

## Análise teórico-experimental de ligações parafusadas com enrijecedores de alma em perfis de aço formados a frio

(Theoretical-experimental analyses of bolted connection with web stiffeners in cold-formed steel profile)

Alexandre Camillo da Silva

*Engenheiro Civil, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Construção Metálica, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, Brasil  
E-mail: camilloweb@hotmail.com*

Arlene Maria Sarmanho Freitas

*D.Sc., Professora Adjunta, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Construção Metálica, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, Brasil  
E-mail: arlene@em.ufop.br*

### Resumo

Nesse trabalho, são apresentados estudos teórico-experimentais para avaliação do comportamento de uma tipologia, não padronizada, de ligação viga-coluna parafusada, utilizando seções transversais em perfis de aço formados a frio. O programa experimental consistiu na realização de quatro ensaios em quatro diferentes configurações de ligações viga-coluna e, para efeito de comparação, agrupadas em dois grupos: sem enrijecedores (SE) e com enrijecedores (CE) de alma soldados nos flanges da coluna. Os resultados experimentais permitiram determinar as curvas momento-rotação e rigidezes, bem como os momentos últimos e seus respectivos mecanismos de colapso. Verificou-se, também, que ao considerar a semicontinuidade - através dos enrijecedores de alma - entre as vigas separadas por uma coluna, o mecanismo de colapso muda e as ligações ficam mais resistentes e rígidas.

**Palavras-chave:** perfis formados a frio, ligações parafusadas, ligações semi-rígidas, enrijecedores de alma.

### Abstract

*This paper presents a theoretical-experimental study to evaluate the behavior of a non standard bolted beam-column connection in cold-formed steel profiles. The experimental program had four tests in four different beam-column connection configurations, grouped in two types in order to compare the differences: with (CE) and without (SE) column web stiffeners. The experimental results showed the moment-rotation curves, stiffnesses, ultimate moment and its respective collapse mechanism. It was observed that the beam-column connection with column web stiffeners have their collapse mode modified and their stiffness and strength increased.*

**Keywords:** Cold formed steel members, bolted connections, semi-rigid joints, web stiffeners.

## 1. Introdução

Um dos mais antigos e graves problemas sociais do Brasil é o déficit habitacional, que, immanentemente ligado às pessoas de baixo poder aquisitivo, mantém contingentes elevados da população a viver sem moradia adequada. Uma das alternativas para combater essa carência são os sistemas construtivos industrializados de baixo custo e rápida execução. Tais sistemas apresentam algumas vertentes, destacando-se, entre elas, aquelas que utilizam as estruturas metálicas em suas concepções. Dentro desse campo, construção metálica, os perfis de aço formados a frio apresentam grande versatilidade e, por possibilitarem um preço final altamente competitivo, sua utilização na construção civil vem crescendo ano após ano. Entretanto o uso racional das estruturas compostas por esses perfis exige a otimização estrutural, que envolve a concepção e, principalmente, o tipo de ligação.

As ligações entre elementos estruturais constituídos por perfis formados a frio podem ser soldadas ou parafusadas, podendo ser classificadas como rígidas, flexíveis ou semi-rígidas, em função do grau de rigidez que as mesmas apresentam. As ligações parafusadas, devido à flexibilidade e rapidez na montagem, vêm, progressivamente, ampliando seu uso na construção moderna, principalmente em ligações executadas no campo; comumente essas ligações apresentam um comportamento semi-rígido e, para que essa semi-rigidez seja utilizada, visando a um projeto mais econômico, faz-se necessário a determinação do seu nível de engastamento. Tal particularidade está condicionada à tipologia da ligação em estudo, levando a uma avaliação teórico-experimental da mesma, de forma a obter a resposta rotacional por meio da curva momento-rotação, pois cada tipo de ligação tem uma curva momento-rotação característica.

Durante as últimas décadas, diversas pesquisas sobre o comportamento de ligações semi-rígidas, envolvendo os perfis laminados ou soldados, foram realizadas, porém, em se tratando de perfis formados a frio, os estudos são mais re-

centes e seu número é relativamente reduzido. Assim, o presente trabalho analisa a utilização de ligações parafusadas em perfis formados a frio. Nele foram desenvolvidos estudos teórico-experimentais com o uso dos enrijecedores de alma nas ligações viga-coluna, a partir de uma tipologia de ligação apresentada por Moraes (2003), que agrega condicionantes construtivos e de montagem de estruturas em aço.

## 2. Desenvolvimento da ligação

As ligações foram baseadas no projeto arquitetônico da edificação de dois pavimentos pertencente ao projeto vencedor do 2º Prêmio Usiminas de Arquitetura em Aço - Habitação Popular - Projeto USIHAB. Toda edificação possui estrutura constituída por vigas e colunas em perfis de aço formados a frio. As ligações, desenvolvidas por Moraes (2003) e utilizadas no presente trabalho, são destinadas a conectar vigas de seção-caixa, com colunas de seção "I enrijecido".

A análise estrutural e o dimensionamento foram realizados, respectivamente, através dos softwares comerciais ANSYS Versão 6.0 (Ansys, 2001) e CFS Versão 4.14 (CFS, 2004), sendo o dimensionamento baseado nas prescrições da norma americana AISI (1996) (LRFD) e da norma brasileira NBR 14762:2001.

O sistema de ligação é composto por dois "U Suporte", soldados em cada um dos flanges da coluna; cada U Suporte recebe uma furação nas partes superior e inferior de seus flanges, cujo objetivo é fazer a conexão com a viga através de cantoneiras de ligação soldadas nessa viga. Essas cantoneiras, também, recebem a mesma furação do U Suporte, fazendo, assim, através de parafusos, a conexão de ambas as partes. Outros componentes desse tipo de ligação são os reforços internos em forma de "U simples", que são soldados na alma e no flange da coluna, e os enrijecedores de alma também soldados, na altura das linhas de furos do U Suporte. A Figura 1

mostra uma vista geral da ligação com a identificação dos componentes utilizados em todos os protótipos, bem como as dimensões dos mesmos, exceto das vigas, que variam as espessuras em função do protótipo. Os meios de ligação utilizados são parafusos ASTM A-325 de diâmetro 12,50 mm, sendo que a soldagem no contorno dos elementos, é do tipo filete, com eletrodos revestidos da classe E60XX, de acordo com a AWS D1.1:2000.

## 3. Programa experimental

O programa experimental consistiu na realização de quatro ensaios, sendo realizado um ensaio para cada protótipo. Os protótipos se diferenciaram pelas espessuras das vigas e, também, para efeito de comparação, pela presença ou não de enrijecedores de alma, soldados nos flanges da coluna.

Os ensaios foram realizados utilizando perfis em dimensões reais. O Protótipo B-SE é composto pela coluna de seção transversal "I enrijecido" 170x190x25x2,25 e por duas vigas de seção-caixa 150x120x20x2,00, parafusadas na coluna. O Protótipo B-CE tem configuração semelhante ao Protótipo B-SE, entretanto, como já mencionado, são soldados, na altura das linhas de furos do U Suporte, aos enrijecedores de alma, 4,75 mm, em ambos os lados da coluna. As fotos da Figura 2 mostram, em detalhe, a configuração das ligações dos protótipos B-SE e B-CE.

Os protótipos C-SE e C-CE têm configuração, respectivamente, semelhante aos protótipos B-SE e B-CE, se diferenciando somente pelas espessuras das vigas 01 e 02, que passam de 2,00 mm para 2,25 mm. A Tabela 1 sintetiza os protótipos ensaiados, identificando a nomenclatura, dimensões dos elementos utilizados e a presença ou não de enrijecedores.

O esquema de montagem foi o mesmo para todos os ensaios. Primeiramente foram posicionados, paralelos entre

si, três pórticos de reação, denominados PR01, PR02 e PR03, equidistantes de 1,0 m entre seus eixos. Em seguida, foram instalados dois acessórios de montagem: placa de base e placa de topo. O primeiro foi parafusado junto à laje de reação, ao passo que o segundo foi parafusado no pórtico de reação PR03. O objetivo desses acessórios foi tornar a coluna rigidamente presa em suas extremidades. Assim, após a fixação da coluna, dois trechos de vigas, denominados viga 01 e viga 02, foram conectados à coluna por meio de ligações parafusadas, entre as cantoneiras de ligação inferiores e superiores e os perfis U suportes. Em seguida, em cada um dos pórticos de reação PR01 e PR02, foram instalados sistemas de aplicação de carga. Um sistema de aplicação foi posicionado na extremidade da viga 01 e o outro, na extremidade da viga 02; cada um era composto por um pórtico de reação, um atuador hidráulico, uma célula de carga, uma rótula de carga e acessórios. Entre esses acessórios, utilizou-se uma placa, chamada Placa de Carga, com espessura de 10 mm, que foi instalada entre a viga e o sistema de aplicação. Essa placa tinha a finalidade de distribuir o carregamento em uma maior região do flange e da alma, diminuindo o nível de concentrações de tensões na região de aplicação do carregamento.

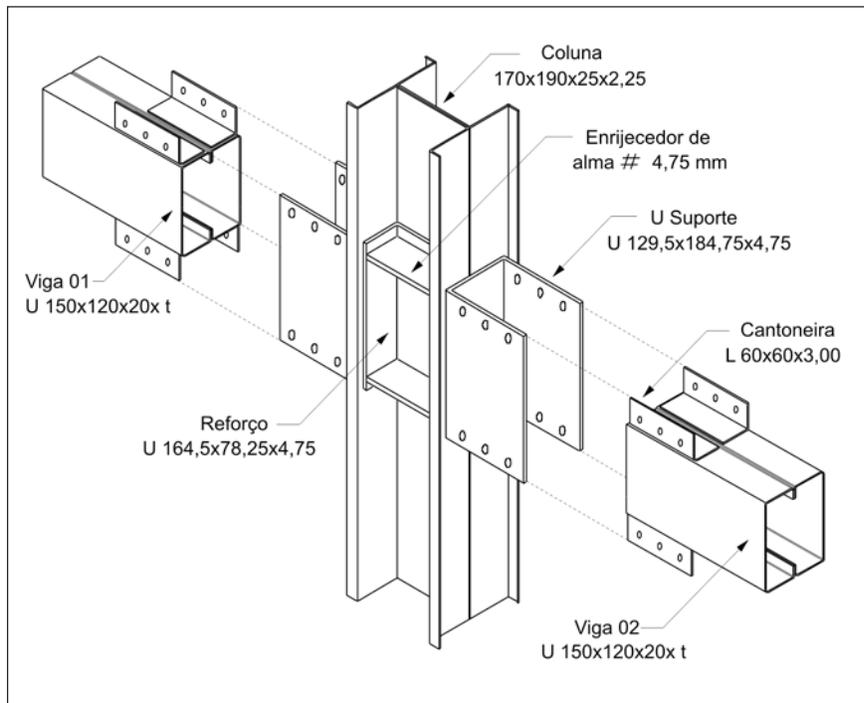
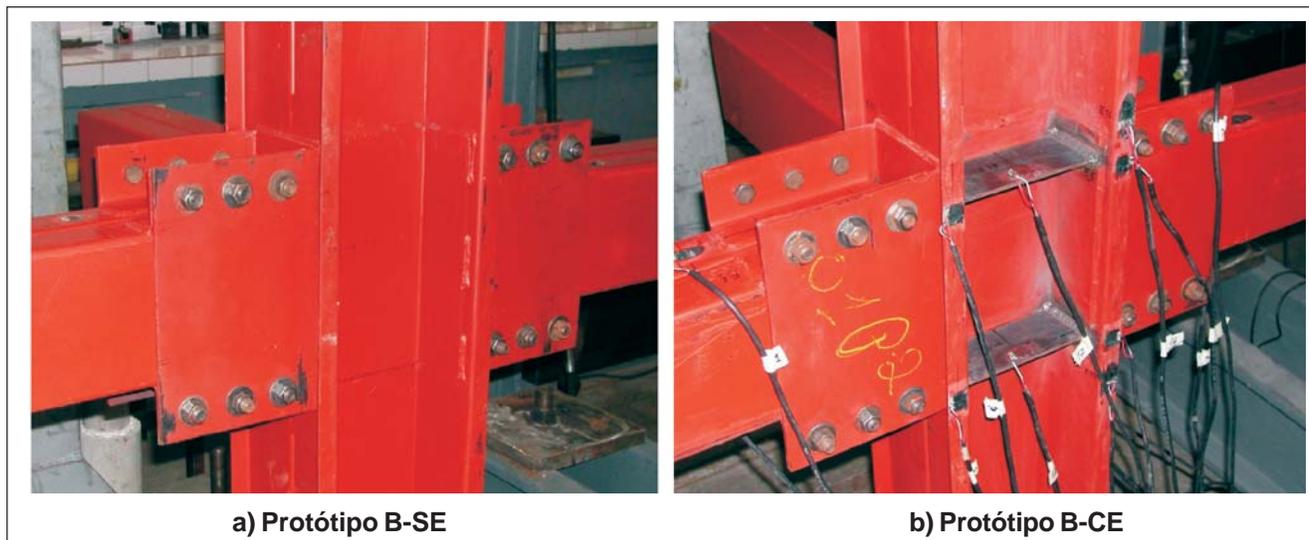


Figura 1 - Vista geral da ligação.

Tabela 1 - Protótipos ensaiados.

Protótipo	Dimensões (mm)		Enrijecedores de alma
	Coluna	Vigas	
B-SE	170x190x25x2,25	150x120x20x2,00	sem
B-CE	170x190x25x2,25	150x120x20x2,00	com
C-SE	170x190x25x2,25	150x120x20x2,25	sem
C-CE	170x190x25x2,25	150x120x20x2,25	com



a) Protótipo B-SE

b) Protótipo B-CE

Figura 2 - Configuração das ligações ensaiadas. a) Protótipo B-SE; b) Protótipo B-CE.

Na instrumentação dos protótipos, foram utilizados LVDT's (Load Variational Displacement Transducers) e defletômetros mecânicos, para medição dos deslocamentos das vigas e da coluna, extensômetros elétricos de resistência (EER), para medição das deformações específicas, em pontos previamente definidos, na região da ligação. O sistema de aquisição de dados, provenientes das células de cargas, LVDT's e extensômetros elétricos de resistência, foi o Spider8 da HBM, onde foram utilizados cinco módulos de aquisição, conectados a um computador Pentium III de 900 MHz e controlados pelo software HBM Catman 4.5. A Figura 3 ilustra o sistema de montagem e o posicionamento dos LVDT's e defletômetros dos ensaios CE, sendo similar ao esquema para os ensaios SE.

Inicialmente foi realizado um pré-ensaio, dentro da fase elástica do material, com o objetivo de retirar as folgas existentes de montagem e de verificar o funcionamento dos sistemas de aquisição de dados e dos equipamentos utilizados. Como pode ser visto na Figura 3, foram utilizados atuadores hidráulicos independentes para a viga 01 e para a viga 02, porém as cargas foram iguais e aplicadas simultaneamente - carregamento balanceado.

Após o pré-ensaio, foram aplicados carregamentos incrementais, com aproximadamente 1,00 kN a cada passo de carga, até que fosse atingido o colapso do protótipo. Ao final de cada passo, eram lidos os defletômetros e computados os dados por meio do sistema automático de aquisição de dados. Assim, com a obtenção, ajuste e tratamento desses resultados, gerou-se a curva momento-rotação do protótipo em estudo. A foto da Figura 4 expõe uma vista geral de um ensaio realizado.

#### 4. Resultados

As curvas momento-rotação dos protótipos ensaiados foram determinadas através dos momentos-fletores para cada passo de carga e as suas respecti-

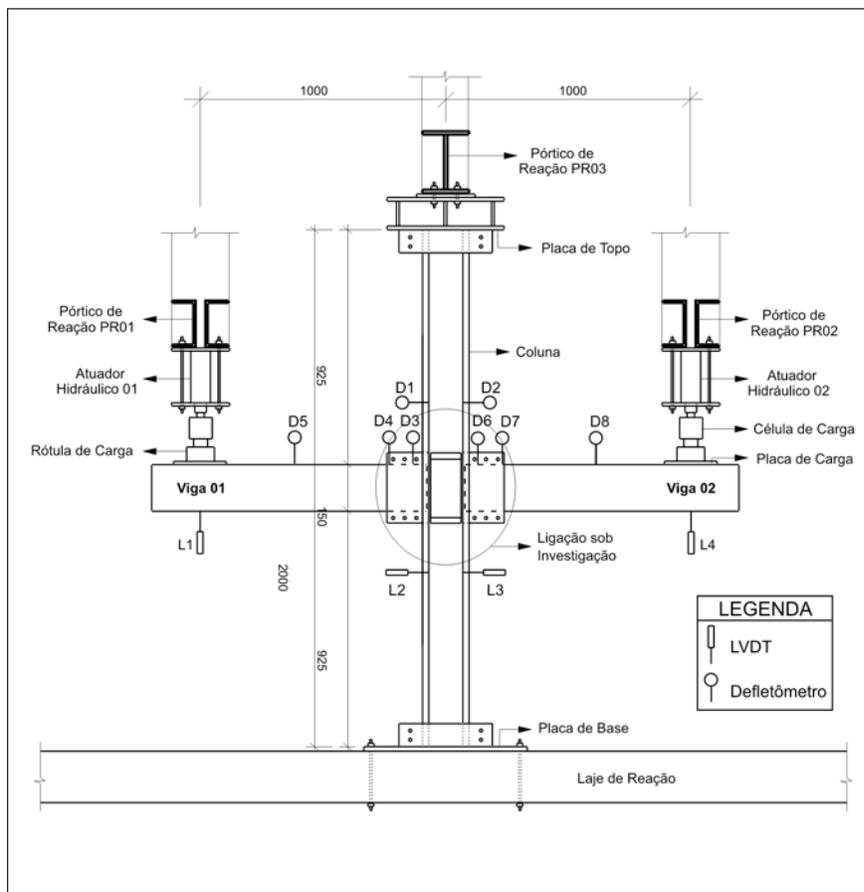


Figura 3 - Esquema de montagem dos protótipos B-CE e C-CE.



Figura 4 - Vista geral do ensaio.

vas rotações relativas. Os momentos-fletores foram definidos multiplicando a carga aplicada na viga pela distância entre o ponto de aplicação da mesma e a face da coluna. Como o carregamento foi simétrico, não houve rotação da coluna em relação às vigas e as rotações relativas, utilizadas para cada passo de carga, foram somente as rotações das vigas. Essas rotações relativas foram calculadas a partir das inclinações da viga em relação ao seu eixo reto, com ajuste linear a cada passo de carga pelo método dos mínimos quadrados. As Figuras 5 e 6 ilustram as medições das cargas versus deslocamentos para o ensaio do protótipo B-CE pelos quais, segundo o procedimento anteriormente descrito, foram determinadas as curvas momento-rotação. Os valores das rigidezes são calculados utilizando o Método da Inclinação Inicial que consiste em traçar uma reta passando pela origem da curva mo-

mento-rotação e interceptando a mesma no seu trecho inicial.

As curvas momento-rotação (Figura 7 e 8) ilustram os ganhos de resistência das ligações com enrijecedores a partir da comparação das ligações sem enrijecedores.

Observou-se que o mecanismo de colapso ocorrido nos protótipos sem enrijecedores, B-SE e C-SE, foi caracterizado pelo precoce escoamento e posterior plastificação dos enrijecedores (de borda) da coluna na região da ligação. A Figura 9 ilustra o mecanismo desenvolvido para o ensaio B-SE. Atentou-se, também, que, a cada incremento de carga, os flanges da coluna foram se deformando, na altura da linha superior e inferior do U Suporte, ocorrendo, assim, uma alteração de forma na região da ligação. Já os protótipos com enrijecedores, B-CE e C-CE não apresentaram

escoamento na coluna, como também não houve alteração de forma na região da ligação. Dessa forma, não ocorreu o colapso precipitado e a capacidade resistente da ligação aumentou consideravelmente. A Figura 10 ilustra o mecanismo de colapso por rasgamento da solda no ensaio do protótipo B-CE. O resumo dos resultados está na Tabela 2, onde se têm o momento último experimental, o momento de colapso e as rigidezes para cada protótipo.

## 5. Discussão e considerações finais

As ligações representam uma parcela significativa no custo das estruturas de aço. Assim o objetivo dos ensaios realizados nesse trabalho foi avaliar a viabilidade, a resistência e o comportamento das ligações viga-coluna parafusadas

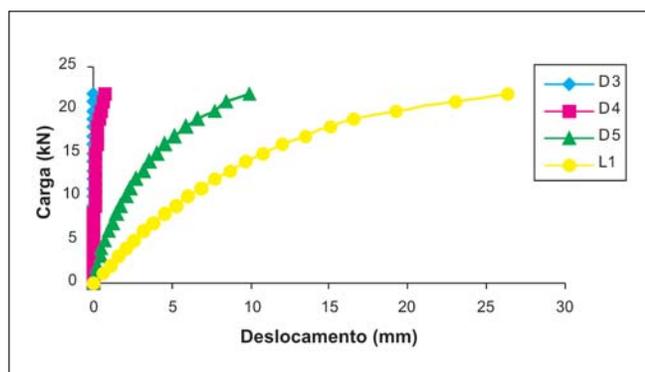


Figura 5 - Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 01 -Protótipo B-CE.

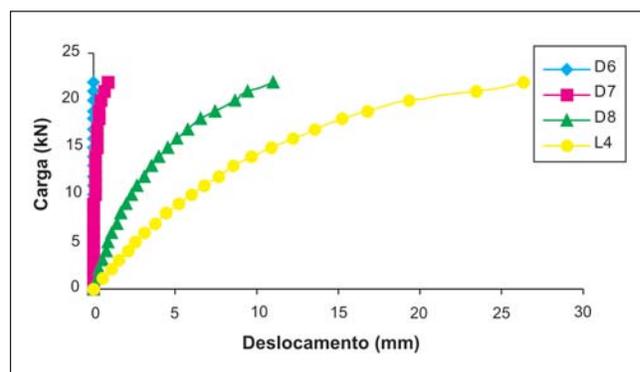


Figura 6 - Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 02 -Protótipo B-CE.

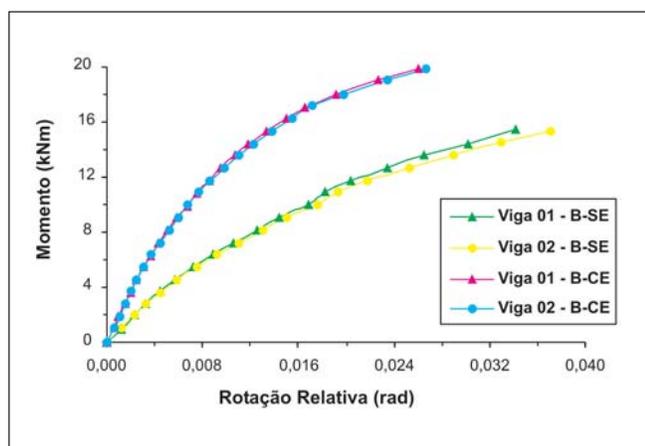


Figura 7 - Curvas momento-rotação dos protótipos B-SE e B-CE.

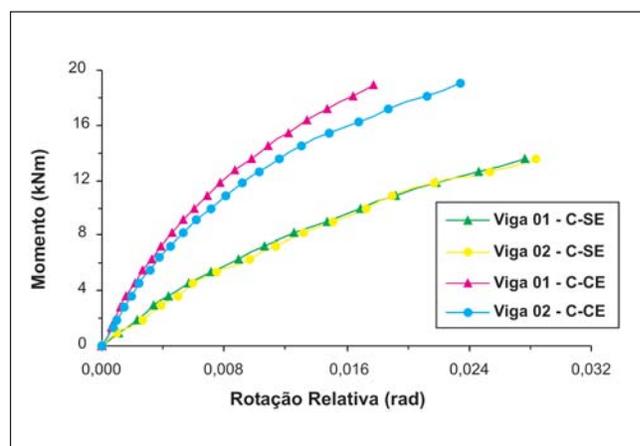


Figura 8 - Curvas momento-rotação dos protótipos C-SE e C-CE.

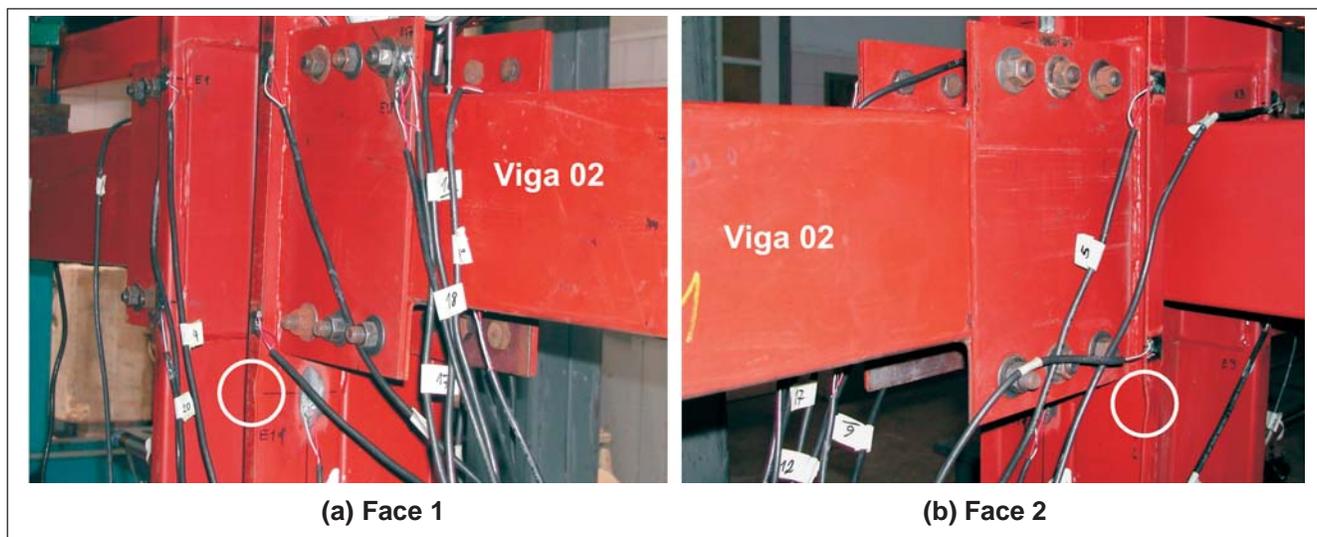


Figura 9 - Mecanismo de plastificação nos enrijecedores de borda da coluna - Viga 02 do ensaio do protótipo B-SE.

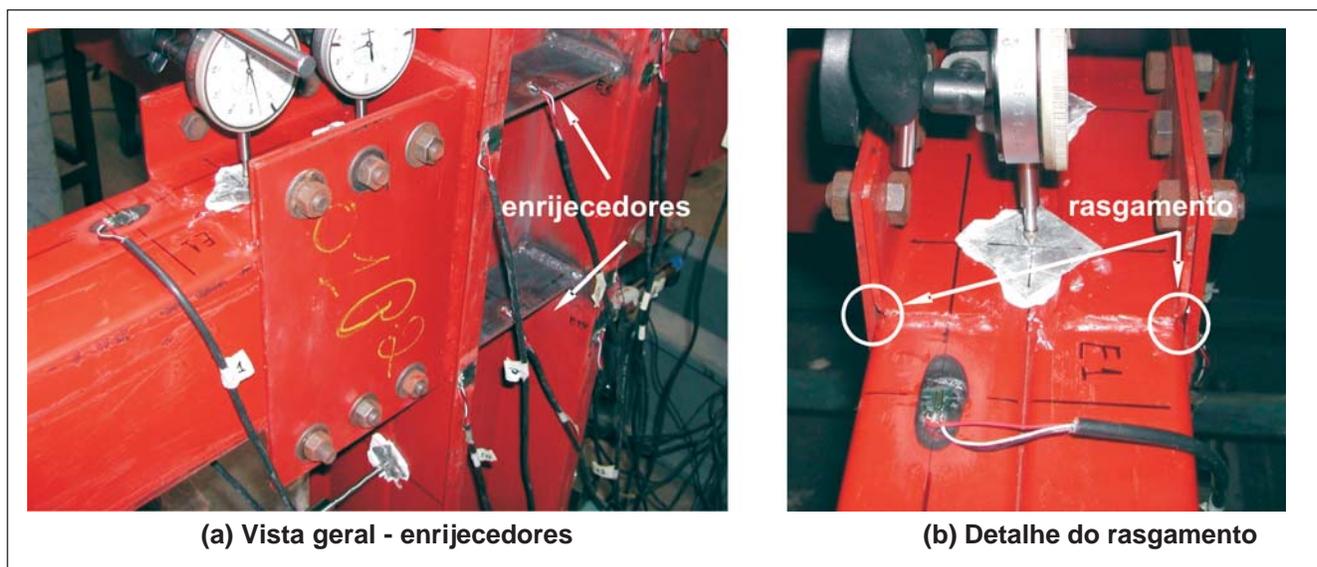


Figura 10 - Fotos que mostram os enrijecedores de alma e o colapso por rasgamento das cantoneiras de ligação superiores da viga 01 para o ensaio do protótipo B-CE.

Tabela 2 - Principais resultados obtidos nos ensaios.

Protótipo	Ligação	Momento Último (kNm)	Momento de Escoamento (kNm)	Rigidezes (kNm/rad)	$K_o$ (média) (kNm/rad)
B-SE	Viga 01 - Coluna	15,44	-	819,84	811,40
	Viga 02 - Coluna			802,95	
B-CE	Viga 01 - Coluna	19,87	14,46	1882,17	1838,94
	Viga 02 - Coluna			1795,71	
C-SE	Viga 01 - Coluna	13,55	8,14	825,11	787,85
	Viga 02 - Coluna			750,59	
C-CE	Viga 01 - Coluna	19,00	16,11	2137,98	2013,60
	Viga 02 - Coluna			1889,22	

em perfis formados a frio. No dimensionamento prévio da tipologia apresentada, ponderou-se a necessidade dos enrijecedores de alma na região da ligação, porém, para fins comparativos, foram testados, também, protótipos sem enrijecedores.

Os ensaios experimentais evidenciaram que a inclusão dos enrijecedores de alma, na região da ligação, restringe a deformação exposta nos flanges da coluna, diminui a concentração de tensões nas bordas da mesma e altera o mecanismo de colapso. Dessa forma, os enrijecedores que diferiram os protótipos B-SE do B-CE impediram o colapso prematuro da ligação, tendo, como consequência direta, o aumento de rigidez em 127%; já os protótipos C-SE e C-CE, onde as vigas são mais espessas, o aumento foi de 156%. Esses resultados ratificam que, ao considerar a semicontinuidade entre as vigas separadas por uma coluna, quer seja com enrijecedores de alma, como no presente trabalho, quer seja com laje de concreto incorporada às vigas, como as ligações mistas de Cabral (2004), o mecanismo de colapso muda e as ligações ficam mais resistentes e rígidas, ou seja, prever ligações com enrijecedores de alma na coluna, ou, ainda, ligações mistas, significa, na maioria das vezes, estar buscando o equilíbrio entre economia e eficiência estrutural.

As ligações com enrijecedores ensaiadas mostraram-se eficientes, entretanto, para que esses resultados possam ser utilizados num projeto final, torna-se necessária a execução de uma maior série de ensaios, a fim de se aferirem tais valores.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à empresa USIMINAS.

## 7. Referências bibliográficas

- AISI. *Cold formed steel desing manual*. Washington, DC: American Iron and Steel Institute, 1996.
- ANSYS. *User's manual for revision 6*. Swanson Analysis Systems Inc., Houston, PA, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio*. NBR 14762. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- CABRAL, J.B. *Análise teórico-experimental de ligações mistas em perfis formados a frio*. Ouro Preto: PROPEC/UFOP, 2004. (Dissertação de Mestrado).
- CABRAL, J.B., FREITAS, A.M.S. Análise teórico-experimental de ligações mistas em perfis formados a frio. *REM - Revista Escola de Minas*, v. 59, n. 1, p. 89-95, 2006.
- CFS. RSG Software, Inc. <http://www.rsgsoftware.com>, 2004.
- CHUNG, K.F., LAU, L. Experimental investigation on bolted moment connections among cold formed steel members. *Engineering Structures*, v. 21, p. 898-911, 1999.
- CHUNG, K.F., LAWSON, R.M. Structural performance of shear resisting connections between cold-formed steel sections using web cleats of cold-formed steel strip. *Engineering Structures*, v. 22, p. 1350-1366, 2000.
- CHUNG, K.F., IP, K.H. Finite element investigation on the structural behaviour of cold-formed steel bolted connections. *Engineering Structures*, v. 23, p. 1115-1125, 2001.
- FREITAS, A.M.S., MORAIS, C.S., RIBEIRO, L.F.L. Theoretical-experimental analysis of bolted beam-column connections in cold formed steel members. In: Eurosteel 2005 - 4th European Conference on steel and composite structures, masstricht: B, Hoffmeister and O, Hechler, v.A, p. 93-100, 2005.
- Hottinger Baldwin Messtechnik. *Manual de operação Spider8 e Spider8-30*, HBM, 2003a.
- Hottinger Baldwin Messtechnik. *Catman 4.5*, HBM Software, Operating Manual, 2003b.
- MORAIS, C.S. *Estudo teórico-experimental de ligações parafusadas em perfis formados a frio*. Ouro Preto: PROPEC/UFOP, 2003. (Dissertação de Mestrado).
- MORAIS, C.S., SILVA, A.C., RIBEIRO, L.F.L., CABRAL, J.B., FREITAS, A.M.S. Análise teórico-experimental de ligações parafusadas em perfis formados a frio. *REM - Revista Escola de Minas*, v. 58, n. 4, p. 347-353, 2005.
- SHAKOURZADEH, H., GUO, Y.Q., BATOZ, J.L. Modeling of connections in the analyses of thin-walled space frames. *Computers and Structures*, v. 71, p. 423-433, 1999.
- SILVA, A.C. *Estudo de ligações parafusadas em perfis formados a frio*. Ouro Preto: PROPEC/UFOP, 2006. (Dissertação de Mestrado).
- USIHAB. *Projetos Arquitetônicos do Projeto USIHAB*. Belo Horizonte, 2001.
- WONG, M.F., CHUNG, K.F. Structural behaviour of bolted moment connections in cold-formed steel beam-column sub-frames. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 58, p. 253-274, 2002.
- WONG, M.F., CHUNG, K.F., YU, W.K. Analysis of bolted moment connections in cold-formed steel beam-column sub-frames. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 61, p. 1332-1352, 2005.

Artigo recebido em 28/08/2007 e aprovado em 13/03/2008.

**REM - Revista Escola de Minas**  
**72 anos**  
**divulgando CIÊNCIA.**