caso a ser analisado é o painel contraventado composto por colunas com 800 mm de comprimento. Os LVDT's foram posicionados com alturas conforme apresentado anteriormente, e a nomenclatura de cada LVDT é apresentada na Figura 3.2.

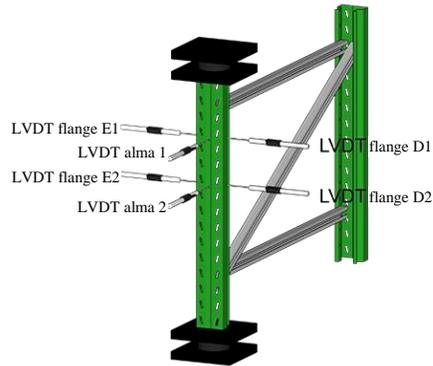
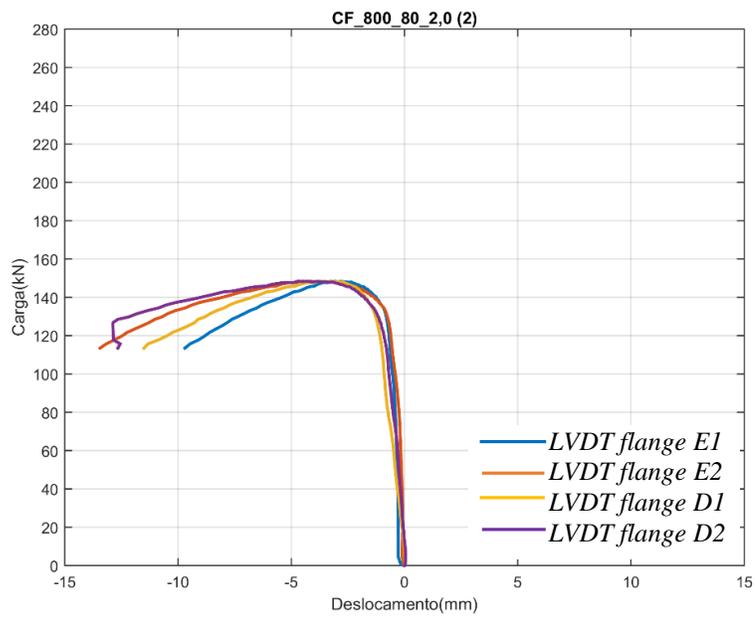


Figura 3.2: LVDT's no painel contraventado de 800 mm de comprimento

Na Figura 3.3 (a) tem-se os deslocamentos medidos pelos LVDT's posicionados nos flanges de ligação do protótipo *CF_800_80_2,0_(2)*, referentes à abertura da seção da coluna. Este caso refere-se à coluna com contraventamento e observa-se que ocorreu deslocamento do flange de ligação com o aumento do carregamento. Considerando o posicionamento dos LVDT's, e o instante em que as medições indicaram a perda de linearidade, tem-se que para o nível de carga de 130 kN o início do modo distorcional na região é medido pelo *LVDT flange D1* e *LVDT flange D2*. Na Figura 3.3 (b) é possível observar o painel contraventado após a realização do ensaio.

Na Figura 3.4 tem-se os deslocamentos medidos pelos LVDT's posicionados na alma da coluna, e pode-se observar o início do deslocamento ao atingir 140 kN pelo *LVDT alma 2*.



(a)



(b)

Figura 3.3: Deslocamento dos flanges de ligação (Painel de 800 mm de comprimento)

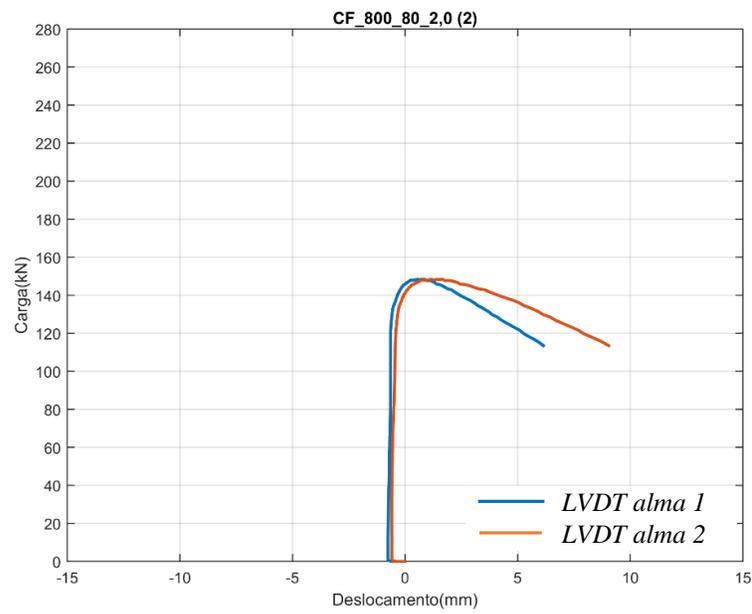
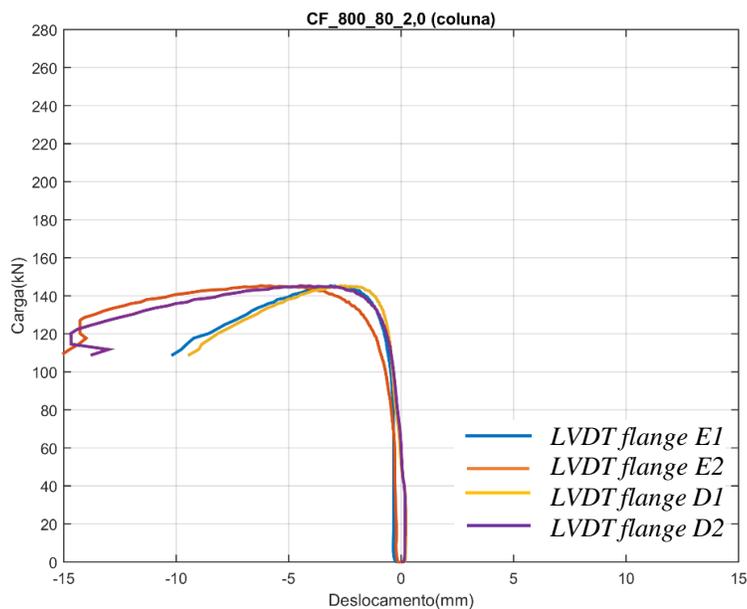


Figura 3.4: Deslocamentos da alma (Painel de 800 mm de comprimento)

3.1.2 Coluna isolada de 800 mm de comprimento

Na Figura 3.5 (a), tem-se os deslocamentos dos flanges de ligação do ensaio da coluna *CF_800_80_2,0_(coluna)*. Observa-se que ocorreu deslocamento do flange de ligação com o aumento do carregamento, caracterizando ocorrência do modo distorcional. Considerando o posicionamento dos LVDT's, o instante em que as medições indicaram a perda de linearidade no ponto instrumentado foi para o nível de carga de 90 kN, medido pelo *LVDT flange E2*. Na Figura 3.5 (b) é apresentada a coluna após a realização do ensaio. O deslocamento da alma iniciou ao atingir a carga de 110 kN, medido pelo *LVDT alma 2*, de acordo com a Figura 3.6.



(a)



(b)

Figura 3.5: Deslocamento dos flanges de ligação (Coluna de 800 mm de comprimento)

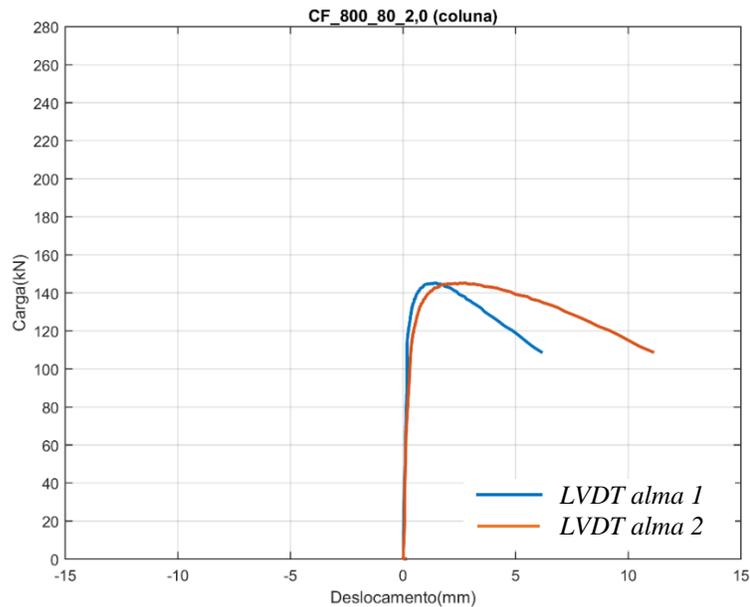


Figura 3.6: Deslocamentos da alma (Coluna de 800 mm de comprimento)

O comportamento das colunas isoladas e dos painéis contraventados para o comprimento de 800 mm foi semelhante, com o modo distorcional se manifestando antes do modo global de flambagem. As diferenças em relação ao nível de carga em que os deslocamentos foram observados, embora pequenos, estão relacionados à influência da presença do contraventamento, que diminui o comprimento destravado da coluna.

3.2 Colunas de 1400 mm de comprimento

3.2.1 Painel contraventado de 1400 mm de comprimento

No comprimento de 1400 mm a posição dos contraventamentos ocorre de maneira assimétrica em relação às duas colunas (Figura 3.7). Foi atribuído à nomenclatura a referência ao lado A e lado B, onde o lado A se refere à disposição com o contraventamento configurando menor comprimento destravado para a coluna ensaiada, e o lado B com um maior comprimento destravado.

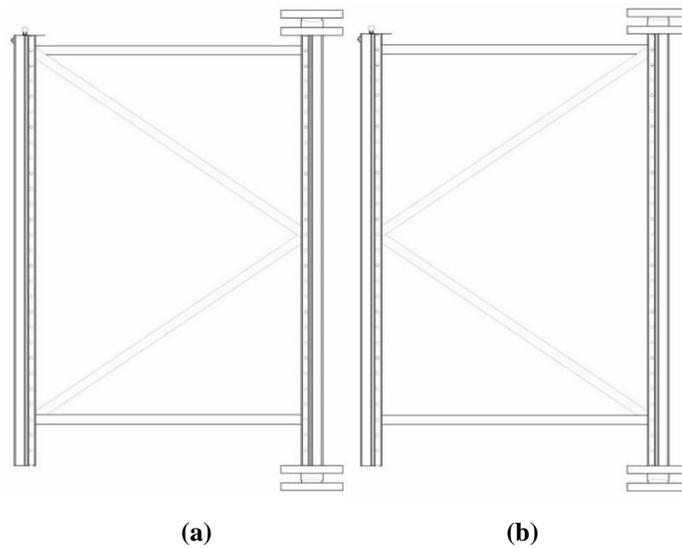


Figura 3.7: Painéis contraventados com colunas de 1400 mm: (a) Lado A; (b) Lado B

Na análise das colunas com 1400 mm de comprimento, é importante observar a diferença entre os resultados obtidos nos painéis contraventados quando a carga foi aplicada no lado A e quando foi aplicada no lado B.

Na Figura 3.8 estão mostrados os LVDT's posicionados e a nomenclatura adotada para o lado B do painel de 1400 mm de comprimento.

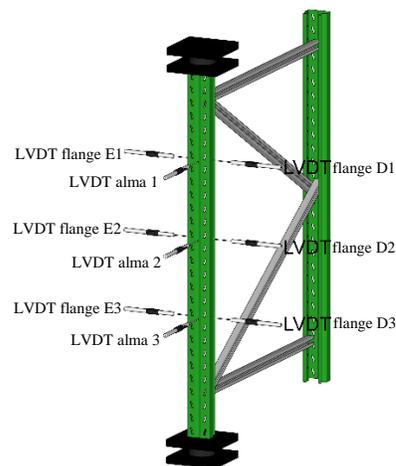
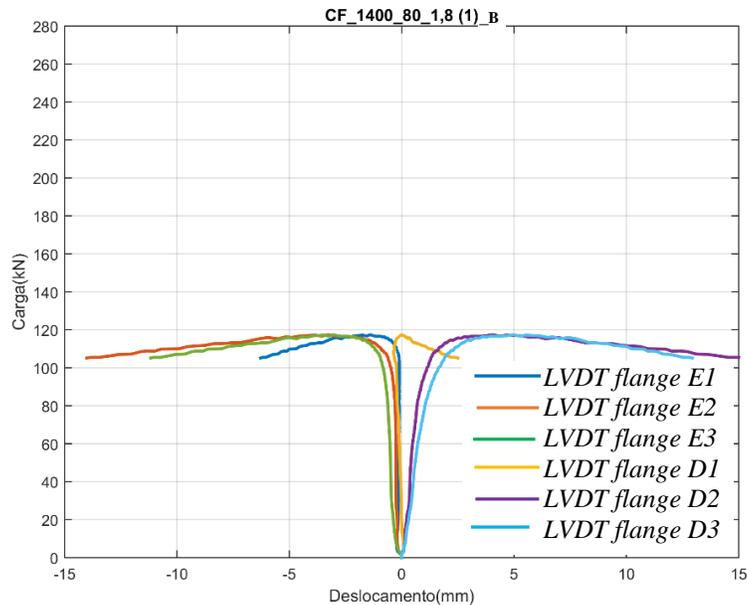


Figura 3.8: LVDT's no painel contraventado de 1400 mm de comprimento – Lado B

Na Figura 3.9 (a), tem-se o gráfico de carga *versus* deslocamento dos LVDT's referentes ao lado B do protótipo *CF_1400_80_1,8(1)_B*, com comprimento destravado de 1200 mm. Os

deslocamentos medidos são relativos à abertura ou fechamento do flange de ligação e observa-se que o deslocamento começa a ser detectado para a posição instrumentada ao atingir o nível de carga de 100 kN, quando indica perda de linearidade, referente ao *LVDT flange E3* e ao *LVDT flange D3*, posicionados na parte inferior da coluna. Na Figura 3.9 (b) tem-se o painel após realização do ensaio.



(a)



(b)

Figura 3.9: Deslocamento dos flanges de ligação (Painel de 1400 mm de comprimento – Lado B)

Na Figura 3.10 tem-se o gráfico dos LVDT's que mediram os deslocamentos da alma da seção. Observa-se a perda de linearidade, indicando início de deslocamento no ponto medido, ao atingir o nível de carga de 115 kN, nos três LVDT's posicionados.

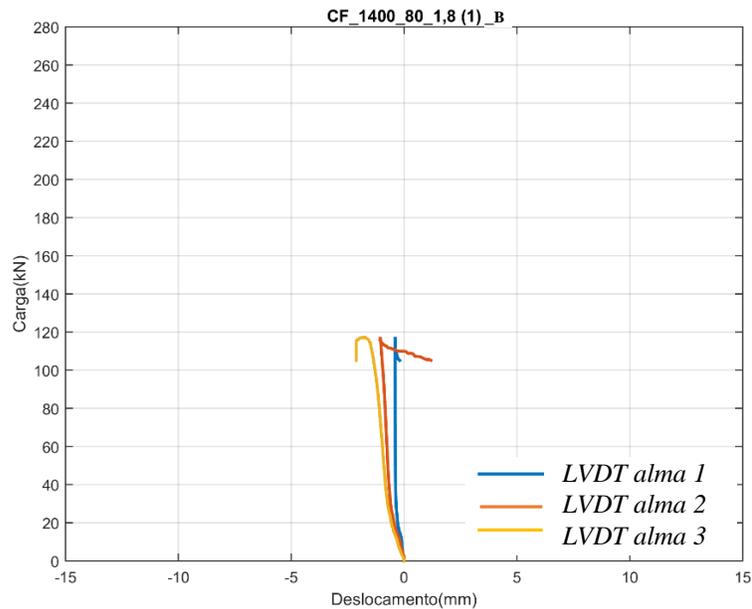


Figura 3.10: Deslocamentos da alma (Painel de 1400 mm de comprimento – Lado B)

Em relação ao lado A, o comprimento destravado é reduzido para 600 mm em decorrência da posição do contraventamento. Na Figura 3.11 estão mostrados os LVDT's posicionados e a nomenclatura adotada.

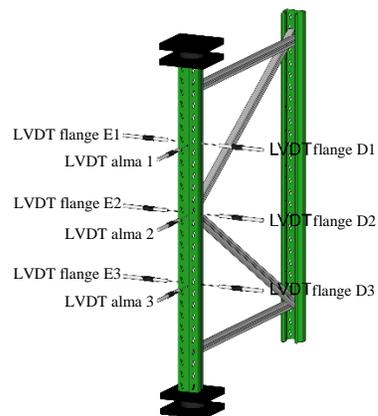
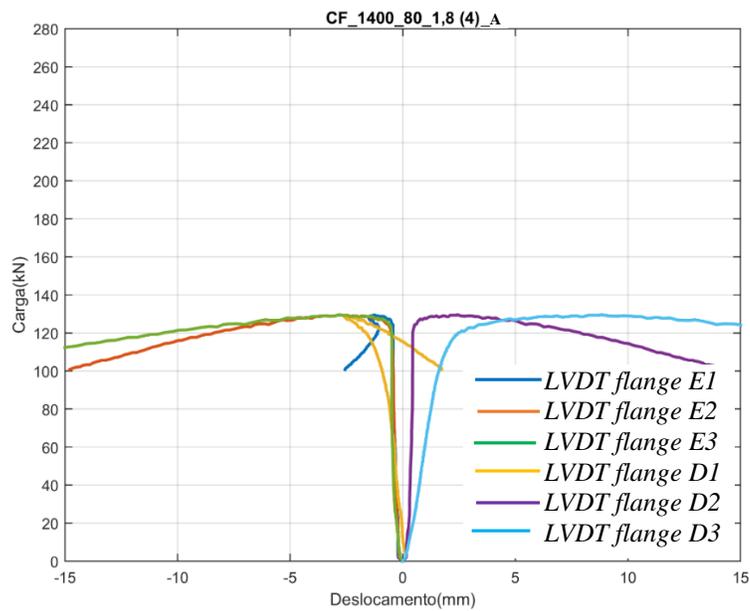


Figura 3.11: LVDT's no painel contraventado de 1400 mm de comprimento – Lado A

Na Figura 3.12 (a) observa-se que o início de deslocamento relativo à abertura da seção transversal da coluna na posição instrumentada, foi observado no nível de carga de 85 kN, pelo *LVDT flange D1* e na Figura 3.12 (b) tem-se uma foto do ensaio. Na Figura 3.13 estão apresentados os deslocamentos da alma, que iniciaram ao atingir a carga de 120 kN medido pelo *LVDT alma 3*.



(a)



(b)

Figura 3.12: Deslocamento dos flanges de ligação (Painel de 1400 mm de comprimento – Lado A)

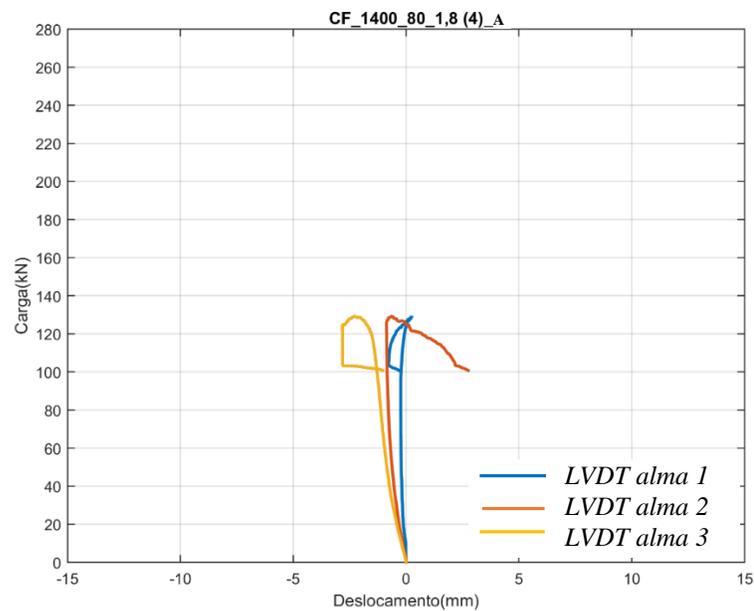


Figura 3.13: Deslocamentos da alma (Painel de 1400 mm de comprimento – Lado A)

3.2.2 Coluna isolada de 1400 mm de comprimento

Analisou-se também a coluna isolada quanto aos deslocamentos com instrumentação conforme Figura 3.14. Pela Figura 3.15 (a) pode-se observar que os deslocamentos dos flanges da coluna *CF_1400_80_1,8_(coluna)* começaram a ocorrer para o nível de carga de 100 kN no ponto instrumentado, medido pelo *LVDT flange D1*. Na Figura 3.15 (b) está mostrado a coluna após realização do ensaio.

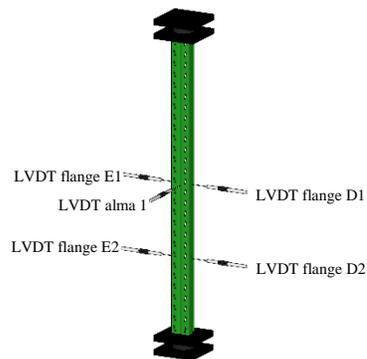
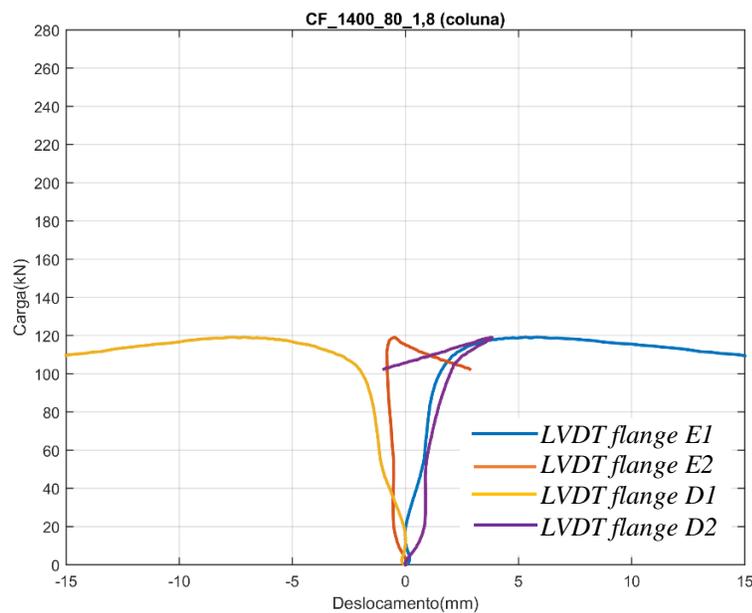


Figura 3.14: Instrumentação coluna isolada de 1400 mm de comprimento



(a)

(b)

Figura 3.15: Deslocamento dos flanges de ligação (Coluna de 1400 mm de comprimento)

Na Figura 3.16 pode-se observar que o deslocamento da alma medido pelo *LVDT alma 1* posicionado a meia altura iniciou ao atingir a carga de 110 kN.

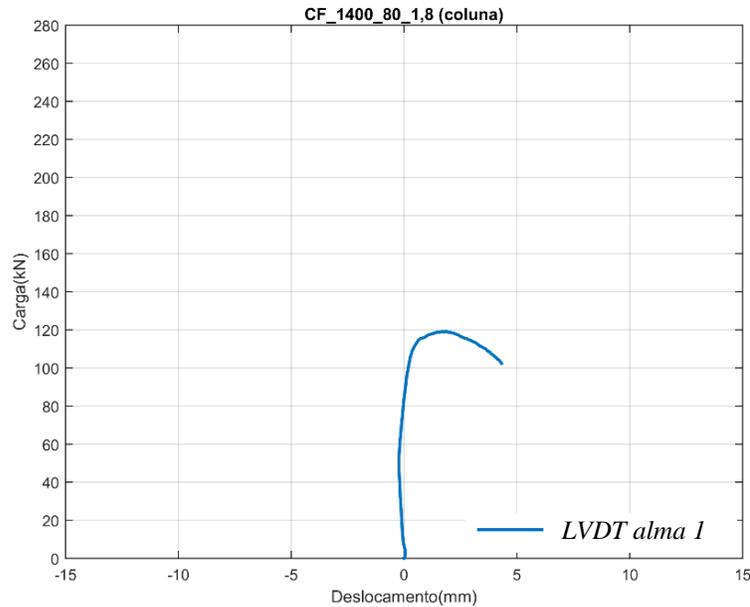


Figura 3.16: Deslocamentos da alma (Coluna de 1400 mm de comprimento)

As observações realizadas para este comprimento de coluna, mostram que o comportamento da coluna isolada em relação à ocorrência dos modos de flambagem, é muito semelhante ao da coluna contraventada posicionada do lado com maior comprimento destravado, lado B. No lado oposto, lado A, a fixação do contraventamento diminuiu o comprimento destravado, que levou a uma observação do modo distorcional para menor nível de carga.

Para este comprimento, os deslocamentos referentes aos LVDT's associados ao modo distorcional iniciaram antes dos referentes ao modo global, mostrando que a flambagem distorcional ocorreu antes da flambagem global da coluna.

3.3 Colunas de 2000 mm de comprimento

3.3.1 Painel contraventado de 2000 mm de comprimento

Assim como nos painéis contraventados formados por colunas de 1400 mm, para o comprimento de 2000 mm foram realizados ensaios de ambos os lados do painel contraventado. A disposição dos lados é apresentada na Figura 3.17.

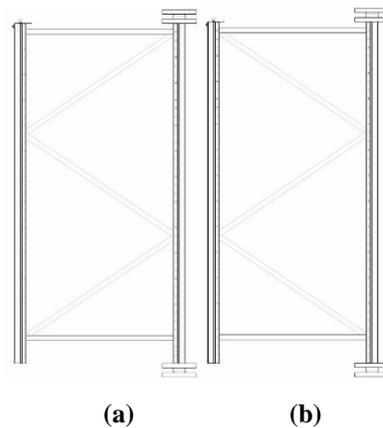


Figura 3.17: Painéis contraventados com colunas de 2000 mm: (a) Lado A; (b) Lado B

Na Figura 3.18 são apresentados os LVDT's posicionados no lado B e a nomenclatura adotada.

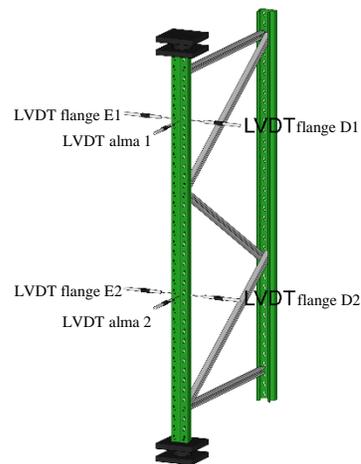
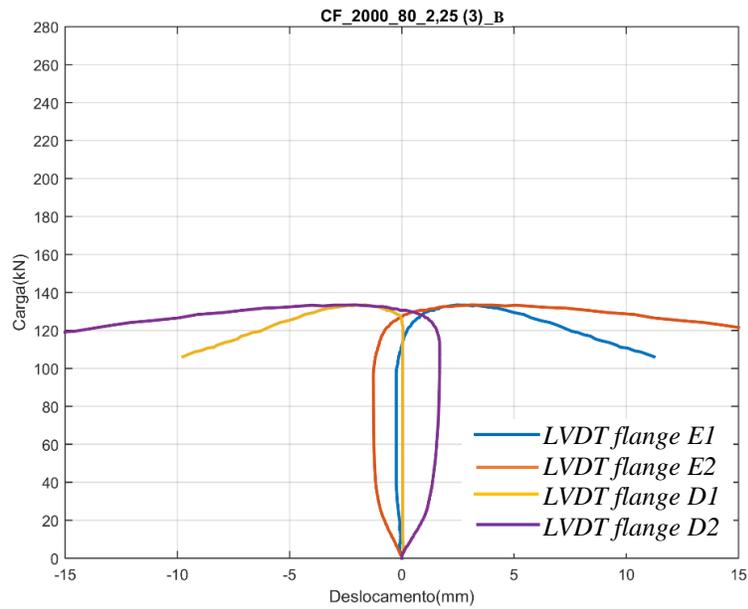


Figura 3.18: LVDT's no painel contraventado de 2000 mm de comprimento – Lado B

Na Figura 3.19 (a) tem-se os deslocamentos referentes aos flanges de ligação na posição indicada dos LVDT's do painel contraventado *CF_2000_80_2,25_(3)_B*. O início de deslocamentos é observado no nível de carga de 110 kN, medido pelo *LVDT flange E1*. Na Figura 3.19 (b) é mostrado o painel após realização do ensaio.

O início dos deslocamentos da alma é observado na Figura 3.20 ao atingir 130 kN de carga, pelos dois LVDT's posicionados.



(a)



(b)

Figura 3.19: Deslocamento dos flanges de ligação (Painel de 2000 mm de comprimento – Lado B)

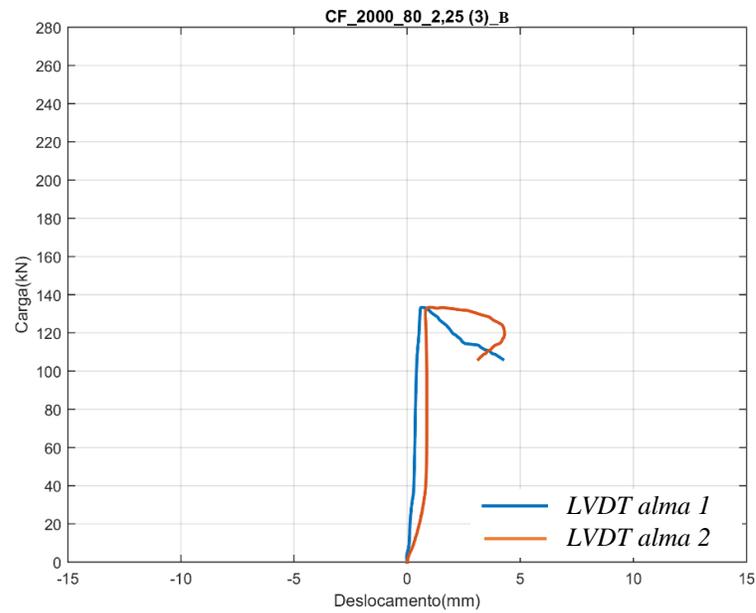


Figura 3.20: Deslocamentos da alma (Painel de 2000 mm de comprimento – Lado B)

Na Figura 3.21 são mostrados os LVDT's posicionados no lado A e a nomenclatura adotada.

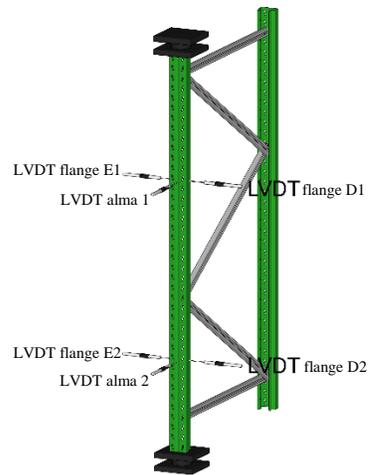
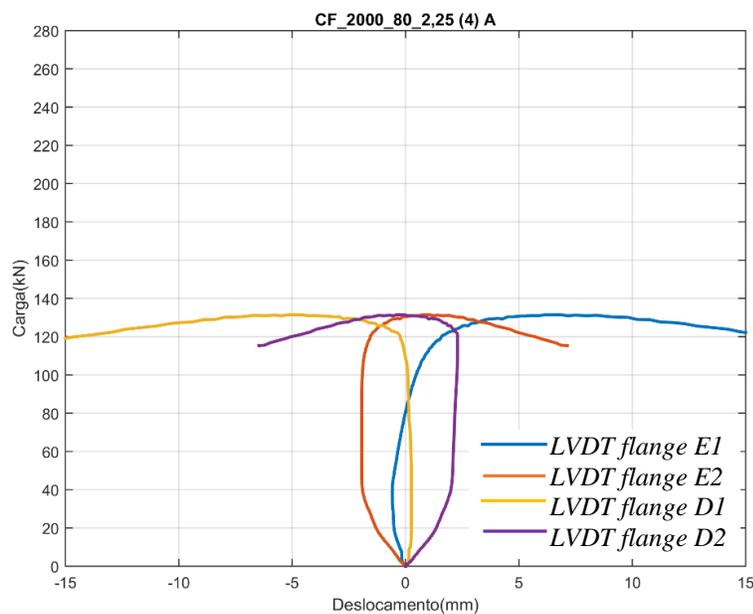


Figura 3.21: LVDT's no painel contraventado de 2000 mm de comprimento – Lado A

Os deslocamentos relacionados aos flanges de ligação do protótipo *CF_2000_80_2,25_(4)_A* são mostrados na Figura 3.22 (a) e observa-se o início de deslocamento para o nível de carga de 110 kN referente ao *LVDT flange E1* e *LVDT flange D1*. Na Figura 3.22 (b) é apresentado o painel após a realização do ensaio.



(a)



(b)

Figura 3.22: Deslocamento dos flanges de ligação (Painel de 2000 mm de comprimento – Lado A)

O início de deslocamentos na alma foi observado ao atingir 130 kN de carga no ponto instrumentado (Figura 3.23).

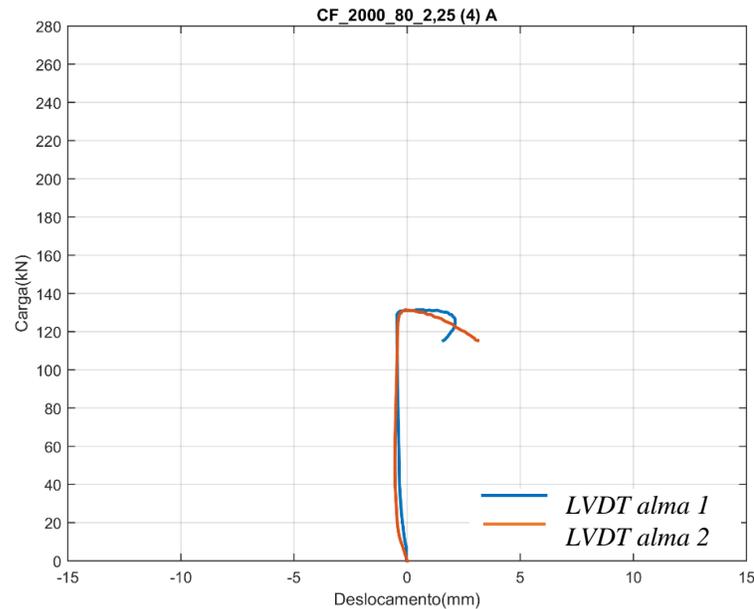


Figura 3.23: Deslocamentos da alma (Painel de 2000 mm de comprimento – Lado A)

A observação dos deslocamentos em ambos os lados do painel contraventado no comprimento de 2000 mm mostra que não houve diferenças significativas quanto ao comportamento de ambas as colunas. Este fato já era esperado, pois a fixação dos contraventamentos ocorreu de forma simétrica em relação aos dois lados no painel contraventado.

3.3.2 Coluna isolada de 2000 mm de comprimento

Quanto à coluna isolada de comprimento igual a 2000 mm tem-se a instrumentação considerada na Figura 3.24. Na Figura 3.25 (a) pode-se observar que não ocorreu deslocamento do flange de ligação da coluna *CF_2000_80_2,25_(coluna)*, indicando que não ocorreu o modo de flambagem distorcional.

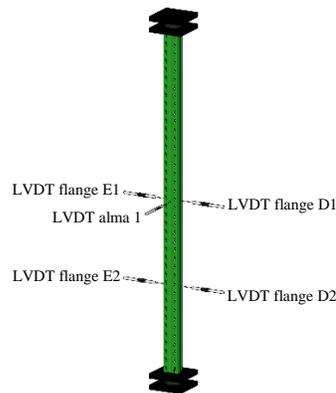
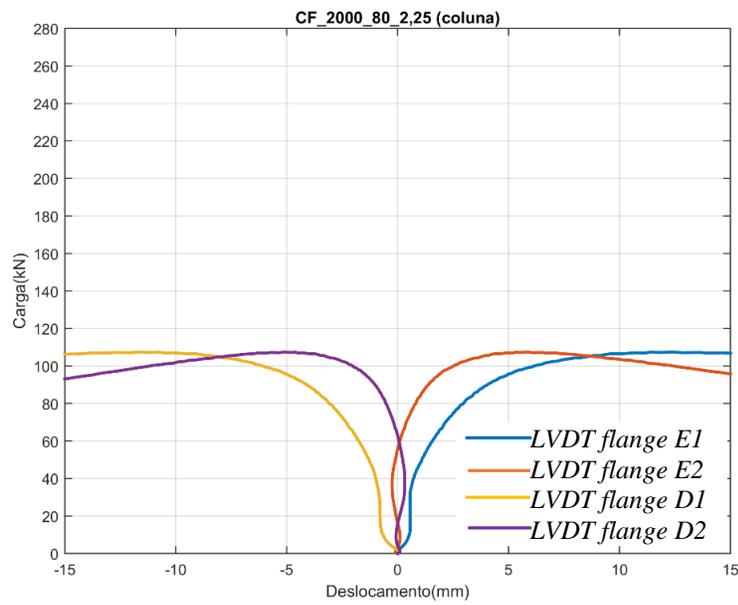


Figura 3.24: Instrumentação coluna isolada de 2000 mm



(a)



(b)

Figura 3.25: Deslocamento dos flanges de ligação (Coluna de 2000 mm de comprimento)

Os deslocamentos observados na coluna após o ensaio (Figura 3.25 (b)) indicam a ocorrência de flambagem global por flexo-torção.

Quanto aos deslocamentos da alma, observa-se uma alteração de medição de deslocamento indicando a flambagem global da coluna no nível de cerca de 100 kN (Figura 3.26). Porém, como visto na Figura 3.25 a coluna já apresentava deslocamentos decorrentes da flambagem global em níveis menores de carga.

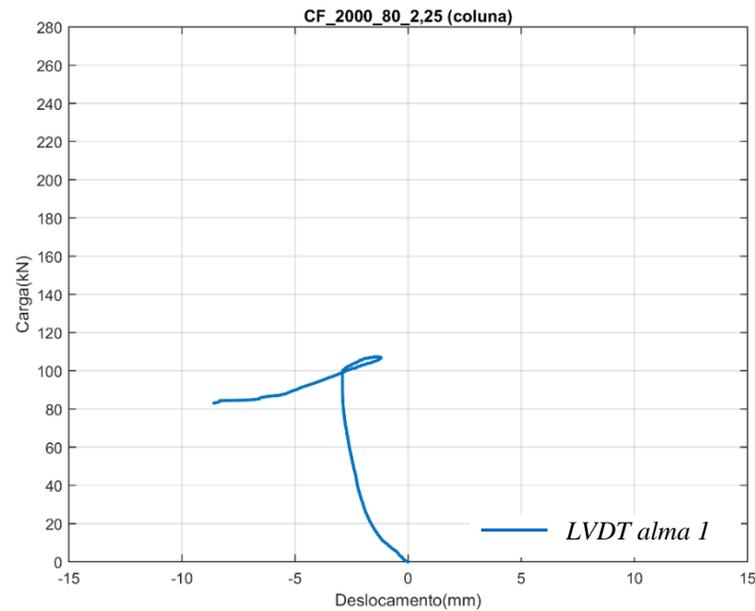


Figura 3.26: Deslocamentos da alma (Coluna de 2000 mm de comprimento)

Com as observações realizadas nas colunas de 2000 mm, percebe-se que neste comprimento não ocorre o modo distorcional de flambagem e os deslocamentos observados são decorrentes da flambagem global por flexo-torção.

3.4 Colunas de 2400 mm de comprimento

3.4.1 Paineis contraventados de 2400 mm de comprimento

Por fim, para os painéis contraventados formados por colunas de 2400 mm de comprimento, foi realizado também o ensaio de ambos os lados. A disposição dos lados considerados está mostrada na Figura 3.27.

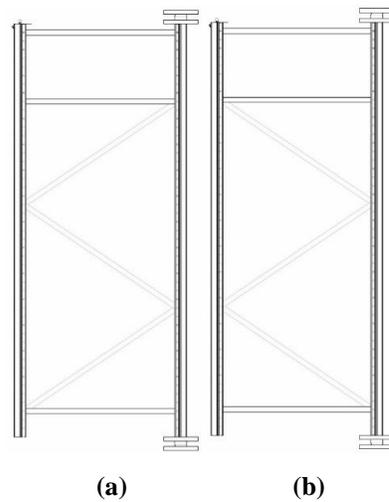


Figura 3.27: Painéis contraventados com colunas de 2400 mm: (a) Lado A; (b) Lado B

Na Figura 3.28 estão apresentados os LVDT's posicionados no lado A e a nomenclatura adotada.

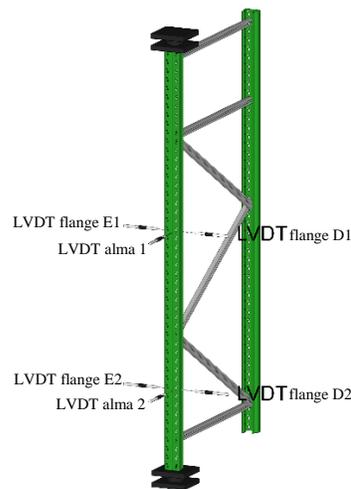
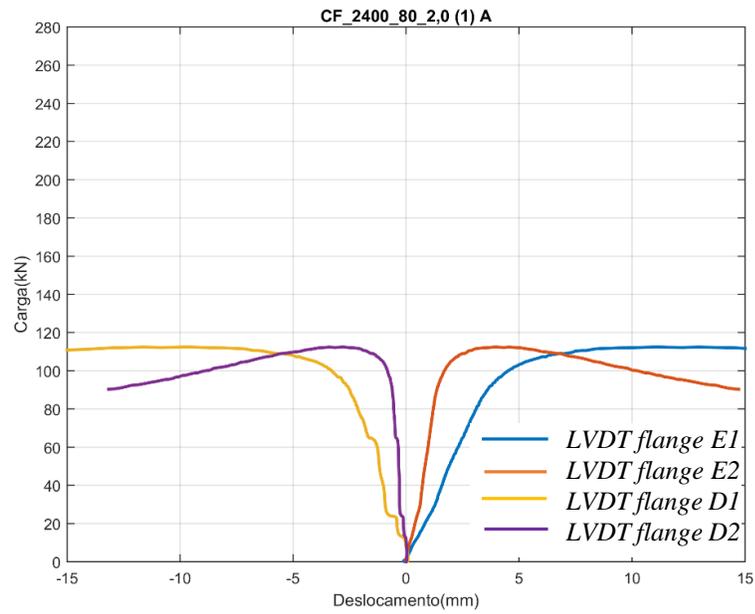


Figura 3.28: LVDT's no painel contraventado de 2400 mm de comprimento – Lado A

Os deslocamentos dos flanges do painel *CF_2400_80_2,0_(1)_A* estão apresentados na Figura 3.29 (a) e os deslocamentos nos pontos instrumentados ocorrem para o nível de carga de 90 kN, medidos pelo *LVDT flange E1* e *LVDT flange D1*. Na Figura 3.29 (B) tem-se o painel após a realização do ensaio. Com relação aos deslocamentos da alma, na Figura 3.30 observa-se a medição dos deslocamentos para carga de 110 kN.



(a)

(b)

Figura 3.29: Deslocamento dos flanges de ligação (Painel de 2400 mm de comprimento – Lado A)

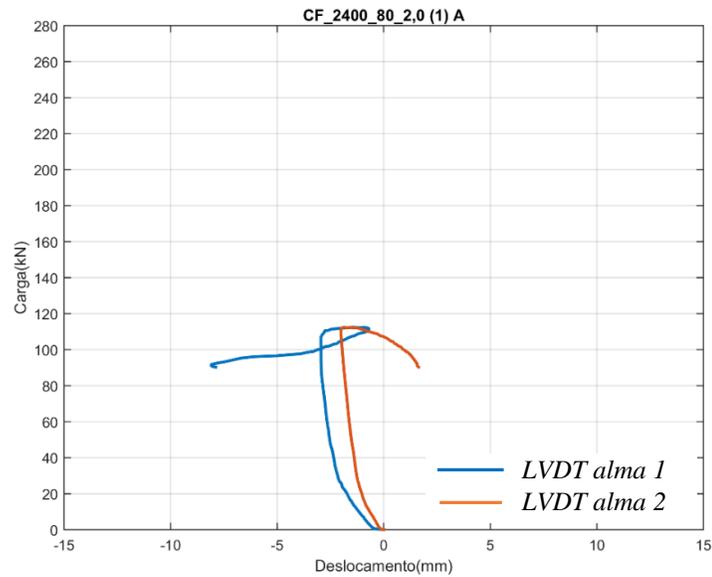


Figura 3.30: Deslocamentos da alma (Painel de 2400 mm de comprimento – Lado A)

Na Figura 3.31 estão apresentados os LVDT's posicionados no lado B e a nomenclatura adotada.

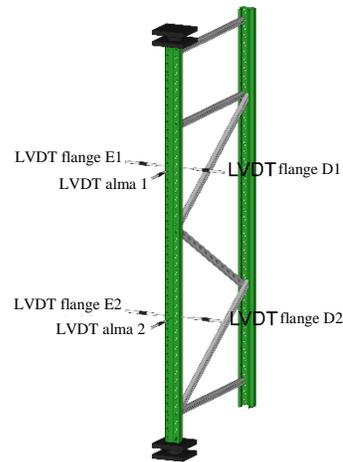
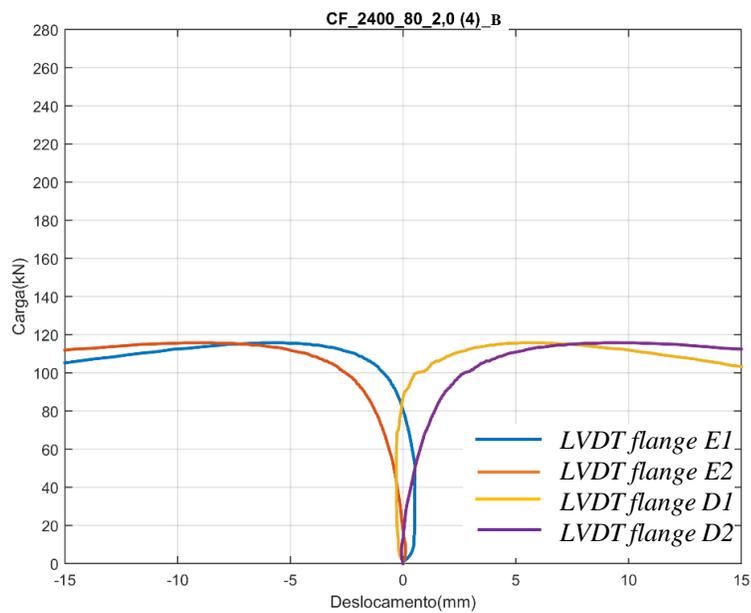


Figura 3.31: LVDT's no painel contraventado de 2400 mm de comprimento – Lado B

Na Figura 3.32 (a) tem-se os deslocamentos medidos pelos LVDT's posicionados nos flanges de ligação do painel *CF_2400_80_2,0_(4)_B*, com início no nível de carga de 80 kN medidos pelo *LVDT flange D2* e *LVDT flange E2*. Na Figura 3.32 (b) é possível observar o painel após a realização do ensaio.



(a)



(b)

Figura 3.32: Deslocamento dos flanges de ligação (Painel de 2400 mm de comprimento – Lado B)

Na Figura 3.33 tem-se os deslocamentos da alma, no nível de carga de 110 kN, medido pelo *LVDT alma 2*.

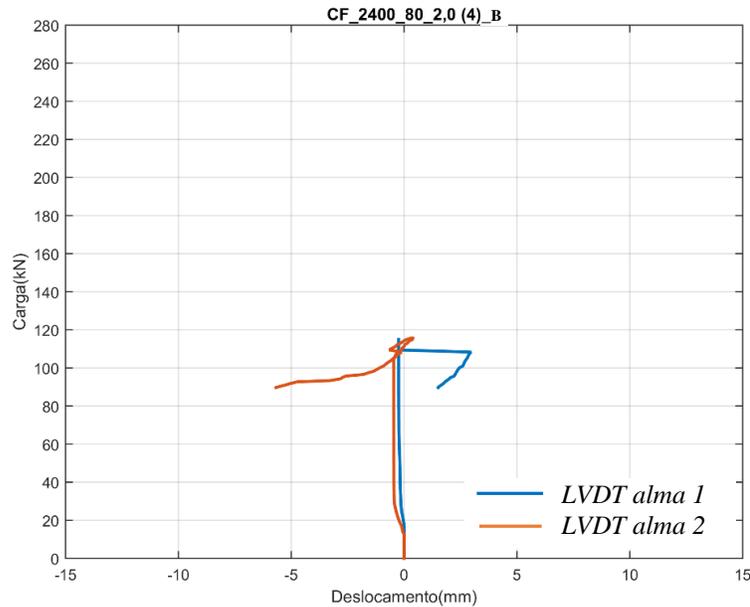


Figura 3.33: Deslocamentos da alma (Painel de 2400 mm de comprimento – Lado B)

Em relação à posição da coluna no painel contraventado observa-se que quando a carga foi aplicada na coluna posicionada no lado B, o deslocamento devido ao modo distorcional de flambagem iniciou em um nível de carga mais baixo que do lado A. Este fato pode ser explicado pela posição do contraventamento do lado B configurar dois comprimentos destravados de tamanhos próximos, se assemelhando à situação observada nas colunas de 1400 mm onde a flambagem distorcional é induzida a ocorrer pela mudança no comprimento destravado devido à posição dos contraventamentos.

3.4.2 Coluna isolada de 2400 mm de comprimento

Quanto à coluna isolada de 2400 mm de comprimento, na Figura 3.34 está mostrada a instrumentação utilizada. Os deslocamentos dos flanges de ligação e da alma da coluna *CF_2400_80_2,0_(coluna)* são mostrados na Figura 3.35 e na Figura 3.36. Observa-se um comportamento semelhante ao observado nas colunas contraventadas quanto aos deslocamentos decorrentes dos modos de flambagem, no entanto para menores níveis de carga indicando a influência do contraventamento no comprimento de flambagem da coluna.

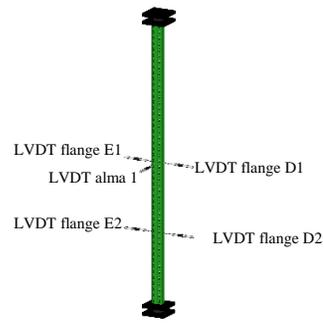
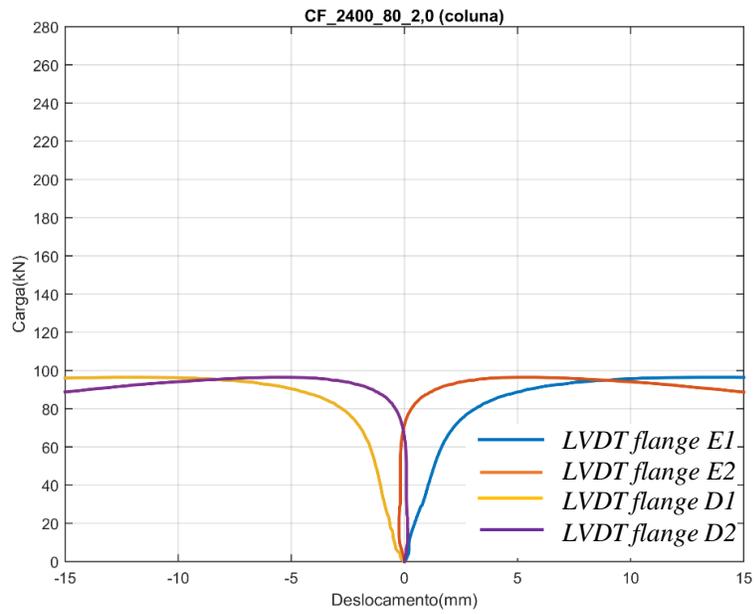


Figura 3.34: Instrumentação coluna isolada de 2400 mm.



(a)

(b)

Figura 3.35: Deslocamento dos flanges de ligação (Coluna de 2400 mm de comprimento)

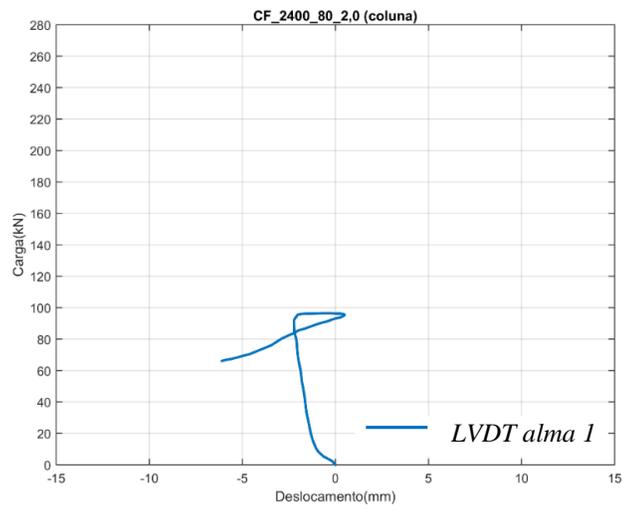


Figura 3.36: Deslocamentos da alma (Coluna de 2400 mm de comprimento)

Como observações gerais em relação aos deslocamentos observados na alma e nos flanges de ligação da seção transversal das colunas que formam os painéis contraventados, destaca-se a importância do comprimento total da coluna e do comprimento destravado na ocorrência dos modos de flambagem. Em todos os comprimentos analisados os deslocamentos decorrentes do modo distorcional e global nas colunas isoladas foram observados em menores níveis de carga comparados aos painéis contraventados. Portanto, percebe-se a influência dos contraventamentos no comportamento dos painéis contraventados, ao diminuir o comprimento destravado da coluna e acarretar em um aumento na resistência.

A redução do comprimento destravado nos painéis com comprimento de 1400 mm, induziu a ocorrência dos deslocamentos relacionados ao modo distorcional em menores níveis de carga. O mesmo foi observado no comprimento de 2400 mm na posição em que o contraventamento divide a coluna em dois comprimentos destravados próximos, mostrando que o modo distorcional reduz a capacidade de carga das colunas quando ocorre.

Em relação aos lados A e B quanto à posição dos contraventamentos nos painéis contraventados, percebe-se que no comprimento de 1400 mm a diferença foi significativa no comportamento em relação aos dois lados, pois o comprimento destravado foi diferente. No comprimento de 2000 mm, não houve diferença, como esperado, pois a posição dos contraventamentos ocorreu de forma simétrica. No comprimento de 2400 mm, observou-se uma pequena diferença de comportamento devido aos comprimentos destravados. Embora a posição dos contraventamentos aparentem serem semelhantes neste comprimento, o lado B divide a coluna em dois comprimentos destravados de tamanhos próximos, o que não ocorre no lado A.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DA CAPACIDADE RESISTENTE

Neste capítulo serão analisados os resultados referentes às capacidades de carga obtidas nos ensaios experimentais dos painéis contraventados e da coluna isolada. Os valores encontrados foram organizados em gráficos de barra onde estão plotadas as médias das cargas últimas experimentais de cada série de painéis contraventados e a carga última experimental da coluna isolada com mesma geometria de seção transversal. Os valores referentes aos painéis contraventados estão representados pelas linhas cheias e as linhas pontilhadas são referentes às colunas isoladas.

Nos painéis formados por colunas de 800 mm de comprimento, devido à simetria observada na posição dos contraventamentos foi realizado o ensaio de apenas um dos lados, dois ensaios de cada série.

No comprimento de 1400 mm a posição dos contraventamentos ocorre de maneira assimétrica em relação às duas colunas. Portanto, foram realizados ensaios de ambos os lados do painel, dois ensaios de cada lado. A média dos quatro valores encontrados também foi calculada.

Assim como nos painéis formados por colunas de 1400 mm, para os painéis formados por colunas de 2000 mm e 2400 mm de comprimento foram realizados ensaios de ambos os lados do painel, totalizando quatro ensaios por série.

Destaca-se que se um valor de carga última experimental encontrado fosse discrepante em relação aos outros da mesma série, o mesmo era desconsiderado e realizado um novo ensaio. Esta observação é válida para todos os comprimentos analisados.

4.1 Colunas CDR 80

No gráfico da Figura 4.1 estão representados os resultados referentes aos painéis contraventados e colunas isoladas de seção com 80 mm de largura da alma, variando em uma direção os comprimentos e na outra direção as espessuras. Os valores estão em porcentagem referente ao ganho da capacidade resistente relacionado à fixação dos contraventamentos. Ou seja, valores positivos indicam ganho de capacidade resistente do painel contraventado em relação à coluna isolada e valores negativos indicam perda de capacidade resistente.

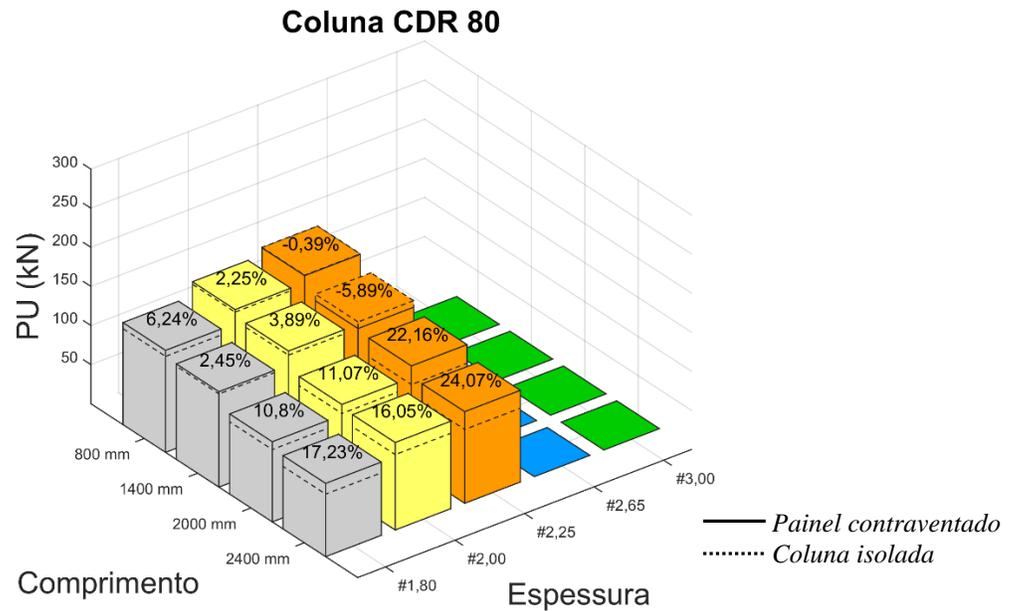


Figura 4.1: Cargas últimas para a coluna CDR 80

Com relação às diferenças entre os valores dos painéis contraventados e das colunas isoladas, observa-se que nos dois comprimentos menores, de 800 mm e 1400 mm, houve um aumento da capacidade resistente pequeno devido ao contraventamento, da ordem de 6 %, no caso do comprimento de 800 mm e espessura de 1,80 mm. No caso da espessura de 2,25 mm, o contraventamento não levou a um aumento da capacidade resistente da coluna, neste caso a coluna isolada apresentou carga última maior que o painel contraventado. Isso pode ser justificado pelo modo distorcional ter deteriorado a capacidade resistente sendo mais significativo para o comprimento livre entre contraventamentos que para a coluna isolada.

Nos comprimentos maiores, de 2000 mm e 2400 mm a posição do contraventamento aumenta a capacidade resistente, ficando a carga última do painel da ordem de 22 % a 24 % maior que da coluna para a espessura de 2,25 mm, e para as espessuras de 1,80 mm e 2,0 mm entre 11 % e 17 %, . Considerando os painéis contraventados houve um ganho na capacidade resistente ao aumentar-se da espessura de 1,80 mm para a de 2,0 mm da ordem de 12 % nos três comprimentos menores, e de 16 % no comprimento maior. O mesmo não foi observado ao aumentar-se de 2,0 mm para 2,25 mm, com aumentos observados na ordem de 5 % e até uma diminuição de resistência no comprimento de 1400 mm. Com relação ao aumento dos comprimentos para a mesma espessura, vê-se que à medida que o comprimento dos painéis aumenta, a carga última diminui devido ao

aumento da esbeltez do elemento, como já era esperado. Destaca-se que as maiores reduções de capacidade resistente foram ao aumentar o comprimento de 1400 mm para 2000 mm, tanto nos painéis contraventados, da ordem de 20 % de diferença, quanto nas colunas isoladas, com diferença de 30 % ao diminuir de 2000 mm para 1400 mm.

4.2 Colunas CDR 90

No gráfico da Figura 4.2 estão mostrados os resultados de cargas últimas para as colunas com largura da alma de 90 mm, em porcentagem relacionada ao ganho de capacidade resistente em relação à fixação do contraventamentos nos painéis contraventados.

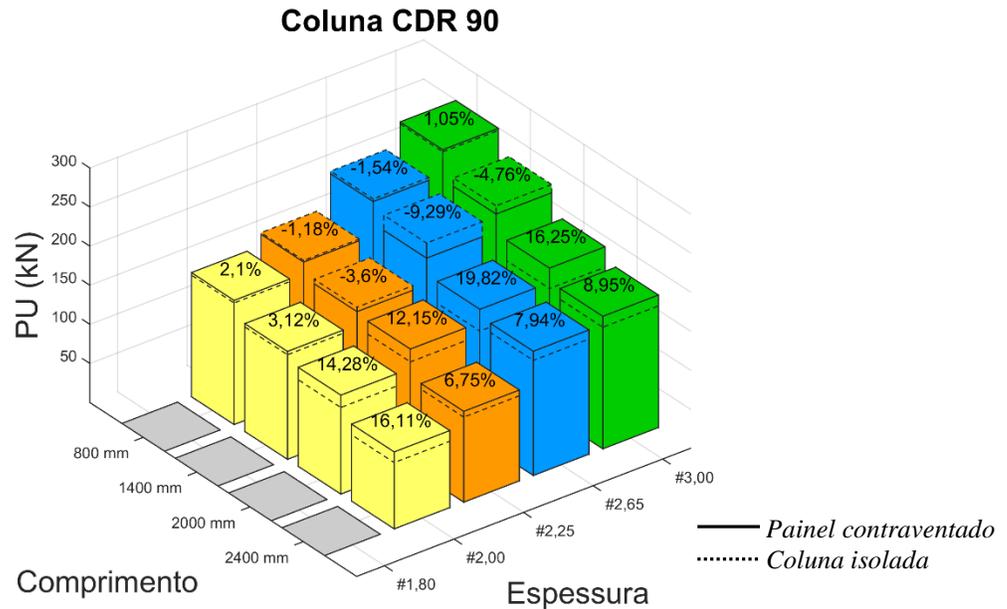


Figura 4.2: Cargas últimas para a coluna CDR 90

Da Figura 4.2 percebe-se que para os comprimentos de 800 mm e 1400 mm não houve aumento da capacidade resistente da coluna em relação ao painel contraventado. Pelo contrário, as colunas isoladas com espessura de 2,25 mm, 2,65 mm e 3,00 mm apresentaram maior capacidade de carga que os painéis contraventados. Este fato está relacionado à ocorrência do modo distorcional de flambagem, que ao se ocorrer antes do modo global leva a uma redução da capacidade de carga da coluna. Esta discussão foi feita também no Capítulo 3, quando foram

apresentados e discutidos os deslocamentos observados nas colunas decorrentes dos modos de flambagem.

Nos comprimentos maiores, de 2000 mm e 2400 mm a posição do contraventamento foi favorável ao aumento da capacidade de carga das colunas, sendo observados para todas as espessuras um aumento considerável, da ordem de até 20 % no comprimento de 2000 mm e espessura 2,65 mm. Com relação ao aumento das espessuras dentro do mesmo conjunto de comprimento, observa-se que houve aumento proporcional da capacidade resistente em todos os casos, destacando os maiores ganhos relativos ao aumento da espessura de 2,25 mm para a espessura de 2,65 mm, onde chegou a um aumento de 26 % no comprimento de 2400 mm.

Com relação à variação dos comprimentos para a mesma espessura, observa-se uma diminuição da capacidade resistente dos painéis e colunas com o aumento do comprimento. Destaca-se uma maior redução para o aumento do comprimento da coluna de 2000 mm para 2400 mm, nas espessuras de 2,00 mm e 2,25 mm da ordem de 30 % de redução.

4.3 Colunas CDR 100

Na Figura 4.3 estão mostrados os resultados para as colunas do tipo CDR 100.

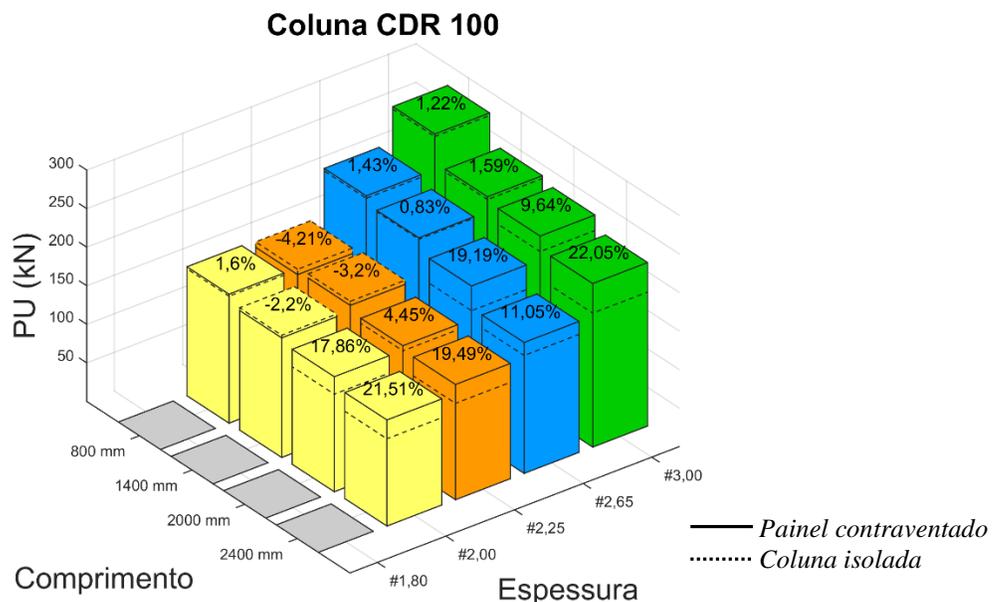


Figura 4.3: Cargas últimas para a coluna CDR 100

O gráfico da Figura 4.3 mostra que os resultados encontrados para as colunas de largura da alma de 100 mm apresentaram comportamento semelhante às colunas de 80 mm e 90 mm. Para os dois comprimentos menores as colunas isoladas apresentam resistência maior que os painéis, ou valores muito próximos. Esses resultados indicam que a posição do contraventamento não influenciou no aumento da carga última, devido a estes comprimentos estarem associados à ocorrência do modo distorcional de flambagem.

Nos comprimentos de 2000 mm e 2400 mm os painéis contraventados apresentaram maior capacidade resistente em relação às colunas, em torno de 15 % de aumento em função dos contraventamentos. Com relação à variação dos comprimentos para uma mesma espessura, observa-se um comportamento semelhante aos casos anteriores, com a carga última dos painéis e colunas diminuindo com o aumento do comprimento. Exceto para a espessura de 2,25 mm ao aumentar de 800 mm para 1400 mm observa-se um pequeno aumento de capacidade de carga.

4.4 Colunas de 800 mm e 1400 mm de comprimento

Nos gráficos da Figura 4.4 e Figura 4.5 estão mostrados as larguras da alma e espessuras da seção variando para o mesmo comprimento, 800 mm e 1400 mm, respectivamente. No comprimento de 800 mm observa-se que houve aumento de resistência da coluna com o aumento da largura da alma e mantendo a mesma espessura, como já era esperado. Isso só não aconteceu na espessura de 2,25 mm, ao aumentar-se de 90 mm para 100 mm. O mesmo comportamento é observado no comprimento de 1400 mm, com as cargas últimas aumentando ao se aumentar a largura da alma da coluna, exceto na espessura de 2,0 mm que ao variar a largura de 80 mm para 90 mm não ocorreu alteração significativa na carga última.

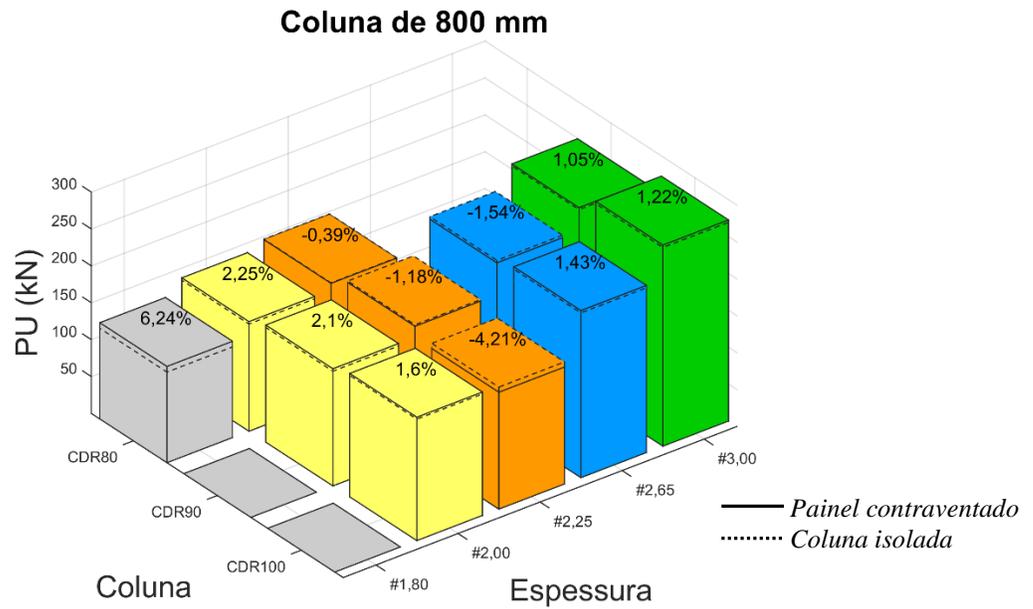


Figura 4.4: Cargas últimas de todas as séries para o comprimento de 800 mm

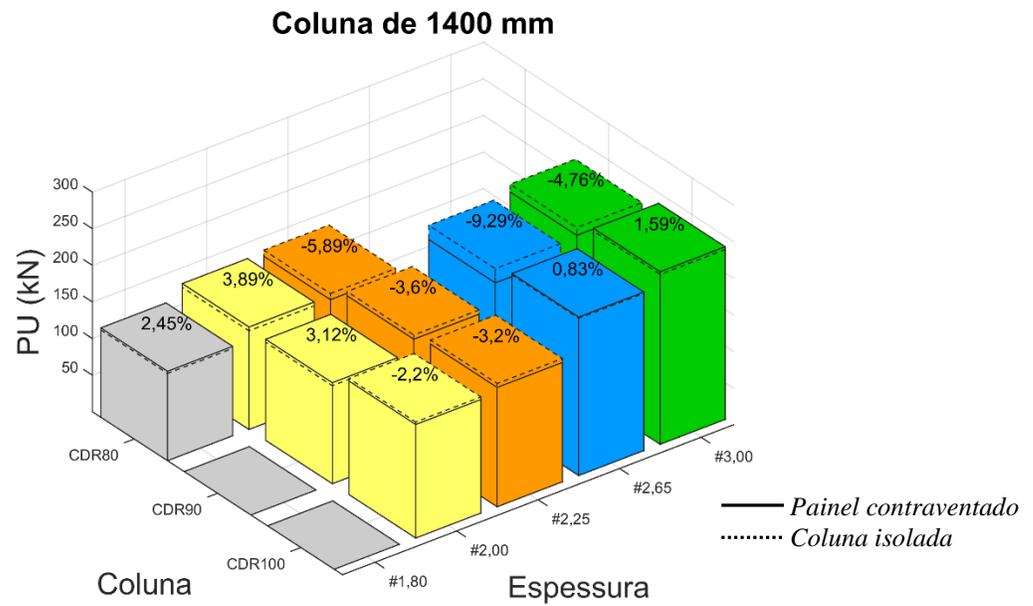


Figura 4.5: Cargas últimas de todas as séries para o comprimento de 1400 mm

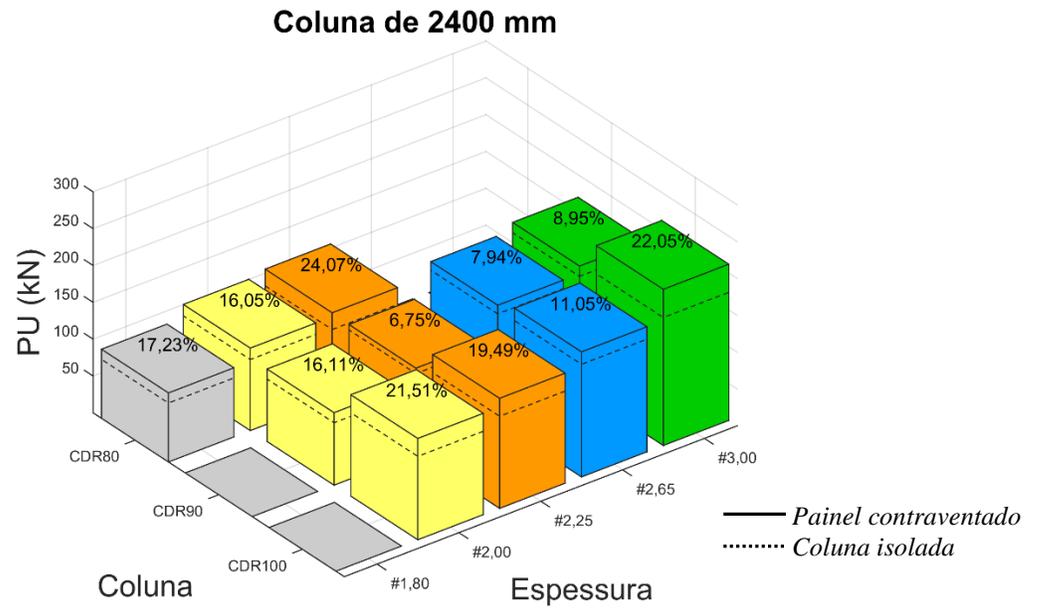


Figura 4.7: Cargas últimas de todas as séries para o comprimento de 2400 mm

5 ANÁLISE TEÓRICA

Para avaliação e dimensionamento dos elementos de sistemas de armazenagem, além das normas de perfis formados a frio existem normas complementares para uma correta avaliação destes elementos. De maneira geral, as prescrições normativas de sistemas de armazenagem remetem-se às normas gerais de perfis formados a frio.

Nos Estados Unidos utiliza-se as preconizações do Rack Manufacturers Institute (RMI, 2012), que reporta à norma de dimensionamento de perfis formados a frio do American Iron and Steel Institute (AISI, 2013).

No Reino Unido é utilizada a norma britânica BS EN 15512:2009 – Steel static storage systems – Adjustable pallet racking systems – Principles for structural design, reportando-se à norma EN 1993:2005 – Design of Steel Structures.

No Brasil, existe a NBR 15524:2007 – Sistemas de armazenagem: Diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos. Essa norma tem como base a norma britânica BS EN 15512. Em conjunto, utiliza-se a EN 1993:2005 – Design of Steel Structures. Assim, tem-se nesse capítulo o procedimento da NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio associada com a NBR 15524.

5.1 Método da Resistência Direta

A NBR 14762:2010 prevê a determinação da capacidade resistente dos elementos considerando-se o Método da Largura Efetiva, Método da Seção Efetiva ou o Método da Resistência Direta. O Método da Resistência Direta (MRD), descrito no Anexo C da norma, considera a determinação da carga crítica de flambagem elástica por análise de estabilidade.

O princípio básico do MRD é a obtenção das cargas máximas da seção a partir de uma análise de estabilidade elástica da seção transversal. Para tanto, é necessário resolver um problema de autovalor (análise linear) determinando assim os valores das cargas críticas de flambagem elástica. Os programas de análise de estabilidade elástica mais conhecidos e disponíveis gratuitamente são o GBTul (Teoria Generalizada de Vigas) e o CUFSM (faixas finitas).

Segundo a NBR 14762:2010, para barras submetidas à compressão centrada e seção sem perfurações, o valor característico da força axial de compressão resistente, $N_{c,Rk}$, deve ser tomado

como o menor valor calculado para flambagem global, local e distorcional, $N_{c,Re}$, $N_{c,Rl}$, $N_{c,Rdist}$, respectivamente.

Para flambagem global da barra por flexão, torção ou flexo-torção, o valor característico da força axial de compressão associada ao modo global de flambagem, $N_{c,Re}$, é dado pelas expressões descritas na Figura 5.1 em que se tem $N_{c,Re}$, em relação à força axial de escoamento e função da esbeltez reduzida, λ_0 .

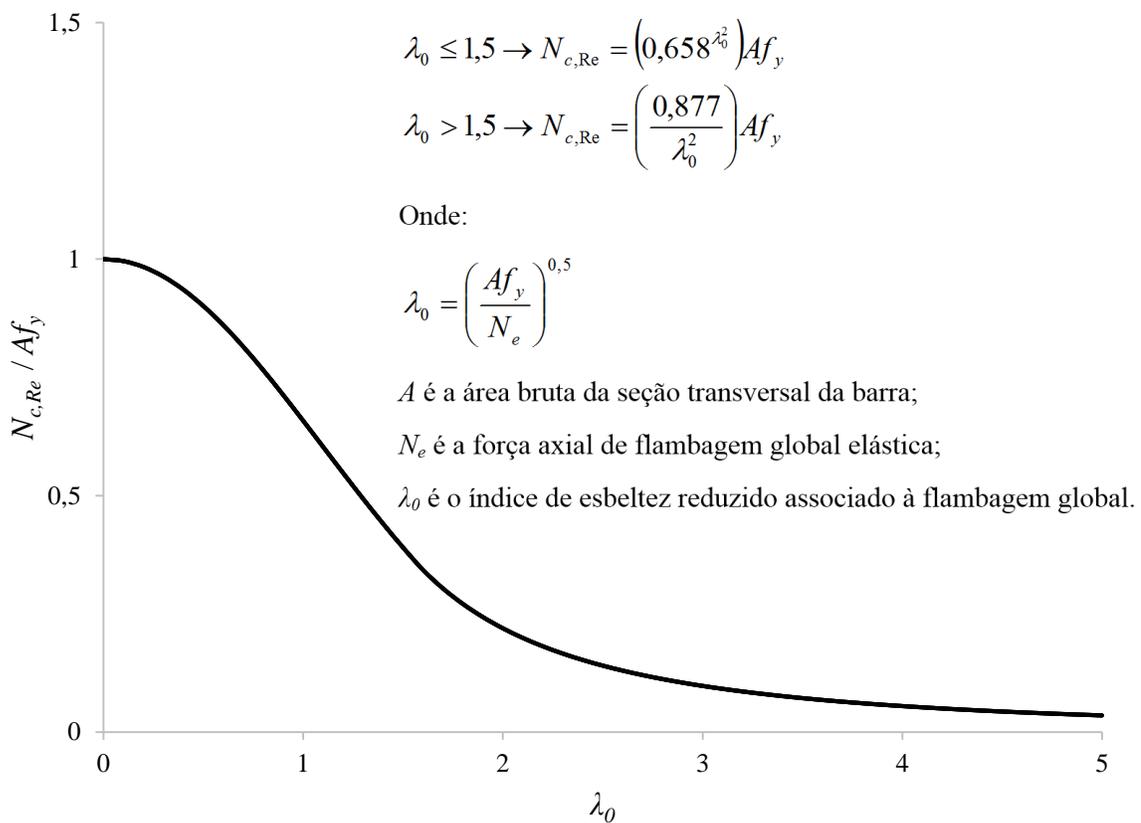


Figura 5.1: Curva de flambagem global (Fonte: Neiva, 2017)

Para a flambagem local, tem-se que o valor característico da força axial de compressão associada ao modo local de flambagem, $N_{c,Rl}$, é dado pelas expressões descritas na Figura 5.2 em que se tem $N_{c,Rl}$, em relação à força axial de compressão e função da esbeltez reduzida, λ_l .

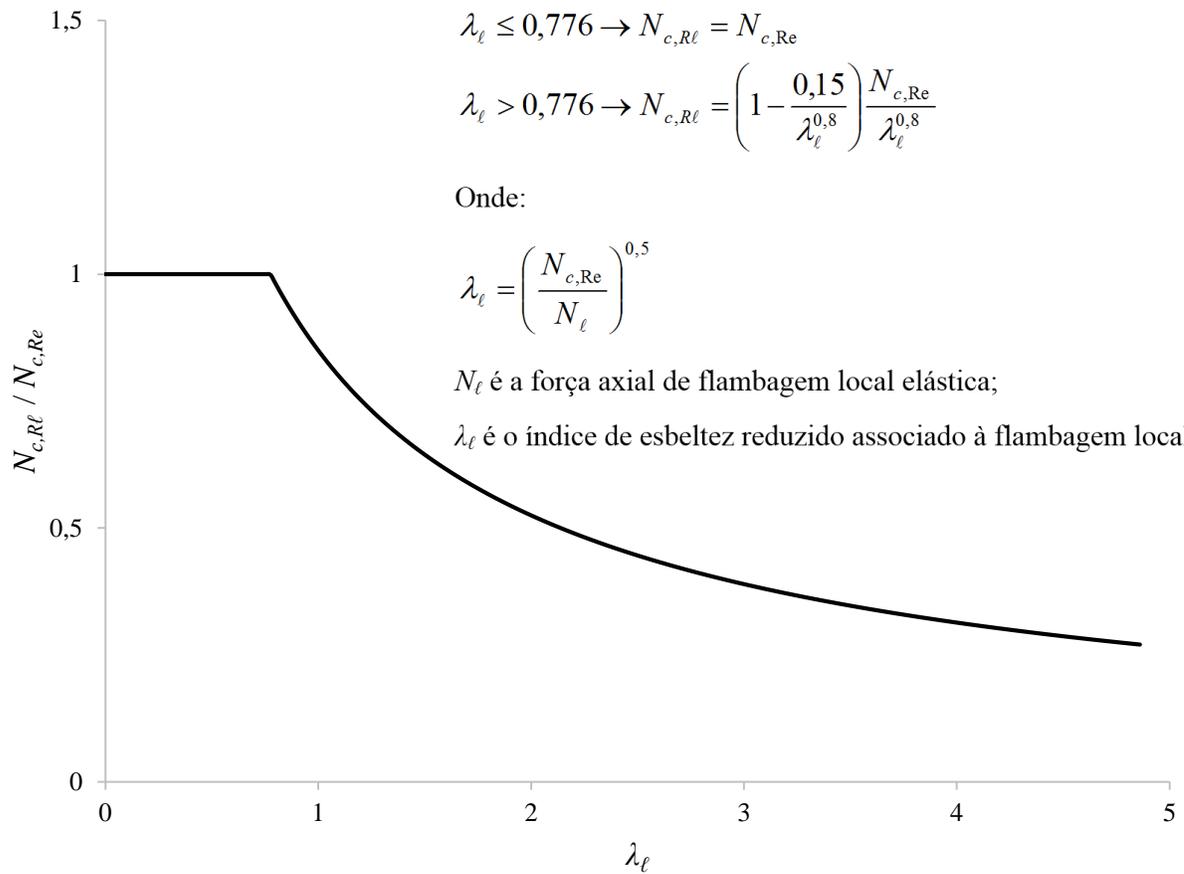


Figura 5.2: Curva de flambagem local (Fonte: Neiva, 2017)

E para a flambagem distorcional, utilizam-se as expressões mostradas na Figura 5.3, para o cálculo da força axial de compressão associada ao modo distorcional de flambagem, $N_{c,Rdist}$, em que se tem a relação dessa com a força axial de escoamento e em função da esbeltez associada ao modo distorcional, λ_{dist} .

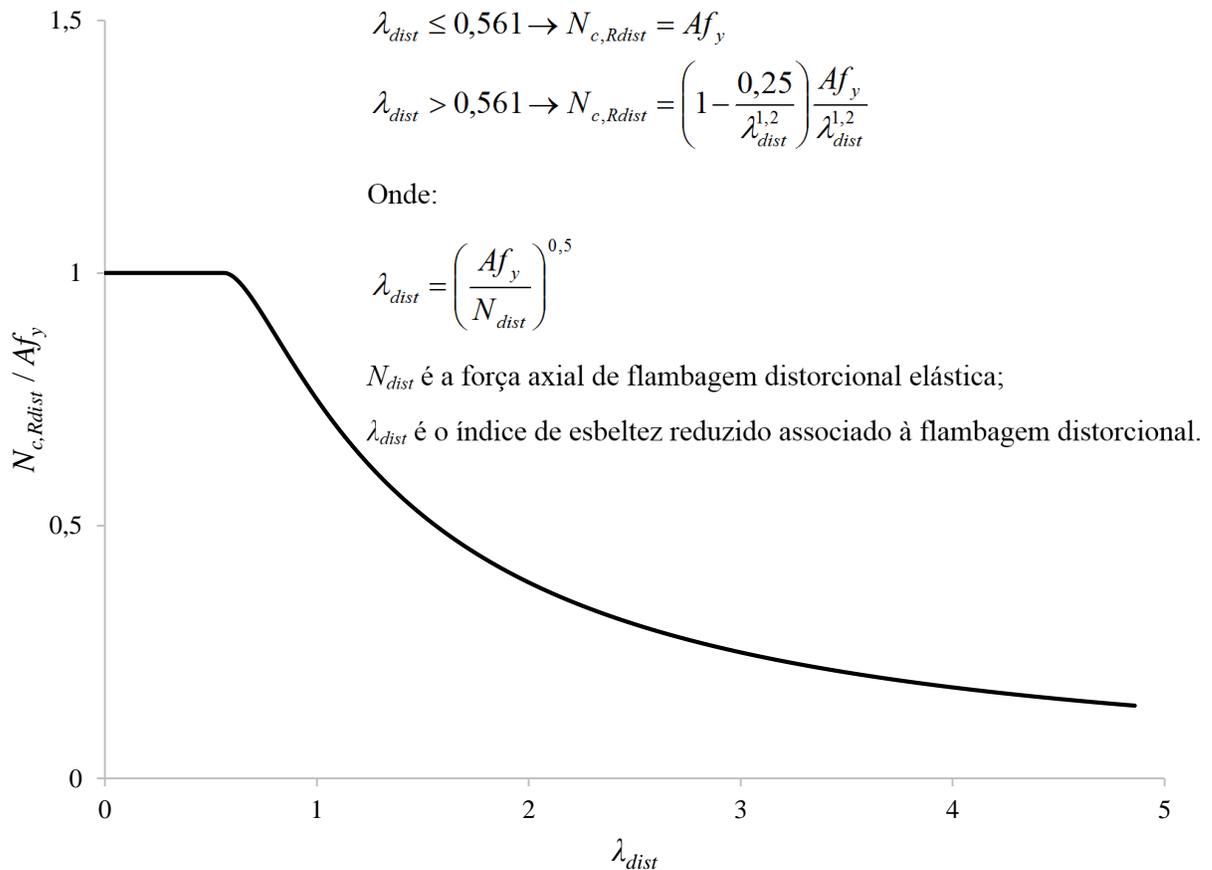


Figura 5.3: Curva de flambagem distorcional (Fonte: Neiva, 2017)

Os valores das cargas críticas de flambagem local, N_{ℓ} , e distorcional, N_{dist} , são obtidos por análise de estabilidade elástica. O valor da carga crítica de flambagem global pode ser determinado tanto por análise de estabilidade elástica quanto pelas expressões presentes na NBR 14762:2010.

Neste capítulo são calculadas as forças axiais de compressão resistente de cálculo relativas aos modos de flambagem considerando seções sem perfurações com a área bruta A_g , e em seguida levando em conta a presença de furos na seção transversal. Uma vez que a NBR 14762:2010 não considera a seções transversais com furos, é realizada uma adaptação nos cálculos com a consideração da área líquida da seção transversal reduzida pelas perfurações, $A_{net\ min}$.

A seção transversal considerada está mostrada na Figura 5.4 com representação dos eixos.

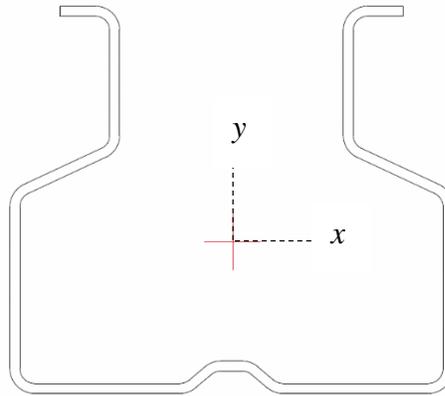


Figura 5.4: Seção transversal

As propriedades geométricas da seção estudada estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Propriedades geométricas das seções transversais

b_w (mm)	t (mm)	A_g (cm ²)	$A_{net\ min}$ (cm ²)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	C_w (cm ⁶)	J (cm ⁴)
80	1,80	4,53	3,78	26,06	40,02	586,33	0,04896
	2,00	5,04	4,20	28,96	44,47	651,56	0,06716
	2,25	5,67	4,72	32,58	50,03	733,14	0,09563
90	2,00	5,24	4,40	30,28	59,67	779,63	0,06983
	2,25	5,89	4,95	34,07	67,13	877,22	0,09942
	2,65	6,94	5,83	40,13	79,07	1033,46	0,16243
	3,00	7,86	6,60	45,44	89,52	1170,29	0,23566
100	2,00	5,57	4,73	35,76	80,93	1102,22	0,07422
	2,25	6,26	5,32	40,23	91,05	1240,16	0,10567
	2,65	7,38	6,26	47,39	107,24	1460,98	0,17264
	3,00	8,35	7,09	53,66	121,42	1654,33	0,25048

Em que b_w é a largura da alma; t é a espessura da seção; A_g é a área bruta da seção transversal maciça; $A_{net\ min}$ é a área da seção transversal considerando redução devido aos furos; I_x e I_y são os momentos de inércia relativos aos eixos x e y , respectivamente; C_w é a constante de empenamento da seção transversal e J a constante de torção da seção.

A área da seção $A_{net\ min}$ foi calculada como a área mínima da seção transversal segundo um plano que intercepte o maior número de perfurações existentes ao longo do comprimento da coluna. Os furos tem dimensão padrão e são utilizados para fixação das longarinas e de outros componentes do sistema de armazenagem. Na Figura 5.5 (a) está representado o plano que passa pelo maior número de furos e na Figura 5.5 (b) as dimensões destes furos.

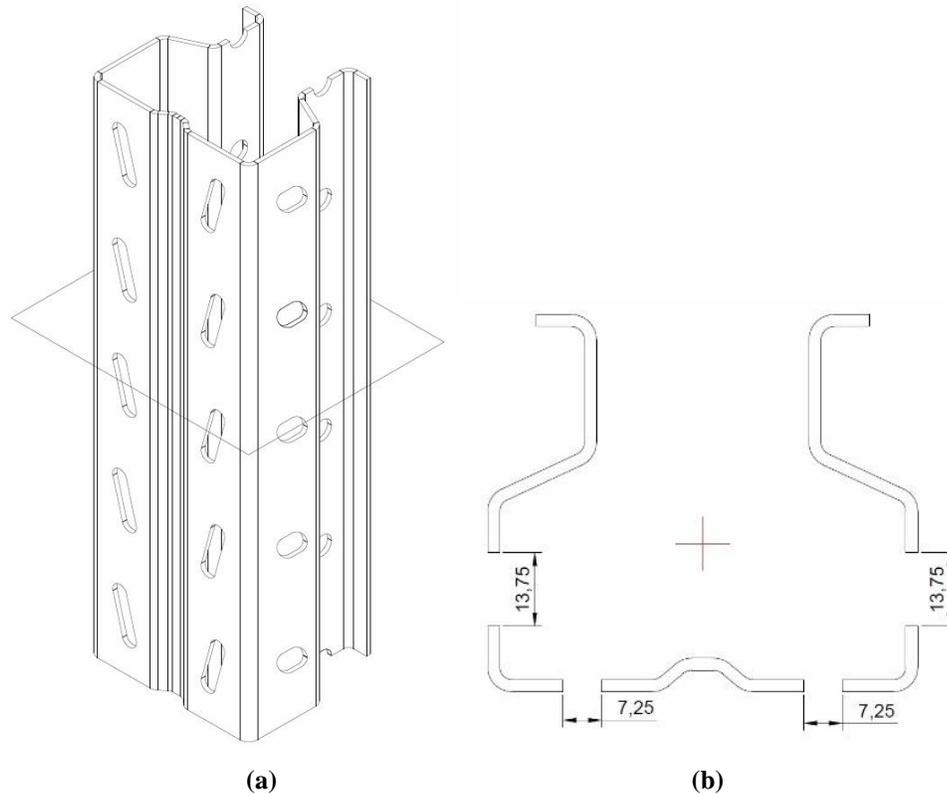


Figura 5.5: Dimensão dos furos (mm)

5.2 Análise de flambagem elástica

A análise de estabilidade elástica da seção transversal foi realizada pelo software GBTul, com a seção modelada como mostrado na Figura 5.6 e considerando a coluna bi-apoiada, como mostrado na Figura 5.7.

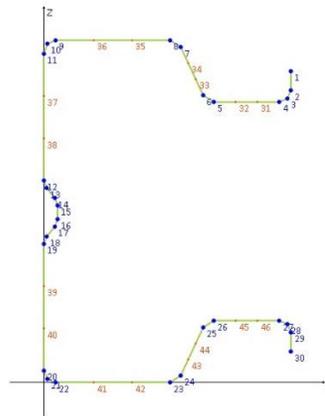


Figura 5.6: Seção transversal no GBTul

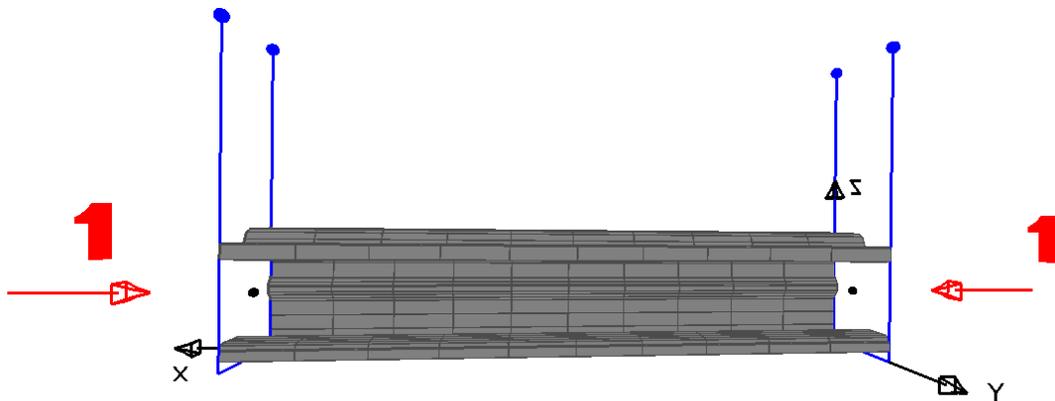


Figura 5.7: Seção modelada no GBTul

A força axial de flambagem distorcional elástica foi determinada para cada seção sendo utilizada para todos os comprimentos analisados. Os valores encontrados estão mostrados na Tabela 5.2 juntamente com os comprimentos em que foram observados.

Tabela 5.2: Força axial de flambagem distorcional elástica

b_w (mm)	t (mm)	L (mm)	N_{dist} (kN)
80	1,80	550	178,97
	2,00	550	224,97
	2,25	500	288,48
90	2,00	550	219,87
	2,25	500	282,82
	2,65	450	403,97
	3,00	450	530,43
100	2,00	550	192,11
	2,25	500	248,14
	2,65	450	355,93
	3,00	450	466,54

Para as análises realizadas, cuja seção transversal foi mostrada anteriormente, não foi observada a flambagem local elástica, assim a $N_{c,R\ell}$ não será a dominante não sendo apresentados seus procedimentos de cálculos.

A força de flambagem global elástica para a seção em estudo, formada por perfil monossimétrico com eixo de simetria em y , é o menor valor calculado segundo as equações da NBR 14762:2010, mostradas nas Equações 5.1 a 5.4.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}$$

Equação 5.1

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2[1 - (y_0 / r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ey}N_{ez}[1 - (y_0 / r_0)^2]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right]$$

Equação 5.2

Onde

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad \text{Equação 5.3}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left(\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right) \quad \text{Equação 5.4}$$

Os comprimentos considerados para as colunas foram de 800 mm, 1400 mm, 2000 mm e 2400 mm. Os valores encontrados de carga global de flambagem elástica para as seções sem perfurações, $N_{e, Ag}$, e considerando a área reduzida, $N_{e, Anet\ min}$, devido às perfurações estão mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Força axial de flambagem global elástica para A_g e $A_{net\ min}$

Seção (mm)	h (mm)	$\bar{\lambda}$	$N_{e, Ag}$ (kN)	$N_{e, Anet\ min}$ (kN)
	800	0,41	291,97	281,39
$b_w=80$	1400	0,72	98,55	95,04
$t=1,80$	2000	1,03	50,67	48,91
	2400	1,23	36,58	35,34
	800	0,41	325,69	313,92
$b_w=80$	1400	0,72	110,74	106,82
$t=2,00$	2000	1,03	57,50	55,53
	2400	1,23	41,81	40,41
	800	0,41	368,42	355,13
$b_w=80$	1400	0,72	126,52	122,07
$t=2,25$	2000	1,03	66,55	64,30
	2400	1,23	48,84	47,24
	800	0,41	395,62	378,77
$b_w=90$	1400	0,72	134,01	128,38
$t=2,00$	2000	1,03	69,24	66,41
	2400	1,23	50,18	48,17

Tabela 5.3: Força axial de flambagem global elástica para A_g e $A_{net\ min}$ (Continuação)

Seção (mm)	h (mm)	$\bar{\lambda}$	$N_{e,Ag}$ (kN)	$N_{e,A_{net\ min}}$ (kN)
$b_w=90$ $t=2,25$	800	0,41	447,28	428,27
	1400	0,72	152,89	146,51
	2000	1,03	79,97	76,73
	2400	1,23	58,47	56,16
$b_w=90$ $t=2,65$	800	0,41	531,58	509,07
	1400	0,72	184,67	177,05
	2000	1,03	98,59	94,69
	2400	1,23	73,14	70,34
$b_w=90$ $t=3,0$	800	0,41	607,23	581,61
	1400	0,72	214,25	205,50
	2000	1,03	116,54	112,02
	2400	1,23	87,51	84,27
$b_w=100$ $t=2,0$	800	0,39	504,55	482,07
	1400	0,68	169,50	162,03
	2000	0,97	86,61	82,84
	2400	1,17	62,24	59,57
$b_w=100$ $t=2,25$	800	0,39	569,80	544,44
	1400	0,68	192,80	184,33
	2000	0,97	99,49	95,21
	2400	1,17	72,04	68,99
$b_w=100$ $t=2,65$	800	0,39	675,81	645,81
	1400	0,68	231,64	221,53
	2000	0,97	121,60	116,45
	2400	1,17	89,17	85,48
$b_w=100$ $t=3,00$	800	0,39	770,46	736,34
	1400	0,68	267,40	255,83
	2000	0,97	142,64	136,68
	2400	1,17	105,77	101,49

Observa-se que houve uma redução no valor de carga global de flambagem considerando a área da seção transversal reduzida pelos furos, como esperado.

5.3 Capacidade resistente - seção sem furo

A capacidade resistente das colunas em estudo, $N_{c,Rk}$, é dada pelo menor valor entre as forças axiais de compressão associadas aos modos global e distorcional de flambagem, $N_{c,Re}$ e $N_{c,Rdist}$, respectivamente. A Tabela 5.4 apresenta um resumo dos valores encontrados.

Tabela 5.4: $N_{c,Rk}$ da seção sem furo

Seção (mm)	h (mm)	$N_{c,Re,Ag}$ (kN)	$N_{c,Rdist}$ (kN)	$N_{c,Rk,Ag}$ (kN)
$b_w=80$	800	111,91	113,09	111,91
	1400	76,33		76,33
	$t=1,80$ 2000	44,44		44,44
	2400	32,08		32,08
$b_w=80$	800	124,44	130,96	124,44
	1400	85,36		85,36
	$t=2,00$ 2000	50,43		50,43
	2400	36,67		36,67
$b_w=80$	800	140,15	153,32	140,15
	1400	96,87		96,87
	$t=2,25$ 2000	58,36		58,36
	2400	42,83		42,83
$b_w=90$	800	133,05	133,42	133,05
	1400	96,18		96,18
	$t=2,00$ 2000	60,73		60,73
	2400	44,01		44,01

Tabela 5.4: $N_{c,Rk}$ da seção sem furo (Continuação)

Seção (mm)	h (mm)	$N_{c,Re,Ag}$ (kN)	$N_{c,Rdist}$ (kN)	$N_{c,Rk,Ag}$ (kN)
	800	149,80		149,80
$b_w=90$	1400	108,95	175,76	108,95
$t=2,25$	2000	70,08		70,08
	2400	51,28		51,28
	800	176,70		176,70
$b_w=90$	1400	129,87	194,55	129,87
$t=2,65$	2000	86,03		86,03
	2400	64,14		64,14
	800	200,33		200,33
$b_w=90$	1400	148,71	246,59	148,71
$t=3,0$	2000	101,09		101,09
	2400	76,75		76,75
	800	145,38		132,24
$b_w=100$	1400	110,56	132,24	110,56
$t=2,0$	2000	74,51		74,51
	2400	54,58		54,58
	800	163,64		156,41
$b_w=100$	1400	124,94	156,41	124,94
$t=2,25$	2000	85,23		85,23
	2400	63,18		63,18
	800	192,92		192,92
$b_w=100$	1400	148,34	196,43	148,34
$t=2,65$	2000	103,31		103,31
	2400	78,20		78,20
	800	218,63		218,63
$b_w=100$	1400	169,25	231,71	169,25
$t=3,00$	2000	120,11		120,11
	2400	92,76		92,76

Observa-se que os valores das forças associadas ao modo global de flambagem foram os dominantes para a capacidade resistente na grande maioria dos casos analisados. Em alguns casos, destacados na Tabela 5.4, a força associada ao modo distorcional de flambagem foi dominante, todos para o comprimento de 800 mm. Isto pode ser justificado pelo fato deste comprimento estar próximo ao ponto de menor valor de carga crítica de flambagem elástica da seção analisada, conforme a Tabela 5.2. Por exemplo, na seção com $b_w=100$ mm e $t=2,0$ mm, observa-se o ponto de menor carga crítica em 550 mm de comprimento.

5.4 Capacidade resistente - seção com furo

Calculou-se a capacidade resistente das colunas, $N_{c,Rk}$, para as seções considerando a área da seção transversal reduzida pela área dos furos. Os valores encontrados estão mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: $N_{c,Rk}$ da seção com furo

Seção (mm)	h (mm)	$N_{c,Re, Anet\ min}$ (kN)	$N_{c,Rdist}$ (kN)	$N_{c,Rk, Anet\ min}$ (kN)
	800	95,74		95,74
$b_w=80$	1400	68,80		68,80
$t=1,80$	2000	42,89	113,09	42,89
	2400	30,99		30,99
	800	106,45		106,45
$b_w=80$	1400	76,88		76,88
$t=2,00$	2000	48,70	130,96	48,70
	2400	35,44		35,44
	800	119,87		119,87
$b_w=80$	1400	87,15		87,15
$t=2,25$	2000	56,33	153,32	56,33
	2400	41,43		41,43

Tabela 5.5: $N_{c,Rk}$ da seção com furo (Continuação)

Seção (mm)	h (mm)	$N_{c,Re, Anet\ min}$ (kN)	$N_{c,Rdist}$ (kN)	$N_{c,Rk, Anet\ min}$ (kN)
	800	114,02		114,02
$b_w=90$	1400	85,80		85,80
$t=2,00$	2000	57,44	133,42	57,44
	2400	42,24		42,24
	800	128,36		128,36
$b_w=90$	1400	97,12		97,12
$t=2,25$	2000	66,05	175,76	66,05
	2400	49,25		49,25
	800	151,38		151,38
$b_w=90$	1400	115,62		115,62
$t=2,65$	2000	80,72	194,55	80,72
	2400	61,69		61,69
	800	171,60		171,60
$b_w=90$	1400	132,24		132,24
$t=3,0$	2000	94,47	246,59	94,47
	2400	73,90		73,90
	800	125,36		125,36
$b_w=100$	1400	98,30		98,30
$t=2,0$	2000	69,27	132,24	69,27
	2400	52,24		52,24
	800	141,10		141,10
$b_w=100$	1400	111,04		111,04
$t=2,25$	2000	79,11	156,41	79,11
	2400	60,51		60,51
	800	166,33		166,33
$b_w=100$	1400	131,73		131,73
$t=2,65$	2000	95,63	196,43	95,63
	2400	74,87		74,87

Tabela 5.5: $N_{c,Rk}$ da seção com furo (Continuação)

Seção (mm)	h (mm)	$N_{c,Re, Anet\ min}$ (kN)	$N_{c,Rdist}$ (kN)	$N_{c,Rk, Anet\ min}$ (kN)
	800	188,48		188,48
$b_w=100$	1400	150,19	231,71	150,19
$t=3,00$	2000	110,89		110,89
	2400	88,47		88,47

Observa-se que considerando a área da seção transversal reduzida, os valores das forças associadas ao modo global de flambagem foram os dominantes para a capacidade resistente em todos os casos analisados. Conforme aumenta-se o comprimento da coluna em uma seção com mesmos parâmetros, pode-se notar que a capacidade resistente da coluna diminui. Este fato está associado à redução da esbelteza do elemento e já era esperado.

No entanto, conforme os ensaios experimentais realizados, o modo global não foi o dominante em todos os casos. Como observado nas análises dos resultados experimentais, nos comprimentos de 800 mm e 1400 mm observou-se a ocorrência do modo distorcional antes do global. Esta diferença entre resultados pode ser atribuída ao fato da análise de estabilidade elástica das seções ter sido realizada sem a consideração de furos na seção das colunas, conforme a norma NBR 14762:2010, ressaltando um tema que foge ao escopo da referida norma.

5.5 Comparações dos resultados teóricos e experimentais

Com os valores da capacidade resistente das colunas calculados conforme a norma brasileira NBR 14762:2010 pelo Método da Resistência Direta considerando área bruta da seção transversal e uma adaptação considerando a área reduzida pelos furos, foi realizada comparação entre estes valores teóricos e os valores experimentais. Os valores experimentais de carga última das colunas, P_u , foram os obtidos experimentalmente. A Tabela 5.6 mostra os valores obtidos.

Tabela 5.6: Valores teóricos

Seção (mm)	h (mm)	$\bar{\lambda}$	$N_{c,Rk,Ag}$ (kN)	$N_{c,Rk,Anet\ min}$ (kN)
$b_w=80$ $t=1,80$	800	0,41	111,91	95,74
	1400	0,72	76,33	68,80
	2000	1,03	44,44	42,89
	2400	1,23	32,08	30,99
$b_w=80$ $t=2,00$	800	0,41	124,44	106,45
	1400	0,72	85,36	76,88
	2000	1,03	50,43	48,70
	2400	1,23	36,67	35,44
$b_w=80$ $t=2,25$	800	0,41	140,15	119,87
	1400	0,72	96,87	87,15
	2000	1,03	58,36	56,33
	2400	1,23	42,83	41,43
$b_w=90$ $t=2,00$	800	0,41	133,05	114,02
	1400	0,72	96,18	85,80
	2000	1,03	60,73	57,44
	2400	1,23	44,01	42,24
$b_w=90$ $t=2,25$	800	0,41	149,80	128,36
	1400	0,72	108,95	97,12
	2000	1,03	70,08	66,05
	2400	1,23	51,28	49,25
$b_w=90$ $t=2,65$	800	0,41	176,70	151,38
	1400	0,72	129,87	115,62
	2000	1,03	86,03	80,72
	2400	1,23	64,14	61,69
$b_w=90$ $t=3,0$	800	0,41	200,33	171,60
	1400	0,72	148,71	132,24
	2000	1,03	101,09	94,47
	2400	1,23	76,75	73,90

Tabela 5.6: Valores teóricos (Continuação)

Seção (mm)	h (mm)	$\bar{\lambda}$	$N_{c,Rk,Ag}$ (kN)	$N_{c,Rk,Anet\ min}$ (kN)
$b_w=100$ $t=2,0$	800	0,39	132,24	125,36
	1400	0,68	110,56	98,30
	2000	0,97	74,51	69,27
	2400	1,17	54,58	52,24
$b_w=100$ $t=2,25$	800	0,39	156,41	141,10
	1400	0,68	124,94	111,04
	2000	0,97	85,23	79,11
	2400	1,17	63,18	60,51
$b_w=100$ $t=2,65$	800	0,39	192,92	166,33
	1400	0,68	148,34	131,73
	2000	0,97	103,31	95,63
	2400	1,17	78,20	74,87
$b_w=100$ $t=3,00$	800	0,39	218,63	188,48
	1400	0,68	169,25	150,19
	2000	0,97	120,11	110,89
	2400	1,17	92,76	88,47

Algumas considerações podem ser feitas a respeito dos resultados encontrados. Os valores de resistência teóricos considerando a redução de área pela presença dos furos foram todos menores que os valores de carga obtidos experimentalmente. Até mesmo considerando a área bruta da seção os valores de resistência teóricos foram menores que os experimentais.

Observou-se que à medida que aumenta-se os comprimentos de coluna, aumenta-se a discrepância entre os valores. Para os comprimentos de 2400 mm, a resistência teórica das colunas está entre 40 e 50 % dos valores experimentais de carga última, tanto para as seções considerando área bruta, quanto considerando a área reduzida pelos furos. Estas observações mostram o quanto a norma é conservadora em suas formulações.

A diferença observada quanto ao modo de flambagem dominante nas análises teóricas e experimentais, pode ser explicada devido à análise de estabilidade elástica das seções ter sido realizada sem a consideração de furos na seção das colunas, conforme a norma NBR 14762:2010. Além disso, a referida norma não considera acoplamento entre os modos, o que é observado nos ensaios experimentais.

O conservadorismo da norma brasileira justifica e ressalta a necessidade de novas curvas de flambagem que considerem as perfurações nas seções transversais das colunas e até mesmo a forma da seção transversal (tipo *rack*).

O mesmo se aplica aos painéis contraventados, cuja fixação dos contraventamentos influencia na carga última das colunas e não é levado em consideração nos cálculos de projetos estruturais. As novas curvas de flambagem irão fornecer formulações para o dimensionamento de estruturas de sistemas de armazenagem com resultados mais coerentes que os resultados fornecidos pelas normas atuais de dimensionamento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de painéis contraventados de sistemas de armazenagem industriais, constituídos por colunas formadas por perfis formados a frio com seção transversal tipo *rack*. Foi avaliada a influência dos contraventamentos nos painéis quando comparados às colunas isoladas, ou seja, sem os contraventamentos.

Foram definidas onze seções transversais, variando-se a largura da alma (80 mm, 90 mm e 100 mm) e as espessuras da chapa (1,8 mm, 2,0 mm, 2,25 mm, 2,65 mm e 3,0 mm). Além disso, foram definidos quatro comprimentos (800 mm, 1400 mm, 2000 mm e 2400 mm) com base nos limites de esbeltez normativos.

Foram apresentados os resultados de 198 ensaios experimentais, sendo 154 ensaios de painéis contraventados e 44 ensaios de colunas isoladas. Foram analisadas as capacidades de carga dos painéis contraventados e também das colunas isoladas, além dos deslocamentos relacionados aos modos de flambagem observados nos protótipos.

Uma análise teórica da capacidade de carga das colunas foi realizada, considerando adaptações de prescrições normativas e comparando com os resultados experimentais.

Com os deslocamentos observados experimentalmente na alma e nos flanges de ligação da seção transversal das colunas e painéis contraventados percebeu-se que o comprimento total da coluna e o comprimento destravado dado pela posição dos contraventamentos, são fatores que influenciam diretamente nos modos de flambagem. Nos quatro comprimentos analisados os deslocamentos relacionados ao modo distorcional e global nas colunas isoladas foram observados em menores níveis de carga quando comparados aos painéis contraventados. A redução do comprimento destravado nos painéis com comprimento de 1400 mm, levou a ocorrência dos deslocamentos relacionados ao modo distorcional em menores níveis de carga. O mesmo foi observado no comprimento de 2400 mm na posição em que o contraventamento divide a coluna em dois comprimentos destravados próximos, mostrando que o modo distorcional quando se apresenta reduz a capacidade de carga das colunas.

Em relação aos lados A e B quanto à posição dos contraventamentos nos painéis contraventados, percebe-se que no comprimento de 1400 mm a diferença foi significativa no comportamento em relação aos dois lados, devido à diferença no comprimento destravado. No comprimento de 2000 mm não houve diferença, pois a posição dos contraventamentos ocorreu de

forma simétrica. No comprimento de 2400 mm, observou-se uma pequena diferença de comportamento, pois embora a posição dos contraventamentos aparentem serem semelhantes neste comprimento, um lado divide a coluna em dois comprimentos destravados de comprimentos próximos, o que não ocorre no outro lado.

Em relação às cargas últimas experimentais obtidas, foram observadas diferenças entre os valores dos painéis contraventados e colunas isoladas. Nas colunas com largura de alma de 80 mm, nos comprimentos de 800 mm e 1400 mm houve um aumento da capacidade resistente pequeno devido ao contraventamento e em alguns casos o contraventamento não levou a um aumento da capacidade resistente da coluna, justificado pelo fato do modo distorcional ter deteriorado a capacidade resistente sendo mais significativo para o comprimento livre entre contraventamentos que para a coluna isolada. Nos comprimentos de 2000 mm e 2400 mm, a posição do contraventamento aumenta significativamente a capacidade resistente da coluna. Observa-se que com o aumento dos comprimentos dentro da mesma série de ensaios, a carga última diminui devido ao aumento da esbeltez, como é de se esperar. Nas colunas com alma de largura 90 mm, observou-se que nos comprimentos de 800 mm e 1400 mm não houve aumento da capacidade resistente da coluna em relação ao painel contraventado, devido à ocorrência do modo distorcional. Já nos comprimentos de 2000 mm e 2400 mm a posição do contraventamento foi favorável ao aumento da capacidade de carga das colunas.

Em relação à análise teórica das colunas, observou-se que os valores de capacidade resistente encontrados considerando a redução de área pela presença dos furos foram todos menores que os valores de carga obtidos experimentalmente. Até mesmo considerando a área bruta da seção os valores de resistência teóricos foram menores que os experimentais. À medida que aumentou-se os comprimentos analisados, aumentou-se a dispersão entre os valores. As observações realizadas mostraram que a norma brasileira NBR 14762:2010 é conservadora em suas formulações, justificando a necessidade de novas curvas de flambagem que considerem as perfurações nas seções transversais das colunas e até mesmo a forma da seção transversal (tipo *rack*), além do acoplamento entre os modos de flambagem, que também não é abordado na referida norma. Ressalta-se o mesmo aos painéis contraventados, cuja fixação dos contraventamentos influencia na carga última das colunas e não é levado em consideração nos cálculos de projetos estruturais. As novas curvas de flambagem irão fornecer formulações para o dimensionamento de estruturas de

sistemas de armazenagem com resultados mais coerentes que os resultados fornecidos pelas normas atuais de dimensionamento.

Para continuidade deste estudo, sugere-se:

-Determinação das cargas últimas experimentais dos painéis contraventados e colunas isoladas para o comprimento de 3000 mm;

-Determinação das curvas de flambagem de painéis contraventados de sistemas de armazenagem industrial;

-Proposição de novas formas de disposição e arranjos estruturais para os contraventamentos das colunas, de forma a obter-se disposições mais vantajosas para os sistemas de armazenagem;

-Definição de uma seção transversal com parâmetros que forneçam melhor relação de carga última *versus* quantidade de material;

-Análise da influência dos contraventamentos na estabilidade do sistema como um todo.

REFERÊNCIAS

Águia. <<http://www.aguiasistemas.com.br/>> Disponível em (2018).

AISI. **Cold Formed Steel Design Manual**. American Iron and Steel Institute, Washington, DC. (2013).

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14762 – Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio**. Rio de Janeiro, (2010).

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15524-2 – Sistema de armazenagem Parte 2: Diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos**. (2007).

Baldassino, N.; Zandonini, R. **Design by testing of industrial racks**. *Advanced Steel Construction*, v. 7, n. 1, p. 27-47, (2011).

Batista, E. M. **Local–global buckling interaction procedures for the design of cold-formed columns: Effective width and direct method integrated approach**. *Thin - Walled Structures* 47, 1218–1231, (2009).

Batista, E. M. **Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local–global buckling interaction**. *Thin - Walled Structures* 47, 345–356, (2010).

Bebiano R.; Pina P.; Silvestre N.; Camotim D. **GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members**, DECivil/IST, Technical University of Lisbon (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>), (2008).

Bernuzzi, C.; Gobetti, A.; Gabbianelli, G.; Simoncelli, M. **Unbraced pallet rack design in accordance with European practice-Part 1: Selection of the method of analysis**. *Thin-Walled Structures*, v. 86, p. 185-207, (2015).

Bernuzzi, C.; Gobetti, A.; Gabbianelli, G.; Simoncelli, M. **Unbraced pallet rack design in accordance with European practice-Part 2: Essential verification checks**. *Thin-Walled Structures*, v. 86, p. 208-229, (2015).

British Standard EN 15512, **Steel Static Storage Systems–Adjustable Pallet Racking Systems–Principles for Structural Design**, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (2009).

Campos, S. R. **Estudo Teórico-Experimental de sistemas de armazenagem industrial tipo Drive-in**. Dissertação de Mestrado. PROPEC - UFOP, (2003).

Dai, L.; Zhao, X.; Rasmussen, K. J. R. **Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright bolted connections**. *Thin-Walled Structures*, v. 124, p. 202-217, (2018).

Dinde, S. R.; Talikoti, R. S. **Structural Behaviour of Industrial Pallet Rack with Braced and Unbraced Frames**. *International Journal of Current Engineering and Technology*, v. 5, n. 4, p. 2328-2331, (2015).

EN 1993 – **Design of Steel Structures**. (2005)

Faria, V. O. **Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. Dissertação de Mestrado, PROPEC - UFOP, (2016).

Freitas, A. M. S.; Freitas, M. S. da R.; Campos, S. R. **Comportamento de sistemas de armazenagem industrial do tipo Drive-in**. *REM: Revista Escola de Minas*, v. 56, n. 4, p. 237-242, out-dez, (2003).

Freitas, A. M. S.; Souza, F. T.; Freitas, M. S. R. **Analysis and behavior of steel storage drive-in racks**. *Thin-Walled Structures*, v. 48, p. 110-117, (2010).

Gilbert, B.P; Rasmussen K.J.R. **Determination of accidental forklift truck impact forces on drive-in steel rack structures**. Engineering Structures, v. 33, n. 5, p. 1403-1409, (2011a).

Gilbert, B.P; Rasmussen K.J.R. **Impact tests and parametric impact studies on drive-in steel storage racks**. Engineering Structures, v. 33, n. 5, p. 1410-1422, (2011b).

Godley, M.H.R. **Storage Racking In Design of cold Formed Steel Members**. Chapter 11, Ed Rhodes. Elsevier Applied Science, Amsterdam, p. 361-399, (1991).

Godley, M. H. R.; Beale, R. G. **Investigation of the effects of looseness of bracing components in the cross-aisle direction on the ultimate load-carrying capacity of pallet rack frames**. Thin-Walled Structures, v. 46, p. 848-854, (2008).

Harris, E.; Hancock, G. J. **Sway Stability Testing of High Rise Rack Sub-Assemblages**. Sway sixteenth International Specialty Conference in Cold Formed Steel Structures proceedings, Missouri-Rolla, (2002).

Kanyilmaz, A.; Brambilla, G.; Chiarelli, G. P.; Castiglioni, C. A. **Assessment of the seismic behaviour of braced steel storage racking systems by means of full scale push over tests**. Thin-Walled Structures, v. 107, p. 138-155, (2016).

Koen, D. **Structural capacity of light gauge steel storage rack uprights**. Thesis of Master of Engineering, School of Civil Engineering, University of Sydney, (2008).

Mathworks. MATLAB – getting started guide. Natick, USA; 2014.

Mecalux. <<http://www.mecalux.com.br/>> Disponível em (2018).

Miranda, S. A. **Análise de ligações de sistemas de armazenagem industrial tipo porta-pallets**. Dissertação de Mestrado. PROPEC - UFOP, (2011).

Neiva, L. H. A. **Análise da influência de diferentes tipologias de perfurações na estabilidade de colunas de sistema de armazenamento**. Dissertação de Mestrado, PROPEC – UFOP, (2017).

Ng, A. L. Y.; Beale, R. G.; Godley, M. H. R. **Methods of restraining progressive collapse in rack structures**. Engineering Structures, v. 31, p. 1460-1468, (2009).

Oliveira, A. M. **Análise teórico-experimental de sistemas industriais de armazenagem (“racks”)**. Dissertação de Mestrado, PROPEC - UFOP, (2000).

Petrone, F.; Higgins, P. S.; Bissonnette, N. P.; Kanvinde, A. M. **The cross-aisle seismic performance of storage rack base connections**. Journal of Constructional Steel Research, v. 122, p. 520-531, (2016).

Rack Manufacturers Institute (RMI). **Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks**. Material Handling Industry, Charlotte, NC, (2012).

Rasmussen, K. J. R.; Gilbert, B. P. **Experimental test on steel storage rack components**. Research Report, n. R899, University of Sydney, Austrália, (2009).

Ribeiro, F. S. **Análise Teórico-Experimental de Colunas Curtas em Perfis Formados a Frio de Seção Transversal tipo Rack**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, (2006).

Sarawit, A. T.; Pekoz, T. **Cold-Formed Steel Frame and Beam-Column Design**. Final report, Cornell University, (2003).

Sarmanho, A. M. C. **Estudo do Comportamento Pós-Crítico de Paredes Esbeltas de Perfis Metálicos**. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, (1991).

Schafer, B. **Designing cold-formed steel using the direct strength method**. 18th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, Orlando, Florida. (2006).

Schafer, B., Ádáni, S. **Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained methods**. 18th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, Orlando, Florida. (2006).

Shah, S. N. R.; Sulong, N. R.; Jumaat, M. Z.; Shariati, M. **State-of-the-art review on the design and performance of steel pallet rack connections**. Engineering Failure Analysis, v. 66, p. 240-258, (2016).

Silva, L. S.; Simões, R.; Gervásio, H.; Vellasco, P.; Lima, L. **Dimensionamento de Estruturas de Aço: Comparação entre o Eurocódigo 3 e a Norma Brasileira NBR8800**. 1ª Edição, p.316, (2016).

Souza, D. A.; Freitas, M. S. R.; Freitas, A. M. S. **Estabilidade de colunas com seções enrijecidas em perfis de aço formados a frio**. REM. Revista Escola de Minas, v. 59, p. 199-205, (2006).

Souza, F. T. **Análise teórico-experimental de sistemas aporticados com elementos perfurados em perfis formados a frios - racks**. Dissertação de Mestrado, PROPEC - UFOP, (2005).

Souza, F. T. **Análise Teórico-Experimental da Estabilidade de Colunas Perfuradas em Perfis de Aço Formados a Frio em Seções Tipo Rack**. Tese de Doutorado, PROPEC - UFOP, (2013).

Teh, L. H.; Hancock, G. J.; Clarke, M. J. **Analysis and Design of Double-Sided High-Rise Steel Pallet Rack Frames**. Journal of Structural Engineering, v. 130, n. 7, p. 1011-1021, (2004).

Thombare, C. N.; Sangle, K. K.; Mohitkar, V. M. **Nonlinear buckling analysis of 2-D cold-formed steel simple cross-aisle storage rack frames**. Journal of Building Engineering, v. 7, p. 12-22, (2016).

Tilburgs, K. **Those peculiar structures in cold-formed steel: racking & shelving.** Steel construction, v. 6, p. 95-106, (2013).

Vazquez, E. G. **Análise teórica e experimental da instabilidade torcional de perfis formados a frio sob compressão centrada.** Tese de doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, (2002).