

# COMPARAÇÃO ENTRE A EFICIÊNCIA ESTRUTURAL DE PERFIS SOLDADOS DE AÇO E PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO

## Comparison of the structural efficiency between welded steel profiles and cold-formed steel beams

Uiatan Aguiar Nogueira<sup>1</sup>, Matilde Batista Melo<sup>2</sup>, Daniel de Lima Araújo<sup>3</sup>

Recebido em 28 de janeiro de 2016; recebido para revisão em 01 de junho de 2016; aceito em 05 de julho de 2016; disponível on-line em 10 de agosto de 2016.



### PALAVRAS CHAVE:

Vigas metálicas;  
Flexão;  
Perfil formado a frio;  
Perfis leves de aço;  
Eficiência estrutural.

### KEYWORDS:

Steel beams;  
Flexure;  
Cold-formed;  
Lightweight steel profiles;  
Structural efficiency.

**RESUMO:** A Análise de elementos estruturais, realizadas durante a etapa de projeto de uma estrutura, é parte fundamental para garantia de bom desempenho e estabilidade do sistema estrutural. Na execução de algumas estruturas, como as coberturas em edificações, é usual o emprego de perfis leves de aço formados a frio devido ao seu baixo peso. Esta pesquisa tem por objetivo avaliar a eficiência estrutural desses perfis quando comparados, por exemplo, aos perfis soldados compactos. Para tanto, foram realizados ensaios de flexão em quatro vigas biapoiadas submetidas a duas forças concentradas, de forma a se obter flexão pura no meio do vão das vigas. Estas foram instrumentadas para a determinação da sua rigidez e da sua resistência à flexão. A principal contribuição deste trabalho é demonstrar a eficiência estrutural de perfis formados a frio em seção caixa submetidos à flexão em comparação com perfis de seção tipo “H” soldados.

**ABSTRACT:** The analysis of structural elements, in a structure's design, is an essential step to ensure good performance and stability of the structural system. In any types of structures, such as roofing in buildings, it's usual using cold-formed steel beams due to their small weight. This research seeks to evaluate the structural efficiency of cold-formed steel beams when compared, for example, to compact welded steel beams. Thus, bending tests were performed in four simply supported beams submitted to two concentrated loads, in order to obtain pure flexure at the mid-span of the beams. These beams were instrumented for the determination of their rigidity and bending strength. The results showed that the cold-formed steel beam, box-shaped, presented structural efficiency similar to the welded steel beam “H” shaped.

### \* Contato com os autores:

<sup>1</sup> e-mail: [uiatannogueira@gmail.com](mailto:uiatannogueira@gmail.com) (U. A. Nogueira)

Graduando da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás.

<sup>2</sup> e-mail: [tidemelo@gmail.com](mailto:tidemelo@gmail.com) (M. B. Melo)

Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG.

<sup>3</sup> e-mail: [dlaraujo@ufg.br](mailto:dlaraujo@ufg.br) (D. L. Araújo)

Professor Associado da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás.

## 1. INTRODUÇÃO

Todas as obras de construção civil, sem exceção, dependem de rigorosas análises e cálculos matemáticos. Por trás de todas estas obras, encontram-se sistemas estruturais complexos que devem resistir a todos os esforços aos quais serão submetidos durante toda a vida útil da obra, garantindo estabilidade e segurança das pessoas que, de forma ou outra, estão envolvidas com as mesmas.

É função da Análise Estrutural a elaboração e a concepção de uma estrutura que supra, sem riscos, todas as funções às quais foi projetada. Tal conceito se aplica à estrutura ou a suas partes constituintes.

Quando se projeta coberturas de edificações de grandes vãos, procura-se empregar materiais resistentes e de baixo peso de modo a maximizar esses vãos. Nesse sentido, são largamente empregadas coberturas em treliça metálica espacial e, para menores vãos, os perfis leves de aço formados a frio. O projeto dessas estruturas deve ser feito seguindo a normalização nacional que, no caso do Brasil, são editadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. A norma NBR 14762 (ABNT, 2010) estabelece os critérios para o dimensionamento de estruturas de aço constituídas de perfis formados a frio e limita a resistência à flexão ao limite elástico da seção, isto é, não permite o cálculo no Estado Limite Último considerando a plastificação da seção transversal. Isso pode reduzir a eficiência desses perfis, em particular quando associados visando à formação de seções mais rígidas, como os perfis em caixa, nas quais as flambagens locais são minimizadas.

Do ponto de vista científico, vários trabalhos nacionais foram desenvolvidos para se compreender o comportamento dos perfis formados a frio, em especial quando associados com lajes de concreto para a formação das vigas mistas (DAVID, 2003; OLIVEIRA, 2001; HANOR, 2000; MALITE, 1993). Dessa forma, este trabalho tem por objetivo contribuir com o conhecimento acerca do comportamento das estruturas em perfis formados a frio submetidos à flexão por meio da determinação da eficiência mecânica desses perfis

quando comparados com perfis soldados de seção compacta e da capacidade de plastificação dos perfis leves de aço formados a frio.

## 2. METODOLOGIA

Os experimentos realizados nessa pesquisa consistiram em ensaios de flexão em vigas metálicas biapoiadas sujeitas à atuação de duas forças concentradas de mesma intensidade, bem como ensaios de tração para caracterização do material.

Foram escolhidas quatro vigas típicas para estudo, sendo uma viga de seção “H” em perfil soldado, duas vigas em perfil leve de aço formado a frio com seção em “U” enrijecido, e uma viga caixa feita pela soldagem de dois perfis leves de aço formado a frio com seção em “U” enrijecido. A viga de seção “H” tinha 3,59 m de comprimento e foi fabricada por empresa local em aço MR250, conforme a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), enquanto as vigas em perfil formado a frio possuíam 3,00 m de comprimento e foram adquiridas de empresa local como constituídas de aço sem qualificação estrutural para perfis, conforme a norma NBR 14762 (ABNT, 2010).

Para a confirmação das propriedades dos aços, foram realizados ensaios de caracterização dos mesmos conforme a norma NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2013). Este ensaio tem por princípio a caracterização do material pela aplicação de esforços de tração sobre corpos de prova específicos até a ruptura, determinando assim suas propriedades mecânicas. Os corpos de prova para esse ensaio foram retirados das próprias vigas ensaiadas, na região próxima aos apoios e que não foi solicitada durante o ensaio das vigas. As dimensões dos corpos de prova obedeceram ao prescrito na norma NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2013), com exceção do comprimento da parte prismática ( $L_0$ ), uma vez que o extensômetro da máquina utilizada no ensaio de tração possuía um comprimento mínimo superior ao estabelecido por essa norma. Para cada tipo de aço foram preparados três corpos de prova conforme mostrado na Figura 1. Nesta mesma figura, também são mostrados os corpos de prova durante o ensaio.



**FIGURA 1:** [a] Corpos-de-prova utilizados no ensaio de caracterização do aço; [b] esquema do ensaio de tração em andamento.

**FONTE:** Autoria própria.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados do ensaio de caracterização do aço. Conforme pode ser constatado nessa tabela, o aço da viga em perfil soldado não atendeu ao prescrito pela norma para o aço MR250, que especifica uma resistência mínima ao escoamento de 250 MPa e uma resistência mínima à ruptura de 400 MPa. Isto pode ser devido ao fato de que a região dos apoios possa ter sido solicitada por problemas localizados como flambagem ou torção, diminuindo a resistência estrutural do aço nesta região. Já o aço das vigas em perfil formado a frio atendeu ao prescrito pela norma para os aços sem qualificação estrutural, uma vez que sua resistência ao escoamento foi superior a 180 MPa e sua resistência à ruptura foi superior a 300 MPa.

O módulo de elasticidade do aço (E) não foi determinado nos ensaios, tendo sido adotado o valor 200 GPa nas análises realizadas.

As dimensões da seção transversal de cada viga foram previamente medidas com paquímetro digital e estão apresentadas na Figura 2. As vigas 2 e 3 tinham a mesma seção transversal, porém com eixo de flexão modificado para o ensaio. Na Tabela 2 são mostradas as propriedades geométricas de cada uma das seções transversais, cujas dimensões de seção transversal estão descritas na Figura 2. Observa-se que a seção transversal do perfil “U” enrijecido formado a frio atende aos valores sugeridos da relação largura-espessura especificados pela norma NBR 14762 (ABNT, 2010).

**TABELA 1:** Resultados da caracterização do aço.

	Resistência ao escoamento ( $f_y$ ) - MPa	Resistência à ruptura ( $f_u$ ) - MPa	Alongamento na ruptura (%)
Perfil Soldado	196,0 ± 11,60	306,9 ± 10,35	*
Perfis formados a frio	268,7 ± 6,89	378,9 ± 13,32	12,8

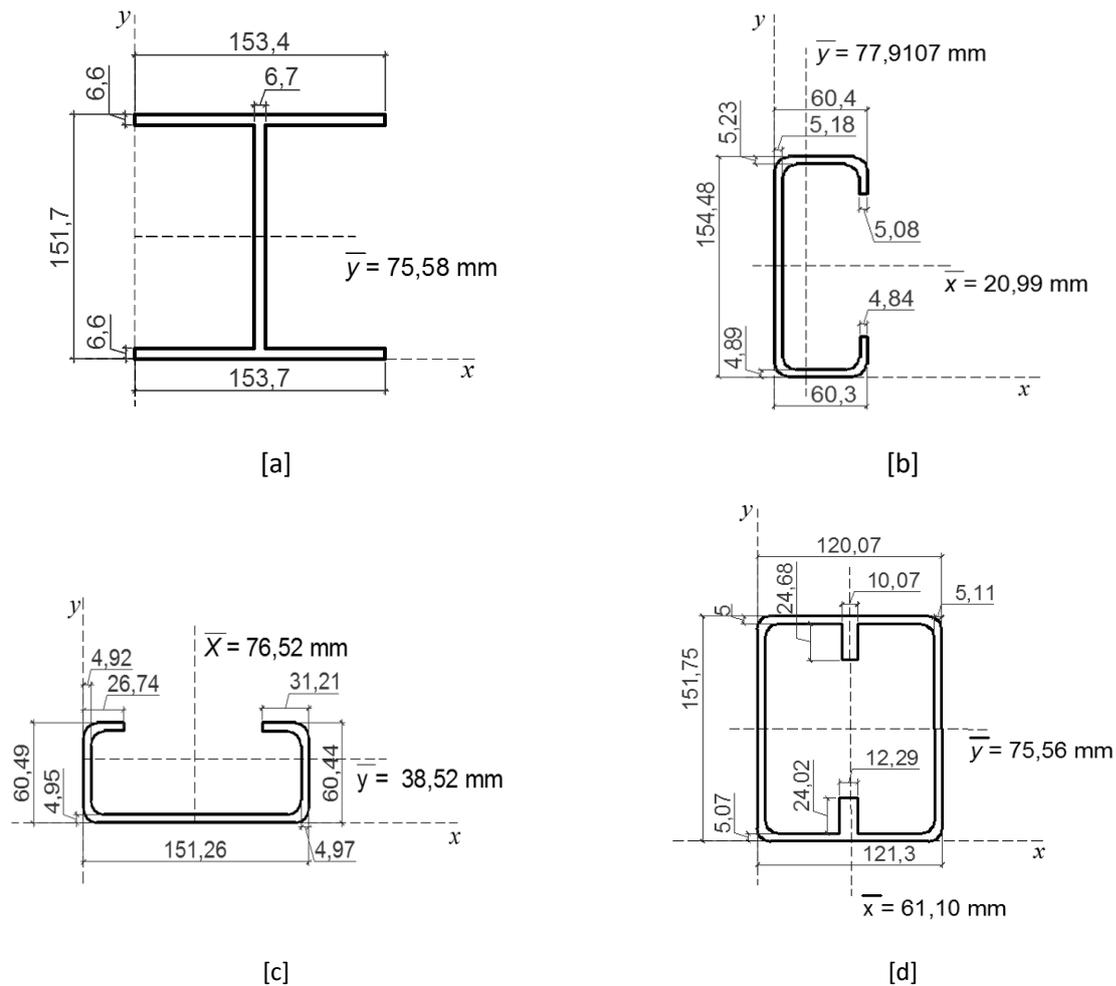
\*valor não determinado.

**FONTE:** Autoria própria.

**TABELA 2:** Propriedades geométricas das seções das vigas ensaiadas.

Viga	Área (mm <sup>2</sup> )	$I_x$ (x10 <sup>-6</sup> m <sup>4</sup> )	$I_y$ (x10 <sup>-6</sup> m <sup>4</sup> )
“H”	2952,83	12,16	3,97
“U”	1508,47	5,19	0,74
“U” girada a 90°	1495,15	0,75	4,93
Caixa	3163,75	11,25	6,14

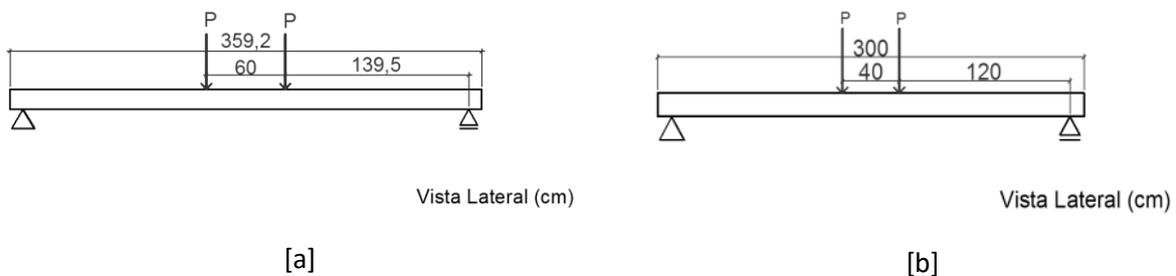
**FONTE:** Autoria própria.



**FIGURA 2:** Seção transversal das vigas ensaiadas (dimensões em mm): [a] Viga 1 – Perfil “H” soldado; [b] Viga 2 – Perfil formado a frio em “U” enrijecido; [c] Viga 3 - Perfil formado a frio em “U” enrijecido com eixo de flexão rotacionado em 90°; [d] Viga 4 – perfil caixa formado por dois perfis em “U” enrijecido. **FONTE:** Autoria própria.

Dois apoios, um do segundo gênero e outro do primeiro gênero, foram colocados a 10 cm de cada extremidade da viga. Assim, a viga de seção “H” possuía um vão de 3,39 m e as demais vigas um vão de 2,80 m. Na viga de seção “H” as forças concentradas estavam a 1,39 m de cada

apoio, resultando em um trecho de 60 cm submetido à flexão pura. Nas demais vigas, as forças concentradas estavam a 1,20 m de cada apoio, resultando em um trecho de 40 cm submetido à flexão pura. O esquema de ensaio das vigas está representado na Figura 3.

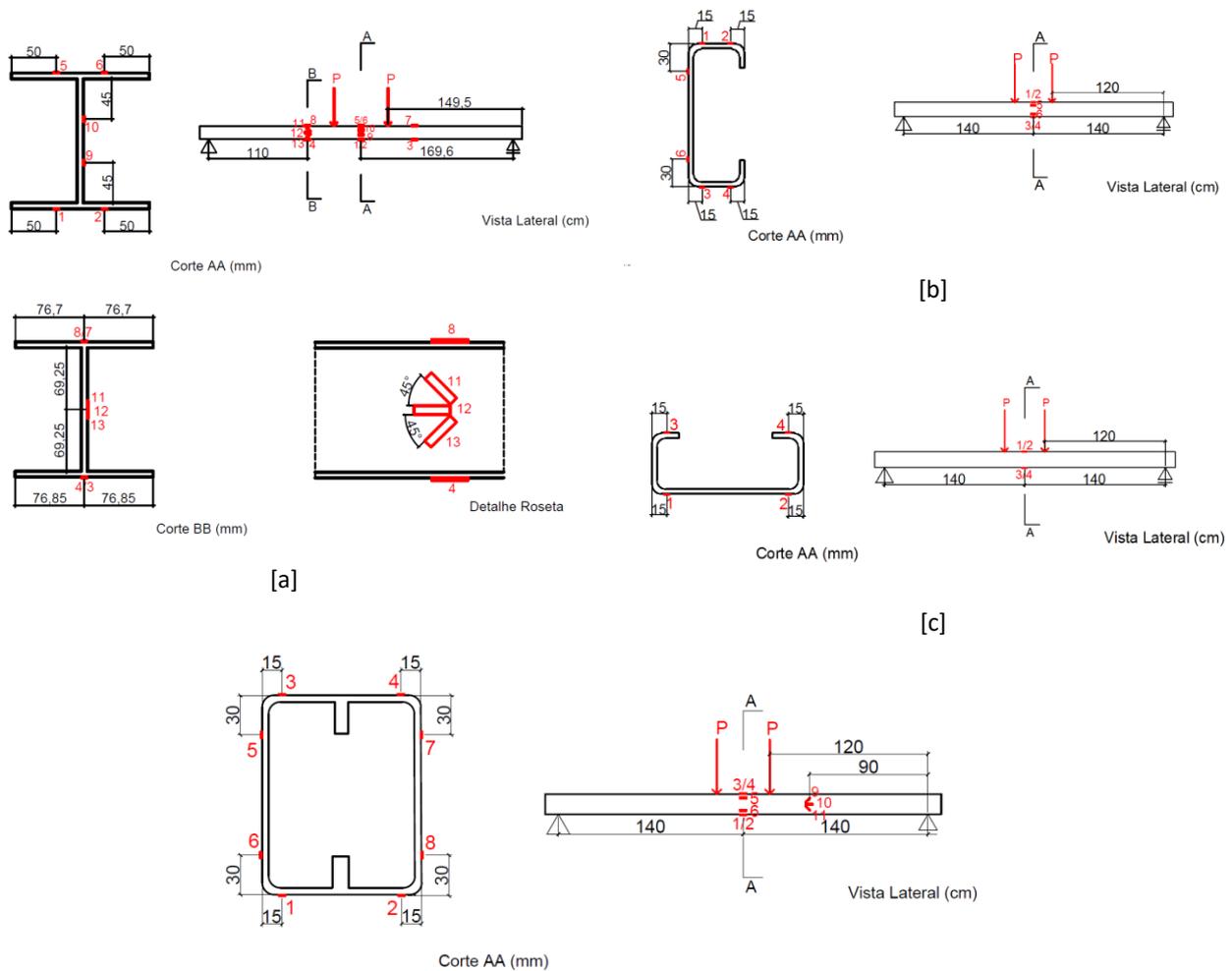


**FIGURA 3:** Esquema de aplicação de forças para o ensaio da (a) viga de seção “H” e (b) vigas em perfil formado a frio (dimensões em cm). **FONTE:** Autoria própria.

As vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos, colados em pontos específicos para determinar a deformação da viga, e um transdutor para medir o deslocamento no meio vão da viga. No caso da viga 1, de seção “H”, também foram colocados transdutores nos terços médios de seu comprimento. Um atuador hidráulico foi acoplado a uma célula de carga com capacidade de 50 kN para aplicação da força, de forma crescente. Na Figura 4 é indicada a posição e

a numeração dos extensômetros colados em cada uma das vigas ensaiadas.

A coleta dos dados de força, deformação e deslocamento da viga foi realizada a partir de um sistema de aquisição de dados. O ensaio foi realizado com carregamento monotônico crescente até a caracterização da ruptura da viga, isto é, até o momento em que a mesma se deformava sob carregamento constante. Uma foto da viga 1 na posição de ensaio é apresentada na Figuras 5.



[a]

[b]

[c]

[d]

**FIGURA 4:** Posição dos extensômetros colados nas vigas ensaiadas; [a] Viga 1 – perfil “H” soldado, [b] Viga 2 – Perfil em “U” enrijecido, [c] Viga 3 – Perfil em “U” enrijecido girado de 90° e [d] Viga 4 – Perfil caixa. **FONTE:** Autoria própria.



FIGURA 5: Fotos do ensaio da viga seção “H”; [a] seção transversal e [b] flambagem local da mesa. FONTE: Autoria própria.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 FORÇA DE PLASTIFICAÇÃO E DE RUÍNA

Inicialmente, foram calculadas as forças teóricas ( $P_{esc}$ ) relativas ao limite do comportamento elástico linear de cada viga. A partir desse limite, a viga passa a ter comportamento plástico (ou seja, o material entra no escoamento). Desta forma, considerando o aço no início do escoamento e com utilização da fórmula da flexão (Eq. [1]), chega-se aos valores mostrados na Tabela 3 que representam o momento fletor relativo ao limite do comportamento elástico linear da seção transversal no meio do vão ( $M_{esc}$ ).

$$\sigma = \frac{M_{esc} y}{I} \quad \text{Eq. [1]}$$

Sendo:

$\sigma$  = tensão normal (MPa);

$M_{esc}$  = momento fletor teórico para início do escoamento do material (kNm);

$y$  = distância da fibra onde se deseja calcular a tensão normal à linha neutra da seção transversal (m);

$I$  = momento de inércia da seção ( $m^4$ ).

Para esses valores teóricos, as fibras mais afastadas da linha neutra da seção transversal começam a se plastificar. De acordo com o Anexo B da norma ABNT NBR 14762 (ABNT, 2010), a tensão de escoamento para as vigas em perfil dobrado a frio é de 272,6 MPa. Ressalta-se que, segundo essa norma, a dobra nos perfis formados a frio contribui

para um aumento da tensão de escoamento do material.

A plastificação da seção transversal termina quando todas as fibras do material atingirem a sua tensão de escoamento. O momento de plastificação teórico ( $M_{plast}$ ), aplicado na seção no meio do vão e para o qual todas as suas fibras estão plastificadas, foi calculado por meio das Equações 2 e 3. A força relativa ao fim da plastificação ( $P_{plast}$ ) também é calculada a partir do conhecimento do momento de plastificação, determinado em relação ao eixo X-X da seção transversal.

$$M_{plast} = f_y Z \quad \text{Eq. [2]}$$

Sendo:

$M_{plast}$  = momento fletor teórico para o fim da plastificação do material (kNm);

$f_y$  = tensão de escoamento do material (MPa);

$Z$  = momento plástico da seção ( $m^4$ ).

$$Z = A_t y_t + A_c y_c \quad \text{Eq. [3]}$$

Sendo:

$A_t$  = área tracionada da seção transversal da viga ( $m^2$ );

$A_c$  = área comprimida da seção transversal da viga ( $m^2$ );

$y_t$  = posição do centro de massa da área tracionada da seção plastificada (m);

$y_c$  = posição do centro de massa da área comprimida da seção plastificada (m).

Analisando-se a Tabela 3, verifica-se uma forte relação entre os momentos fletores e os momentos de inércia em torno do eixo X-X, uma vez que as vigas com maior momento de inércia

começam a plastificar a seção transversal para maiores valores de força aplicada.

### 3.2 DESLOCAMENTO VERTICAL

O cálculo teórico da flecha foi feito apenas para o regime linear-elástico do material, uma vez que a Lei de Hooke não é válida no regime plástico. Assim, por meio da Equação 4 determinou-se a flecha relativa ao final do comportamento elástico de cada viga. Na Tabela 4 é apresentada uma comparação entre as flechas teóricas para cada viga e na Figura 6 os deslocamentos teóricos e reais de cada viga são comparados. Os deslocamentos reais foram obtidos por meio do transdutor localizado no meio do vão. Percebe-se pela Tabela 4 uma relação direta entre a flecha da viga e seu momento de inércia, isto é, as flechas aumentam com a redução do momento de inércia da seção transversal.

$$v = \frac{P_{esc} L^3}{48 E I} \quad \text{Eq. [4]}$$

Sendo:

**v** = deslocamento vertical teórico da seção a meio vão (m);

**P<sub>esc</sub>** = força teórica para início do escoamento do material (kN);

**L** = vão teórico da viga (m);

**E** = módulo de elasticidade do material (GPa);

**I** = momento de inércia (m<sup>4</sup>).

Nos gráficos (a), (c) e (d) da Figura 8 verifica-se uma boa aproximação entre os valores teóricos e reais de flecha para as vigas com seção I (Viga 1), seção U girada a 90° (Viga 3) e seção caixa (Viga 4). Na análise da Viga 4, percebe-se que a rigidez real dessa viga foi inferior ao previsto, enquanto que na viga 3 percebe-se uma melhor aproximação dos valores teóricos e experimentais, mesmo com a oscilação dos valores registrados pelo transdutor. A diferença na rigidez teórica e experimental na viga de seção caixa pode ser devida à solda realizada entre os perfis, isto é, a inércia à flexão real do perfil pode ter sido inferior ao valor calculado teoricamente. Na Viga 2, de seção U, percebe-se uma maior diferença entre a rigidez teórica e experimental. Neste caso, essa maior diferença pode ser devida ao efeito de torção que ocorreu nesse perfil durante o ensaio. Devido a não simetria da seção transversal em relação ao eixo vertical, ocorreu torção nesse perfil desde o início do carregamento e o ensaio foi interrompido devido ao tombamento da viga por instabilidade lateral. Na Tabela 5 são mostrados os valores teórico e experimental da rigidez das vigas no regime elástico-linear.

**TABELA 3:** Valores teóricos relativos ao início e fim da plastificação da seção transversal a meio vão.

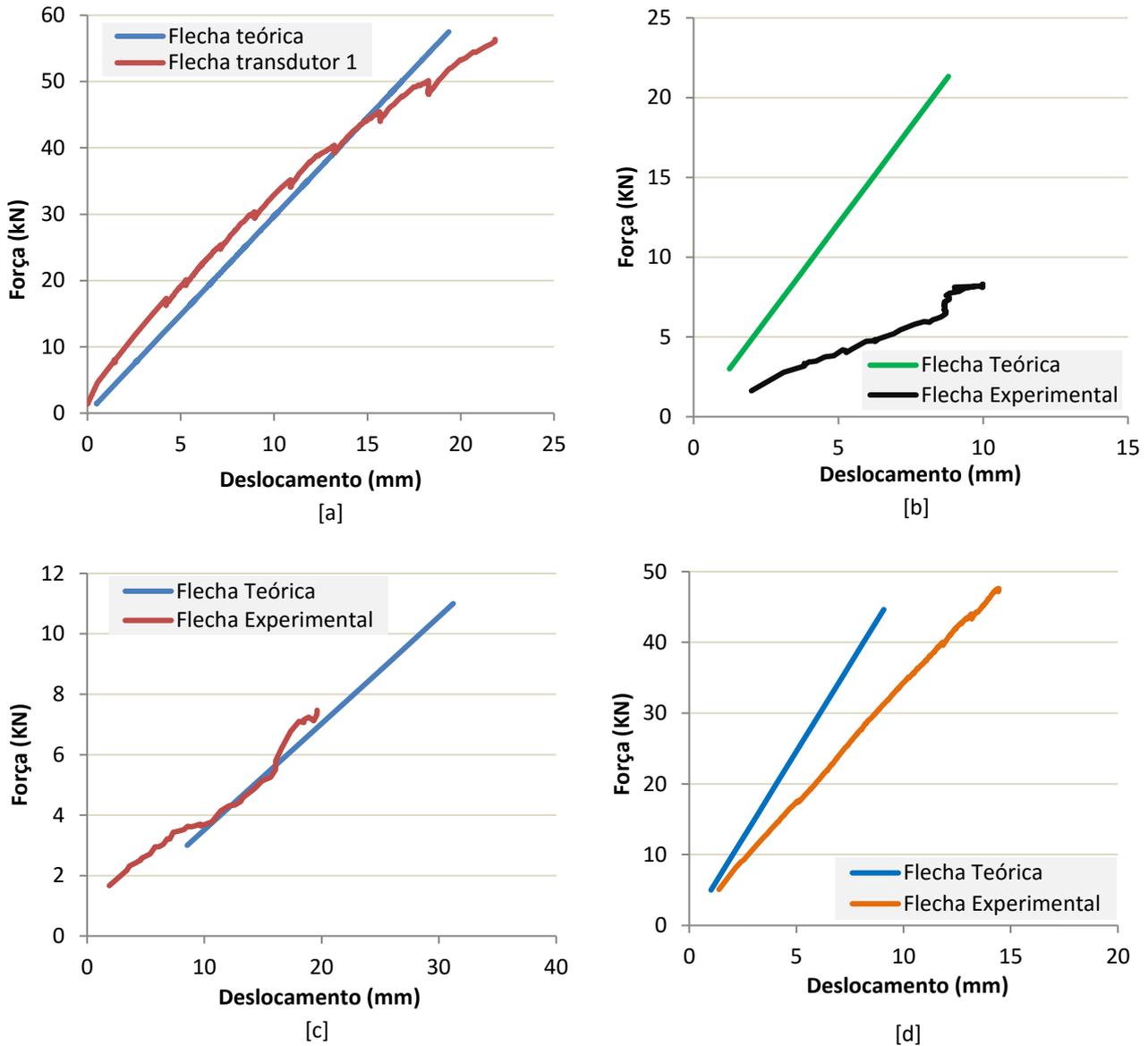
Viga	P <sub>esc</sub> (kN)	M <sub>esc</sub> (kNm)	P <sub>plast</sub> (kN)	M <sub>plast</sub> (kNm)
"H"	45,05	31,53	50,11	35,08
"U"	30,10	18,06	25,49	15,29
"U" girada a 90°	15,88	9,53	14,40	8,64
Caixa	67,64	40,58	77,62	46,57

FONTE: Autoria própria.

**TABELA 4:** Flecha teórica das vigas no início do escoamento da seção transversal.

Viga	"H"	"U"	"U" girado a 90°	Caixa
Flecha (mm)	15,17	13,25	48,12	13,75

FONTE: Autoria própria.



**FIGURA 6:** Comparação entre os deslocamentos real e teórico da viga no meio do vão: [a] Deslocamento a meio vão Viga seção "H" - Viga 1 – perfil "H" soldado, [b] Deslocamento a meio vão Viga seção "U" - Viga 2 – Perfil em "U" enrijecido, [c] Deslocamento a meio vão Viga seção "U" girada a 90° - Viga 3 – Perfil em "U" enrijecido girado de 90° e [d] Deslocamento a meio vão Viga seção caixa - Viga 4 – Perfil caixa. **FONTE:** Autoria própria.

**TABELA 5:** Rijeza experimental e teórica das vigas ensaiadas.

Viga de seção	$K_{exp}$ (kN/mm)	$K_{teo}$ (kN/mm)	$K_{exp}/K_{teo}$
"H"	2,39	2,97	0,80
"U"	0,83	2,42	0,34
"U" girada a 90°	0,31	0,35	0,88
Caixa	3,23	4,92	0,66

**FONTE:** Autoria própria.

### 3.3 DEFORMAÇÃO

A análise da deformação das vigas é feita a partir dos gráficos de Força *versus* Deformação obtidos por meio dos extensômetros elétricos de resistência colados ao longo da viga para cada etapa de acréscimo de carregamento. A partir desses gráficos, podem-se determinar aspectos importantes do ensaio, como, por exemplo: os momentos fletores experimentais para os quais as vigas começaram e terminaram a fase de plastificação; verificar a ocorrência de torção ou deformação da viga de forma assimétrica em relação à seção transversal; e comparar os valores de deformação teórico e experimental.

Durante o ensaio, alguns extensômetros não apresentaram leitura. Na viga caixa, perderam-se os extensômetros de número 3, 5 e 10 e na viga U, o de número 1. Entretanto, esse imprevisto não influenciou no estudo proposto.

Quando uma seção transversal está submetida a momento fletor, parte dela está sofrendo esforços de tração e a outra, esforços de compressão. A separação dos esforços de tração e compressão se dá pelo eixo neutro da seção, uma linha horizontal imaginária que passa pelo centro de massa da mesma, na qual as deformações são nulas. Assim, para uma seção simétrica em relação aos dois eixos, espera-se que pontos diametralmente opostos apresentem deformações iguais em módulo, mas de sinal contrário, uma vez que um ponto está sob compressão e outro sob tração. Para pontos equidistantes em relação ao eixo y, espera-se que apresentem deformação igual em módulo e sinal.

Assim, para os extensômetros colados nas vigas de seção “H” e Caixa, simétricas em relação aos eixos x e y, espera-se simetria para pontos diametralmente opostos e equidistantes em relação ao eixo y. Porém, as vigas de seção “U” apresentam simetria em relação a apenas um eixo (x ou y, quando girada em 90 graus), o que faz com que a simetria seja esperada apenas para pontos equidistantes a esses eixos.

Na Figura 7 são mostradas as deformações registradas em todas as vigas ensaiadas. Na Figura 9 (a) verifica-se uma

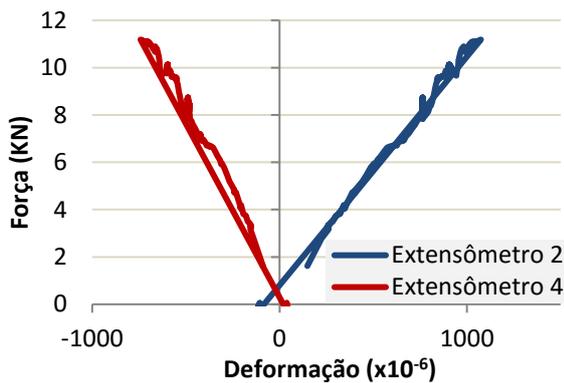
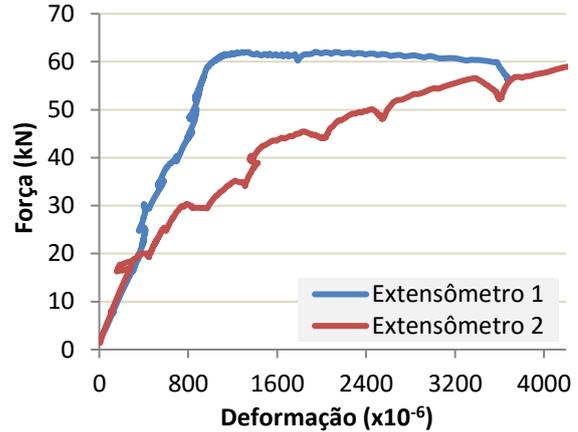
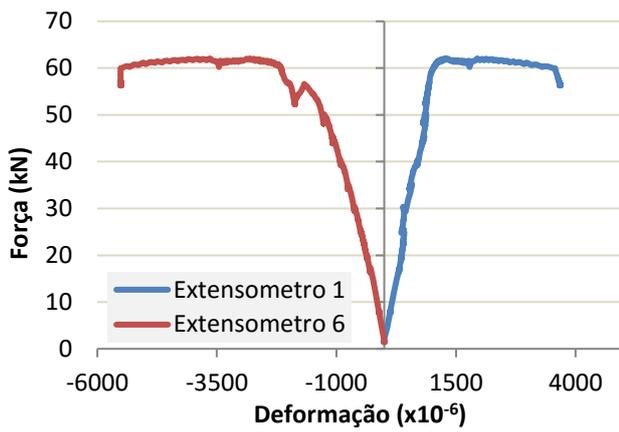
divergência entre a deformação medida pelos extensômetros 1 e 2 colados na face inferior da mesa tracionada da Viga 1, com seção em “H”. Isso se deve ao fato da viga ter sofrido torção durante o ensaio, possivelmente por imperfeição da simetria da seção na fabricação ou até mesmo por má acomodação dos apoios.

A Viga 4, de seção caixa (Figura 7.d), apresentou uma melhor simetria na leitura dos extensômetros colados na mesma fibra da seção transversal durante o regime elástico-linear.

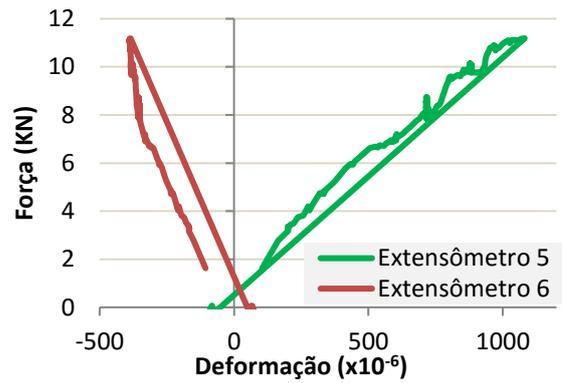
A Viga 2, de seção “U”, pela dificuldade de se aplicar a força sobre o eixo que passa pelo centroide da seção também sofreu efeitos de torção (Figura 7.b). O ensaio da mesma, porém, foi interrompido devido à instabilidade lateral com a viga ainda no regime elástico-linear.

A Viga 3, de seção “U” girada a 90°, apresentou, para pontos equidistantes ao eixo y, deformações razoavelmente simétricas, principalmente nas fibras mais comprimidas. Os valores de deformação foram altos para pequenos valores de carregamento, quando comparados aos das outras vigas, uma vez que o momento de inércia dessa viga em relação ao eixo x é o de menor valor. Portanto, percebe-se a influência das propriedades geométricas da seção com as propriedades mecânicas do material.

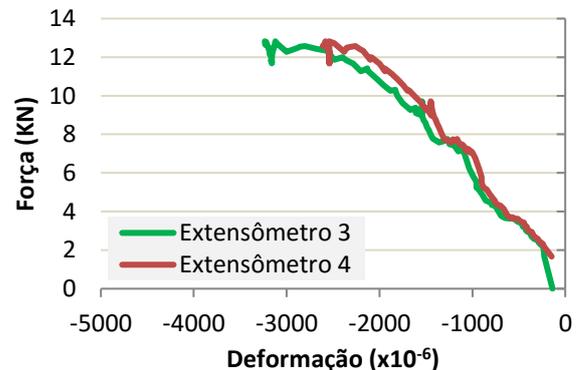
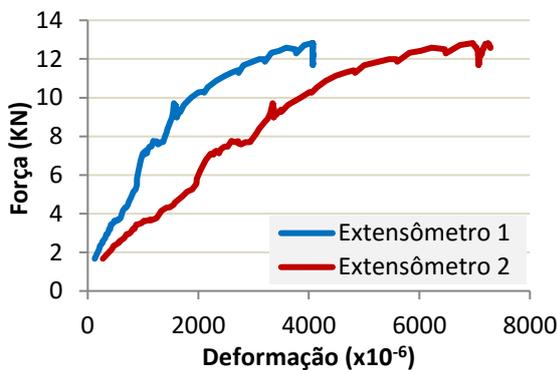
A transição do regime elástico para o plástico ocorre por meio do escoamento do material, no qual há aumento da deformação sem aumento de carregamento ou, em alguns casos, com aumento mínimo de carregamento. Dessa forma, tomando as curvas da Figura 7 e conhecendo a deformação de escoamento do material, pode-se determinar o início do escoamento das fibras mais extremas da seção transversal no meio do vão. A plastificação total da seção transversal pode ser determinada, aproximadamente, a partir do momento em que a viga não resiste a incrementos de força. Isso, é claro, se a seção transversal for compacta de modo que não ocorram flambagens localizadas, que é o caso das vigas ensaiadas neste trabalho. Na Tabela 6 os valores razoáveis experimentais para fim do regime elástico e plastificação total da seção transversal são apresentados.



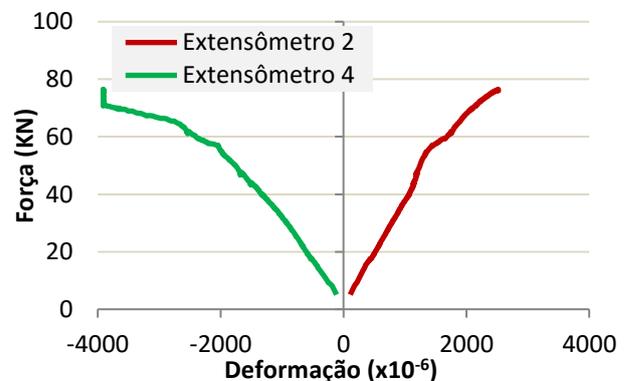
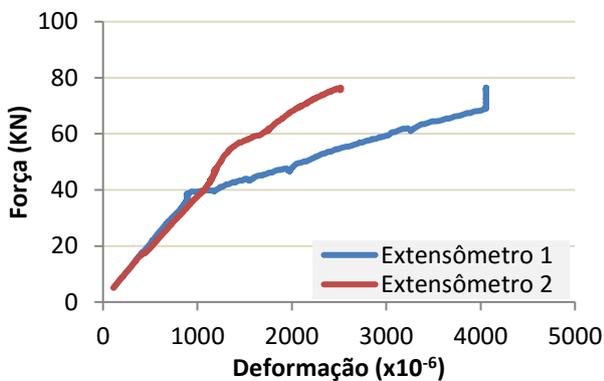
[a]



[b]



[c]



[d]

**FIGURA 7:** Gráficos de Força versus Deformação no meio do vão: [a] Força x Deformação Viga Seção "H" e "I" - Viga 1 – perfil "H" soldado, [b] Força X Deformação Viga seção "U" - Viga 2 – Perfil em "U" enrijecido, [c] Força x Deformação Viga seção "U" girada a 90° - Viga 3 – Perfil em "U" enrijecido girado de 90° e [d] Força x Deformação Viga seção Caixa - Viga 4 – Perfil caixa.

**FONTE:** Autoria própria.

Comparando-se os valores experimentais da Tabela 6 com os valores teóricos da Tabela 3, percebe-se que apesar da torção, as fibras extremas da seção transversal da Viga 1, de seção “H”, começaram e terminaram a plastificação para valores próximos aos valores teóricos ( $P_{esc}$  e  $P_{plast}$ ). Neste caso, a relação entre a força teórica e a força experimental no final do regime elástico linear e no regime plástico foi igual a 0,98 e 0,96, respectivamente.

No caso da Viga 3, de seção “U” girada a 90°, houve uma grande diferença entre os valores teóricos e experimentais. Neste caso, os valores experimentais foram cerca de 50% inferiores aos valores teóricos. Isso se deve, provavelmente, à flambagem local dos enrijecedores do perfil em U que estavam comprimidos durante o ensaio.

Na viga 4, de seção caixa, a relação entre o momento experimental e o momento teórico no final do regime elástico linear e no regime plástico foi igual a 0,90 e 0,98, respectivamente. Isso mostra que a viga atingiu o regime plástico antes do previsto, provavelmente devido ao menor momento de inércia da viga em relação ao valor teórico calculado. Apesar disso, o momento último dessa viga foi praticamente igual ao momento teórico de plastificação da seção transversal da viga.

Um dos aspectos mais importantes a ser ressaltado foi a capacidade do perfil I e do perfil caixa atingirem a plastificação total da seção. Ambos são classificados como compactos, entretanto a norma NBR 14762 (ABNT, 2010) não permite o cálculo plástico dos perfis formados a frio.

Pode-se, ainda, determinar a rotação da seção transversal do meio do vão das vigas a partir do conhecimento da deformação dos

extensômetros colados ao longo da altura da seção transversal. Durante o regime elástico, a seção transversal da viga deve permanecer plana. Quatro extensômetros da viga de seção “H” foram utilizados (extensômetros 1, 6, 9 e 10), enquanto da viga de seção caixa foram utilizados apenas três (extensômetros 1, 4 e 6). Na Figura 8 é ilustrada a deformação da seção transversal das vigas de seção “H” e caixa.

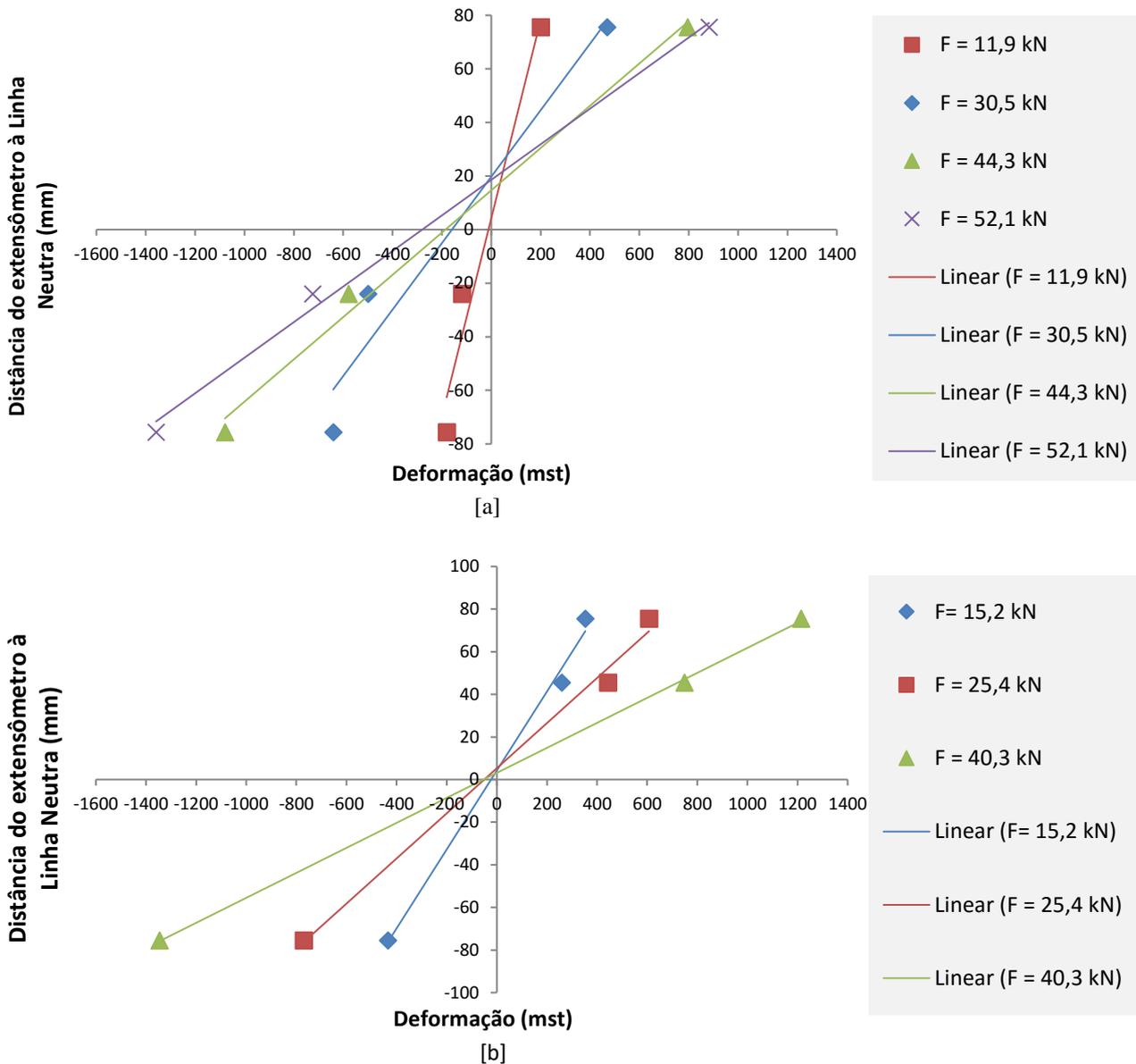
Verifica-se, por meio da Figura 8, uma tendência linear entre os pontos para carregamentos inferiores ao limite de escoamento das vigas. Como os coeficientes  $R^2$  aproximaram-se do valor unitário 1, é possível afirmar que a seção continuou plana durante o regime elástico linear. Entretanto, para as forças próximas do limite de escoamento, verifica-se uma discrepância entre os coeficientes  $R^2$  e o valor unitário, uma vez que o material aproxima-se do regime plástico.

Nota-se que a viga 1, em perfil formado a frio, apresenta tendência de plastificação da seção para carregamentos relativamente pequenos devido ao baixo valor da tensão de escoamento do aço. Apesar disso, a força última da Viga 1, em torno de 60 kN, foi superior à força correspondente à plastificação da seção transversal devido ao aumento expressivo da tensão de ruptura do material. Dessa forma, a força última dessa viga foi 35% superior à força relativa ao final do regime elástico linear. Já a Viga 4, de seção em caixa, apresentou uma maior linearidade da seção transversal. Neste caso, foi observado um aumento de 28% na resistência da viga devido à plastificação da seção transversal. Esse aumento foi menor que o da viga de seção “H” provavelmente devido ao efeito de encruamento que ocorre no aço durante o dobramento das chapas.

**TABELA 6:** Valores experimentais referentes ao final do regime elástico e à plastificação total da seção transversal.

Viga de seção	“H”	“U” girada a 90°	Caixa
$P_{esc-r}$ (kN)	46,00	8,00	60,60
$M_{esc-r}$ (kNm)	32,20	4,80	36,36
$M_{esc-r}/M_{esc}$	1,02	0,50	0,90
$P_{plast-r}$ (kN)	52,00	12,50	76,00
$M_{plast-r}$ (kNm)	36,40	7,50	45,60
$M_{plast-r}/M_{plast}$	1,04	0,87	0,98

FONTE: Autoria própria.



**FIGURA 8:** Rotação da seção transversal no meio do vão das vigas: [a] Posição do extensômetro em função de sua deformação - Viga 1 – perfil “H” soldado e [b] Posição do extensômetro em função de sua deformação - Viga 4 – Perfil caixa.

**FONTE:** Autoria própria.

**3.4 FORÇA CORTANTE**

Foi determinada a tensão de cisalhamento na seção transversal das vigas 1 e 4. Para isso, utilizaram-se os gráficos de Força versus Deformação obtidos da roseta de deformação colada nas vigas (Figura 11) e as Equações 5, 6, 7, 8 e 9, para as quais a Lei de Hooke é respeitada (HIBBELER, 2010). Os valores de deformação das rosetas das vigas 1 e 4, no limite do regime elástico linear registrado durante o ensaio, estão apresentados na Tabela 7. Na Tabela 8 são apresentados os valores calculados de deformações principais.

$$\epsilon_b = \epsilon_x \tag{Eq. [5]}$$

$$\epsilon_a + \epsilon_c = \epsilon_x + \epsilon_y \tag{Eq. [6]}$$

$$\epsilon_a - \epsilon_c = \gamma_{xy} \tag{Eq. [7]}$$

$$\frac{\gamma_{12}}{2} = \sqrt{\left(\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2\right)} \tag{Eq. [8]}$$

$$\epsilon_{12} = \left(\frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2}\right) \pm \frac{\gamma_{12}}{2} \tag{Eq. [9]}$$

Sendo:

$\epsilon$  = deformação linear;

$\epsilon_x$  = deformação linear no eixo x do plano de tensões;

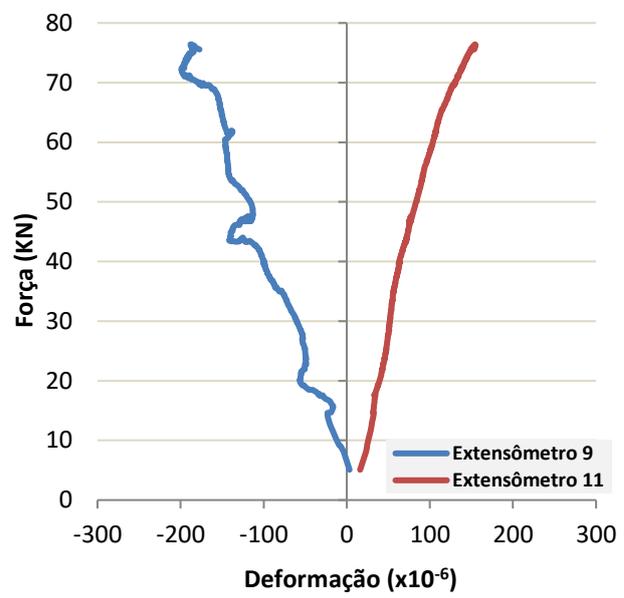
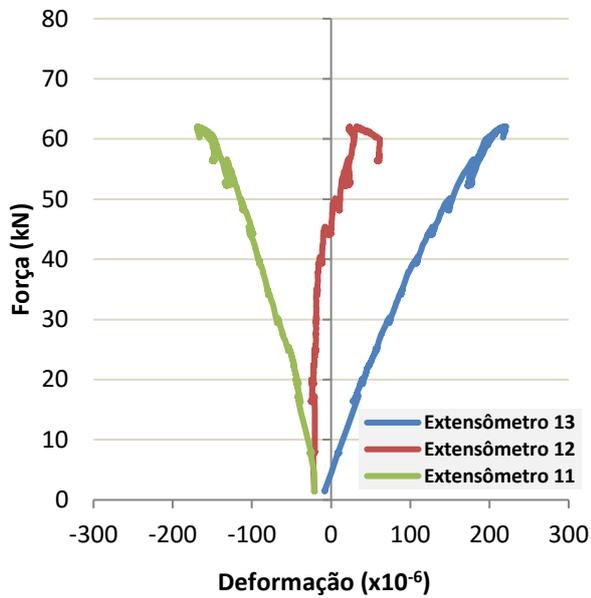
$\epsilon_y$  = deformação linear no eixo y do plano de tensões;

$\epsilon_{12}$  = deformação linear principal;

$\gamma$  = deformação angular;

$\gamma_{xy}$  = deformação angular no plano xy de tensões;

$\gamma_{12}$  = deformação angular principal.



**FIGURA 9:** Força versus Deformação nas rosetas das vigas de seção: [a] Força x Deformação Viga seção "H" - Viga 1 – perfil "H" soldado e [b] Força x Deformação Viga seção Caixa - Viga 4 – perfil caixa. **FONTE:** Autoria própria.

**TABELA 7:** Valores de deformação medidos pela roseta no limite de escoamento e deformação nos eixos cartesianos.

Viga de seção	$\epsilon_a (x10^{-6})$	$\epsilon_b (x10^{-6})$	$\epsilon_c (x10^{-6})$	$\epsilon_x (x10^{-6})$	$\epsilon_y (x10^{-6})$	$\gamma_{xy} (x10^{-6})$
"H"	125	0	-105	0	20	230
Caixa	100	0	-140	0	-40	240

**FONTE:** Autoria própria.

**TABELA 8:** Deformações principais e médias na seção da roseta.

Viga de seção	$\gamma_{12} (x10^{-6})$	$\epsilon_{med} (x10^{-6})$	$\epsilon_1 (x10^{-6})$	$\epsilon_2 (x10^{-6})$
"H"	230,87	10	125,41	-105,44
Caixa	243,31	-20	101,66	-141,66

**FONTE:** Autoria própria.

A partir do valor da deformação principal de cisalhamento ( $\gamma_{12}$ ) e por meio da Equação 10, calculou-se a máxima tensão cisalhante na seção transversal da viga no limite do escoamento. Para tanto, adotou-se  $G = 76,92$  GPa. Assim, utilizando-se da Equação 11, obteve-se a máxima força de cisalhamento experimental. Os valores teóricos da força e da tensão cisalhante foram determinados a partir da reação em cada apoio, uma vez que a força cortante no ponto onde foi colada a roseta é dado por esse mesmo valor. Na Tabela 9 estão apresentados os valores teóricos e experimentais da força cortante e da tensão de cisalhamento.

$$\tau = G \gamma \quad \text{Eq. [10]}$$

Sendo:

- $\tau$  = tensão cisalhante (MPa);
- $G$  = módulo de elasticidade transversal do material (GPa);
- $\gamma$  = deformação angular.

$$\tau = \frac{V Q}{I t} \quad \text{Eq. [11]}$$

Sendo:

- $V$  = força cortante na seção transversal (kN);
- $Q$  = momento estático máximo da seção transversal de cada viga ( $m^3$ );
- $t$  = espessura da alma do perfil (m).

Observa-se da Tabela 9 que as tensões de cisalhamento são bem inferiores à tensão de escoamento do material, demonstrando que essas vigas romperam por flexão. Além disso, a força cortante experimental foi 38% superior à força

cortante teórica da viga de seção em “H” e 18% superior à força cortante teórica da viga de seção caixa. Esses valores estão a favor da segurança, sendo que a diferença pode ser devida ao valor estimado para o módulo de elasticidade transversal do material.

### 3.5 EFICIÊNCIA ESTRUTURAL

Foi calculada a eficiência estrutural de cada viga a fim de se determinar qual tipo de seção transversal apresenta a maior eficiência mecânica, ou seja, aquele que resiste aos maiores valores de carregamento para um menor volume de aço utilizado. Das quatro vigas ensaiadas, apenas as vigas de seção “H” e caixa foram carregadas até a ruptura e apresentaram valores de força última ( $F_u$ ) iguais a, respectivamente, 60 kN e 76 kN. Assim, com a utilização da Equação 12, para determinar o peso dos perfis por metro linear, e da Equação 13, para o cálculo da eficiência ( $e$ ) das vigas, foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 10.

$$m = A \gamma_{aço} \quad \text{Eq. [12]}$$

Sendo:

- $m$  = peso por metro linear do perfil (kg/m);
- $A$  = área da seção transversal do perfil ( $m^2$ );
- $\gamma_{aço}$  = peso específico do aço ( $kN/m^3$ ).

$$e = \frac{M_{esc}}{m} \text{ ou } \frac{M_{plast}}{m} \quad \text{Eq. [13]}$$

Sendo:

- $e$  = eficiência mecânica da viga ( $kNm^2/kg$ ).

**TABELA 9:** Valores teóricos e experimentais da força cortante e da tensão de cisalhamento máxima na seção.

Viga de seção	Q ( $m^3$ )	I ( $\times 10^{-6} m^4$ )	t (mm)	$\tau$ (MPa)	$V_{teo}$ (kN)	$V_{exp}$ (kN)
“H”	$9,11 \times 10^{-5}$	12,16	6,7	17,76	15,88	22,15
Caixa	$8,33 \times 10^{-5}$	11,25	10,18	18,72	25,73	30,30

FONTE: Autoria própria.

TABELA 10: Eficiência estrutural das vigas de seção “H” e Caixa.

Viga de seção	A (mm <sup>2</sup> )	m (kg/m)	M <sub>esc</sub> (kNm)	M <sub>plst</sub> (kNm)	e <sub>y</sub> (kNm <sup>2</sup> /kg)	e <sub>plast</sub> (kNm <sup>2</sup> /kg)
"H"	2952,83	23,18	64,40	84,00	2,78	3,62
Caixa	3163,748	24,84	72,72	92,40	2,93	3,72

FONTES: Autoria própria.

Portanto, verifica-se da Tabela 10 que a viga de seção caixa apresentou uma eficiência mecânica 5% maior que o perfil “H” se for tomado no dimensionamento o momento elástico. A norma ABNT NBR 14762 não permite o dimensionamento de perfis formados a frio em regime plástico, enquanto a norma ABNT NBR 8800 permite a consideração da plastificação da seção transversal nos perfis compactos. Sendo assim, comparando o momento de plastificação do perfil “H” com o momento elástico do perfil caixa, o primeiro apresenta uma eficiência mecânica 24% maior. Entretanto, neste trabalho constatou-se que o perfil caixa se comportou como um perfil compacto, atingindo a plastificação total da seção transversal. Dessa forma, pode-se concluir que ele foi tão eficiente quanto o perfil de seção em “H”, já que a sua eficiência estrutural foi 3% maior que a do perfil em “H”.

Deve-se destacar, porém, que outros fatores devem ser considerados antes da definição do tipo de seção a ser utilizado, como por exemplo, soldagem, flambagem lateral e resistência à torção.

#### 4. CONCLUSÃO

As vigas ensaiadas nesse trabalho possuem seção transversal de pequenas dimensões, apresentando, dessa forma, baixa rigidez. Assim, para valores de força relativamente pequenos, foram encontrados elevados valores de deslocamentos. Entretanto, verificou-se relação direta entre a resistência e a rigidez da viga com o seu momento de inércia. Portanto, quanto maior o momento de inércia, maior a resistência à flexão da viga. Essa proporcionalidade ficou evidente na comparação dos ensaios das vigas de seção “U” (Viga 2 e Viga 3), onde a rotação da

mesma em torno de um eixo alterou as suas propriedades geométricas e, conseqüentemente, sua resistência.

O cálculo da eficiência estrutural levou em conta apenas as duas vigas com maiores momentos de inércia, isto é, a Viga 1, em perfil soldado em forma de “H”, e a Viga 4, com seção transversal em forma de caixa e constituída por dois perfis leves dobrados a frio e soldados ao longo de suas abas. A viga mais eficiente foi aquela que resistiu aos maiores valores de momento fletor com o menor consumo de material. Nesse sentido, pode-se concluir que a viga em seção de caixa foi tão eficiente quanto o perfil de seção em “H” se for permitida a consideração da plastificação da seção transversal. Caso contrário, a viga em perfil soldado, compacta, foi até 24% mais eficiente devido à plastificação da seção transversal, mesmo com o material apresentando menor resistência que o aço dos perfis leves dobrados a frio.

Assim, a principal conclusão desse trabalho é que as seções compactas em perfis formados a frio podem ser tão eficientes quanto os perfis soldados desde que seja permitido o dimensionamento dos mesmos considerando a plastificação total da seção transversal.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento dessa pesquisa por meio da Chamada CNPq/VALE S.A. Nº 05/2012 – Forma Engenharia. Os autores também agradecem aos alunos Danielle Galvão Amarantes, Juliana Romana Dias Dionizio, Matheus Cavalcante Borges e Valdivino Candido Teixeira Júnior pelo auxílio na realização dos ensaios.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_, NBR 14762: **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas de perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_, NBR ISO 6892-1: **Materiais metálicos — Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2013.

DAVID, D. L. **Análise do comportamento de vigas mistas com perfil e conectores formados a frio e laje treliçada**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

HANOR, A. **Tests of composite beams with cold-formed sections**. Journal of Constructional Steel Research. v. 54, p. 245-264, 2000.

MALITE, M. **Análise do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada**. Tese. (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1993.

OLIVEIRA, L. A. F. **Estudo do comportamento e da resistência das vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis formados a frio e lajes pré-fabricadas**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.