

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5164>

ARTIGO ORIGINAL

Simulação numérica de barras em dupla cantoneira enrijecida formadas a frio com travejamento em quadro submetidas à compressão

RESUMO: Cantoneiras enrijecidas de aço formadas a frio podem apresentar três modos críticos de instabilidade. Entretanto, barras em seção composta podem apresentar outros modos de acordo com o tipo, a disposição e a configuração das conexões. Barras compostas em dupla cantoneira com travejamento em quadro são constituídas por duas seções idênticas, dispostas de forma paralela e ligadas, em apenas alguns pontos ao longo do seu comprimento, por chapas separadoras. Apesar de ser um sistema bastante utilizado, não existem especificações nas normas para dimensionamento preciso desse componente estrutural. Posto isso, este trabalho objetivou avaliar a influência da inserção de travejamentos ao longo do comprimento na força normal resistente das barras compostas e verificar se os resultados obtidos estão compatíveis com os das hipóteses adotadas com base nos procedimentos normativos. Para tanto, foi realizada uma análise numérica não linear pelo Método dos Elementos Finitos no software Ansys, utilizando-se seções caracterizadas experimentalmente e disponíveis na literatura. Nesse sentido, observou-se que a adição de chapas separadoras aumentou significativamente a força normal resistente dos elementos, sendo os arranjos com uma ou duas chapas os mais efetivos. Os resultados foram intermediários, considerando as normativas adotadas, e indicaram a necessidade de um modelo de cálculo próprio para o arranjo de cantoneiras enrijecidas compostas, ligadas por travejamentos em quadro.

Palavras-chave: Ansys; análise numérica não linear; dupla cantoneira enrijecida; elementos finitos; perfil formado a frio.

Numerical simulation of cold-formed double stiffened angle bars with frame beams subjected to compression

SUBMETIDO 15/12/2020

APROVADO 21/01/2021

PUBLICADO ON-LINE 14/08/2021

PUBLICADO 30/09/2022

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

 João Paulo Monteiro Couto ^[1]

 Wanderson Fernando Maia ^[2]

 Felipe Nascimento Arroyo ^[3]*

 André Luis Christoforo ^[4]

[1] jpmcouth23@gmail.com

[2] wfmaia@ufscar.br

[3] lipe.arroyo@gmail.com

[4] christoforoal@yahoo.com.br

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar),
Brasil.

ABSTRACT: *Stiffened cold-formed steel angles can exhibit three critical modes of instability. However, composite section bars may present other modes depending on the type, arrangement and configuration of the connections. Double corner compound bars with frame locking are made up of two identical sections arranged in parallel and connected in only a few points along their length by separating plates. Despite being a widely used system, there are no specifications in the standards for precise dimensioning of this structural component. Thus, this study aimed to evaluate the influence of the insertion of beams along the length on the normal resistant strength of the composite bars and to verify whether the results obtained are compatible with those of the hypotheses adopted based on normative procedures. For this, a non-linear numerical analysis was performed using the Finite Element Method in the Ansys software, using experimentally characterized section available in the literature. In this sense, it was observed that the addition of separator plates significantly increased the normal resistant strength of the elements, with the arrangements of one or two plates being the most effective. The results were intermediate, given the adopted regulations that indicated the need for a proper calculation model for the arrangement of composite stiffened angles connected by frame beams.*

Keywords: *Ansys; cold-formed steel; double-angle members; finite element analysis; nonlinear numerical analysis.*

1 Introdução

O aço é um dos principais materiais da indústria de construção civil e está ganhando cada vez mais espaço no Brasil devido às suas várias vantagens, como o menor prazo de execução, o maior controle de qualidade e a maior leveza das estruturas.

Uma das maneiras de se construir estruturas em aço é através do uso de perfis de aço formados a frio, que se caracterizam pela elevada resistência mecânica, pela fabricação mais simples e barata e pelo menor consumo de material, que reduz os custos finais de construções como estruturas treliçadas e edifícios de pequenas alturas. Entretanto, por serem perfis fabricados com chapas de espessura reduzida, podem apresentar modos de instabilidade que normalmente não ocorrem em perfis laminados ou soldados, requerendo verificações adicionais de estabilidade em seu dimensionamento. Uma opção interessante de seção a ser utilizada em estruturas metálicas é a cantoneira enrijecida, seja de forma isolada ou composta, já que ambas apresentam comportamento mais estável do que as cantoneiras simples (MAIA *et al.*, 2016).

As cantoneiras enrijecidas de aço formadas a frio podem apresentar três modos críticos de instabilidade: (i) modo global de flexão; (ii) modo global de flexo-torção, ambos críticos para barras de maior esbelte; e (iii) modo local, predominante em barras de menor esbelte. Contudo, barras em seção composta podem apresentar outros modos de instabilidades de acordo com o tipo, a disposição e a configuração dos travejamentos, o que pode modificar o comportamento destas e elevar o grau de complexidade do seu dimensionamento (ROCHA; MAIA, 2019).

As barras compostas em dupla cantoneira com travejamento em quadro – que são objetos de investigação deste estudo – são constituídas por duas seções idênticas, dispostas de forma paralela (afastadas entre si) e ligadas em apenas alguns pontos ao longo do comprimento da barra (Figura 1). Apesar de ser um sistema bastante utilizado, principalmente por cantoneira simples, não existem especificações nas normas de

cálculo para dimensionamento preciso desse componente estrutural. Além disso, a literatura é limitada nesse sentido ao caracterizar o comportamento de apenas algumas seções específicas (MAIA, 2012).

Figura 1 ▶
Sistema em
dupla cantoneira simples
com chapas separadoras.
*Fonte: adaptado de
Maia (2012)*



Este trabalho visa contribuir para um maior domínio sobre o comportamento estrutural de barras compostas formadas por dupla cantoneira enrijecida com travejamento em quadro submetidas à compressão excêntrica (força aplicada pela aba). Para a realização deste estudo, foi feita uma análise numérica não linear pelo Método dos Elementos Finitos, realizada no software Ansys. Os resultados obtidos na análise numérica foram comparados com os obtidos em hipóteses de cálculo, fundamentadas em normas nacionais e internacionais. Foram variados os índices de esbeltez local e global, a espessura das seções e o número de travejamentos a fim de avaliar a influência de cada uma das variáveis na força normal resistente à compressão das barras.

2 Método da pesquisa

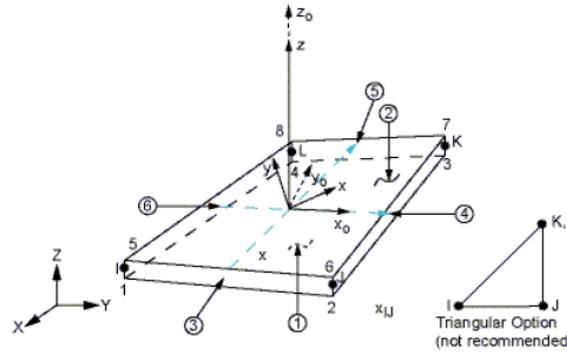
As simulações numéricas foram realizadas utilizando o software Ansys, baseado no Método dos Elementos Finitos, a partir de um modelo numérico já estabelecido na literatura. Inicialmente, foram realizadas análises elásticas, de forma a avaliar a instabilidade dos perfis dupla cantoneira enrijecida e identificar modos críticos existentes. Em seguida, foi realizada uma análise não linear, adicionando-se a esta as imperfeições geométricas e de materiais.

2.1 Elemento Shell 181

Os perfis utilizados nas simulações, assim como as chapas separadoras e o perfil para aplicação da força, foram modelados utilizando o elemento Shell 181 (Figura 2). De acordo com a bibliografia do software Ansys, Shell 181 é propício para análises não lineares de elementos de casca de pequena espessura, sujeitos a grandes deformações e rotações. O Shell 181 possui quatro nós com seis graus de liberdade cada, além de permitir translação e rotação na direção dos eixos x , y e z (U_x , U_y , U_z , ROT_x , ROT_y e ROT_z).

Figura 2 ▶

Elemento finito Shell 181.
 Fonte: adaptado do manual do Ansys (2013)

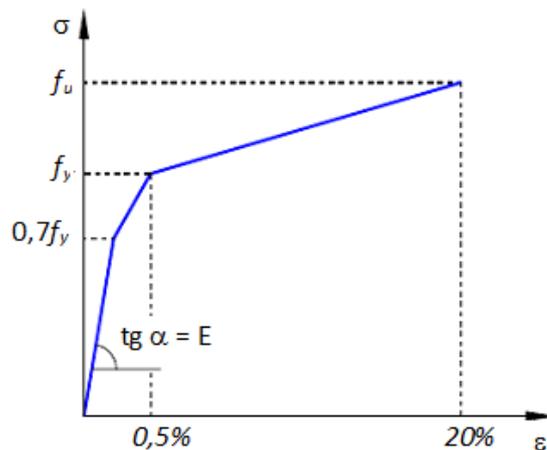


2.2 Modelo reológico

Para a consideração da curva “tensão x deformação” do material, foi utilizado o modelo aproximado trilinear (Figura 3). Resultados apresentados por Maia (2008) mostraram que esse modelo pode ser considerado como uma aproximação satisfatória quando não se dispõe de valores de ensaios de caracterização.

Figura 3 ▶

Curva tensão x deformação: modelo aproximado trilinear.
 Fonte: adaptado de Maia (2008)



2.3 Não linearidade geométrica

Para a resolução do sistema não linear, foi utilizado o método iterativo e incremental Newton-Raphson Completo, que atualiza a matriz de rigidez tangente a cada iteração. O carregamento foi implementado utilizando a ferramenta do Ansys “Automatic Load Stepping”, que atualiza de forma automática o incremento a ser acrescido, introduzindo limites superior e inferior de incrementos. Foi utilizado também o critério de convergência em termo dos deslocamentos para verificar se a solução obtida possui a precisão julgada suficiente.

Segundo Rocha (2017), o critério de convergência em termo dos deslocamentos é dado por $\|\delta u\| < \beta \|u\|$, em que δu é a correção iterativa do deslocamento, u é o deslocamento total e β é a tolerância ou erro máximo admitido. Neste trabalho, o valor de tolerância (β) adotado foi de 0,001 (0,1%), que é o padrão do Ansys. Para melhor convergência dos modelos, foi adotada a ferramenta “Line-Search”, que estima uma solução exterior ao raio de convergência do método de Newton-Raphson.

2.4 Modelos numéricos analisados

Os modelos numéricos executados e analisados neste trabalho foram seções duplas, construídas a partir das seções simples estudadas por Young (2005) (Le 70×17×1,20; Le 70×17×1,50; Le 70×17×1,90), com variação dos comprimentos conforme ensaiados experimentalmente e do número de travamentos ao longo do comprimento, totalizando 96 ensaios não lineares e 36 simulações lineares para definição das imperfeições geométricas.

A Tabela 1 indica as propriedades geométricas e mecânicas adotadas nas análises, sendo que b_f é a largura da aba, D é a largura do enrijecedor, t é a espessura da aba, r_i é o raio interno de dobramento, f_y é a resistência ao escoamento do aço, f_u é a resistência à ruptura do aço e E é o módulo de elasticidade do aço.

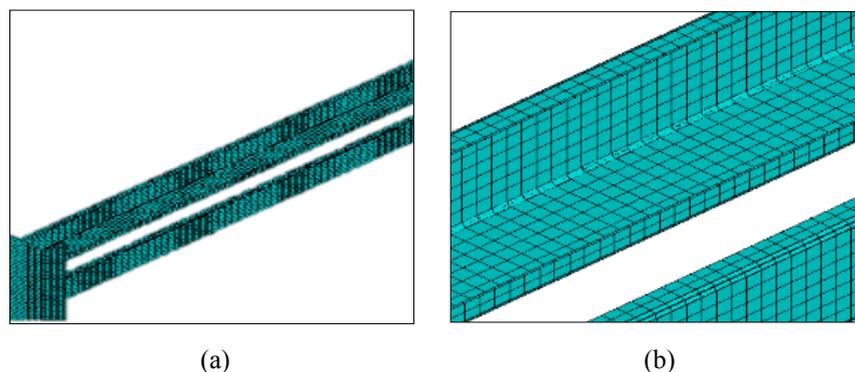
Tabela 1 ►
Propriedades geométricas e mecânicas das seções ensaiadas.
Fonte: adaptado de Young (2005)

Seção	Le 70×17×1,20	Le 70×17×1,50	Le 70×17×1,90
b_f (mm)	72,30	73,50	73,60
D (mm)	17,00	16,80	17,70
t (mm)	1,20	1,49	1,89
r_i (mm)	2,60	2,60	2,60
f_y (MPa)	580	505	495
f_u (MPa)	595	550	535
E (MPa)	211.000	212.000	213.000

É importante destacar que os travamentos sempre foram adotados de modo a deixar os comprimentos de destravamentos iguais, ou seja, deixando a peça simétrica.

Os elementos utilizados para a análise de elementos finitos foram adotados como sendo aproximadamente quadrados, com lado de cerca de 1 cm, com exceção dos cantos que foram discretizados em dois elementos. Todas as seções foram modeladas utilizando as dimensões da linha de esqueleto (linha média) e cantos arredondados. A Figura 4 ilustra a malha adotada para um dos modelos.

Figura 4 ►
Modelagem da malha de elementos finitos.
Fonte: elaborada pelos autores



A modelagem das chapas separadoras foi realizada conforme o esquema utilizado por Maia (2012), mostrado na sequência (Figuras 5 e 6). As distâncias entre os perfis e a largura foram de 20 cm e 7 cm, respectivamente, para todas as análises realizadas. Já a espessura e características mecânicas das chapas variaram de acordo com o perfil analisado em cada caso (2Le 70×17×1,20; 2Le 70×17×1,50 e 2Le 70×17×1,90).

Figura 5 ▶

Esquema para ensaio dos elementos: vista frontal (a) e lateral (b).

Fonte: adaptado de Maia (2012)

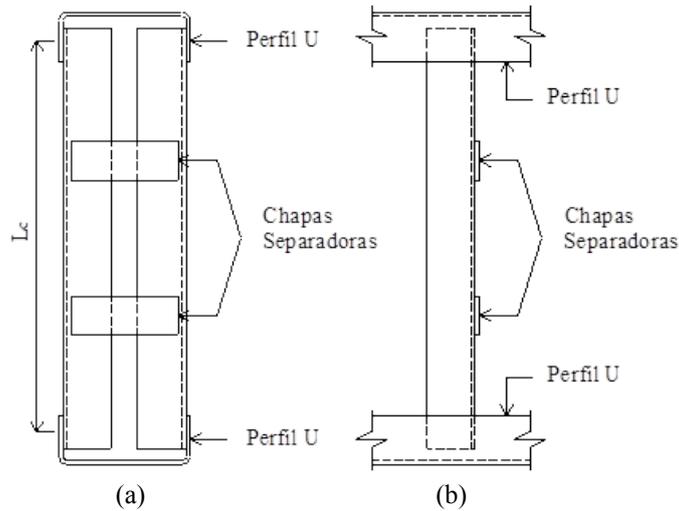
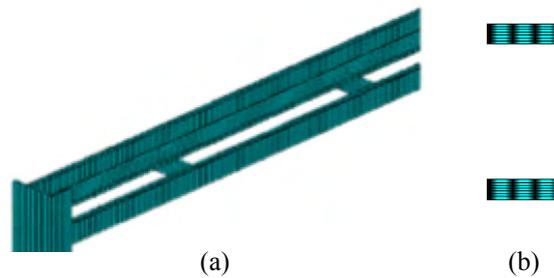


Figura 6 ▶

Exemplo de modelagem de um arranjo com duas chapas separadoras: vista 3D (a) e frontal (b).

Fonte: elaborada pelos autores

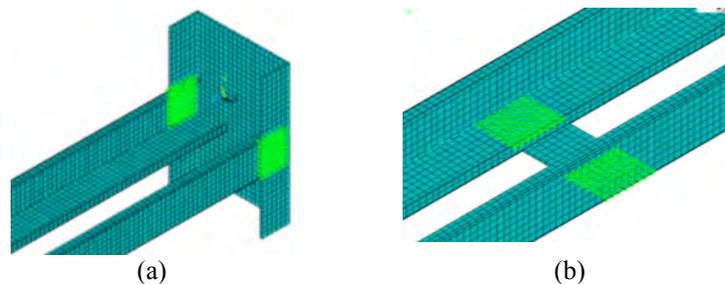


A soldagem das cantoneiras nos perfis U – para transmissão do carregamento excêntrico e das chapas separadoras nas cantoneiras – foi realizada utilizando o comando “CPintf” do Ansys, que cria pares entre os nós selecionados (Figura 7). Nessas regiões, os nós tiveram os deslocamentos acoplados nas três direções (U_x , U_y e U_z). Além disso, as condições de contorno utilizadas para restrição dos graus de liberdade dos elementos foram as mesmas utilizadas por Maia (2012), estando relacionadas no Quadro 1.

Figura 7 ▶

Acoplamento de nós no Perfil U (a) e nas chapas separadoras (b).

Fonte: elaborada pelos autores

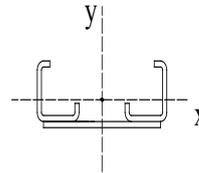


Quadro 1 ►

Restrições adotadas nos dispositivos de extremidades.

Fonte: adaptado de Maia (2012)

Posição	Graus de liberdades restringidos
Nós da extremidade – Perfis U (face de aplicação do deslocamento/força)	U_x, U_y, ROT_x, ROT_y e ROT_z Acoplamento U_z
Nós da extremidade – Perfis U (face oposta à e aplicação do deslocamento/força)	$U_x, U_y, U_z, ROT_x, ROT_y$ e ROT_z



Nota: eixo z ao longo do comprimento da barra

2.5 Imperfeições geométricas iniciais

A existência de imperfeições geométricas é um importante aspecto na análise não linear de perfis de aço formados a frio, já que diferentes considerações podem alterar de forma significativa os resultados dos modelos numéricos. Além disso, não existe consenso definido na literatura quanto à magnitude, forma e modo de aplicação das imperfeições geométricas iniciais nos modelos numéricos.

Dessa forma, o método para inserção de imperfeições geométricas nas análises realizadas nesta pesquisa será o mesmo utilizado por Maia (2012) e Chodraui (2006). Inicialmente, foi realizada uma análise de autovalor no Ansys, a fim de identificar os modos críticos de forma isolada para cada seção utilizada, sendo estes o modo local, flexo-torção e flexão. A partir das configurações deformadas para cada modo crítico, foram utilizados os valores de imperfeições apresentados por Schafer e Peköz (1998) para os modos local e de flexo-torção. Os valores adotados foram 0,14 t para o modo local, 0,64 t para o modo de flexo-torção e $L_{barra}/1.500$ para o modo de flexão. Em seguida, os modelos numéricos foram atualizados a partir das configurações deformadas corrigidas por esses fatores, de forma a obter uma nova geometria para os nós da malha de elementos finitos e sobrepor esses efeitos de imperfeições.

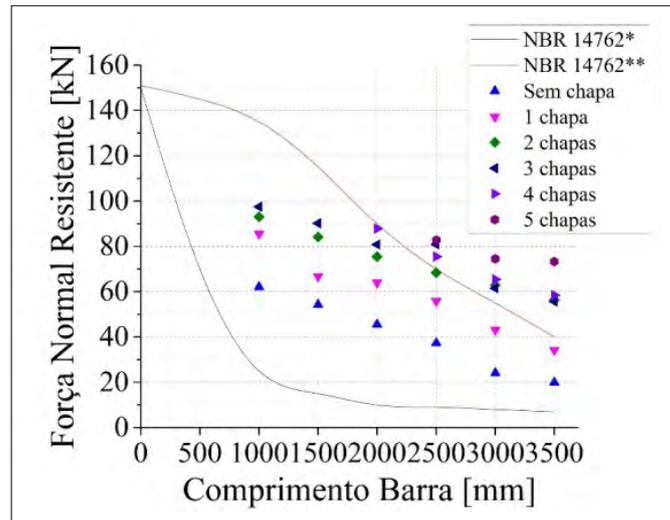
3 Resultados da pesquisa

Para cada uma das barras (2Le 70×17×1,20; 2Le 70×17×1,50 e 2Le 70×17×1,90) foi obtida, pelo método dos elementos finitos, a força normal resistente máxima, que em seguida foi comparada com os resultados da NBR 14762 (ABNT, 2010) em três situações: i) a força normal resistente correspondente ao dobro da resistência de uma seção isolada, com comprimento destravado igual ao comprimento total das barras, independentemente do número de travamentos; (ii) a força normal resistente correspondente ao dobro da resistência de uma seção isolada, mas considerando o comprimento destravado; e (iii) a força normal resistente máxima correspondente a seção dupla, levando em conta a interação completa entre as seções. No entanto, considerou apenas a flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto.

3.1 Seção dupla cantoneira 2Le 70×17×1,20

Na Figura 8 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica da seção 2Le 70×17×1,20 e o ganho de resistência com a inserção das chapas.

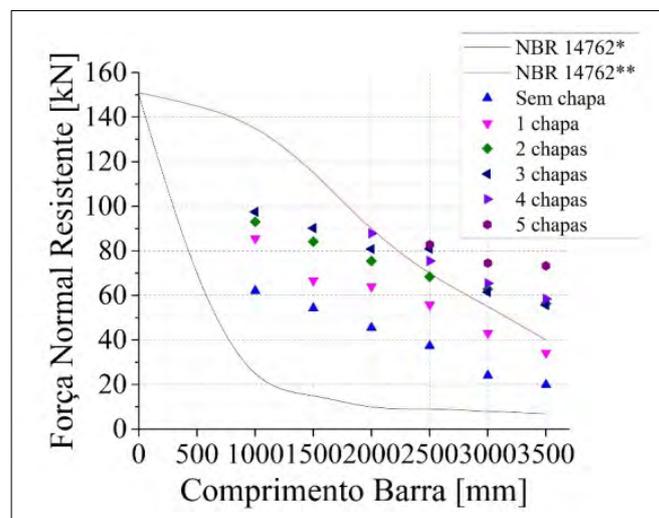
Figura 8 ►
Força normal resistente em relação ao número de travamentos.
Fonte: dados da pesquisa



Nota-se, a partir da Figura 8, um aumento significativo na força normal resistente com a adição de chapas ao longo do comprimento, sendo os maiores incrementos nos casos de uma e duas chapas adicionadas. O crescimento ainda é presente nos travejamentos seguintes, mas relativamente menor. Em alguns casos, há uma queda na força normal resistente para quatro chapas ao longo do comprimento. Provavelmente essa ocorrência se deve à mudança no modo de instabilidade, com a resistência voltando a crescer com a inserção do quinto e sexto travejamentos.

Na Figura 9 os resultados da análise numérica são comparados com os resultados extremos dos procedimentos adotados com base na NBR 14762 (ABNT, 2010), ou seja, no primeiro caso considerou-se seções isoladas com comprimento destravado igual ao comprimento total das barras – independentemente do número de travamentos – e no segundo caso considerou-se seção composta com interação completa.

Figura 9 ►
Força normal resistente em relação ao comprimento total da barra.
Fonte: dados da pesquisa

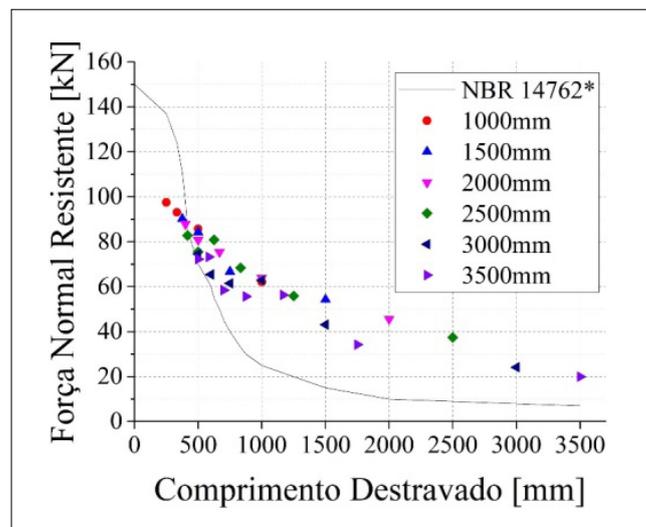


Legenda:
*ABNT NBR 14762:2010 [mín(flexão e flexo-torção)]
**ABNT NBR 14762:2010 (somente flexão)

Em relação ao procedimento que considerou as seções isoladas, com comprimento destravado igual ao comprimento total das barras, observou-se que este foi excessivamente conservador para todos os comprimentos. Já com relação ao procedimento que considerou seção composta, este foi contra a segurança para barras com menos de 2.000 mm e com quatro travamentos. No entanto, os resultados da força normal resistente ultrapassam o previsto pelo método com arranjos estruturais com comprimento a partir de 2.500 mm e mais de três chapas ao longo do comprimento.

A força normal resistente calculada em função do comprimento livre entre travamentos, tendo em vista o dobro da resistência de uma seção, foi comparada com a força normal resistente da análise numérica (Figura 10).

Figura 10 ►
Força normal resistente em
relação ao comprimento
destravado.
Fonte: dados da pesquisa



Legenda:

*ABNT NBR 14762:2010 [min(flexão e flexo-torção)]

Nesse caso (Figura 10), notou-se que a normativa brasileira subdimensiona a força resistente para comprimentos maiores. Entretanto, esse procedimento de cálculo mostrou-se próximo dos resultados obtidos para arranjos com distância entre chapas de aproximadamente 500 mm, estando a favor da segurança para todos os elementos com comprimento destravado maior que esse valor.

Por se tratar da seção de menor espessura (2Le 70×17×1,20), foi a única seção em que se observou a presença significativa do modo de instabilidade local, coincidentemente no arranjo de menor comprimento total e destravado. Já para as seções de maior comprimento, o comportamento manteve-se o mesmo: a adição de travamentos aumentou significativamente a força resistente máxima para cada comprimento, com o aumento sendo mais significativo nas primeiras conexões adicionadas.

Foi observada na maioria dos casos a sobreposição dos modos globais de flexão e de flexo-torção nas barras mais longas e com menos travamentos – comprimento livre menor que 700 mm, em média. A presença do modo local foi notada em barras mais curtas e com maior número de travamentos. Além disso, observou-se que o nível de tensões nas chapas separadoras – utilizadas como conexões – se manteve baixo, indo de acordo com os ensaios numéricos e experimentais de Maia (2012), nos quais a alteração da rigidez desses elementos pouco afetou a força normal excêntrica máxima. As Figuras 11 e 12 ilustram os modos de instabilidade observados nas análises e as tensões de Von Mises para a força normal resistente.

Figura 11 ▶

Modos de instabilidade e distribuição de tensões de Von Mises ($L = 1.000 \text{ mm}$): sem travamento (a), um travamento (b), dois travamentos (c) e três travamentos (d).

Fonte: dados da pesquisa

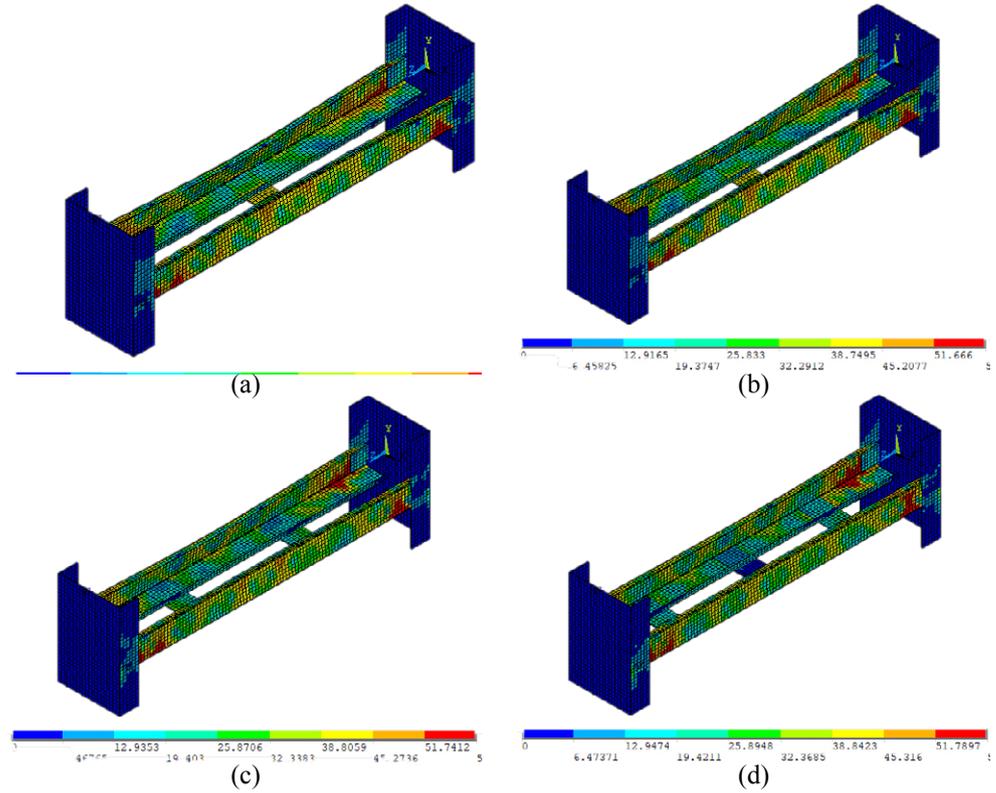
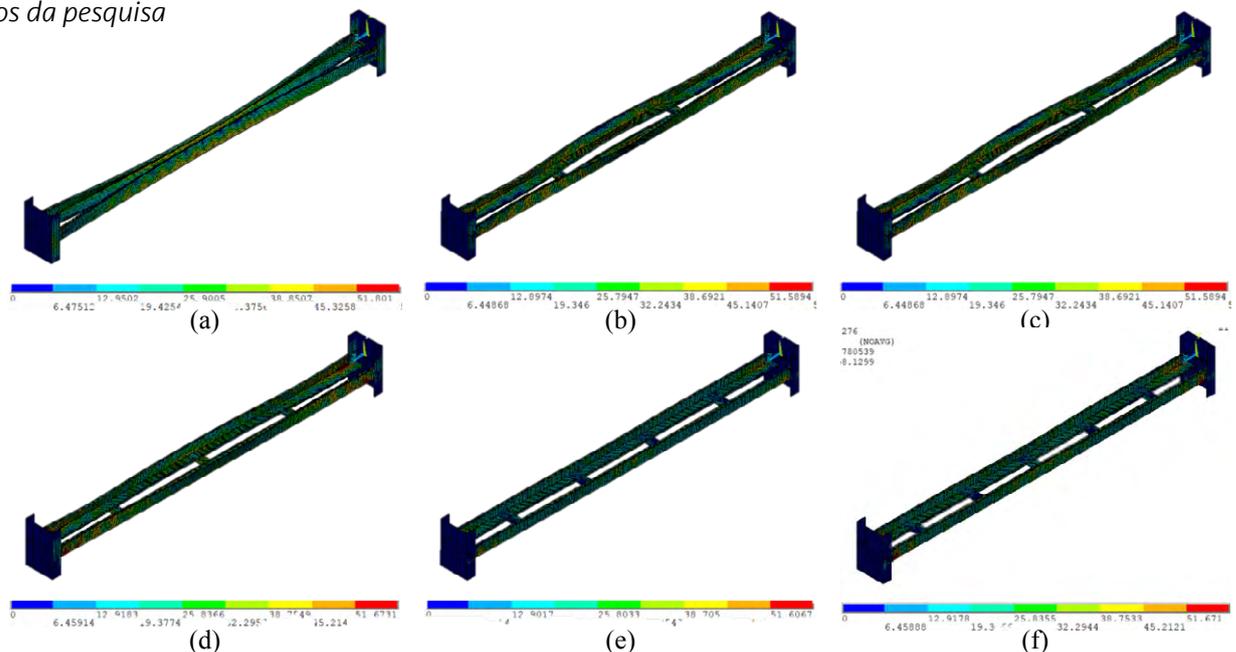


Figura 12 ▼

Modos de instabilidade e distribuição de tensões de Von Mises ($L = 2.500 \text{ mm}$): sem travamento (a), um travamento (b), dois travamentos (c), três travamentos (d), quatro travamentos (e) e cinco travamentos (f).

Fonte: dados da pesquisa



Sem travamentos, observa-se a presença crítica da flexo-torção e da flexão ao longo do comprimento da seção, caracterizada pelo processo de deslocamento e torção da seção transversal.

Com um travamento, observa-se a presença crítica da flexo-torção e da flexão ao longo do comprimento da seção, com o comprimento de semionda – característico da flexo-torção – sendo limitado pelo travejamento adicionado.

Com dois travamentos, observa-se a presença crítica da flexo-torção e da flexão ao longo do comprimento da seção, com o comprimento livre entre os dois travejamentos sofrendo processo de abertura da seção transversal, característico da flexo-torção.

Com três travamentos, observa-se a presença crítica da flexão ao longo do comprimento da seção, com o deslocamento da seção transversal e sem modificação significativa da seção em relação à torção.

Com quatro travamentos, observa-se a presença crítica da flexão ao longo do comprimento da seção, com o deslocamento da seção transversal e sem modificação significativa da seção em relação à torção.

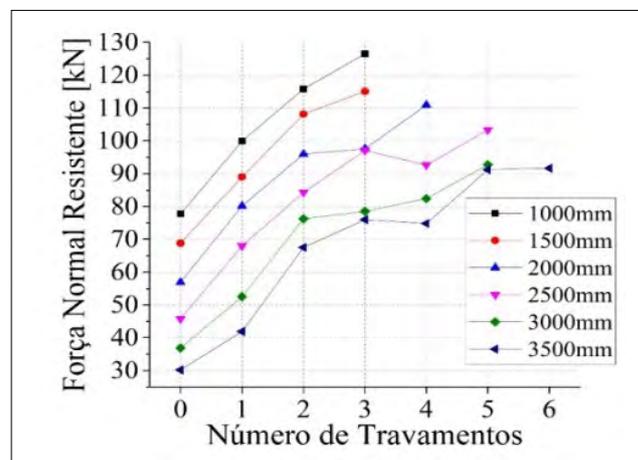
É comum, para configurações com quatro travejamentos, a existência da flexo-torção, notada pela torção da barra ao longo dos dois travejamentos centrais. Entretanto, essa configuração de tensões não se apresentou para o comprimento de 2.500 mm.

Por fim, com cinco travamentos, observa-se a presença crítica da flexão ao longo do comprimento da seção, com o deslocamento da seção transversal e sem modificação significativa da seção em relação à torção.

3.2 Seção dupla cantoneira 2Le 70×17×1,50

Na Figura 13 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica da seção 2Le 70×17×1,50 e o ganho de resistência com a inserção das chapas.

Figura 13 ►
Força normal resistente em relação ao número de travamentos.
Fonte: dados da pesquisa



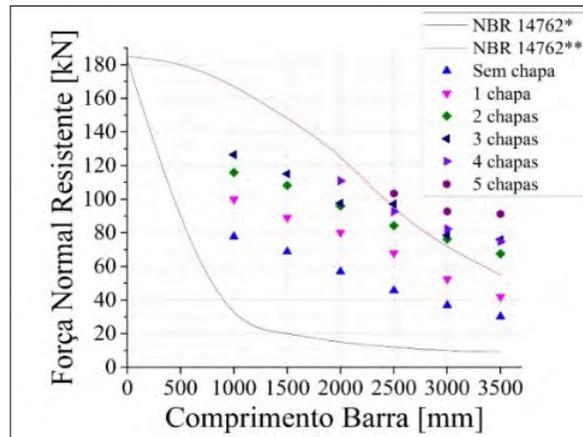
Nota-se novamente um aumento significativo na força normal resistente com a adição de chapas ao longo do comprimento, sendo os maiores incrementos nos casos de uma e duas chapas adicionadas. O crescimento ainda é presente nos travejamentos seguintes, mas relativamente menor. Em alguns casos, há uma queda na força normal resistente para três ou quatro chapas ao longo do comprimento – sendo essa ocorrência provavelmente devida à mudança no modo de instabilidade –, com a resistência voltando a crescer no quinto e sexto travejamentos adicionados.

Na Figura 14 os resultados da análise numérica são comparados com os resultados extremos dos procedimentos adotados com base na NBR 14762 (ABNT, 2010). Ou seja, o primeiro caso considerou seções isoladas com comprimento destravado igual ao comprimento total das barras, independentemente do número de travamentos, e o segundo caso considerou a seção composta com interação completa.

Figura 14 ►

Força normal resistente em relação ao comprimento total da barra.

Fonte: dados da pesquisa



Legenda:

*ABNT NBR 14762:2010 [mín (flexão e flexo-torção)]

**ABNT NBR 14762:2010 (somente flexão)

Observa-se que o procedimento que considerou seções isoladas se mostrou conservador, assim como aconteceu para a seção 2Le 70×17×1,20. O procedimento que considerou seção composta foi contra a segurança para barras menores que 2.000 mm e com quatro travamentos.

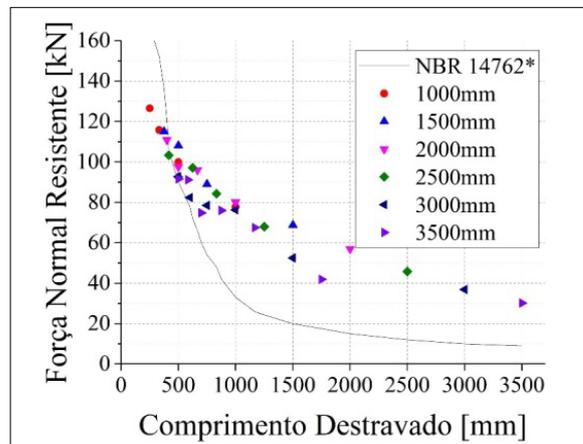
Os resultados da força normal resistente ultrapassam o previsto pelo procedimento para barras com comprimento a partir de 2.500 mm e mais de três chapas ao longo do comprimento.

A força normal resistente obtida em função do comprimento destravado foi comparada com a força normal resistente obtida na análise numérica, considerando o dobro da resistência de uma única seção (Figura 15).

Figura 15 ►

Força normal resistente em relação ao comprimento destravado.

Fonte: dados da pesquisa



Legenda:

*ABNT NBR 14762:2010 [mín (flexão e flexo-torção)]

Novamente, notou-se que o procedimento de cálculo subdimensiona a força resistente para comprimentos maiores. Entretanto, esse procedimento mostrou-se relativamente próximo dos resultados obtidos para arranjos com distância entre chapas de aproximadamente 500 mm, estando a favor da segurança para todos os elementos com comprimento destravado maior que esse valor.

Para todas as seções, o comportamento manteve-se o mesmo: a adição de travamentos aumentou significativamente a força resistente para cada comprimento, com o aumento sendo mais significativo nas primeiras conexões adicionadas. O modo de instabilidade foi predominantemente uma combinação entre a flexão e a flexo-torção, sendo a flexão

o principal modo de instabilidade nas configurações com comprimento livre menor que 700 mm, em média.

As Figuras 16 e 17 ilustram os modos de instabilidade observados nas análises e as tensões de Von Mises para a força normal resistente.

Figura 16 ► Modos de instabilidade e distribuição de tensões de Von Mises (L = 1.000 mm): sem travamento (a), um travamento (b), dois travamentos (c) e três travamentos (d).
Fonte: dados da pesquisa

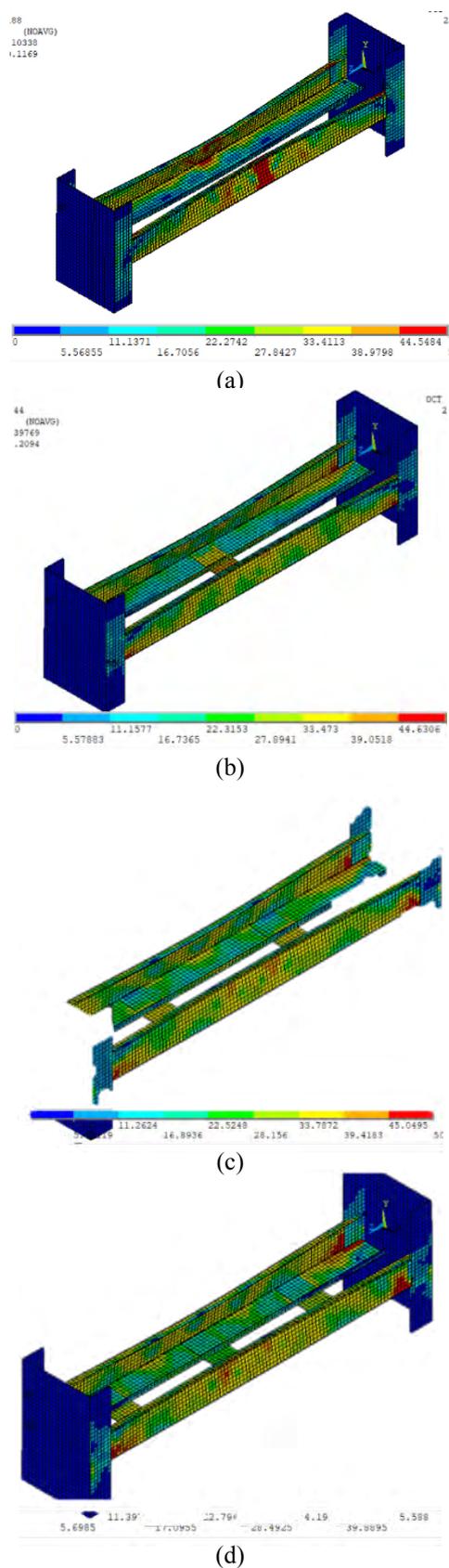
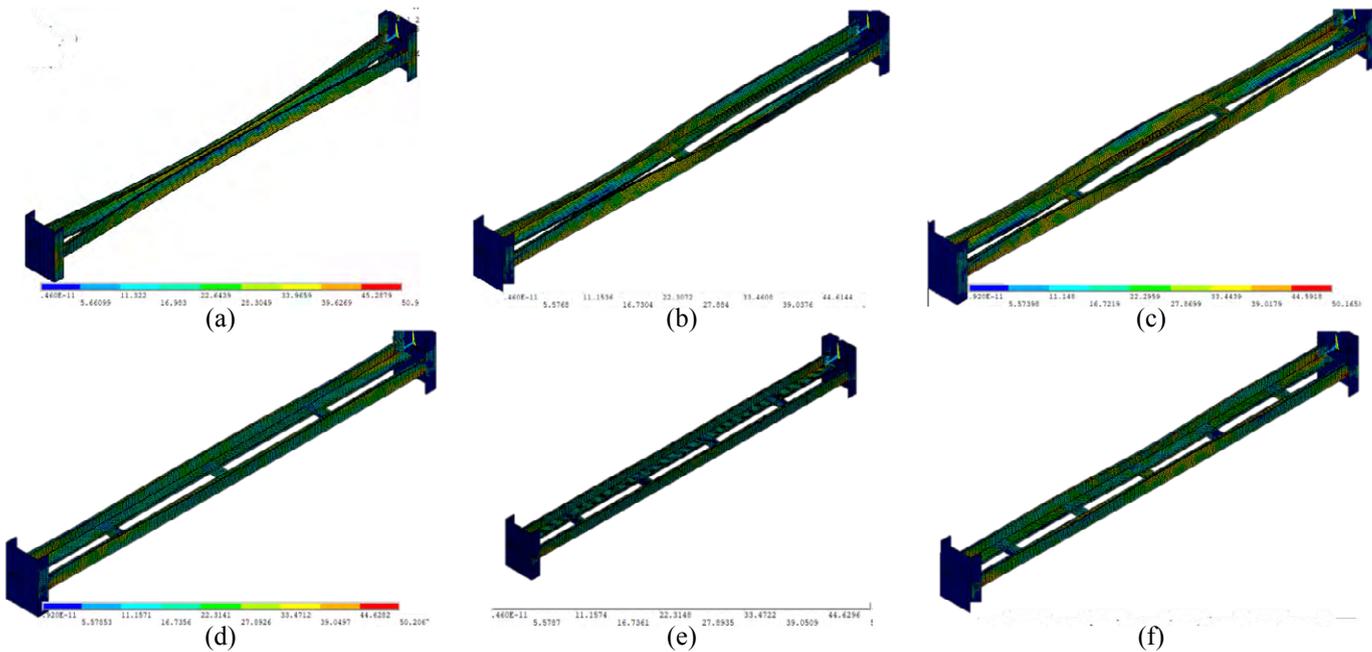


Figura 17 ▼

Modos de instabilidade e distribuição de tensões de Von Mises ($L = 2.500 \text{ mm}$):
 sem travamento (a),
 um travamento (b),
 dois travamentos (c),
 três travamentos (d),
 quatro travamentos (e)
 e cinco travamentos (f).
 Fonte: dados da pesquisa



Nas Figuras 16 e 17 é possível observar a presença de flexo-torção e da flexão ao longo do comprimento da seção quando esta não possui travamento. Essas peças são caracterizadas pelo processo de deslocamento e torção da seção transversal. Contudo, quando a peça não possui travamento, ainda apresenta flexo-torção e flexão ao longo de seu comprimento, porém com o comprimento de semionda (característico da flexo-torção) sendo limitado pelo travejamento adicionado.

Com a adição de novos travamentos, é possível notar a presença crítica da flexo-torção e da flexão quando utilizados dois travamentos ou três a cinco travamentos, respectivamente. Vale destacar que essa presença sempre ocorre entre os travamentos. Além do mais, com dois travamentos ocorre abertura da seção transversal, característica da flexo-torção. Para três a cinco travamentos, ocorre deslocamento da seção transversal e sem modificação significativa da seção em relação à torção.

É comum, para configurações com quatro travejamentos, a existência da flexo-torção, notada pela torção da barra ao longo dos dois travejamentos centrais. Entretanto, essa configuração de tensões não se apresentou para o comprimento de 2.500 mm.

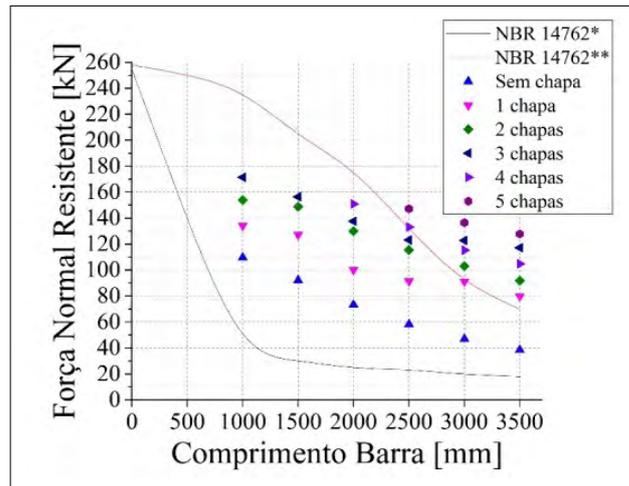
3.3 Seção dupla cantoneira 2Le 70×17×1,90

Na Figura 18 são apresentados os resultados obtidos na análise numérica da seção 2Le 70×17×1,90 e o ganho de resistência com a inserção das chapas.

Figura 18 ►

Força normal resistente em relação ao número de travamentos.

Fonte: dados da pesquisa



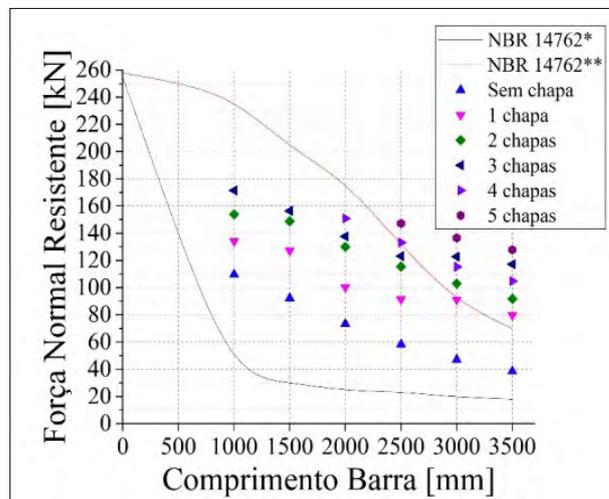
Conforme visto anteriormente, é possível visualizar um aumento significativo da força normal resistente com o aumento do número de travamentos. Além do mais, quanto maior o comprimento da peça, maior foi o aumento gerado. Vale destacar a perda de resistência quando adicionados quatro travamentos, o que provavelmente se deve à mudança no modo de instabilidade.

Na Figura 19 os resultados da análise numérica são comparados com os resultados extremos dos procedimentos adotados com base na NBR 14762 (ABNT, 2010). No primeiro caso considerou-se seções isoladas com comprimento destravado igual ao comprimento total das barras, independentemente do número de travamentos. No segundo caso considerou-se seção composta com interação completa.

Figura 19 ►

Força normal resistente em relação ao comprimento total da barra.

Fonte: dados da pesquisa



Legenda:

*ABNT NBR 14762:2010 [mín (flexão e flexo-torção)]

**ABNT NBR 14762:2010 (somente flexão)

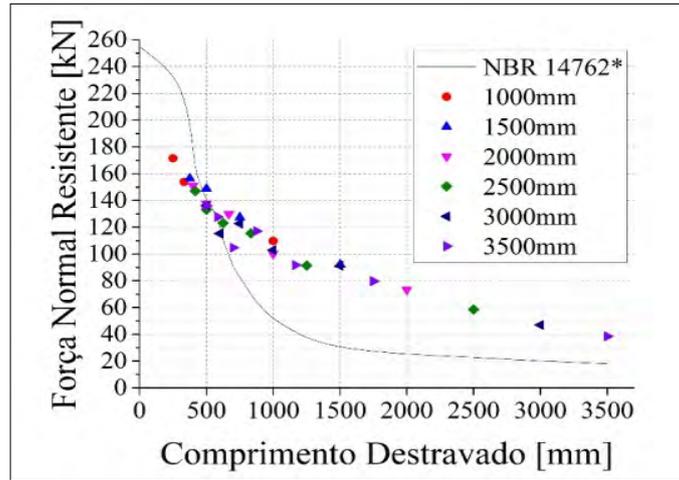
Como se pode notar na Figura 19, considerando seção composta, a normativa brasileira é contra a segurança para barras com menos de 2.000 mm e com quatro travamentos. Já analisando comprimentos superiores a 2.500 mm e com mais de três chapas, a normativa brasileira é a favor da segurança, visto que dimensiona valores de força normal resistente inferiores aos resistidos pelos perfis.

A Figura 20 apresenta os resultados da simulação numérica em comparação com a normativa brasileira em relação ao comprimento destravado. Para esse caso, foi considerado o dobro da resistência de uma única seção.

Figura 20 ►

Força normal resistente em relação ao comprimento destravado.

Fonte: dados da pesquisa



Legenda:

*ABNT NBR 14762:2010 [mín (flexão e flexo-torção)]

Conforme obtido anteriormente, neste caso a normativa brasileira também está a favor da segurança, estimando uma força normal resistente menor do que o real (obtido na simulação numérica). Entretanto, a normativa brasileira mostrou-se relativamente próxima dos resultados obtidos para arranjos com distância entre chapas de aproximadamente 500 mm, estando a favor da segurança para a maioria dos elementos com comprimento destravado maior que esse valor.

As Figuras 21 e 22 ilustram os modos de instabilidade observados nas análises e as tensões de Von Mises para a força normal resistente.

Figura 21 ►

Modos de instabilidade e distribuição de tensões de Von Mises (L = 1.000 mm): sem travamento (a), um travamento (b), dois travamentos (c) e três travamentos (d).

Fonte: dados da pesquisa

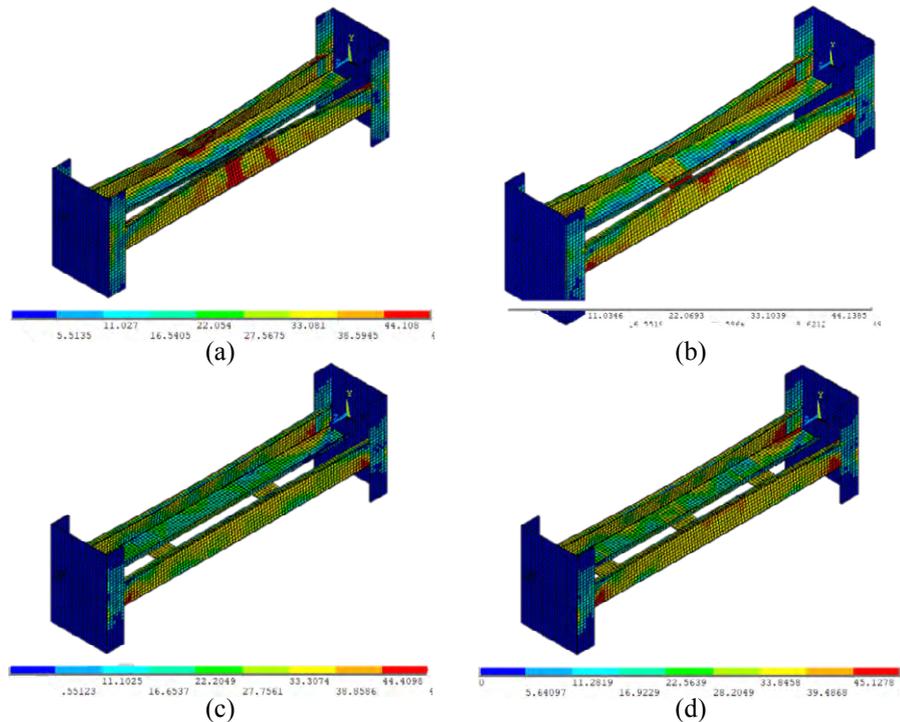
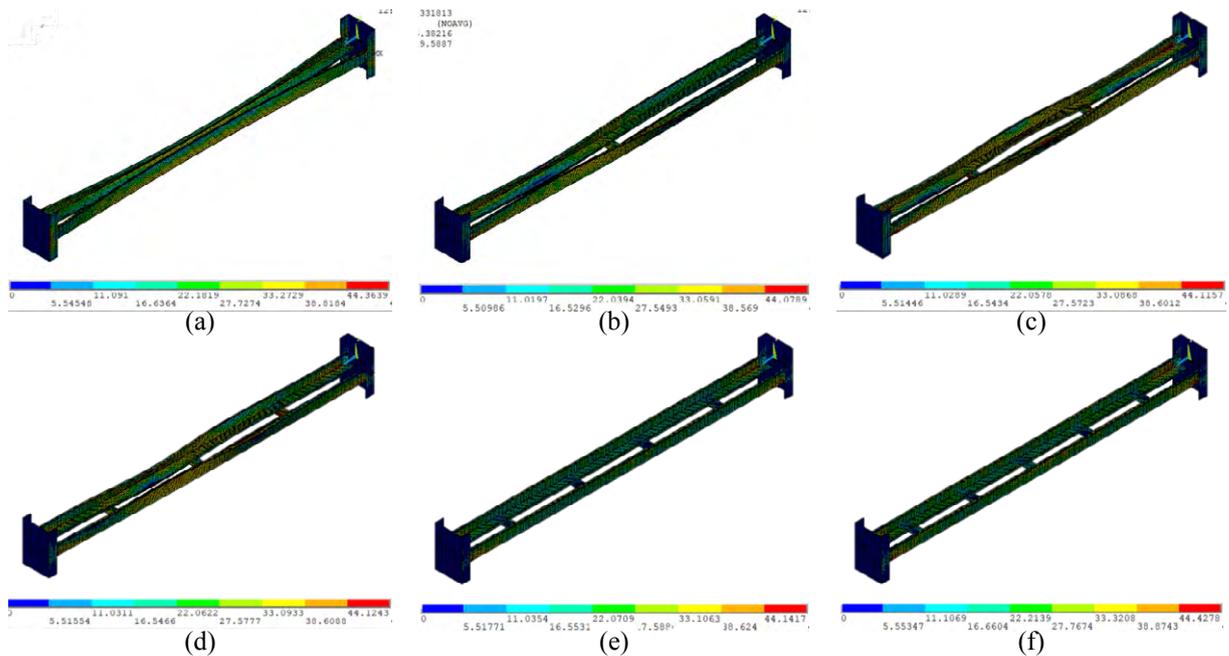


Figura 22 ▼

Modos de instabilidade e distribuição de tensões de Von Mises ($L = 2.500 \text{ mm}$):
 sem travamento (a),
 um travamento (b),
 dois travamentos (c),
 três travamentos (d),
 quatro travamentos (e)
 e cinco travamentos (f).
 Fonte: dados da pesquisa



A seção de maior espessura ($2L_e 70 \times 17 \times 1,90$) foi a única que apresentou tensões significativas nas chapas utilizadas como travamento. Entretanto, isso aconteceu apenas nas barras de menor comprimento (1.000 mm) com uma única ou duas chapas ao longo do comprimento. Para todos os outros arranjos, o comportamento manteve-se o mesmo: a adição de travamentos aumentou significativamente a força resistente máxima para cada comprimento, com o aumento sendo mais significativo nas primeiras conexões adicionadas. O modo de instabilidade predominante foi uma combinação entre a flexão e a flexo-torção, sendo a flexão o principal modo de instabilidade nas configurações com comprimento livre menor que 700 mm , em média.

Sem travamentos, observa-se a presença crítica da flexo-torção e da flexão ao longo do comprimento da seção, caracterizada pelo processo de deslocamento e torção da seção transversal. Com um travamento, observa-se a presença crítica da flexo-torção e da flexão ao longo do comprimento da seção, com o comprimento de semionda característico da flexo-torção sendo limitado pelo travejamento adicionado. Com dois travamentos, observa-se a presença crítica da flexo-torção e da flexão ao longo do comprimento da seção, com o comprimento livre entre os dois travejamentos sofrendo processo de abertura da seção transversal, característico da flexo-torção. Com três travamentos, observa-se a presença crítica da flexo-torção e da flexão ao longo do comprimento da seção, com o comprimento de semionda característico da flexo-torção

sendo limitado pelos travejamentos adicionados. Com quatro travamentos, observa-se a presença crítica da flexão ao longo do comprimento da seção, com o deslocamento da seção transversal e sem modificação significativa da seção em relação à torção.

É comum, para configurações com quatro travejamentos, a existência da flexo-torção, notada pela torção da barra ao longo dos dois travejamentos centrais. Entretanto, essa configuração de tensões não se apresentou para o comprimento de 2.500 mm. Por fim, com cinco travamentos, observa-se a presença crítica da flexão ao longo do comprimento da seção, com o deslocamento da seção transversal e sem modificação significativa da seção em relação à torção.

4 Conclusão

Por meio das simulações numéricas realizadas, foi possível observar que as barras submetidas à compressão excêntrica apresentam, em sua maioria, instabilidade por flexo-torção e flexão; no caso das barras mais curtas, observou-se, no modo de flexo-torção, comprimento de semionda limitado pelas chapas separadoras, enquanto as barras mais longas apresentaram instabilidade por flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto; a adição de chapas separadoras aumentou significativamente a força normal resistente dos elementos em relação às configurações sem travejamentos, sendo os arranjos com uma ou duas chapas os que mais aumentaram a resistência do conjunto; a posterior adição de mais travamentos continuou aumentando a força normal resistente, apesar de fazê-lo de forma menos eficiente na maioria dos casos. Observou-se também uma queda na resistência dos arranjos com quatro chapas em relação aos arranjos com três chapas separadoras para alguns comprimentos, o que indica a importância da presença de uma conexão no meio do comprimento.

Comparando-se os resultados obtidos com as hipóteses de cálculo propostas, foi possível concluir que o procedimento que se utilizou da resistência de uma seção dupla (seção composta) – utilizando apenas a flexão em relação ao eixo de menor inércia do conjunto com o procedimento da NBR 14762 (ABNT, 2010) – é a favor da segurança apenas para arranjos com comprimento maior que 2.500 mm e pelo menos três chapas separadoras.

Em relação ao método que considerou o dobro da resistência de uma única seção adotando o comprimento livre entre travamentos, com o procedimento da ABNT NBR 14762:2010, observou-se que este é próximo dos obtidos para arranjos com comprimento livre em torno de 500 mm e a favor da segurança para configurações com comprimento livre maior que esse.

Posto isso, entendemos a necessidade de um modelo de dimensionamento intermediário e próprio para o arranjo de cantoneiras enrijecidas compostas ligadas por travejamentos em quadro.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ANSYS. **Structural nonlinearities**: ANSYS Fluent User's Guide. Houston: Ansys Inc., 2013. v. 1. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2022.

CHODRAUI, G. M. B. **Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada e à flexão.**

2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/D.18.2003.tde-18072003-124917>.

MAIA, W. F. **Análise teórica e experimental de barras em dupla cantoneira de aço formada a frio submetidas à compressão**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/T.18.2012.tde-10102012-083428>.

MAIA, W. F. **Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/D.18.2008.tde-16052008-084426>.

MAIA, W. F.; VIEIRA JR., L. C. M.; SCHAFER, B. W.; MALITE, M. Experimental and numerical investigation of cold-formed steel double angle members under compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 121, p. 398-412, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.003>.

ROCHA, M. S. **Análise numérica de cantoneiras enrijecidas de aço formadas a frio submetidas à compressão**. Relatório de Iniciação Científica – PIBIC/UFSCar. São Carlos: UFSCar, 2017.

ROCHA, M. S.; MAIA, W. F. Análise numérica de cantoneiras enrijecidas de aço formadas a frio submetidas à compressão. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 8, n. 3, p. 360-379, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.17648/aco-2238-9377-8-3-2>.

SCHAFER, B. W.; PEKÖZ, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 47, n. 3, p. 193-210, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00007-8).

YOUNG, B. Experimental investigation of cold-formed steel lipped angle concentrically loaded compression members. **Journal of Structural Engineering**, v. 131, n. 9, p. 1390-1396, 2005. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:9\(1390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:9(1390))