

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS DE SEÇÃO “I” em PERFIL FORMADO A FRIO COM EMENDAS SOLDADAS¹

Gregório Sandro Vieira²
Orlando Ferreira Gomes³
Daniela C. Lemes David⁴
Andrea Prado Abreu Reis³

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo experimental de vigas, em perfil formado a frio, submetidas a flexão simples. As vigas eram compostas por dois perfis U metálicos, sendo uma série formada por perfis do tipo “U” simples e outra, por perfis do tipo “U” enrijecido, ambos soldados pela alma formando um “I”. Em cada série foram analisadas três vigas, sendo uma com emenda e as demais com emendas de topo e emendas por trespasses. Os resultados dos ensaios para as vigas sem emenda foram comparados com os resultados teóricos, propostos pela NBR14762, e serviram de parâmetro para a comparação do comportamento destas vigas, com o das vigas que receberam emendas. Também foi feita uma comparação entre a capacidade das duas séries, mostrando o ganho de resistência que se tem com o enrijecimento das mesas dos perfis.

Palavras-chave: Perfil formado a frio; Emendas; Flexão.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF BEAMS OF SECTION “I” IN FORMED PROFILE THE COLD WITH WELDED EMENDATIONS

Abstract

This paper presents an experimental study of beams in cold-formed profile, subjected to bending. The beams were composed of two U shaped profile, being formed by a series of profiles such as "U" and other simple, for profiles of type "U" hardened, both soldiers in the soul forming an "I". In each series were analyzed three beams, one with an amendment and other amendments to top and amendments for trespass. Test results for beams without amendment were compared with the theoretical results proposed by NBR14762, and served as a parameter to compare the behavior of these beams, the beams that were amended. Also a comparison was made between the ability of the two series, showing the strength increase that has tables with the stiffening of the profiles..

Key words: Cold-Formed Steel Members; Emendations; Flexural.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Mestre em Engenharia Civil pela UFG e Doutorando do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ

³ Doutor em Engenharia Civil pela USP/EESC e Professor da Escola de Engenharia Civil da UFG

⁴ Doutora em Engenharia Civil pela USP/EESC e Eng. da IEME Brasil Engenharia Consultiva-São Paulo/SP

1 INTRODUÇÃO

As estruturas em perfis de aço formados a frio são uma boa opção estrutural para galpões, silos, coberturas, torres, pequenos edifícios, dentre outros. Devido a alta relação inércia/peso essas estruturas podem vir a ser mais econômicas que as estruturas em concreto ou em perfis laminados e soldados.

Uma das características desses perfis é sua elevada esbelteza, tornando-os suscetíveis a modos de instabilidade, como a flambagem local, distorcional e global. A determinação da força resistente deste tipo de perfil está diretamente relacionada com a análise de sua estabilidade.

Motivados por uma maior lucratividade em função da redução de custos, muitos fabricantes se utilizam da união de partes de perfis para um aproveitamento máximo das peças em estoque.

Visando avaliar o comportamento de vigas com e sem emenda, foram realizados ensaios experimentais em vigas metálicas, bi-apoiadas, de seção transversal do tipo “I”, em região de flexão pura. Foram avaliadas duas séries de vigas, uma formada pela união de perfis formados a frio do tipo “U” e outra do tipo “U enrijecido”. Em cada série foram ensaiadas três vigas, a primeira com emenda de topo no meio do vão, a segunda com emenda de topo em pontos distintos dos perfis, e a terceira sem emenda. Os resultados experimentais foram comparados aos teóricos, calculados pelo Método da Largura Efetiva e o Método da Resistência Direta, ambos presentes na NBR 14762:2010.⁽¹⁾

O Método da Largura Efetiva é um método aproximado que analisa cada elemento de forma isolada, levando em consideração as condições de contorno com as outras chapas componentes do perfil. Este método foi originalmente proposto por von Kármán, Secheler e Donnell.⁽²⁾ e posteriormente modificado e ajustado através de dados experimentais por Winter.⁽³⁾ O método consiste em diminuir as larguras dos elementos submetidos totalmente ou parcialmente a tensões de compressão e calcular, com as novas larguras, as novas propriedades geométricas da seção transversal. Com isso, as propriedades geométricas efetivas do novo perfil são utilizadas para a análise, considerando a resistência pós-flambagem dos elementos.

Algumas desvantagens desse método são: necessidade de se realizar cálculos iterativos e a dificuldade de incluir no cálculo o modo de flambagem distorcional.

Schafer e Peköz⁽⁴⁾ desenvolveram novo procedimento de cálculo para os perfis formados a frio, o Método da Resistência Direta (MRD). Neste método é necessário determinar as cargas críticas de flambagem elástica do perfil como um todo e utilizando esta informação, junto com uma série de curvas de resistência, determinar a resistência última do perfil.

O MRD considera a interação entre as chapas que compõem o perfil, o que não é feito no método das larguras efetivas, já que neste método cada chapa é analisada isoladamente. A análise é feita em relação às propriedades geométricas da seção bruta, não necessitando recalculas as propriedades da seção. Apresenta ainda a grande vantagem de permitir considerar explicitamente o modo distorcional.

Para determinação da carga crítica de flambagem elástica pode-se utilizar o programa computacional CU-FSM, desenvolvido por Shafer e disponível no endereço eletrônico www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/.⁽⁵⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

O programa experimental compôs-se de duas séries de ensaios de vigas em perfil formado a frio submetidas a flexão. A primeira série, VA, era formada por vigas de seção I, composta por dois perfis U, soldados pela alma. A segunda série, VB, era também formada por vigas de seção I, porém composta por dois perfis U enrijecidos. Em cada série foram avaliadas três vigas, uma sem emenda e as demais com emenda central e em trespasse.

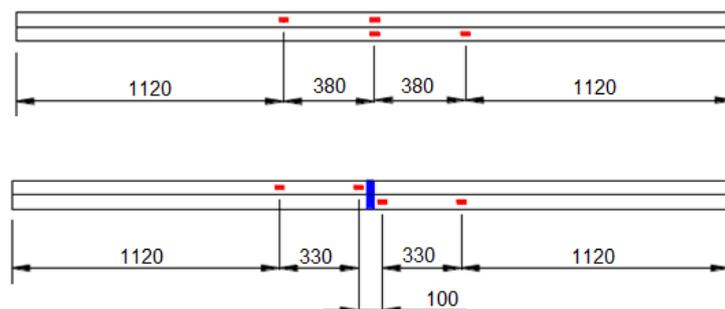
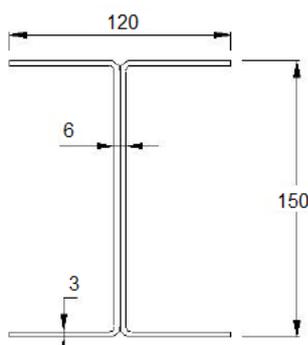
As vigas possuíam 3.000 mm de comprimento e foram ensaiadas na condição bi-apoiada, resultando 2.850 mm entre eixos dos apoios. Foi disposta uma viga de transmissão de carga, acima das vigas ensaiadas, de forma que a carga, na viga de estudo, ficasse concentrada em dois pontos equidistantes do eixo central, resultando uma região trabalhando a flexão pura. O carregamento foi aplicado por meio de um atuador hidráulico, acionado manualmente por uma bomba hidráulica. A intensidade da carga aplicada foi medida por uma célula de carga.

As vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência, para medir as deformações, e defletômetros, para medir os deslocamentos verticais.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG), suas características estão apresentadas na Quadro 1 e o esquema de ensaio na Figura 1.

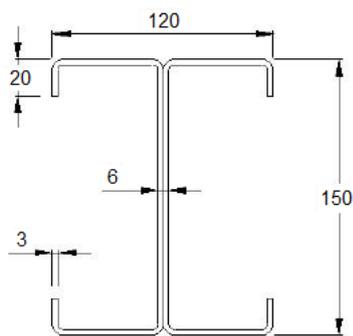
Quadro 1. Características das vigas ensaiadas

Viga e Perfil		Emenda	
VA-1	U 150x60x3	Sem emenda	
VA-2		Emenda central	
VA-3		Emenda em trespasse	
VB-1	U 150x60x20x3	Sem emenda	
VB-2		Emenda central	
VB-3		Emenda em trespasse	



b) Posição dos extensômetros

a) Seção Série VA



c) Seção Série VB



d) Esquema de ensaio e posição dos defletômetros

Figura 1. Características das vigas ensaiadas e esquema de ensaio.

As propriedades mecânicas do aço foram determinadas por meio de ensaios a tração segundo a NBR 6152:2002.⁽⁶⁾ A fim de verificar a influência da solda, utilizada na fabricação das vigas metálicas, foi também realizado ensaio a tração em corpos-de-prova com uma emenda central. A geometria dos corpos-de-prova utilizados o ensaio de caracterização estão apresentados na Figura 2.

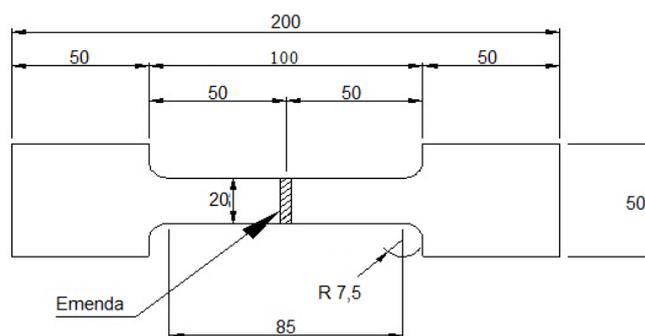


Figura 2. Dimensões dos corpos-de-prova para caracterização do aço.

3 RESULTADOS

Os resultados obtidos na realização dos ensaios de tração dos corpos de prova sem emenda (CP1 e CP2) e com uma emenda soldada (CPS1 e CPS2) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do aço

Corpo de prova	Tipo do aço	Tensão de escoamento (%)		Tensão de ruptura (MPa)		Alongamento (%)		f_u/f_y
		Medido	Média	Medido	Média	Medido	Média	
CP1	CSN COR 420	348,63	345,98	468,80	463,93	14,20	13,75	1,345
CP2	CSN COR 420	343,33		459,06		13,30		1,337
CPS1	CSN COR 420	373,34	367,40	484,44	482,42	11,30	11,50	1,298
CPS2	CSN COR 420	361,46		480,40		11,70		1,329

Para o ensaio das vigas à flexão, adotou-se como força última aquela para a qual se verificou a instabilidade da viga, plastificação das mesas e deslocamento excessivo das vigas provocando a ruína total ou parcial do conjunto ensaiado. Os resultados teóricos e experimentais correspondentes à força última ($P_{\text{último}}$), momento último ($M_{\text{último}}$) e modo de falha estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Força última e modo de falha das vigas ensaiadas

VIGA	Resultados Experimentais			Resultados Teóricos (NBR14762:2010)		
	$P_{\text{último}}$ (kN)	$M_{\text{último}}$ (kN.cm)	FALHA	M_R (kN.cm)*	M_R (kN.cm)**	FALHA
V1A	47,24	2.243,43	FLM/FLT	1.543,63	1.750,93	FLT
V2A	46,84	2.224,43	FLM/FLT	1.556,99	1.769,60	FLT
V3A	49,24	2.338,43	FLM	1.567,51	1.784,69	FLT
V1B	74,98	3.561,55	FDST	2.515,61	2.525,50	FLT
V2B	73,64	3.497,43	FDST	2.596,79	2.595,29	FLT
V3B	76,74	3.644,68	FDST	2.550,09	2.561,48	FLT

*Método da Largura Efetiva, ** Método da Resistência Direta

A deformada final das vigas estão ilustradas nas Figuras 3 e 4.



Figura 3 – Formação de meia ondas senoidais indicando a flambagem local da mesa – Vigas da série VA.



Figura 4 – Ruptura por distorção da seção transversal– Vigas da série VB.

Os gráficos das Figuras 5 e 6 mostram os deslocamentos verticais das vigas. Na Tabela 3 está apresentado o deslocamento máximo, medido em cada viga, e sua respectiva força última.

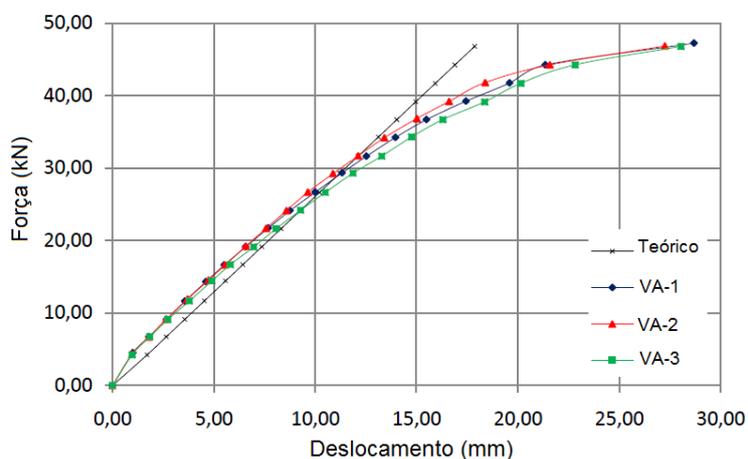


Figura 5 – Deslocamento vertical no meio do vão – Vigas da série VA.

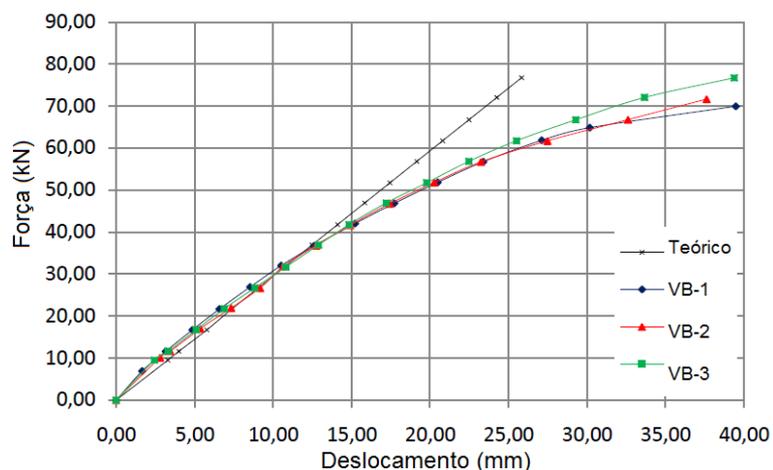
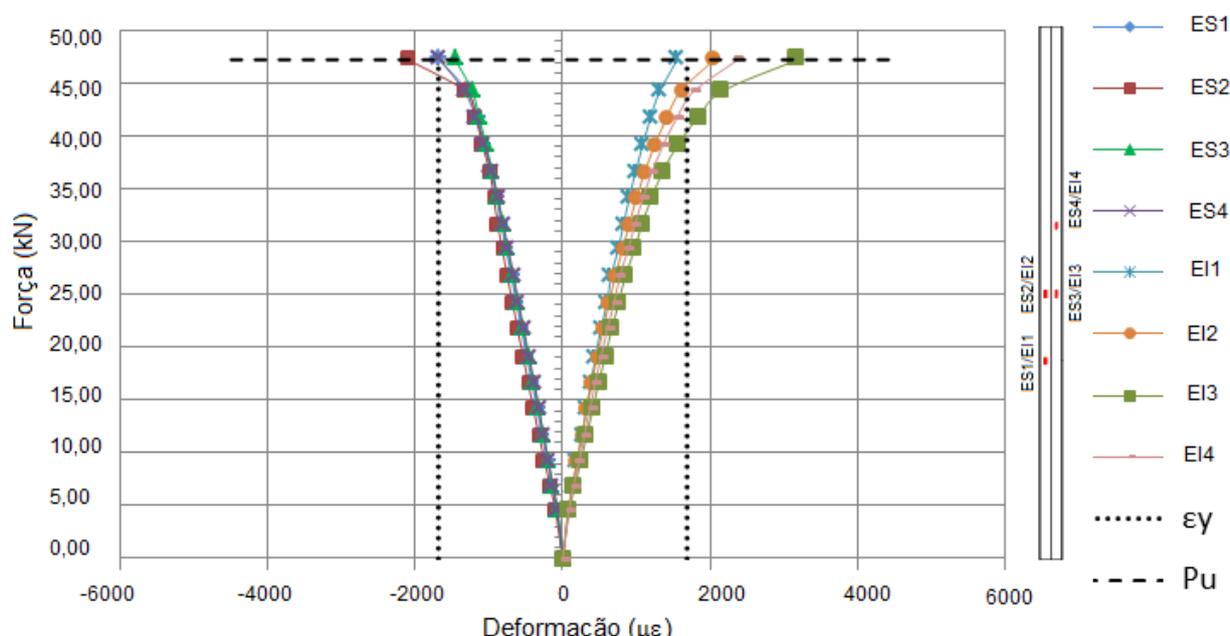


Figura 6 – Deslocamento vertical no meio do vão – Vigas da série VB.

Tabela 3. Resultados das cargas para os deslocamentos máximos medidos

VIGA	P _{último} (kN)	f (mm)
V1A	47,24	28,70
V2A	46,84	27,26
V3A	49,24	28,05
V1B	74,98	39,49
V2B	73,64	37,62
V3B	76,74	33,67

As deformações específicas foram medidas com auxílio de extensômetros elétricos. Cada viga recebeu oito extensômetros que foram nomeados segundo sua posição. As curvas com prefixo ES representam os resultados dos extensômetros posicionados na mesa superior, e as curvas com prefixo IS representam os resultados dos extensômetros fixados na mesa inferior. Os resultados da viga VA-1 estão ilustrados na Figura 7.


Figura 7 – Deformações registradas pelos extensômetros da Viga VA-1

4 DISCUSSÃO

Conforme pôde-se verificar, a relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento, f_u/f_y , assim como o alongamento dos corpos de prova ensaiados foi superior ao valor recomendado pela NBR 14762, que são respectivamente 1,8 e 7%. De acordo com a *American Society Mechanical Engineer* – ASME (QW-153),⁽⁷⁾ o corpo de prova deve apresentar uma resistência à tração maior que a resistência mínima especificada para o aço do material de base. Além disto, o rompimento deve ocorrer no material base, fora da região de solda ou da linha de fusão e a resistência deve ser no mínimo 5% superior a resistência encontrada para o aço do material de base. Com isso pode-se concluir que o processo de soldagem utilizado na união das peças atende as especificações mínimas recomendadas.

As tensões limites de escoamento f_y e de ruptura f_u tiveram um aumento de 6,20% e 3,98% respectivamente, em relação aos corpos de prova sem solda. Com relação ao

alongamento, foi observado que para os corpos de prova que receberam a emenda soldada, o valor foi inferior ao dos corpos de prova sem solda, mostrando que o processo de soldagem provoca a redução da ductilidade do aço tornando-o um material mais frágil. A relação entre a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento f_u/f_y dos corpos de prova ensaiados com emenda soldada também foi inferiores aos obtidos com os corpos de prova que não receberam solda. Ainda assim, os valores foram superiores aos mínimos estabelecidos pela NBR 14762, o que garante que, apesar das alterações provocadas pelo processo de soldagem, o material ainda conserva as características mecânicas.

Conforme apresentado na Tabela 2, em relação às vigas da série A, os valores da carga última para a viga com uma emenda soldada foi 0,85% inferior a viga sem emendas. Já a viga com emenda em trespasse, teve uma carga 4,23% superior à viga sem emenda.

Para as vigas da série B também se pode observar que a carga última da viga, que recebeu uma emenda, foi inferior a carga da viga sem emendas em 1,82%. A viga com emenda em trespasse, assim como na série A, teve a sua carga última superior a da viga sem emenda em 2,35%.

Os resultados demonstram que o processo de soldagem não produz grandes influências na capacidade portante da peça.

Comparando-se os resultados da força última de colapso entre as vigas de mesmas características, mas com seções transversais diferentes, observa-se um ganho de capacidade portante significativo.

O modo de falha previsto pelos métodos de cálculo, flambagem lateral com torção, não ocorreu e sim a flambagem local da mesa, para as vigas da série A, e flambagem distorcional, para as vigas da série B. O momento fletor último experimental foi superior aos teóricos conforme apresentado na Tabela 4. Observou-se também pouca diferença entre os resultados teóricos obtidos pelo método da largura efetiva e o método da resistência direta.

Tabela 4. Comparação entre os momentos experimentais e teóricos

VIGA	Experimental $M_{\text{último}}$ (kN.cm)	Resultados Teóricos (NBR14762:2010)		Relação Exp. e Teórico	
		M_R (kN.cm)*	M_R (kN.cm)**	M_u/M_r^*	M_u/M_r^{**}
V1A	2.243,43	1.543,63	1.750,93	1,45	1,28
V2A	2.224,43	1.556,99	1.769,60	1,43	1,26
V3A	2.338,43	1.567,51	1.784,69	1,49	1,31
V1B	3.561,55	2.515,61	2.525,50	1,42	1,41
V2B	3.497,43	2.596,79	2.595,29	1,35	1,35
V3B	3.644,68	2.550,09	2.561,48	1,43	1,42

*Método da Largura Efetiva, ** Método da Resistência Direta

Em relação ao deslocamento vertical, a viga VA-1, sem emendas, apresentou deslocamentos intermediários aos das vigas com emendas soldadas. No caso das vigas da série B, a viga VB-1, sem emendas, apresentou deslocamentos inferiores aos das vigas com emendas. Pelo fato dos resultados obtidos nos ensaios apresentarem diferenças pouco significativas, para ambas as séries, conclui-se que a emenda não altera as deflexões das vigas.

As deformações registradas pelos extensômetros colocados em posições simétricas apresentaram valores próximos, o que indica a boa condução da metodologia de ensaio.

De acordo com os gráficos das Figuras 5, 6 e 7, deformações e deslocamentos, percebe-se que a partir de 75% da força última o comportamento não é linear e as tensões estão bem próximas à tensão de escoamento do aço. Fazendo essa consideração, os momentos teóricos resistentes são bem próximos aos momentos últimos experimentais.

5 CONCLUSÃO

Os valores obtidos nos cálculos serviram de parâmetro para a análise dos resultados obtidos, o que possibilitou algumas conclusões, as quais são apresentadas a seguir: Todas as vigas estudadas romperam-se com valores referentes ao momento fletor último ($M_{\text{último}}$) superior ao momento de escoamento e deformações específicas últimas (ϵ_{cu}) acima das respectivas deformações específicas de escoamento (ϵ_y). Isso ocorre devido a reserva de resistência inelástica.

A diferença entre os resultados para as cargas de colapso das vigas sem emenda e das vigas com emenda não chega a 10% em ambas as séries, demonstrando que, nem a presença da solda, tão pouco o seu posicionamento, influenciaram de forma significativa a capacidade portante da viga.

Em relação aos deslocamentos verticais as diferenças de valores entre vigas não foi superior a 10%. Também se pode observar que no caso da série A, a viga com uma emenda central apresentou um deslocamento maior que as outras vigas da série para um mesmo carregamento. Já na série B, a viga sem emenda apresentou deslocamentos maiores que as outras vigas da série. Sendo assim, não é possível determinar um padrão de comportamento em função da quantidade ou posicionamento das soldas para os deslocamentos verticais.

O aço submetido ao processo de soldagem sofre redução de sua ductilidade como ficou evidenciado na comparação dos ensaios de corpos de prova. Apesar da alteração da ductilidade, os resultados demonstram que isso não compromete o desempenho das vigas.

O acréscimo médio de 13,71% da área de aço resultou em um acréscimo médio de 57,26% na capacidade portante da viga mostrando que, o simples acréscimo de enrijecedores de borda em um perfil formado a frio representa um ganho expressivo no seu desempenho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Escola de Engenharia Civil da UFG, através do Laboratório de Estruturas na pessoa do seu coordenador Prof. Dr. Gilson Natal Guimarães onde foram realizados os ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-14762:2010- Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Rio de Janeiro, ABNT.
- 2 Von Kármán, T., Secheler, E. E., and Donnell, L. H. The Strength of Thin Plates in Compression, Transactions ASME, Vol. 54, MP54-5, 1932.
- 3 Winter, G., Thin-Walled Structures - Theoretical Solutions and Tests Results. IN: EIGHT CONGRESS, IABSE, 1968, pp. 101-112.



- 4 Schafer, B. W. and Peköz, T., Direct Strength Prediction of Cold-Formed Steel Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions, Thin-Walled Structures, Research and Development, Eds. Shanmugan, N.E, Liew, J. Y. R., and Thevendran, V., Elsevier, 1998, p. 137-144 (also in Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, MO, oct., 1998).
- 5 www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/, Website (Benjamim William Schafer), acesso em Janeiro de 2011.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002). *NBR 6152: Materiais metálicos: Ensaio de tração à temperatura ambiente*. Rio de Janeiro.ABNT.
- 7 American Society Mechanical Engineer. Acceptance Criteria Tension Tests – ASME (QW-153), New York, s.d.