

# Dimensionamento de Ligações Rígidas com Chapas de Extremidade

*Janaina P. S. Oliveira<sup>1</sup>*

*Jean M. R. Mônico<sup>2</sup>*

*Adenilcia F. G. Calenzani<sup>3</sup>*

*Walnório G. Ferreira<sup>4</sup>*

## Resumo

O dimensionamento de ligações rígidas em estruturas de aço assume um papel de plena importância na garantia das propriedades de resistência e estabilidade da estrutura. Essas ligações são responsáveis pela transmissão dos esforços de flexão e cortante entre os elementos estruturais.

As ligações em estruturas de aço são constituídas basicamente por meios de ligações, como parafusos e soldas e por elementos de ligações, como enrijecedores e chapas. Os parafusos das ligações rígidas com chapa de extremidade estão sujeitos aos esforços combinados de tração e cisalhamento. Devido ao esforço de tração deve-se considerar no dimensionamento das chapas e dos parafusos o efeito alavanca. Neste artigo serão abordadas duas metodologias de cálculo para consideração deste efeito em tais ligações, uma sugerida pela NBR8800:2008 e outra desenvolvida no Steel Design Guide Series 16 (Murray e Shoemaker, 2003).

O objetivo desse artigo foi o desenvolvimento de planilhas de cálculo capazes de efetuar o dimensionamento das ligações rígidas com chapas de extremidade segundo ambas as metodologias supracitadas. Inicialmente as planilhas foram calibradas com resultados da bibliografia (Baião e Silva, 2005) e a seguir alguns exemplos de ligações foram implementados variando-se os parâmetros da ligação. Ao final, os resultados obtidos e as conclusões são apresentados.

**Palavras-chave:** Estruturas de aço, Ligações Rígidas, Parafusos, Chapas.

## 1 Introdução

Uma das principais etapas no estudo e na elaboração de projetos de estrutura de aço é o cálculo das ligações entre os elementos estruturais, fato este de plena importância, uma vez que a opção correta por um determinado tipo de ligação e o seu dimensionamento adequado proporcionará propriedades de resistência, rigidez e estabilidade necessárias à segurança e ao bom funcionamento da estrutura como um todo.

Em geral, as ligações estruturais são projetadas como rígidas (engastadas) ou flexíveis (rotuladas). Nas ligações rígidas, supõe-se a completa transferência de momentos e total inexistência de giros relativos entre as partes. De forma contrária, ao se projetar ligações flexíveis, supõe-se capacidade ilimitada de rotação e inexistência de transmissão de momentos.

As ligações viga-pilar com chapa de extremidade são ligações engastadas cuja função é unir a viga ao pilar por meio de uma chapa soldada. É possível executar esta ligação configurando a chapa de várias maneiras diferentes: pode-se limitar a altura e o comprimento da chapa às dimensões da seção transversal do perfil da viga, pode-se estender a altura da chapa além da altura do perfil, pode-se estender a largura da chapa além da largura das mesas da viga, dentre outras maneiras (Figura 1). É evidente que cada uma dessas configurações acarretará em um diferente dimensionamento da ligação.

Na ligação viga-pilar com chapa de extremidade, se a chapa for pouco espessa, esta tende a se deformar. Como as extremidades da chapa estão fixas pelos parafusos, essas não se deformam, gerando uma força adicional  $Q$  em cada parafuso. Dessa forma, o efeito alavanca aumenta a força no parafuso, sendo que esse

1 Engenheira Civil – Universidade Federal do Espírito Santo – janainapenas@gmail.com.

2 Engenheiro Civil – Universidade Federal do Espírito Santo – jean.mrm@hotmail.com.

3 Professora Doutora do Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo – afcalenzani@gmail.com.

3 Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo – walnorio@gmail.com.

aumento deve ser levado em consideração na análise da ligação. A Figura 2 ilustra a força de alavanca atuando em um modelo tê-dividido para três diferentes espessuras de chapa.

## 2 Métodos de Dimensionamento

### 2.1 NBR8800:2008

A NBR8800:2008 permite fazer análises menos

rigorosas para situações em que haja o efeito alavanca, dispensando a determinação do valor da força  $Q$ .

De acordo com a NBR8800:2008, pode-se admitir que o efeito alavanca foi considerado desde que o valor da dimensão  $a$  seja inferior ao da dimensão  $b$  (Figura 3), dimensionando-se as chapas e os parafusos com uma das opções a seguir:

- a) Determinar as espessuras das chapas das partes ligadas considerando o momento fletor solicitante dado na Figura 4 menor ou igual ao momento resistente de cálculo

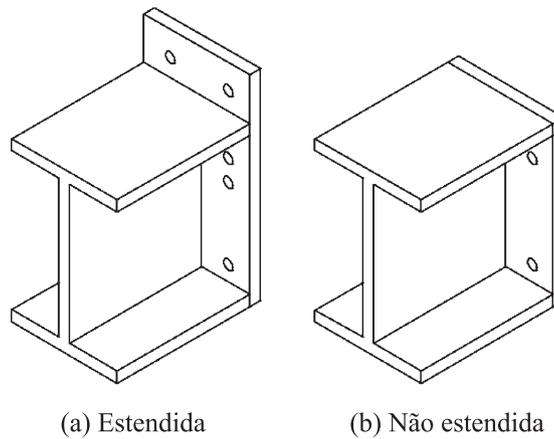


Figura 1 – Diferentes configurações da chapa de extremidade.

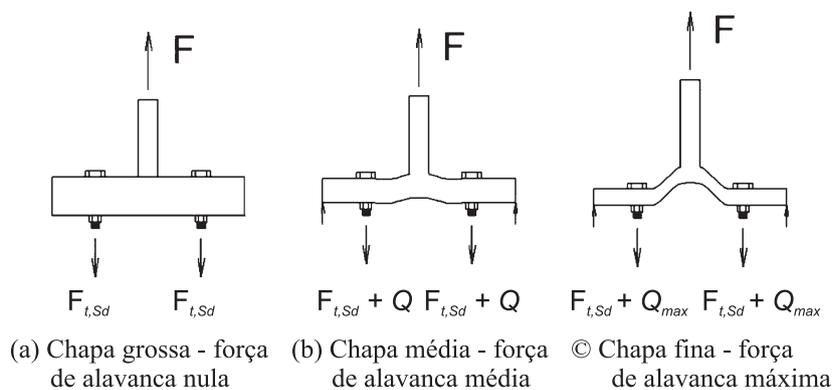


Figura 2 – Efeito alavanca.

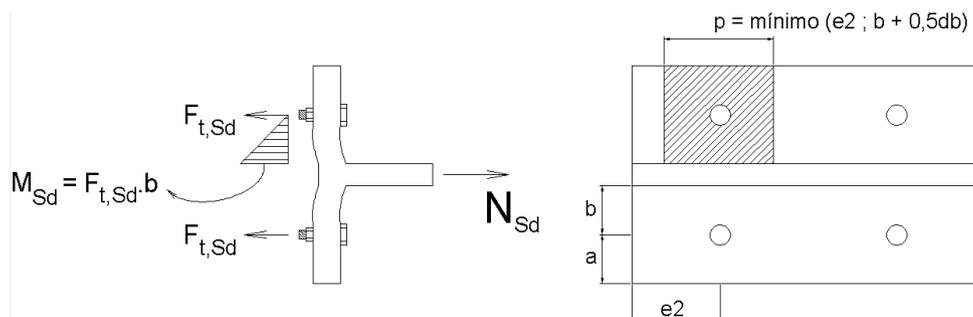


Figura 3 – Parâmetros a considerar no efeito alavanca (adaptada da NBR8800:2008).

de plastificação, e dimensionar os parafusos considerando uma redução de 33% da sua força resistente de cálculo à tração;

- b) Determinar as espessuras das chapas das partes ligadas empregando o momento resistente de cálculo elástico e dimensionar os parafusos considerando uma redução de 25% da sua força resistente de cálculo à tração.

Ao empregar o momento resistente de plasti-

ficção, obtêm-se menores espessuras de chapas. Entretanto, pelo fato de a chapa ser mais fina, o efeito alavanca será maior nos parafusos, o que explica a maior redução da sua força resistente à tração.

## 2.2 Steel Design Guide Series 16 (Murray e Shoemaker, 2003)

Murray e Shoemaker (2003) apresentam dois

Momento Plástico	Momento Elástico
<p><b>1) Dimensionar os parafusos:</b></p> $F_{t,Sd} \leq 0,67 F_{t,Rd}$ <p>Onde <math>F_{t,Sd}</math> e <math>F_{t,Rd}</math> são as forças de tração solicitante e resistente de cálculo, respectivamente.</p> <p><b>2) Dimensionar a chapa:</b></p> $F_{t,Sd} \cdot b \leq \frac{Z f_y}{\gamma f_{a1}}$ <p>Onde os dois termos são, respectivamente, os momentos fletores solicitante e resistente de cálculo.</p>	<p><b>1) Dimensionar os parafusos:</b></p> $F_{t,Sd} \leq 0,75 F_{t,Rd}$ <p>Onde <math>F_{t,Sd}</math> e <math>F_{t,Rd}</math> são as forças de tração solicitante e resistente de cálculo, respectivamente.</p> <p><b>2) Dimensionar a chapa:</b></p> $F_{t,Sd} \cdot b \leq \frac{W f_y}{\gamma f_{a1}}$ <p>Onde os dois termos são, respectivamente, os momentos fletores solicitante e resistente de cálculo.</p>

Figura 4 – Sequência de cálculo para dimensionamento segundo a NBR8800:2008.

Chapa Grossa	Chapa Fina
<p><b>1) Dimensionar os parafusos:</b></p> $M_u \leq \phi M_{np}$ <p>Onde <math>M_u</math> e <math>\phi M_{np}</math> são o momento fletor solicitante de cálculo na ligação e o momento fletor resistente de cálculo à ruptura dos parafusos, respectivamente.</p> <p><b>2) Dimensionar a chapa:</b></p> $\phi M_{np} \leq 0,90 \phi_b M_{pl}$ <p>Onde <math>M_u</math> e <math>\phi M_{np}</math> é o momento resistente de cálculo para plastificação da chapa.</p>	<p><b>1) Dimensionar os parafusos:</b></p> $W_r M_u \leq \phi_b M_{np}$ <p>Onde <math>F_{t,Sd}</math> e <math>F_{t,Rd}</math> são as forças de tração solicitante e resistente de cálculo, respectivamente.</p> <p><b>2) Determinar a força de alavanca máxima para um dado diâmetro de parafusos.</b></p> <p><b>3) Verificar o momento resistente da ligação sujeita ao efeito alavanca.</b></p> $M_u \leq \phi M_q$ <p><math>\phi M_q</math> o momento resistente de cálculo da ligação correspondente à ruptura dos parafusos por tração, considerando-se a força de alavanca.</p>

Figura 5 – Sequência de cálculo para dimensionamento segundo AISC Steel Design Guide Series 16.

procedimentos para o dimensionamento da chapa e dos parafusos sujeitos ao efeito alavanca, com base no mecanismo das linhas de escoamento e no método Kennedy (1981) apud Murray e Shoemaker (2003), descritos a seguir:

- a) Chapa com comportamento de chapa grossa (Figura 2-a): a força de alavanca só atua nos parafusos quando a chapa atinge 90% de seu momento de plastificação. Dessa forma, pode-se dimensionar os parafusos considerando a chapa como grossa, desprezando-se a força de alavanca nos mesmos.
- b) Chapa com comportamento de chapa fina (Figura 2-c): os parafusos são dimensionados para a força de alavanca máxima. Para isso, determina-se a espessura da chapa necessária para resistir ao momento fletor solicitante de cálculo na região da ligação e a seguir calcula-se a força de alavanca máxima correspondente à espessura determinada.

### 3 Desenvolvimento e Calibração das Planilhas de Cálculo

Planilhas eletrônicas foram desenvolvidas no Microsoft Excel (2010), baseadas nas metodologias da NBR8800:2008 e de Murray e Shoemaker (2003), sendo que nesta última foi adotada a norma AISC360-05 para verificação dos parafusos, soldas e chapas. A entrada de dados e a saída de resultados estão representadas na Figura 6.

Além disso, a Figura 6 mostra a planilha de cálculo de ligação com chapa de extremidade estendida. Entretanto, foi feita planilha similar para chapa de extremidade não estendida. Essas planilhas dimensionam ligações com perfis de aço laminados da Açominas, atualmente do grupo Gerdau. Pode-se considerar ligação por contato ou por atrito com parafusos de alta resistência ASTM A-325 ou ASTM A-490, sendo o número de parafusos da ligação

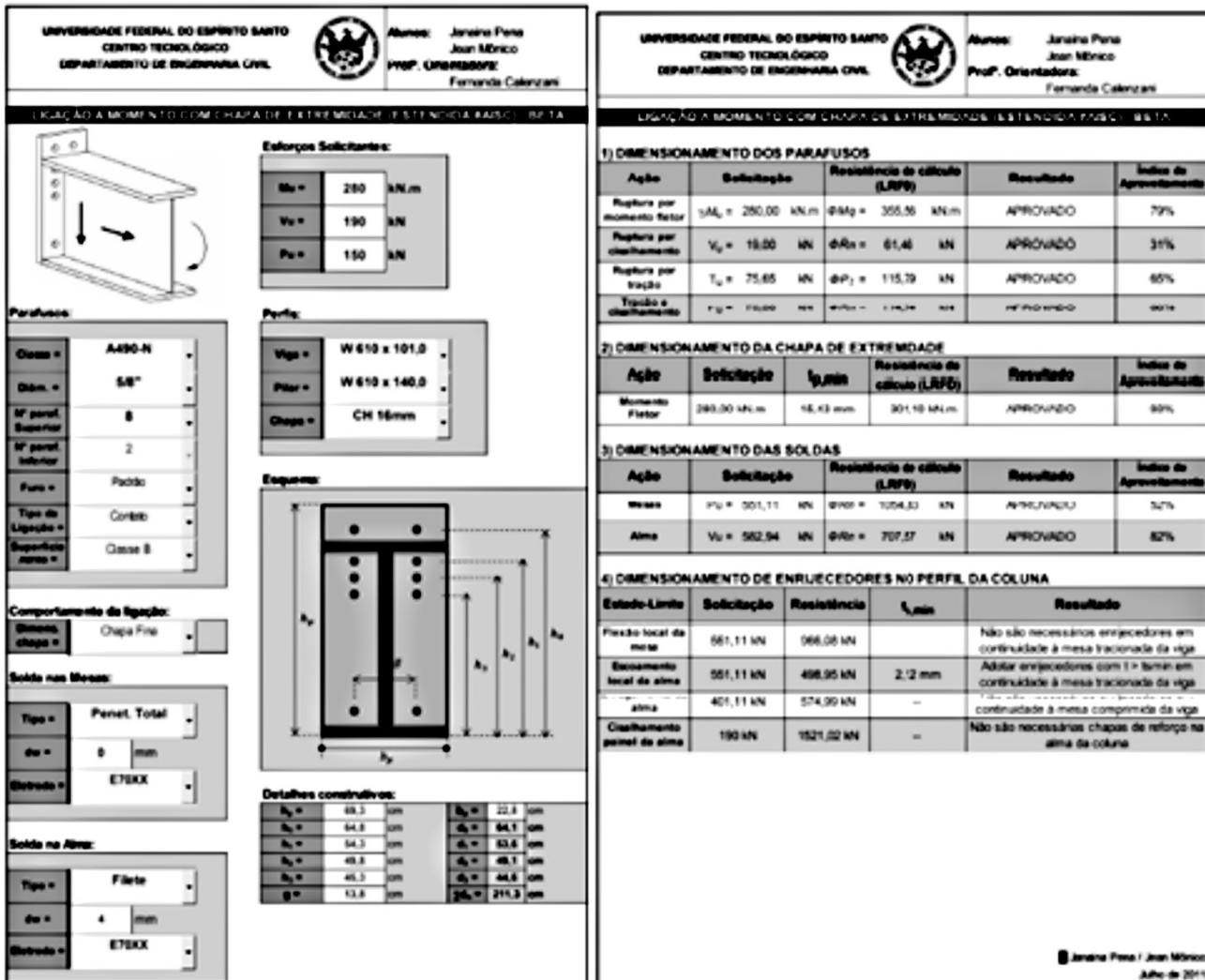


Figura 6 – Planilha de cálculo de ligação com chapa de extremidade estendida.

definido pelo usuário. Adicionalmente, o cálculo dos filetes da solda entre a viga e a chapa de extremidade também é apresentado.

Para validar as planilhas de cálculo dois exemplos de ligações viga-pilar com chapa de extremidade estendida de Baião e Silva (2005) foram dimensionados, conforme representado na Figura 7.

Os resultados que mais se aproximam aos encontrados no Guia Prático de Estruturas em Perfis Laminados, de Baião e Silva (2005), são os da metodologia sugerida por Murray e Shoemaker (2003), considerando a chapa com comportamento de chapa grossa e as equações da AISC360-05. Tal

aproximação é explicada pelo fato de Baião e Silva (2005) ter utilizado equações similares às encontradas na AISC360-05.

## 4 Resultados e Discussões

Diferentes configurações na geometria da ligação acarretam diferentes resultados quanto aos valores da espessura da chapa e do diâmetro dos parafusos. Na Figura 8-a, foram comparadas ligações variando a tipologia da chapa (estendida ou não estendida), mantendo-se os demais parâmetros da ligação como o

<b>W 200 x 22,5</b>		<b>ESFORÇOS</b>	$M_{Sd} = 50 \text{ kN.m}$
			$V_{Sd} = 154 \text{ kN.m}$
		<b>MATERIAIS</b>	Parafusos: A325-N
			Soldas: E70XX
			Chapa: ASTM A36
			$N_{Sd} = 0$

	Baião e Silva (2005) - Catálogo Gerdau	NBR 8800:2008		AISC 360-05	
		Mom. Plástico	Mom. Elástico	Chapa Fina	Chapa Grossa
$t_p =$	16mm	22,4mm	31,5mm	16mm	19mm
$d_b =$	$\phi 5/8"$	$\phi 3/4"$	$\phi 3/4"$	$\phi 5/8"$	$\phi 5/8"$
$S_1 =$	Filete 8mm	Filete 9mm	Filete 9mm	Filete 9mm	Filete 9mm
$S_2 =$	Filete 6mm	Filete 6mm	Filete 6mm	Filete 6mm	Filete 6mm

<b>W 530 x 66,5</b>		<b>ESFORÇOS</b>	$M_{Sd} = 468 \text{ kN.m}$
			$V_{Sd} = 161 \text{ kN.m}$
		<b>MATERIAIS</b>	Parafusos: A325-N
			Soldas: E70XX
			Chapa: ASTM A36
			$N_{Sd} = 0$

	Baião e Silva (2005) - Catálogo Gerdau	NBR 8800:2008		AISC 360-05	
		Mom. Plástico	Mom. Elástico	Chapa Fina	Chapa Grossa
$t_p =$	31,5mm	22,4mm	31,5mm	16mm	19mm
$d_b =$	$\phi 1"$	$\phi 3/4"$	$\phi 3/4"$	$\phi 5/8"$	$\phi 5/8"$
$S_1 =$	Penetração total	Penetração total	Penetração total	Penetração total	Penetração total
$S_2 =$	Filete 9mm	Filete 6mm	Filete 6mm	Filete 6mm	Filete 6mm

Figura 7 – Validação das planilhas de cálculo de ligação com chapa de extremidade estendida.

<b>W 310 x 52,0</b>		<b>ESFORÇOS</b> $M_{Sd} = 120 \text{ kN.m}$ $V_{Sd} = 130 \text{ kN.m}$ $N_{Sd} = 50$

	NBR 8800:2008 - Momento Resistente Plástico		AISC 360-05 - Comportamento de chapa fina	
	Estendida	Não Estendida	Estendida	Não Estendida
$t_p =$	31,5mm	37,5mm	16mm	22,4mm
$d_b =$	22mm	24mm	20mm	24mm
$S_1 =$	Filete 9mm	Filete 9mm	Filete 9mm	Filete 9mm
$S_2 =$	Filete 5mm	Filete 5mm	Filete 5mm	Filete 5mm

(a) Comparação de chapa estendida e não estendida

<b>W 610 x 101,0</b>		<b>ESFORÇOS</b> $M_{Sd} = 468 \text{ kN.m}$ $V_{Sd} = 161 \text{ kN.m}$ $N_{Sd} = 0$

Nº de parafusos	NBR 8800:2008 - Momento Resistente Plástico			AISC 360-05 - Comportamento de chapa fina		
	4	6	8	4	6	8
$t_p =$	37,5mm	31,5mm	25mm	19mm	16mm	16mm
$d_b =$	22mm	20mm	20mm	20mm	16mm	16mm

(b) Ligação viga-pilar com chapa de extremidade estendida para diferentes quantidades de parafusos tracionados

<b>W 250 x 17,9</b>		<b>ESFORÇOS</b> $M_{Sd} = 28 \text{ kN.m}$ $V_{Sd} = 110 \text{ kN.m}$ $N_{Sd} = 11$

	NBR 8800:2008 - Momento Resistente Plástico		AISC 360-05 - Comportamento de chapa fina	
	Atrito	Contato	Atrito	Contato
$t_p =$	22mm	22mm	12,5mm	12,5mm
$d_b =$	16mm	16mm	16mm	16mm

c) Ligação viga-pilar com chapa de extremidade não estendida por atrito e por contato

Figura 8 – Dimensionamento de ligações viga-pilar com chapa de extremidade.

tipo de perfil, os valores dos esforços e a quantidade de parafusos. Já na Figura 8-b, dimensionou-se uma ligação viga-pilar com chapa de extremidade estendida utilizando-se, para meio de comparação, quantidades diferentes de parafusos tracionados (4, 6 e 8). Por fim, na Figura 9-c, dimensionaram-se ligações viga-pilar por atrito e por contato com chapa de extremidade não estendida. Para todos estes tipos de dimensionamento adotou-se o método da NBR8800:2008 com momento resistente plástico da chapa e o método sugerido por Murray e Shoemaker (2003) com comportamento de chapa fina (Figura 2-c).

Pela Figura 8-a observa-se que as ligações com chapa de extremidade estendida necessitam de chapas menos espessas e parafusos com diâmetros menores do que nas ligações cuja chapa de extremidade não é estendida. A redução do diâmetro dos parafusos ocorre devido à força de tração, causada pelo momento fletor solicitante de cálculo, ser menor à medida que aumentamos o valor de  $\sum d_n$ . Além disso, como nas ligações com chapa de extremidade estendida a força de tração no parafuso é menor, o momento fletor solicitante de cálculo ( $M_{Sd} = F_{t,Sd} \cdot b$ ) será menor, gerando chapas menos espessas.

Na Figura 8-b é possível perceber que quando aumentamos a quantidade de parafusos tracionados, diminuimos a espessura da chapa de extremidade e o diâmetro dos parafusos da ligação. À medida que se acrescenta linhas de parafusos mais próximas à linha neutra do perfil, a contribuição não é tão relevante se comparada quando acrescentamos linhas de parafusos próximas à mesa superior do perfil. Isso ocorre devido ao momento fletor resistente da enésima linha de parafusos ser igual a  $2 \cdot F_{t,Rd} \cdot d_n$ . Assim, se diminuirmos o valor de  $d_n$  a contribuição da linha de parafusos será menor.

Já na Figura 8-c constatou-se que os diâmetros dos parafusos encontrados em ligações por contato e por atrito são equivalentes. Isso aconteceu porque na ligação viga-pilar com chapa de extremidade o esforço predominante nos parafusos é o esforço de tração, portanto, não há redução considerável no diâmetro dos parafusos para o caso de ligações por contato.

Pela Figura 8, observa-se que as equações da NBR8800:2008 apresentam resultados satisfatórios em relação ao dimensionamento de parafusos e soldas. Entretanto, a metodologia simplificada de dimensionamento da chapa de extremidade, sem que seja calculada a força de alavanca, faz com que as espessuras das chapas sejam maiores. Os resultados de dimensionamento mais econômicos encontram-se quando os parafusos e a chapa de extremidade são calculados considerando a chapa com comportamento de chapa fina (Figura 2-c), obtendo-se a resistência da ligação sujeita ao efeito máximo de alavanca.

## 5 Conclusão

A NBR8800:2008 permite análises menos rigorosas em ligações sujeitas ao efeito alavanca. Para isso, ela pressupõe que o efeito alavanca foi considerado, desde que as condições mencionadas no item 4.1 sejam atendidas. No entanto, comparando-se o dimensionamento de ligações rígidas de viga-pilar com chapa de extremidade entre as metodologias da NBR8800:2008 e de Murray e Shoemaker (Steel Design Guide Series 13, 2003), nota-se que esta última traz resultados mais econômicos em relação à espessura da chapa. É importante ressaltar que o dimensionamento de soldas, parafusos, enrijecedores e chapas feitos pela NBR8800:2008 é similar ao da AISC360-05.

Para o dimensionamento de ligações entre vigas-pilares com chapa de extremidade pode-se adotar a chapa estendida ou não estendida, sendo que com o uso da primeira consegue-se obter uma chapa menos espessa, além de diâmetros menores de parafuso. Portanto, em situações em que ocorram grandes esforços, aconselha-se adotar chapas de extremidades estendidas.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES).

## 7 Referências Bibliográficas

- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC 360-05**: Specification for structural steel buildings. Chicago, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:2008 Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.
- BAIÃO, Oswaldo T.; SILVA, Antônio C. V. **Ligações para estruturas de aço: Guia prático para estruturas com perfis laminados**. 2005
- FERREIRA, Walnório Graça. **Dimensionamento de elementos de perfis de aço laminados e soldados**. Vitória, 2004.
- MURRAY, Thomas M.; SHOEMAKER, W. Lee. **Steel design guide series 16: Moment end-plate connections**. Chicago, 2003.
- SILVA, Ana Lydia R. C., FAKURY, Ricardo Hallal. **Dimensionamento básico de elementos de estruturas de aço**. Belo Horizonte, 2009.