



ÁREA LÍQUIDA EFETIVA DE CANTONEIRAS DE AÇO AXIALMENTE TRACIONADAS

Layce Emanuelle Paixão de Vasconcelos

Rafaela Machado Gonçalves

layce.vasconcelos@gmail.com

rafaelamachado1@yahoo.com.br

FAESA

Av. Vitória - 2220, 29053-360, Espírito Santo, Vitória, Brasil

Janaina Pena Soares de Oliveira

janainapenas@gmail.com

FAESA

Av. Vitória - 2220, 29053-360, Espírito Santo, Vitória, Brasil

UFMG

Av. Presidente Antônio Carlos – 6627, 31270-901, Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani

afcalenzani@gmail.com

UFES

Av. Fernando Ferrari – 514, 29075-910, Espírito Santo, Vitória, Brasil

Ricardo Hallal Fakury

fakury@dees.ufmg.br

UFMG

Av. Presidente Antônio Carlos – 6627, 31270-901, Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

Resumo: Ao ser tracionada axialmente, uma barra de aço conectada por apenas alguns dos elementos da seção transversal está sujeita a tensões de tração com distribuição não uniforme junto à ligação. Para considerar essa distribuição, adota-se uma área de trabalho inferior à área líquida da seção transversal na verificação do estado limite-último de ruptura da seção líquida, denominada área líquida efetiva (A_e). Este artigo tem como objetivo estudar os procedimentos de cálculo de A_e de cantoneiras de aço parafusadas por apenas uma aba. Para isso, foram comparados os procedimentos das normas ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-10 e EUROCODE 3:2005 e de Veronez (2005) com análise numérica realizada por Veronez (2005) e com resultados de ensaios encontrados na literatura. Os resultados mostraram que o procedimento de Veronez (2005) e do EUROCODE 3:2005 são os mais seguros, mas, também, que os procedimentos da ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-10 fornecem valores próximos da análise numérica e dos ensaios.

Palavras-chave: Área líquida efetiva, Cantoneiras de aço, Barras tracionadas

1 INTRODUÇÃO

No Brasil o uso das estruturas de aço na construção civil só começou a ser difundido após a chegada da primeira siderúrgica, em 1950. Mais recentemente, esse uso tem aumentado bastante, estimulado pelos inúmeros benefícios que as estruturas de aço oferecem (Paula, 2006), a seguir mencionados. Contribui também para esse aumento a constante evolução da qualidade dos produtos e a demanda do mercado por obras com melhor desempenho.

A montagem das estruturas de aço é relativamente rápida devido ao fato de as peças estruturais serem pré-fabricadas e conectadas entre si na obra, garantindo a estabilidade de todo o conjunto estrutural. Essa rapidez é mais pronunciada quando se usam ligações parafusadas, que dispensam o uso de energia elétrica e facilitam inclusive uma eventual desmontagem da estrutura (Paula, 2006).

Outros inúmeros benefícios que as estruturas de aço proporcionam são listados por Paula (2006), tais como: canteiro de obras reduzido, curto prazo para a execução da obra, projetos arquitetônicos arrojados, vencimento de grandes vãos e atendimento a exigências de alto nível de qualidade e precisão. Aliados à racionalização dos processos de fabricação e montagem, esses benefícios tornam as estruturas de aço uma alternativa competitiva na indústria da construção civil.

Nos sistemas estruturais de aço, é muito comum a utilização de barras que estejam solicitadas à tração axial. As treliças de coberturas (Fig.1) e de pisos, além dos contraventamentos dos edifícios, são alguns exemplos onde são empregadas essas barras, que na maioria das vezes, possuem seções transversais formadas por perfis H, I, U, tubular ou L, sendo estes últimos, chamados de cantoneiras, os mais empregados.



Figura 1. Treliça de cobertura com cantoneiras tracionadas parafusadas por apenas uma aba

No dimensionamento das barras tracionadas, um dos estados-limites últimos que precisam ser verificados é a ruptura da seção líquida. Nessa verificação, é fundamental a determinação da área líquida efetiva. Este artigo tem como objetivo estudar os procedimentos de cálculo adotados pelas normas brasileira ABNT NBR 8800:2008, americana ANSI/AISC 360-10 e europeia EUROCODE 3:2005 e, também, o procedimento indicado por Veronez (2005) para a determinação da área líquida efetiva em cantoneiras conectadas por

meio de parafusos em apenas uma aba (Fig. 1). Para isso, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos pelos procedimentos citados com os resultados numéricos obtidos por Veronez (2005) com o uso do *software* ANSYS 5.5 e com resultados de ensaios encontrados na literatura, descritos por Petretta (1999).

2 BARRAS TRACIONADAS

A área a ser considerada na ruptura da seção líquida é a área líquida efetiva. Essa área é obtida após duas reduções, feitas a partir da área bruta (A_g). A primeira redução é causada pela presença de furos no caso de ligação parafusada, levando à chamada área líquida (A_n) – essa área é igual à área bruta quando a ligação é soldada. A segunda redução é causada pela distribuição de tensões não uniforme junto à ligação, quando essa ligação é feita por apenas alguns dos elementos componentes da seção transversal (o fluxo de tração tende a se concentrar mais nos elementos conectados que nos elementos soltos, em um efeito conhecido como *shear-lag*), levando à área líquida efetiva (A_e). Pode-se definir o efeito *shear-lag* como uma distribuição de tensões não uniforme que ocorre em barras com ligações excêntricas, que se manifesta nas barras com elementos soltos (não conectados), elementos estes que têm sua capacidade total parcialmente utilizada quando é alcançado o estado-limite último de ruptura (Veronez, 2005).

Nas cantoneiras conectadas por meio de parafusos por apenas uma aba, a força de tração passa apenas por essa aba, que fica com tensão média maior do que a aba solta (Fig. 2). Assim, a distribuição de tensão na cantoneira junto à ligação deixa de ser uniforme, razão pela qual se considera apenas parte da área líquida participando da capacidade resistente à ruptura da barra. Essa parcela da área líquida é a denominada área líquida efetiva (A_e).

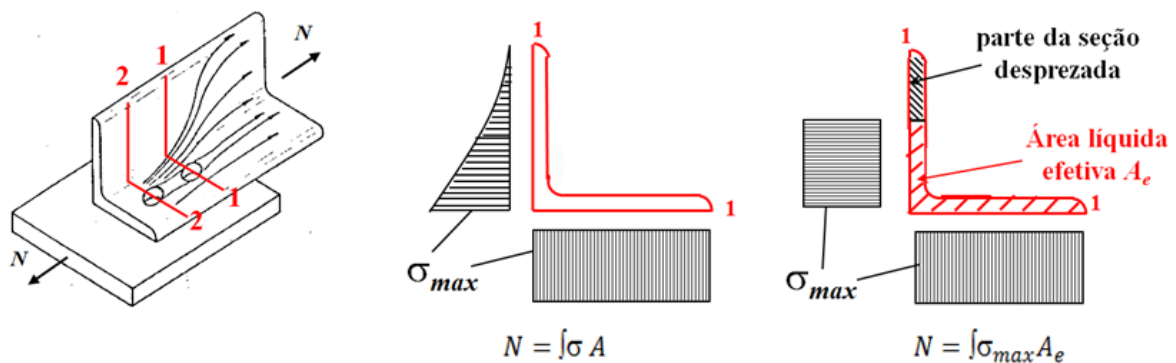


Figura 2. Desvio do fluxo de tração em cantoneira parafusada conectada por apenas uma aba

2.1 Cálculo da área líquida efetiva (A_e)

No intuito de avaliar os fatores que influem no valor da área líquida efetiva, Munse e Chesson (1963) conduziram vários testes em barras com diferentes detalhes de ligação, e foram os primeiros pesquisadores a propor uma expressão para determinar o valor dessa área. Além dos seus próprios testes, eles examinaram outros resultados de testes de ligações parafusadas e rebitadas (Chesson, 1959; Chesson e Munse, 1958). Esses testes incluíam chapas, cantoneiras e perfis U simples, cantoneiras duplas conectadas do mesmo lado ou em lados opostos por chapas auxiliares, quatro cantoneiras opostas, perfis U duplos e barras compostas do tipo I e do tipo caixão, formadas por cantoneiras ou perfis U (Veronez, 2005).

A expressão para o cálculo da área líquida efetiva proposta por Munse e Chesson (1963) é:

$$A_e = A_n \left(1,60 - 0,7 \frac{A_n}{A_g} \right) \left(1 - \frac{e_c}{\ell_c} \right) \quad (1)$$

onde A_n é a área líquida, A_g é a área bruta da seção transversal, e_c é a distância do centro geométrico do perfil ao plano de cisalhamento da ligação (excentricidade da ligação) e ℓ_c é o comprimento da ligação na direção da sollicitação (Fig. 3). O primeiro termo entre parênteses é chamado de coeficiente de eficiência, e depende da distribuição dos parafusos na ligação e do diâmetro dos furos. Esse coeficiente apresenta valor mínimo igual a 0,90 e, para os casos usuais, em que a distância entre os parafusos é da ordem de 3 diâmetros, valor máximo de 1,14. O segundo termo entre parênteses, chamado de fator *shear-lag*, é o mais representativo, e tem a função de levar em conta o efeito *shear-lag*, já definido.

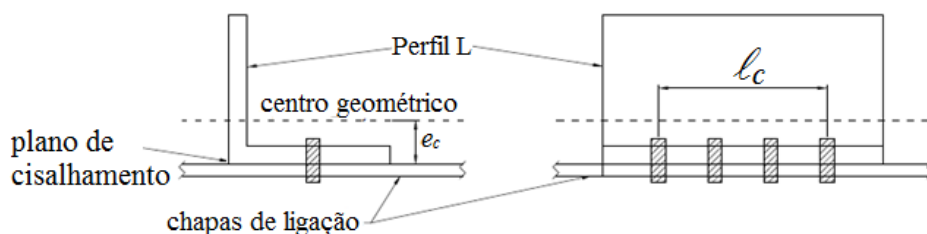


Figura 3. Parâmetros para o cálculo da área líquida efetiva. Adaptada de Sawyer (2013)

2.2 Procedimentos para determinação da área líquida efetiva (A_e)

Procedimento da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008. No procedimento de cálculo apresentado pela ABNT NBR 8800:2008, a área líquida efetiva da seção transversal é calculada por meio de um coeficiente de redução (C_t), aplicado à área líquida (A_n):

$$A_e = C_t A_n \quad (2)$$

Considerando todos os furos alinhados, situação comum na prática, a área líquida A_n é igual à área bruta menos a área dos furos (A_h) na seção transversal, ou seja:

$$A_n = A_g - A_h \quad (3)$$

Assim, em uma cantoneira:

$$A_n = A_g - n(d_h t) \quad (4)$$

onde n é o número de furos na seção transversal, t é a espessura da cantoneira e d_h é o diâmetro dos furos. Caso os furos sejam feitos por meio de broca, a ABNT NBR 8800:2008 recomenda que o diâmetro dos furos seja tomado como igual ao diâmetro do parafuso acrescido de 1,5 mm, já por punção, deve-se acrescentar 3,5 mm ao diâmetro do parafuso.

A ABNT NBR 8800:2008 prescreve que nas barras com seções transversais abertas, o coeficiente de redução da área líquida, C_t , deve ser calculado, com base na Eq. (1), de Munse e Chesson (1963), como igual ao fator *shear-lag*:

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{\ell_c} \quad (5)$$

onde e_c e ℓ_c foram definidos no Subitem 2.1 (Fig. 3), mas com observação de que ℓ_c , nas ligações parafusadas, é igual à distância do eixo do primeiro ao último parafuso da linha de furação com maior número de parafusos, na direção da sollicitação.

Adicionalmente, para consideração do coeficiente de eficiência, conservadoramente, a ABNT NBR 8800:2008 determina que o valor máximo de C_t não pode ser tomado superior a 0,90. Além disso, determina que não podem ser projetadas ligações que resultem em C_t inferior a 0,60, ou seja, ligações com pequena eficiência.

Não é difícil concluir que ligações em que todas as linhas de furação tenham apenas um parafuso na direção da sollicitação não são previstas, uma vez que levariam a um valor nulo do comprimento ℓ_c .

Procedimento da norma americana ANSI/AISC 360-10. A norma americana ANSI/AISC 360-10 também adota como base a equação de Munse e Chesson (1963) para determinação da área líquida efetiva. Assim, utilizam-se as Eqs. (2) a (5), com as seguintes diferenças em relação à ABNT NBR 8800:2008:

- não impõe o limite superior de 0,90 para o coeficiente C_t , ou seja, não leva em conta o coeficiente de eficiência;
- não impede que seja usada uma ligação em que o coeficiente C_t dado pela Eq. (5) seja menor que 0,60;
- admite que se adote um valor mínimo de C_t igual a 0,60 para cantoneiras ligadas com três parafusos e igual a 0,80 para cantoneiras ligadas com quatro ou mais parafusos por linha de furação na direção da sollicitação, mesmo que seja obtido um valor menor pela Eq. (5).

Procedimento da norma europeia EUROCODE 3:2005. A norma adotada pelos países europeus, EUROCODE 3:2005, na sua Parte 8 (EN 1993-1-8:2005), relacionada ao projeto de ligações, determina que a área líquida efetiva de cantoneiras tracionadas ligadas por uma aba, para o caso de apenas 1 parafuso na direção da sollicitação (Fig. 4-a), seja obtida pela seguinte expressão:

$$A_e = 2(e_2 - 0,5d_h) \cdot t \quad (6)$$

onde o comprimento e_2 é a distância do centro do furo à borda livre, como mostra a Fig. 4-a, e t é a espessura da cantoneira.

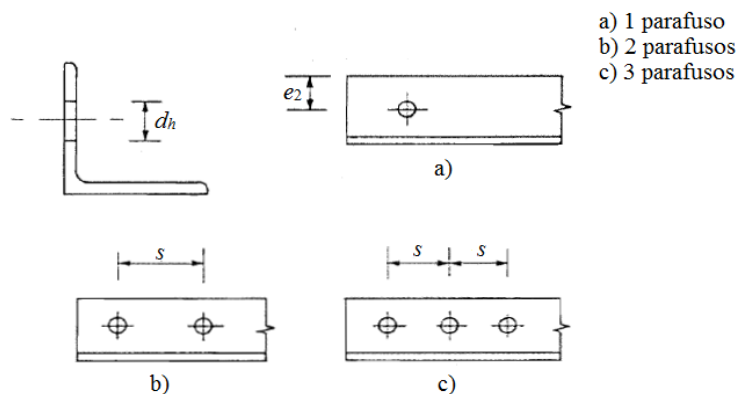


Figura 4. Conexões em cantoneiras. Adaptada do EN 1993-1-8:2005

Para linha de furação com 2 parafusos (Fig. 4-b), tem-se:

$$A_e = \beta_2 A_n \quad (7)$$

Finalmente, para linha de furação com 3 ou mais parafusos (Fig. 4-c), vem:

$$A_e = \beta_3 A_n \quad (8)$$

Os parâmetros β_2 e β_3 são fatores de redução que dependem do espaçamento entre furos adjacentes (s) e do diâmetro dos furos (d_h), como indicado na Tabela 1. Para valores intermediários do espaçamento, os valores de β_2 e β_3 podem ser determinados por interpolação linear.

Tabela 1. Fatores de redução β_2 e β_3 . Adaptada da EN 1993-1-8:2005

Espaçamento entre furos adjacentes (s)	$\leq 2,5 d_h$	$\geq 5,0 d_h$
2 parafusos (β_2)	0,4	0,7
3 ou mais parafusos (β_3)	0,5	0,7

O EUROCODE 3:2005, na sua Parte 1 (EN 1993-1-1:2005), que trata do dimensionamento de modo geral, por sua vez, determina que a área líquida efetiva não pode superar 90% da área líquida. Assim, em síntese, deve ser usada a Eq. (6), ou a Eq. (7), ou a Eq. (8), dependendo do número de parafusos na direção da solicitação, mas o valor obtido precisa ser limitado em 0,90.

Proposta de Veronez (2005). No estudo realizado por Veronez (2005) foi analisada a ruptura da área líquida efetiva de cantoneiras de aço tracionadas e ligadas por parafusos. Nesse estudo, foi feita uma simulação numérica de cantoneiras conectadas por apenas uma aba com uma única linha de furação na direção da solicitação com auxílio do *software* ANSYS 5.5, utilizando o método dos elementos finitos. Na análise numérica, Veronez (2005) obteve os valores do coeficiente de redução da área líquida efetiva, $C_{t,num}$, através da seguinte equação:

$$C_{t,num} = \frac{N_{t,u}}{A_n f_u} \quad (9)$$

onde $N_{t,u}$ é a força de tração que levou ao colapso a barra analisada e f_u a resistência à ruptura do aço.

No intuito de estudar os procedimentos encontrados na literatura para determinação da força de tração resistente quanto à ruptura da seção líquida, Veronez (2005) analisou, por meio de modelos numéricos, os parâmetros que influenciam nesse modo de colapso, sendo eles: a geometria da seção transversal, a espessura do elemento conectado, o comprimento da ligação (considerando o número de parafusos por linha de furação e o espaçamento longitudinal entre furos), o espaçamento transversal entre furos (em ligações com mais de uma linha de furação na direção da solicitação), a distância de furo à borda e a excentricidade da ligação.

Para a construção dos modelos numéricos, Veronez (2005) escolheu o aço ASTM A36, um dos mais utilizados na fabricação de cantoneiras no Brasil.

Após a análise dos resultados obtidos na modelagem numérica, Veronez (2005) propôs que a área líquida efetiva de cantoneiras tracionadas também seja calculada multiplicando-se a área líquida A_n por um coeficiente de redução, que será simbolizado neste trabalho por $C_{t,v}$. Para a determinação desse coeficiente em ligações com 5 ou mais parafusos dispostos em uma linha de furação na direção da solicitação, as seguintes equações foram deduzidas:

$$C_{t,v} = 1,45 \left(\frac{e_2}{e_2 + e_0} \right) - 0,19 \quad \text{para} \quad \frac{e_2}{e_2 + e_0} < 0,67 \quad (10)$$

e,

$$C_{t,v} = 0,78 \quad \text{para} \quad \frac{e_2}{e_2 + e_0} \geq 0,67 \quad (11)$$

onde e_2 é a distância da linha de furação à borda longitudinal mais próxima e e_0 é a distância da linha de furação à linha que passa pelo centro geométrico da seção transversal na direção da aba parafusada, como mostra a Fig. 5.

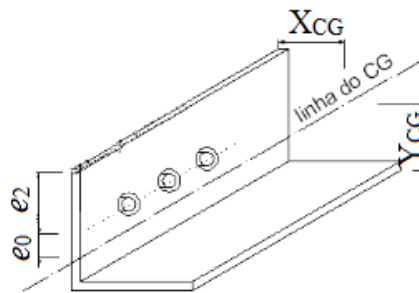


Figura 5. Distâncias e_2 e e_0 . Adaptada de Veronez (2005)

Caso as ligações tenham 3 ou 4 parafusos na linha de furação, Veronez (2005) recomenda multiplicar os valores das Eqs. (10) e (11) por 0,6 e 0,9, respectivamente.

3 METODOLOGIA

O objetivo geral da pesquisa é avaliar os procedimentos de cálculo para obter o valor da área líquida efetiva (A_e) de cantoneiras de aço tracionadas prescritos pelas normas brasileira (ABNT NBR 8800:2008), americana (ANSI/AISC 360-10) e europeia (EUROCODE 3:2005), além do procedimento proposto por Veronez (2005), tendo como referência os resultados numéricos de Veronez (2005) e os resultados de ensaios citados por Petretta (1999).

Com o intuito de se avaliar a eficiência dos procedimentos citados, realizou-se uma análise paramétrica, na qual foram analisados os 19 modelos numéricos estudados por Veronez (2005) - modelos M01 a M19 - e, os resultados obtidos, com auxílio do *software* ANSYS 5.5, foram comparados com os desses procedimentos. Nessa análise, os seguintes parâmetros foram avaliados: largura da aba da cantoneira (b), espessura da cantoneira (t), quantidade de parafusos por linha de furação (n), distância longitudinal do centro do furo à borda da cantoneira na direção paralela ao carregamento (e_1), distância do centro do furo à borda da cantoneira na direção transversal ao carregamento (e_2), espaçamento entre furos adjacentes na direção paralela ao carregamento (s), excentricidade da ligação (e_c), comprimento da ligação (ℓ_c) e distância do centro do furo à linha do centro geométrico da cantoneira (e_0). A Figura 7 mostra os parâmetros analisados e a Tabela 2 fornece o resumo

dos modelos numéricos de Veronez (2005) estudados neste artigo, com os parâmetros avaliados em **negrito**.

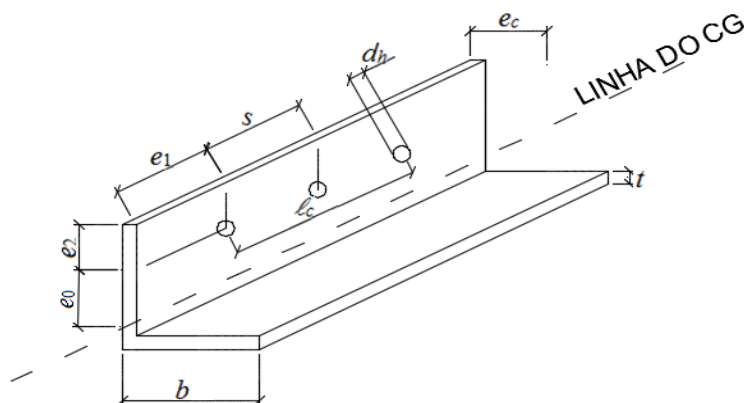


Figura 7. Parâmetros avaliados

Tabela 2. Modelos de Veronez (2005) analisados neste artigo

Modelo	Parâmetro avaliado	b (cm)	t (cm)	d_h (cm)	n	e_1 (cm)	e_2 (cm)	s (cm)	e_0 (cm)	l_c (cm)	e_c (cm)
M01	n, l_c	6,5	0,8	1,62	3	3	4,1	6,35	0,4816	12,7	1,918
M02		6,5	0,8	1,62	4	3	4,1	6,35	0,4816	19,05	1,918
M03		6,5	0,8	1,62	5	3	4,1	6,35	0,4816	25,4	1,918
M04		6,5	0,8	1,62	6	3	4,1	6,35	0,4816	31,75	1,918
M05		6,5	0,8	1,62	7	3	4,1	6,35	0,4816	38,1	1,918
M06	s, l_c	6,5	0,8	1,62	4	3	4,1	4,445	0,4816	13,335	1,918
M07		6,5	0,8	1,62	4	3	4,1	5,08	0,4816	15,24	1,918
M08		6,5	0,8	1,62	4	3	4,1	5,715	0,4816	17,145	1,918
M09		6,5	0,8	1,62	4	3	4,1	6,35	0,4816	19,05	1,918
M10		6,5	0,8	1,62	4	3	4,1	6,99	0,4816	20,97	1,918
M11	b, e_2, e_c	4,0579	0,5	1,62	5	3	1,9	6,35	0,96	25,4	1,198
M12		4,9923	0,5	1,62	5	3	2,6	6,35	0,96	25,4	1,432
M13		6,0597	0,5	1,62	5	3	3,4	6,35	0,96	25,4	1,700
M14		6,9936	0,5	1,62	5	3	4,1	6,35	0,96	25,4	1,934
M15	b, e_c, e_0	5,4193	0,5	1,62	5	3	3,4	6,35	0,48	25,4	1,539
M16		6,0597	0,5	1,62	5	3	3,4	6,35	0,96	25,4	1,700
M17		6,7001	0,5	1,62	5	3	3,4	6,35	1,44	25,4	1,860
M18		7,3404	0,5	1,62	5	3	3,4	6,35	1,92	25,4	2,020
M19		7,9806	0,5	1,62	5	3	3,4	6,35	2,4	25,4	2,181

Os procedimentos estudados neste artigo também foram comparados com os resultados de ensaios encontrados na literatura e descritos por Petretta (1999). Os valores do coeficiente de redução da área líquida efetiva obtidos nos ensaios, $C_{t,ensaio}$, foram calculados de modo similar a Veronez (2005), por meio da Eq. (9). Para a análise dos resultados, foram selecionados 11 ensaios de cantoneiras tracionadas conectadas por parafusos em apenas uma aba, realizados por Nelson (1953), Muller e Wagner (1985), Hanson (1987) *apud* Madugula e Mohan (1988), Zanon (1989) *apud* Newell (1989) e Wu e Kulak (1993). A Tabela 3 fornece um resumo dos modelos dos ensaios - M20 a M30 - estudados neste artigo.

Tabela 3. Modelos dos ensaios citados por Petretta (1999) e analisados neste artigo

Modelo	Ensaio	Perfil	d_h (cm)	n	e_2 (cm)	s (cm)	e_0 (cm)	ℓ_c (cm)	e_c (cm)
M20	Nelson (1953)	L 76x76x6,3	1,98	5	3,15	6,35	2,34	25,4	2,11
M21	Muller e Wagner (1985)	L 76x76x6,3	1,75	5	3,15	2,54	2,34	10,16	2,11
M22		L 50x50x6,3	2,06	3	2,14	5,08	1,43	10,16	1,43
M23		L 50x50x3,2	2,06	3	2,14	5,08	1,52	10,16	1,34
M24	Hanson (1987)	L 76x76x4,8	1,75	3	3,15	3,81	2,36	7,62	2,09
M25	Zanon (1989)	L 50x50x4	3,75	4	2,14	4,5	1,72	13,5	1,14
M26		2L 50x50x4	3,75	4	2,14	4,5	2,29	13,5	0,57
M27	Wu e Kulak (1993)	L 102x102x6,3	2,05	6	3,85	7,6	3,57	38	2,78
M28		L 76x76x4,8	2,30	6	3,15	7,6	2,36	38	2,09
M29		2L 102x102x6,3	2,05	6	3,85	7,6	4,96	38	1,39
M30		2L 76x76x4,8	2,30	6	3,15	7,6	3,41	38	1,04

Para se obter os valores da área líquida efetiva dos modelos da Tabela 2 e da Tabela 3 foi desenvolvida uma planilha, com auxílio do *software* Excel:2013, onde calculou-se o valor de A_e por meio de cada procedimento estudado. Esses valores de A_e foram comparados com os valores numéricos de Veronez (2005) e dos resultados dos ensaios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 4 constam os resultados obtidos da área líquida efetiva para os modelos M01 até M30, de acordo com cada procedimento estudado: ABNT NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-10, EUROCODE 3:2005 e Veronez (2005). Constam, também, os resultados obtidos numericamente por Veronez (2005) nos modelos M01 até M19, e os obtidos pelos ensaios citados por Petretta (1999) nos modelos M20 até M30.

Tabela 4. Área líquida efetiva (cm²)

Modelo	ABNT NBR 8800:2008	ANSI/AISC 360-10	EUROCODE 3:2005	Veronez (2005) - Procedimento	Veronez (2005) - Numérico	Ensaio
M01	7,19	7,19	5,92	3,54	4,26	-
M02	7,61	7,61	5,92	5,32	6,46	-
M03	7,62	7,82	5,92	5,91	6,96	-
M04	7,62	7,95	5,92	5,91	6,96	-
M05	7,62	8,04	5,92	5,91	6,96	-
M06	7,25	7,25	5,92	5,32	6,30	-
M07	7,40	7,40	5,92	5,32	6,38	-
M08	7,52	7,52	5,92	5,32	6,43	-
M09	7,61	7,61	5,92	5,32	6,46	-
M10	7,62	7,79	5,92	5,32	6,46	-
M11	2,70	2,86	2,10	2,32	2,41	-
M12	3,54	3,71	2,75	2,24	3,20	-
M13	4,50	4,67	3,50	3,04	4,08	-
M14	5,34	5,48	4,15	3,75	4,64	-
M15	3,92	4,10	3,05	3,11	3,72	-
M16	4,50	4,67	3,50	3,11	4,17	-
M17	5,08	5,23	3,95	3,11	4,60	-
M18	5,65	5,78	4,40	4,60	4,66	-
M19	6,23	6,33	4,84	4,49	4,66	-
M20	7,25	7,39	4,49	5,17	-	6,27
M21	6,51	6,57	4,11	5,26	-	4,59
M22	4,13	4,13	2,41	1,96	-	3,85
M23	2,17	2,17	1,25	0,99	-	1,72
M24	4,53	4,53	3,12	2,39	-	3,65
M25	2,88	2,93	1,60	1,77	-	2,73
M26	5,76	6,13	3,20	2,94	-	5,82
M27	10,04	10,34	6,66	6,28	-	9,23
M28	5,32	5,59	3,34	3,77	-	5,47
M29	20,10	21,51	13,32	9,91	-	17,55
M30	10,69	11,55	6,70	6,02	-	9,73

Na Tabela 5 são apresentadas as razões entre as áreas líquidas efetivas obtidas por cada procedimento estudado com relação aos resultados numéricos de Veronez (2005) nos modelos M01 até M19.

Tabela 5. Razão entre as áreas líquidas efetivas obtidas pelos procedimentos analisados e os resultados numéricos de Veronez (2005)

Modelo	ABNT NBR 8800:2008	ANSI/AISC 360-10	EUROCODE 3:2005	Veronez (2005) - Procedimento
M01	1,68	1,69	1,39	0,83
M02	1,17	1,18	0,92	0,82
M03	1,09	1,12	0,85	0,85
M04	1,09	1,14	0,85	0,85
M05	1,09	1,16	0,85	0,85
M06	1,15	1,15	0,94	0,85
M07	1,16	1,16	0,93	0,83
M08	1,17	1,17	0,92	0,83
M09	1,18	1,18	0,92	0,82
M10	1,18	1,21	0,92	0,82
M11	1,12	1,19	0,87	0,96
M12	1,11	1,16	0,86	0,70
M13	1,10	1,14	0,86	0,75
M14	1,15	1,18	0,89	0,81
M15	1,05	1,10	0,82	0,84
M16	1,08	1,12	0,84	0,75
M17	1,10	1,14	0,86	0,68
M18	1,21	1,24	0,94	0,99
M19	1,34	1,36	1,04	0,96

Na Tabela 6 são apresentadas as razões entre as áreas líquidas efetivas obtidas por cada procedimento estudado com relação aos resultados dos ensaios citados por Petretta (1999) nos modelos M20 até M30.

Tabela 6. Razão entre as áreas líquidas efetivas obtidas pelos procedimentos analisados e os resultados dos ensaios citados por Petretta (1999)

Modelo	ABNT NBR 8800:2008	ANSI/AISC 360-10	EUROCODE 3:2005	Veronez (2005) - Procedimento
M20	1,16	1,18	0,72	0,82
M21	1,42	1,43	0,89	1,15
M22	1,07	1,07	0,62	0,51
M23	1,26	1,26	0,73	0,57
M24	1,24	1,24	0,85	0,65
M25	1,05	1,07	0,59	0,65
M26	0,99	1,05	0,55	0,50
M27	1,09	1,12	0,72	0,68
M28	0,97	1,02	0,61	0,69
M29	1,14	1,23	0,76	0,56
M30	1,10	1,19	0,69	0,62

A Figura 8 apresenta o resultado de variação da área líquida efetiva para cada procedimento estudado, onde ao se alterar o número de parafusos na linha de furação na direção da solicitação (n), obteve-se também a variação do comprimento de ligação (ℓ_c) nos modelos M01 a M05 da Tabela 2. É possível notar que os resultados obtidos pela ABNT NBR 8800:2008 e pela ANSI/AISC 360-10 são em torno de 15% superiores aos resultados numéricos (Tabela 5), exceto para o modelo M01, que apresentou uma maior variação da área líquida efetiva em relação ao resultado numérico para todos os procedimentos. Verifica-se, ainda, que alguns resultados obtidos pela ANSI/AISC 360-10 são superiores aos resultados da ABNT NBR 8800:2008, pelo fato de a norma brasileira limitar o coeficiente C_t em 0,90. Os resultados do procedimento de Veronez (2005) apresentam a menor A_e , com razão em torno de 0,85 em relação aos resultados numéricos. A partir do comprimento de ligação de 25,4 cm, os resultados de Veronez (2005) igualam-se aos resultados da norma EUROCODE 3:2005 para o caso de 3 ou mais parafusos.

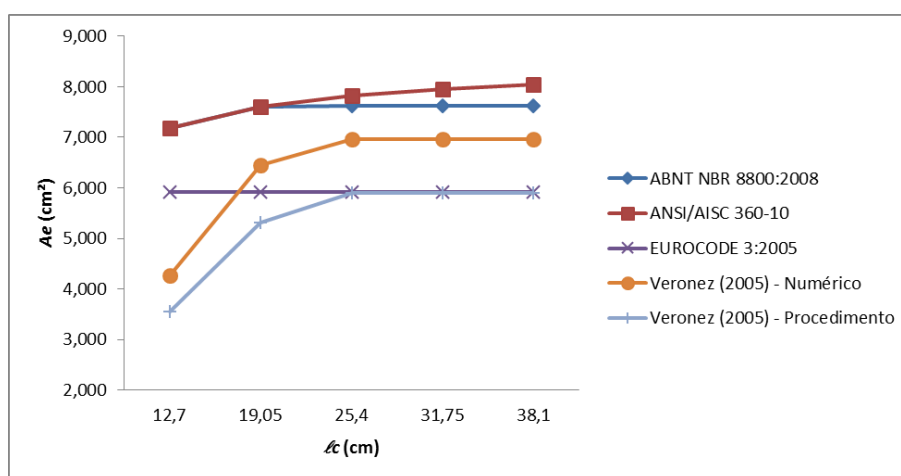


Figura 8. A_e para a variação do número de parafusos por linha de furação (n) para os modelos M01 a M05

Variando o espaçamento entre os furos (s), o comprimento de ligação (ℓ_c) também varia. A Figura 9 mostra os resultados obtidos para a variação desses parâmetros, mantendo-se 4 parafusos por linha de furação nos modelos M06 a M10 (Tabela 2). Pode-se observar que o procedimento do EUROCODE 3:2005 apresentou resultados similares ao da modelagem numérica, com a razão entre as áreas próxima de 1,0 (Tabela 5). Os resultados obtidos pela ABNT NBR 8800:2008 e pela ANSI/AISC 360-10 foram iguais, estando 15% acima dos resultados numéricos. Já o procedimento proposto por Veronez (2005) fornece valores em torno de 17% abaixo dos numéricos.

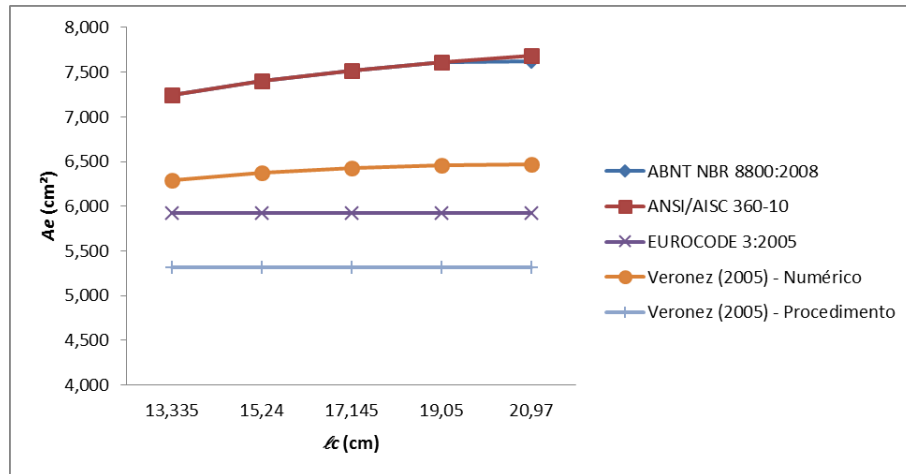


Figura 9. A_e para a variação da distância entre parafusos (s) para os modelos M06 a M10

A Figura 10 apresenta os resultados de A_e obtidos variando-se a distância do centro do furo à borda da barra na direção transversal ao carregamento (e_2), além da alternância das excentricidades da ligação (e_c) e a variação da largura da aba (b), nos modelos M11 a M14 da Tabela 2. Os resultados de A_e para os procedimentos da ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-10 estão próximos, ficando em torno de 10% acima dos resultados numéricos (Tabela 5).

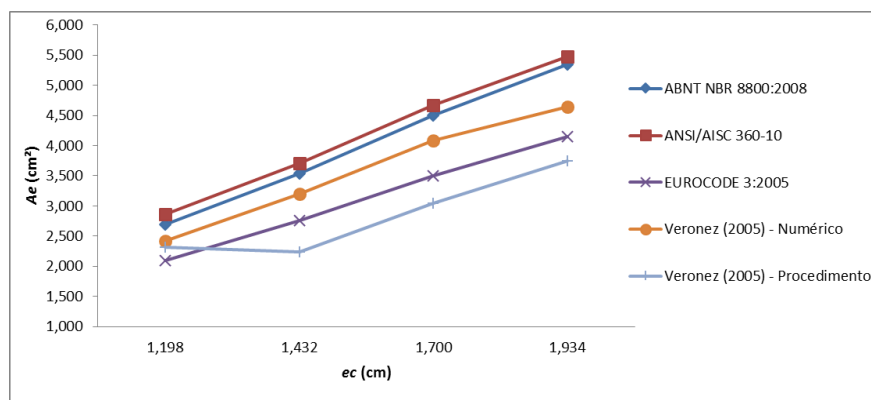


Figura 10. A_e para a variação da distância do centro do furo a borda da barra, transversal à direção do carregamento (e_2) para os modelos M11 a M14

A Figura 11 exibe os resultados de A_e obtidos nos modelos M15 a M19 da Tabela 2, em que ocorreram variação de e_0 , e_c , além da largura das abas (b) das cantoneiras, adotando-se um número padrão de 5 parafusos na linha de furação. Com esses resultados verifica-se um comportamento similar dos procedimentos, ocorrendo uma variação do comportamento para e_c igual a 1,86 cm no procedimento de Veronez (2005), porém estando seu resultado 32% abaixo do numérico (Tabela 5). Os procedimentos da ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-10 apresentaram valores de A_e em torno de 30% acima dos resultados numéricos para os modelos M18 e M19 (Tabela 5) e, nos demais modelos, razão próxima a 1,0.

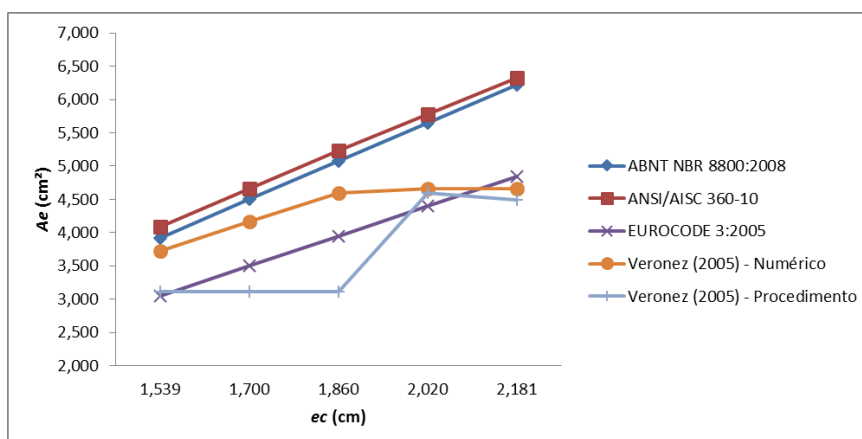


Figura 11. A_e para a variação da excentricidade da ligação (e_c) para os modelos M15 a M19

Na Figura 12 é apresentada a linha de ajuste entre os resultados obtidos nos ensaios citados por Petretta (1999), ou seja, nos modelos M20 até M30 da Tabela 3, e os resultados obtidos pelos procedimentos estudados. É possível observar que os resultados obtidos por esses procedimentos não apresentam grande dispersão em relação à linha de ajuste. Além disso, pode-se notar que o procedimento do EUROCODE 3:2005 e o de Veronez (2005) estão sempre abaixo dos resultados dos ensaios, com a razão em torno de 0,60 (Tabela 6). Os resultados dos procedimentos da ABNT NBR 8800:2008 e do ANSI/AISC 360-10 ficaram muito próximos, estando em torno de 20% acima dos resultados dos ensaios (Tabela 5).

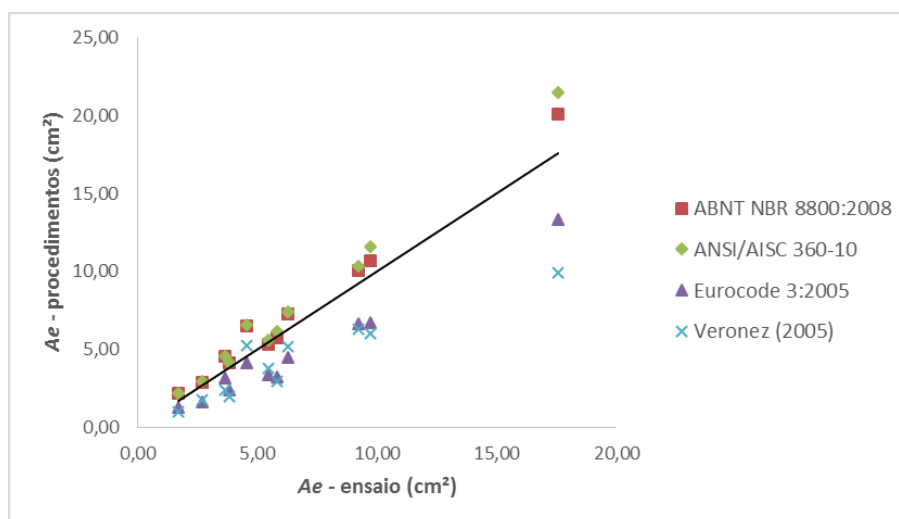


Figura 12. Linha de ajuste perfeito da A_e para os modelos M20 a M30

5 CONCLUSÕES

Neste artigo foram analisados os procedimentos para o cálculo da área líquida efetiva prescritos pelas normas ABNT NBT 8800:2008, ANSI/AISC 360-10 e EUROCODE 3:2005, além do procedimento proposto por Veronez (2005), para o caso de cantoneiras ligadas por apenas uma das abas por meio de 3 ou mais parafusos dispostos em uma linha de furação na direção da solicitação. Para essa análise, foram tomados como referência os resultados

numéricos de 19 modelos de Veronez (2005) e os resultados de 11 ensaios da literatura citados por Petretta (1999).

Os procedimentos apresentados pelo Eurocode 3:2005 e por Veronez (2005) foram os que apresentaram resultados mais conservadores, sempre abaixo dos resultados obtidos na simulação numérica de Veronez (2005) e nos ensaios citados por Petretta (1999). Os procedimentos de cálculo prescritos pelas normas ABNT NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-10 apresentaram resultados próximos entre si, estando algumas vezes maiores do que os resultados numéricos e os dos ensaios, mas dentro de um limite de 21% e 26%, respectivamente. Essas conclusões não se aplicam aos modelos M01, M19 e M21, onde as diferenças foram atípicas, indicando que esses modelos precisam ainda ser melhor avaliados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Fundação de Assistência e Educação (FAESA) pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

American Institute of Steel Construction, 2010. *ANSI/AISC 360-10 Specification for structural steel building*. Chicago.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 8800:2008 *Projeto de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro.

Chesson, E. J., Munse, W.H., 1958. Behavior of riveted connections in truss-type members. *ASCE Transactions*, vol. 123, pp. 1087-1128.

Chesson, E.J., 1959. *Behavior of large riveted and bolted structural connections*. Tese de Doutorado. Universidade de Illinois, Estados Unidos.

European Committee for Standardization – CEN, EN 1993-1-1:2005 – Eurocode 3: *Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Bruxelas, Bélgica.

European Committee for Standardization – CEN, EN 1993-1-8:2005 – Eurocode 3: *Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints*. Bruxelas, Bélgica.

Madagula, M.K.S., Mohan, S., 1988. Angles in eccentric tension. *Journal of the Structural Engineer*, ASCE, v. 114, pp. 2387-2396.

Mueller, W.H., Wagner, A.L., 1985. *Plastic behaviour of steel angle columns*, Res. Rept., Bonneville Power Admin., Portland, Oreg., pp 33-82.

Munse, W.H., Chesson, E.J., 1963. Riveted and bolted joints: net section design. *Journal of Structural Engineering*, vol. 123, n. 9, pp. 1144-1152.

Nelson, H.M., 1953. *Angles in tension*. British Constructional Steelwork Association, n 7, United Kingdom, pp. 8-18.

Newell, M.P., 1989. *Net section design for bolted and welded connections consideration of shear-lag and tear-out modes*. Tese de Doutorado, Universidade de Toronto, Canada.

Paula, V. F., 2006. *Análise experimental e numérica de cantoneiras de aço formadas a frio, sob tração e conectadas por parafusos*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Petretta, M., 1999. *An investigation of the shear lag effect in welded angle tensile connections*. Tese de Doutorado. Universidade de Toronto, Canadá.

Sawyer, B., 2013. *Analysis of shear lag in steel angle connectors*. Honors Theses. Paper 132. Universidade de New Hampshire.

Veronez, J.S., 2005. *Estudo da área líquida efetiva de chapas e cantoneiras de aço tracionadas e ligadas por parafusos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. UFES, Vitória.

Wu, Y., Kulak, G.L., 1993. *Shear lag in bolted single and double angle tension members*. Structural Engineering Report, n 187, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada.