

## Eficiência do coeficiente de redução da área líquida (NBR-14762:2010) em ligações de cantoneiras de aço formadas a frio

Luciano M. Bezerra<sup>1\*</sup>, Ronivon S. Pereira<sup>2</sup>, Valdeir F. DePaula<sup>3</sup>, Jorge Bonilla<sup>4</sup>, Brenda V. Fontes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Professor, Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, [Imbz@unb.br](mailto:Imbz@unb.br)

<sup>2</sup> Aluno, Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, [ronivon.sp@gmail.com](mailto:ronivon.sp@gmail.com), [brendavcf94@gmail.com](mailto:brendavcf94@gmail.com)

<sup>3</sup> Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás/IFG/Goiânia, [valdeir.paula@ifg.edu.br](mailto:valdeir.paula@ifg.edu.br)

<sup>4</sup> Professor, Departamento de Matemática Aplicada, Universidade Ciego de Ávila, Cuba, [jorgedbr@unica.cu](mailto:jorgedbr@unica.cu)

### Efficiency of the net area reduction coefficient (NBR-14762:2010) on bolted connections of cold formed steel angles

#### Resumo

Este trabalho apresenta uma investigação analítica e experimental do coeficiente de redução da área líquida,  $C_t$ , em cantoneiras de aço, formadas a frio, conectadas por parafusos e submetidas a esforço de tração. São apresentados resultados experimentais disponíveis na literatura e mais 86 ensaios inéditos realizados em cantoneiras de aço fabricado no Brasil. Ao se considerar a conexão parafusada, surge o fenômeno de *shear lag* que reduz a capacidade resistente da cantoneira. Desse modo, para o cálculo da capacidade última da peça tracionada, a ruptura da seção líquida é examinada e o *shear lag* levado em conta através do coeficiente  $C_t$ . A partir de análises estatísticas de dados experimentais, compara-se o coeficiente  $C_t$  prescrito pela norma Brasileira NBR-14762:2010 com outras formulações.

**Palavras-chave:** Cantoneiras de aço formadas a frio, *shear lag*, ruptura da seção líquida.

#### Abstract

This work presents an analytical and experimental investigation of the net area reduction coefficient,  $C_t$ , in cold-formed steel angles, connected by bolts and subjected to tensile effort. Several experimental results available in the literature are presented, and 86 more unpublished tests carried out on steel angles manufactured in Brazil. When considering the bolted connection, the shear lag phenomenon arises and reduces the ultimate capacity of the angle. Thus, to calculate the ultimate capacity of tension member, the collapse of the net-section is examined and the shear lag taken into account with the coefficient  $C_t$ . From statistical analyses of the experimental data, the  $C_t$  coefficient prescribed by the Brazilian standard NBR-14762:2010 is compared with other formulations.

**Keywords:** Cold-formed steel angles, *shear lag*, net-section failure.

\* autor correspondente

## 1 Introdução

O uso do aço na construção civil brasileira tem sido bastante estimulado nos últimos anos, especialmente devido aos inúmeros benefícios que as estruturas metálicas oferecem, tais como; canteiro de obras reduzido, curto prazo para a execução da obra, projetos arquitetônicos arrojados com a existência de grandes vãos e a exigência de um nível mais elevado de qualidade e precisão na construção. Aliados à racionalização dos processos de fabricação e montagem, esses benefícios tornam as estruturas em aço uma grande alternativa para o desenvolvimento que a indústria da construção pode realizar em todo o país. Quando se trata da construção em aço na engenharia civil, normalmente são utilizadas três seções principais de aço para vigas, colunas e tirantes: (a) perfis laminados a quente (b) perfis soldados e (c) perfis formados a frio. Seções de aço formadas a frio são obtidas a partir do dobramento, a frio, de chapas finas de aço. Os métodos para fabricar tais seções formadas a frio permitem uma grande liberdade no processo de concepção, e oferecem aos arquitetos e engenheiros uma grande variedade de formas e tamanhos para as seções de aço.

Antes de 1940, as seções de aço formadas a frio não eram populares na indústria da construção civil. De acordo com Chung e Lau (1999), desde então, as seções de aço formadas a frio têm desempenhado um papel significativo na construção residencial e há uma tendência constante para estender a sua utilização em edifícios de baixa altura. As principais vantagens das seções formadas a frio são: preço acessível, peso leve, alta resistência e rigidez, qualidade uniforme, facilidade de pré-fabricação e produção em massa, economia no transporte e no manuseamento, montagem e instalação rápida e fácil, entre outras. Segundo Yu (2000) nos Estados Unidos, cerca de 15 mil casas de aço foram construídas em 1993 e 75 mil em 1996. No Brasil, o uso de perfis de aço formado a frio também cresceu substancialmente.

Para elementos tracionados de aço formado a frio o comportamento desses se difere de várias maneiras daquele de aços pesados. Para se desenvolver um bom projeto de estruturas de aço formado a frio, as especificações são altamente desejáveis, e a norma dos EUA, Canadá e México, AISI (2016) e a NBR-14762 (2010) no Brasil, são exemplos de normas de construção correspondentes às estruturas de aços formados a frio. De acordo com as especificações destas normas, considerando a capacidade de

carga máxima, um dos modos de falhas de elementos unidimensionais, como barras e perfis estruturais, sob tração, é a ruptura da seção líquida da seção transversal do elemento tracionado.

Este artigo busca analisar o comportamento estrutural de ligações parafusadas em cantoneiras de aço formadas a frio, visando através de dados experimentais e estatísticos, obter comparações e prescrição que melhor quantifiquem a resistência à ruptura da seção líquida de conexões sujeitas à redução de resistência pelo coeficiente de redução  $C_t$ , que considera o fenômeno *shear lag*. Além dos dados disponíveis na literatura, foram também testados em laboratório mais 86 modelos de cantoneiras em aço COR 420 cujos resultados são aqui apresentados. Com base nesse conjunto de ensaios, as prescrições da NBR-14762 (2010) são aferidas. Uma nova equação para o coeficiente  $C_t$  é proposta e investigada diante da prescrição de outras normas.

## 2 Análise teórica

Entre as verificações mencionadas na literatura, para peças tracionadas, leva-se em consideração também a ruptura da seção líquida em cantoneiras sujeitas ao fenômeno *shear lag*. Tal fenômeno está ligado diretamente à distribuição não uniforme das tensões quando se conecta uma cantoneira sob tração à chapa de espera, ou chapa *Gusset*. A distância da superfície de contato da chapa de espera ao centro de gravidade da seção da cantoneira causa uma redução na eficiência da peça tracionada e isso é levado em consideração através do coeficiente de redução da seção líquida,  $C_t$  (NBR-14762, 2010 e AISI-S100, 2016). A situação apresentada neste artigo se refere à capacidade resistente à ruptura ( $T_r$ ) da seção líquida na região da ligação em barras sob tração. A norma americana AISI-S100 (2016), no item J6, calcula ( $T_r$ ) a partir da capacidade nominal de resistência ( $T_n$ ) multiplicada por um coeficiente  $\phi = 0,65$ . De forma análoga, a NBR-14762 (2010), no item 9.6.2, calcula ( $T_r$ ) também a partir capacidade nominal, mas dividindo ( $T_n$ ) por um coeficiente  $\gamma = 1,65$ . Em resumo, para o AISI-S100 (2016) e a NBR-14762 (2010), a capacidade última da seção líquida, considerando o fenômeno *shear lag*, é dada, respectivamente, pela Equação (1):

$$T_r = \begin{cases} \phi T_n, \phi = 0,65 \text{ (AISI)} \\ T_n/\gamma, \gamma = 1,65 \text{ (NBR)} \end{cases} \quad \text{sendo} \quad T_n = C_t A_n F_u \quad (1)$$

Onde:  $C_t$  é o coeficiente de redução da seção líquida,  $A_n$  é área líquida e  $F_u$  é a tensão de ruptura do aço da chapa do perfil usado.

Dependendo do tipo da seção do perfil, existe uma expressão diferente para  $C_t$ . O cálculo da seção líquida depende da padronização dos furos e se estes estão em linha ou em zig-zag. A expressão matemática na Equação (1) para as cantoneiras (AISI S100-2016) foi estabelecida baseada em pesquisas na Universidade de Missouri-Rolla (EUA), por Laboube e Yu (1995). Esses estudos propuseram a clássica expressão para o coeficiente  $C_t$  para cantoneiras, com dois ou mais parafusos na direção da solicitação da força de tração: A Equação (2) foi inicialmente usada na norma americana AISI-S100 (2007) e posteriormente adotada pela NBR-14762 (2010). Atualmente a Norma americana AISI-S100 (2016) utiliza a Equação (3) no lugar da Equação (2). A Equação (3) é uma equação obtida a partir dos ensaios conduzidos por Teh e Gilbert (2013 e 2014).

$$C_t = 1,0 - 1,2 \left( \frac{\bar{x}}{L} \right) < 0, \quad (2)$$

$$C_t = \left( \frac{1}{1,1 + \frac{0,5b_1}{b_2+b_1} + 2 \frac{\bar{x}}{L}} \right) \quad (3)$$

Onde:

- $b_1$  é a largura total da aba da cantoneira não conectada,
- $b_2$  é a largura total da aba da cantoneira conectada,
- $\bar{x}$  é a distância do plano da aba conectada até o centro de gravidade e,
- $L$  é o comprimento total da ligação parafusada.

A Equação (2) leva em consideração o *shear lag*, quando a carga aplicada não é transmitida diretamente a todos os elementos de conexão da seção transversal da peça tracionada. Experiências relatadas na literatura, como (Yip e Cheng, 2000; e Maiola, 2004) demonstram que a Equação (2) pode ser modificada para uma melhor representação do fenômeno *shear lag*. Segundo Kulak e Wu (1997), uma melhor determinação da capacidade final de cantoneiras formadas a frio e conectadas por parafusos passa por uma avaliação mais precisa do fenômeno *shear lag*. Observando a Equação (2), é difícil aceitar que o complexo fenômeno de *shear lag*, no qual o fluxo de tensão varia nas direções longitudinal e transversal da cantoneira dependa somente de  $\bar{x}$  e  $L$ . Nota-se que a Equação (2) não leva em conta outros parâmetros, tais como: as

larguras das abas conectadas e não conectadas, a espessura da cantoneira e o diâmetro do parafuso, entre outros.

### 3 Verificação do coeficiente de redução da área líquida " $C_t$ "

Nesta seção será apresentada a verificação da expressão adotada pela AISI-S100 (2016), pela NBR-14762 (2010), entre outras, para o cálculo do coeficiente de redução da área líquida  $C_t$  para cantoneiras formadas a frio e conectadas por parafusos. A relação entre a capacidade final para a resistência nominal da seção líquida é utilizada para avaliar o coeficiente  $C_t$ . A capacidade final experimental é chamada de " $T_{exp}$ ". A resistência da seção líquida nominal " $T_n$ " é obtida através da Equação (1) usando medidas geométricas da cantoneira e propriedades do aço. Dados experimentais mais antigos e disponíveis na literatura foram utilizados para uma avaliação preliminar do coeficiente de redução " $C_t$ " expressa pela Equação (2). Tais dados se referem aos experimentos de Holcomb et al. (1995) e Yip e Cheng (2000) que relatam 42 experimentos em cantoneiras de aço, sob tração e formadas a frio. Já a Equação (3), atualmente utilizada pela AISI S100 (2016), baseia-se em dados recentes de 69 ensaios em cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à tração, dos autores Teh e Gilbert (2013) e Teh e Gilbert (2014). Os ensaios de Holcomb et al. (1995) foram realizados na Universidade de Missouri-Rolla, USA; os de Yip e Cheng (2000) foram realizados na Universidade de Alberta, Canadá, e os de Teh e Gilbert (2013, 2014 ) realizados na Universidade de Wollongong, Austrália.

A Tabela 1 resume os dados dos experimentos acima mencionados e também reporta as propriedades geométricas e dos materiais das cantoneiras ensaiadas. A referida tabela também apresenta o comportamento do coeficiente  $C_t$  segundo as prescrições da NBR-14762 (2010) para cantoneiras de aço formadas a frio e conectadas por parafusos.

A identificação de cada cantoneira está na Tabela 1, sendo " $b_c$ " a largura da aba conectada; " $b_d$ " a largura da aba não conectada; " $t$ " a espessura uniforme; " $d$ " o diâmetro nominal do parafuso; " $\bar{x}$ " a distância do plano da aba conectada até o centro de gravidade; e " $L$ " o comprimento total da ligação parafusada ao longo da direção da força aplicada. A Figura 1 ilustra uma cantoneira formada a frio.

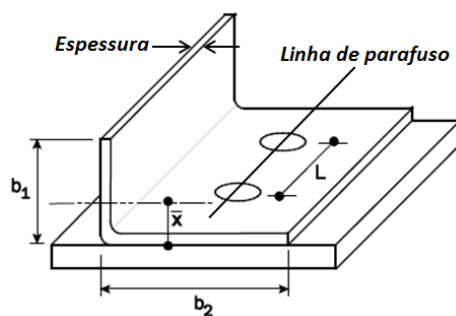


Figura 1- Cantoneira de aço formada a frio com uma conexão de parafusos.

A cantoneira na Figura 1 está ligada por parafusos a uma chapa de espera, ou chapa Gusset. Na Tabela 1, as cantoneiras conectam-se com 2, 3, ou 4 parafusos por linha, e a resistência nominal ( $T_n$ ) é calculada segundo a Eq.(1) com as propriedades geométricas e do material da cantoneira. Com a divisão de ( $T_n$ ) pela carga final de ruptura ( $T_r$ ), obtida experimentalmente ( $T_r = T_{exp}$ ), obtém-se um índice de performance da Eq. (1). Tal índice indica resultado insatisfatório e contra a segurança quando menor que um, ( $T_{exp}/T_n < 1,0$ ); caso contrário, ( $T_{exp}/T_n \geq 1,0$ ), o resultado é conservador.

Tabela 1 – Características e comportamento do coeficiente  $C_t$  dado pela NBR 14762-2010 das cantoneiras de aço formadas a frio, apresentadas por Holcomb et al. (1995), Yip e Cheng (2000) e Teh e Gilbert (2013 e 2014).

| Nº. En-saios | Fonte  | Config. do modelo | $b_c$ (mm) | $b_d$ (mm) | $t$ (mm) | Nº Par. | $d$ (mm) | $\bar{x}$ (mm) | $L$ (mm) | $T_{exp}$ (kN) | $F_u$ (MPa) | $A$ (mm <sup>2</sup> ) | $A_n$ (mm <sup>2</sup> ) | $T_n$ (kN) | $T_{exp}^- / T_n$ (kN) | $T_{exp}^- / T_n$ (%) | $T_{exp} / T_n$ | $C_t$ NBR 14762 (2010) | $C_t$ exp |
|--------------|--------|-------------------|------------|------------|----------|---------|----------|----------------|----------|----------------|-------------|------------------------|--------------------------|------------|------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|-----------|
| 1            | Hol-   | LBN11-1           | 41,30      | 41,30      | 1,067    | 2       | 12,70    | 10,81          | 38,1     | 15,80          | 385         | 86,3                   | 71,11                    | 18,1       | -2,3                   | -14,3                 | 0,875           | 0,659                  | 0,577     |
| 2            | comb   | LBN11-2           | 41,30      | 41,30      | 1,067    | 2       | 12,70    | 10,81          | 38,1     | 16,20          | 385         | 86,3                   | 71,11                    | 18,1       | -1,9                   | -11,4                 | 0,897           | 0,659                  | 0,592     |
| 3            | et al. | LBN11-3           | 41,30      | 41,30      | 1,067    | 2       | 12,70    | 10,81          | 38,1     | 15,90          | 385         | 86,3                   | 71,11                    | 18,1       | -2,2                   | -13,5                 | 0,881           | 0,659                  | 0,581     |
| 4            | 1995   | LCN11-1           | 41,30      | 41,30      | 1,067    | 3       | 12,70    | 10,81          | 76,2     | 19,60          | 385         | 86,3                   | 71,11                    | 22,7       | -3,1                   | -15,9                 | 0,863           | 0,830                  | 0,716     |
| 5            |        | LCN11-2           | 41,30      | 41,30      | 1,067    | 3       | 12,70    | 10,81          | 76,2     | 20,00          | 385         | 86,3                   | 71,11                    | 22,7       | -2,7                   | -13,6                 | 0,880           | 0,830                  | 0,731     |
| 6            |        | LCN11-3           | 41,30      | 41,30      | 1,067    | 3       | 12,70    | 10,81          | 76,2     | 20,90          | 385         | 86,3                   | 71,11                    | 22,7       | -1,8                   | -8,7                  | 0,920           | 0,830                  | 0,763     |
| 7            |        | LBN12-1           | 41,30      | 82,50      | 1,067    | 2       | 12,70    | 28,06          | 38,1     | 17,90          | 385         | 130,2                  | 115,07                   | 17,7       | 0,2                    | 1,0                   | 1,010           | 0,400                  | 0,404     |
| 8            |        | LBN12-2           | 41,30      | 82,50      | 1,067    | 2       | 12,70    | 28,06          | 38,1     | 19,30          | 385         | 130,2                  | 115,07                   | 17,7       | 1,6                    | 8,2                   | 1,089           | 0,400                  | 0,436     |
| 9            |        | LBN12-3           | 41,30      | 82,50      | 1,067    | 2       | 12,70    | 28,06          | 38,1     | 18,20          | 385         | 130,2                  | 115,07                   | 17,7       | 0,5                    | 2,6                   | 1,027           | 0,400                  | 0,411     |
| 10           |        | LCN12-1           | 41,30      | 82,50      | 1,067    | 3       | 12,70    | 28,06          | 76,2     | 21,90          | 385         | 130,2                  | 115,07                   | 24,7       | -2,8                   | -12,9                 | 0,886           | 0,558                  | 0,494     |
| 11           |        | LCN12-2           | 41,30      | 82,50      | 1,067    | 3       | 12,70    | 28,06          | 76,2     | 22,80          | 385         | 130,2                  | 115,07                   | 24,7       | -1,9                   | -8,4                  | 0,922           | 0,558                  | 0,515     |
| 12           |        | LBN13-1           | 82,50      | 41,30      | 1,067    | 2       | 12,70    | 7,34           | 38,1     | 25,30          | 385         | 130,2                  | 115,07                   | 34,1       | -8,8                   | -34,6                 | 0,743           | 0,769                  | 0,571     |
| 13           |        | LBN13-2           | 82,50      | 41,30      | 1,067    | 2       | 12,70    | 7,34           | 38,1     | 24,40          | 385         | 130,2                  | 115,07                   | 34,1       | -9,7                   | -39,6                 | 0,716           | 0,769                  | 0,551     |
| 14           |        | LCN13-1           | 82,50      | 41,30      | 1,067    | 3       | 12,70    | 7,34           | 76,2     | 29,80          | 385         | 130,2                  | 115,07                   | 39,2       | -9,4                   | -31,5                 | 0,761           | 0,884                  | 0,673     |
| 15           |        | LCN13-2           | 82,50      | 41,30      | 1,067    | 3       | 12,70    | 7,34           | 76,2     | 31,70          | 385         | 130,2                  | 115,07                   | 39,2       | -7,5                   | -23,6                 | 0,809           | 0,884                  | 0,716     |
| 16           |        | LBN31-1           | 41,30      | 41,30      | 3,048    | 2       | 12,70    | 11,74          | 38,1     | 49,00          | 366         | 236,5                  | 193,21                   | 44,6       | 4,4                    | 9,0                   | 1,099           | 0,630                  | 0,693     |
| 17           |        | LBN31-2           | 41,30      | 41,30      | 3,048    | 2       | 12,70    | 11,74          | 38,1     | 48,30          | 366         | 236,5                  | 193,21                   | 44,6       | 3,7                    | 7,7                   | 1,084           | 0,630                  | 0,683     |
| 18           |        | LCN31-1           | 41,30      | 41,30      | 3,048    | 3       | 12,70    | 11,74          | 76,2     | 58,50          | 366         | 236,5                  | 193,21                   | 57,6       | 0,9                    | 1,5                   | 1,015           | 0,815                  | 0,827     |
| 19           |        | LCN31-2           | 41,30      | 41,30      | 3,048    | 3       | 12,70    | 11,74          | 76,2     | 56,70          | 366         | 236,5                  | 193,21                   | 57,6       | -0,9                   | -1,7                  | 0,984           | 0,815                  | 0,802     |
| 20           |        | LBN32-1           | 41,30      | 82,50      | 3,048    | 2       | 12,70    | 29,14          | 38,1     | 52,00          | 366         | 362,1                  | 318,79                   | 46,7       | 5,3                    | 10,2                  | 1,114           | 0,400                  | 0,446     |
| 21           |        | LBN32-2           | 41,30      | 82,50      | 3,048    | 2       | 12,70    | 29,14          | 38,1     | 56,00          | 366         | 362,1                  | 318,79                   | 46,7       | 9,3                    | 16,7                  | 1,200           | 0,400                  | 0,480     |
| 22           |        | LCN32-1           | 41,30      | 82,50      | 3,048    | 3       | 12,70    | 29,14          | 76,2     | 62,90          | 366         | 362,1                  | 318,79                   | 63,1       | -0,2                   | -0,4                  | 0,996           | 0,541                  | 0,539     |
| 23           |        | LCN32-2           | 41,30      | 82,50      | 3,048    | 3       | 12,70    | 29,14          | 76,2     | 60,20          | 366         | 362,1                  | 318,79                   | 63,1       | -2,9                   | -4,9                  | 0,953           | 0,541                  | 0,516     |
| 24           |        | LBN33-1           | 82,50      | 41,30      | 3,048    | 2       | 12,70    | 8,20           | 38,1     | 80,90          | 366         | 362,1                  | 318,79                   | 86,6       | -5,7                   | -7,0                  | 0,935           | 0,742                  | 0,693     |
| 25           |        | LBN33-2           | 82,50      | 41,30      | 3,048    | 2       | 12,70    | 8,20           | 38,1     | 79,60          | 366         | 362,1                  | 318,79                   | 86,6       | -7,0                   | -8,7                  | 0,920           | 0,742                  | 0,682     |
| 26           |        | LCN33-1           | 82,50      | 41,30      | 3,048    | 3       | 12,70    | 8,20           | 76,2     | 88,30          | 366         | 362,1                  | 318,79                   | 101,6      | -13,3                  | -15,7                 | 0,869           | 0,871                  | 0,757     |
| 27           |        | LCN33-2           | 82,50      | 41,30      | 3,048    | 3       | 12,70    | 8,20           | 76,2     | 90,90          | 366         | 362,1                  | 318,79                   | 101,6      | -10,7                  | -11,8                 | 0,895           | 0,871                  | 0,779     |
| 28           | Yip e  | 12,2              | 102,00     | 102,00     | 2,657    | 2       | 19,10    | 26,72          | 95,5     | 135,80         | 516         | 530,4                  | 475,69                   | 163,1      | -27,3                  | -20,1                 | 0,833           | 0,664                  | 0,553     |
| 29           | Chen.  | 12,3              | 102,00     | 102,00     | 2,657    | 3       | 19,10    | 26,72          | 191,0    | 154,70         | 516         | 530,4                  | 475,69                   | 204,3      | -49,6                  | -32,0                 | 0,757           | 0,832                  | 0,630     |
| 30           | 1997   | 12,4              | 102,00     | 102,00     | 2,657    | 3       | 19,10    | 26,72          | 191,0    | 158,30         | 516         | 530,4                  | 475,69                   | 204,3      | -46,0                  | -29,0                 | 0,775           | 0,832                  | 0,645     |
| 31           |        | 14,2              | 50,80      | 50,80      | 1,897    | 2       | 15,90    | 13,57          | 63,3     | 35,70          | 327         | 186,8                  | 153,81                   | 37,4       | -1,7                   | -4,6                  | 0,956           | 0,743                  | 0,710     |
| 32           |        | 14,3              | 50,80      | 50,80      | 1,897    | 3       | 15,90    | 13,57          | 126,6    | 43,00          | 327         | 186,8                  | 153,81                   | 43,8       | -0,8                   | -1,9                  | 0,981           | 0,871                  | 0,855     |
| 33           |        | 16,2              | 38,10      | 38,10      | 1,519    | 2       | 12,70    | 10,22          | 38,1     | 20,30          | 317         | 112,0                  | 90,39                    | 19,4       | 0,9                    | 4,3                   | 1,045           | 0,678                  | 0,708     |
| 34           |        | 16,3              | 38,10      | 38,10      | 1,519    | 3       | 12,70    | 10,22          | 76,2     | 24,40          | 317         | 112,0                  | 90,39                    | 24,0       | 0,4                    | 1,5                   | 1,015           | 0,839                  | 0,852     |
| 35           | Yip e  | A2-2              | 51,00      | 51,00      | 1,214    | 2       | 19,10    | 13,31          | 63,5     | 27,90          | 316         | 121,4                  | 96,46                    | 22,8       | 5,1                    | 18,3                  | 1,224           | 0,749                  | 0,916     |
| 36           | Chen.  | A2-2N             | 51,00      | 51,00      | 1,214    | 2       | 19,05    | 13,31          | 63,5     | 24,00          | 316         | 121,4                  | 96,46                    | 22,8       | 1,2                    | 4,9                   | 1,052           | 0,749                  | 0,787     |
| 37           | 1999   | A2-3              | 51,00      | 51,00      | 1,214    | 3       | 19,05    | 13,31          | 127,0    | 31,10          | 316         | 121,4                  | 96,46                    | 26,6       | 4,5                    | 14,3                  | 1,167           | 0,874                  | 1,020     |
| 38           |        | A3-2              | 76,00      | 76,00      | 1,214    | 2       | 19,05    | 19,55          | 63,5     | 32,80          | 316         | 182,1                  | 157,16                   | 31,3       | 1,5                    | 4,5                   | 1,048           | 0,630                  | 0,660     |
| 39           |        | A3-3              | 76,00      | 76,00      | 1,214    | 3       | 19,10    | 19,55          | 127,0    | 37,70          | 316         | 182,1                  | 157,16                   | 40,5       | -2,8                   | -7,3                  | 0,932           | 0,815                  | 0,759     |
| 40           |        | A4-2              | 102,00     | 102,00     | 1,214    | 2       | 19,05    | 26,05          | 63,5     | 34,00          | 316         | 245,2                  | 220,29                   | 35,3       | -1,3                   | -3,9                  | 0,962           | 0,508                  | 0,488     |
| 41           |        | A4-3              | 102,00     | 102,00     | 1,214    | 3       | 19,05    | 26,05          | 127,0    | 45,10          | 316         | 245,2                  | 220,29                   | 52,5       | -7,4                   | -16,3                 | 0,859           | 0,754                  | 0,648     |
| 42           |        | A4-4              | 102,00     | 102,00     | 1,214    | 4       | 19,05    | 26,05          | 190,5    | 49,40          | 316         | 245,2                  | 220,29                   | 58,2       | -8,8                   | -17,8                 | 0,849           | 0,836                  | 0,710     |

continuação na próxima pag...

| ...continuação da Tabela 1 |            |                   |        |        |       |       |       |       |       |        |       |       |        |        |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|------------|-------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 43                         | Teh e 2013 | EA2               | 40,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 10,60 | 40,0  | 60,92  | 580   | 226,6 | 187,56 | 74,2   | -13,3 | -21,8 | 0,821 | 0,682 | 0,560 |       |
| 44                         |            | EA4               | 40,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 10,60 | 60,0  | 66,36  | 580   | 226,6 | 187,56 | 85,7   | -19,4 | -29,2 | 0,774 | 0,788 | 0,610 |       |
| 45                         |            | Gilbert           | EA6    | 40,00  | 40,00 | 3,000 | 2     | 13,00 | 10,60 | 80,0   | 67,45 | 580   | 226,6  | 187,56 | 91,5  | -24,0 | -35,6 | 0,737 | 0,841 | 0,620 |
| 46                         |            | bert              | EA8    | 50,00  | 50,00 | 3,000 | 2     | 13,00 | 13,10 | 40,0   | 73,23 | 580   | 286,6  | 247,56 | 87,2  | -13,9 | -19,0 | 0,840 | 0,607 | 0,510 |
| 47                         |            | EA10              | 50,00  | 50,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 13,10 | 60,0  | 76,10  | 580   | 286,6 | 247,56 | 106,0  | -29,9 | -39,2 | 0,718 | 0,738 | 0,530 |       |
| 48                         |            | EA12              | 50,00  | 50,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 13,10 | 80,0  | 86,15  | 580   | 286,6 | 247,56 | 115,4  | -29,2 | -33,9 | 0,747 | 0,804 | 0,600 |       |
| 49                         |            | EA14              | 60,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 15,60 | 50,0  | 89,14  | 580   | 346,6 | 295,56 | 107,2  | -18,1 | -20,3 | 0,831 | 0,626 | 0,520 |       |
| 50                         |            | EA16              | 60,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 15,60 | 75,0  | 102,85 | 580   | 346,6 | 295,56 | 128,6  | -25,8 | -25,1 | 0,800 | 0,750 | 0,600 |       |
| 51                         |            | EA18              | 60,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 15,60 | 100,0 | 106,28 | 580   | 346,6 | 295,56 | 139,3  | -33,1 | -31,1 | 0,763 | 0,813 | 0,620 |       |
| 52                         |            | EA20              | 75,00  | 75,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 19,30 | 50,0  | 107,34 | 580   | 436,6 | 385,56 | 120,0  | -12,7 | -11,8 | 0,894 | 0,537 | 0,480 |       |
| 53                         |            | EA22              | 75,00  | 75,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 19,30 | 75,0  | 118,52 | 580   | 436,6 | 385,56 | 154,6  | -36,1 | -30,4 | 0,767 | 0,691 | 0,530 |       |
| 54                         |            | EA24              | 75,00  | 75,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 19,30 | 100,0 | 122,99 | 580   | 436,6 | 385,56 | 171,8  | -48,8 | -39,7 | 0,716 | 0,768 | 0,550 |       |
| 55                         |            | EA1               | 40,00  | 40,00  | 1,500 | 2     | 13,00 | 10,70 | 40,0  | 30,95  | 605   | 116,0 | 96,51  | 39,7   | -8,7  | -28,1 | 0,781 | 0,679 | 0,530 |       |
| 56                         |            | EA3               | 40,00  | 40,00  | 1,500 | 2     | 13,00 | 10,70 | 60,0  | 34,45  | 605   | 116,0 | 96,51  | 45,9   | -11,4 | -33,2 | 0,751 | 0,786 | 0,590 |       |
| 57                         |            | EA5               | 40,00  | 40,00  | 1,500 | 2     | 13,00 | 10,70 | 80,0  | 34,45  | 605   | 116,0 | 96,51  | 49,0   | -14,6 | -42,3 | 0,703 | 0,840 | 0,590 |       |
| 58                         |            | EA7               | 50,00  | 50,00  | 1,500 | 2     | 13,00 | 13,20 | 40,0  | 35,97  | 605   | 146,0 | 126,51 | 46,2   | -10,3 | -28,5 | 0,778 | 0,604 | 0,470 |       |
| 59                         |            | EA9               | 50,00  | 50,00  | 1,500 | 2     | 13,00 | 13,20 | 60,0  | 39,04  | 605   | 146,0 | 126,51 | 56,3   | -17,3 | -44,3 | 0,693 | 0,736 | 0,510 |       |
| 60                         |            | EA11              | 50,00  | 50,00  | 1,500 | 2     | 13,00 | 13,20 | 80,0  | 40,57  | 605   | 146,0 | 126,51 | 61,4   | -20,8 | -51,3 | 0,661 | 0,802 | 0,530 |       |
| 61                         |            | EA13              | 60,00  | 60,00  | 1,500 | 2     | 17,00 | 15,70 | 50,0  | 47,35  | 605   | 176,0 | 150,51 | 56,8   | -9,4  | -19,9 | 0,834 | 0,623 | 0,520 |       |
| 62                         |            | EA15              | 60,00  | 60,00  | 1,500 | 2     | 17,00 | 15,70 | 75,0  | 49,17  | 605   | 176,0 | 150,51 | 68,2   | -19,0 | -38,7 | 0,721 | 0,749 | 0,540 |       |
| 63                         |            | EA17              | 60,00  | 60,00  | 1,500 | 2     | 17,00 | 15,70 | 100,0 | 50,99  | 605   | 176,0 | 150,51 | 73,9   | -22,9 | -44,9 | 0,690 | 0,812 | 0,560 |       |
| 64                         |            | DEA1              | 40,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 10,60 | 40,0  | 55,48  | 580   | 226,6 | 187,56 | 74,2   | -18,7 | -33,7 | 0,748 | 0,682 | 0,510 |       |
| 65                         |            | DEA2              | 40,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 10,60 | 60,0  | 63,09  | 580   | 226,6 | 187,56 | 85,7   | -22,6 | -35,9 | 0,736 | 0,788 | 0,580 |       |
| 66                         |            | DEA3              | 40,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 10,60 | 80,0  | 68,53  | 580   | 226,6 | 187,56 | 91,5   | -23,0 | -33,5 | 0,749 | 0,841 | 0,630 |       |
| 67                         |            | DEA4              | 50,00  | 50,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 13,10 | 40,0  | 71,79  | 580   | 286,6 | 247,56 | 87,2   | -15,4 | -21,4 | 0,824 | 0,607 | 0,500 |       |
| 68                         |            | DEA5              | 50,00  | 50,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 13,10 | 60,0  | 73,23  | 580   | 286,6 | 247,56 | 106,0  | -32,7 | -44,7 | 0,691 | 0,738 | 0,510 |       |
| 69                         |            | DEA6              | 50,00  | 50,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 13,10 | 80,0  | 74,66  | 580   | 286,6 | 247,56 | 115,4  | -40,7 | -54,5 | 0,647 | 0,804 | 0,520 |       |
| 70                         |            | DEA7              | 60,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 15,60 | 50,0  | 87,43  | 580   | 346,6 | 295,56 | 107,2  | -19,8 | -22,7 | 0,815 | 0,626 | 0,510 |       |
| 71                         |            | DEA8              | 60,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 15,60 | 75,0  | 89,14  | 580   | 346,6 | 295,56 | 128,6  | -39,5 | -44,3 | 0,693 | 0,750 | 0,520 |       |
| 72                         |            | DEA9              | 60,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 15,60 | 100,0 | 101,14 | 580   | 346,6 | 295,56 | 139,3  | -38,2 | -37,8 | 0,726 | 0,813 | 0,590 |       |
| 73                         |            | AEA1              | 40,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 10,60 | 40,0  | 63,09  | 580   | 226,6 | 187,56 | 74,2   | -11,1 | -17,6 | 0,850 | 0,682 | 0,580 |       |
| 74                         |            | AEA2 <sup>a</sup> | 50,00  | 50,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 13,10 | 80,0  | 80,41  | 580   | 286,6 | 247,56 | 115,4  | -35,0 | -43,5 | 0,697 | 0,804 | 0,560 |       |
| 75                         |            | AEA3              | 60,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 15,60 | 50,0  | 89,14  | 580   | 346,6 | 295,56 | 107,2  | -18,1 | -20,3 | 0,831 | 0,626 | 0,520 |       |
| 76                         |            | AEA4              | 60,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 15,60 | 75,0  | 99,43  | 580   | 346,6 | 295,56 | 128,6  | -29,2 | -29,4 | 0,773 | 0,750 | 0,580 |       |
| 77                         |            | AEA5              | 60,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 15,60 | 100,0 | 106,28 | 580   | 346,6 | 295,56 | 139,3  | -33,1 | -31,1 | 0,763 | 0,813 | 0,620 |       |
| 78                         |            | UAW1              | 60,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 7,80  | 50,0  | 84,71  | 580   | 286,6 | 235,56 | 111,1  | -26,3 | -31,1 | 0,763 | 0,813 | 0,620 |       |
| 79                         |            | UAW2              | 60,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 7,80  | 75,0  | 91,54  | 580   | 286,6 | 235,56 | 119,6  | -28,0 | -30,6 | 0,766 | 0,875 | 0,670 |       |
| 80                         |            | UAW3              | 60,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 7,80  | 100,0 | 94,27  | 580   | 286,6 | 235,56 | 123,8  | -29,6 | -31,4 | 0,761 | 0,906 | 0,690 |       |
| 81                         |            | UAW4              | 80,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 6,45  | 50,0  | 113,14 | 580   | 346,6 | 295,56 | 144,9  | -31,8 | -28,1 | 0,781 | 0,845 | 0,660 |       |
| 82                         |            | UAW5              | 80,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 6,45  | 75,0  | 120,00 | 580   | 346,6 | 295,56 | 153,7  | -33,7 | -28,1 | 0,781 | 0,897 | 0,700 |       |
| 83                         |            | UAW6              | 80,00  | 40,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 6,45  | 100,0 | 123,42 | 580   | 346,6 | 295,56 | 158,2  | -34,7 | -28,1 | 0,780 | 0,923 | 0,720 |       |
| 84                         |            | UAW7              | 75,00  | 50,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 9,80  | 50,0  | 97,27  | 580   | 361,6 | 310,56 | 137,8  | -40,5 | -41,6 | 0,706 | 0,765 | 0,540 |       |
| 85                         |            | UAW8              | 75,00  | 50,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 9,80  | 75,0  | 111,68 | 580   | 361,6 | 310,56 | 151,9  | -40,2 | -36,0 | 0,735 | 0,843 | 0,620 |       |
| 86                         |            | UAW9              | 75,00  | 50,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 9,80  | 100,0 | 113,48 | 580   | 361,6 | 310,56 | 158,9  | -45,5 | -40,1 | 0,714 | 0,882 | 0,630 |       |
| 87                         |            | UAW11             | 100,00 | 50,00  | 3,000 | 2     | 17,00 | 8,11  | 75,0  | 138,65 | 580   | 436,6 | 385,56 | 194,6  | -56,0 | -40,4 | 0,712 | 0,870 | 0,620 |       |
| 88                         |            | UAW13             | 60,00  | 40,00  | 1,500 | 2     | 17,00 | 7,92  | 50,0  | 41,56  | 605   | 146,0 | 120,51 | 59,1   | -17,5 | -42,1 | 0,704 | 0,810 | 0,570 |       |
| 89                         |            | UAW16             | 80,00  | 40,00  | 1,500 | 2     | 17,00 | 6,57  | 50,0  | 58,28  | 605   | 176,0 | 150,51 | 76,7   | -18,4 | -31,6 | 0,760 | 0,842 | 0,640 |       |
| 90                         |            | UAW17             | 80,00  | 40,00  | 1,500 | 2     | 17,00 | 6,57  | 75,0  | 58,28  | 605   | 176,0 | 150,51 | 81,5   | -23,2 | -39,8 | 0,715 | 0,895 | 0,640 |       |
| 91                         |            | UAW19             | 75,00  | 50,00  | 1,500 | 2     | 17,00 | 9,92  | 50,0  | 52,58  | 605   | 183,5 | 158,01 | 72,8   | -20,3 | -38,5 | 0,722 | 0,762 | 0,550 |       |
| 92                         |            | UAN1              | 40,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 19,50 | 40,0  | 60,30  | 580   | 286,6 | 247,56 | 59,6   | 0,7   | 1,2   | 1,012 | 0,415 | 0,420 |       |
| 93                         |            | UAN2              | 40,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 19,50 | 60,0  | 74,66  | 580   | 286,6 | 247,56 | 87,6   | -12,9 | -17,3 | 0,852 | 0,610 | 0,520 |       |
| 94                         |            | UAN3              | 40,00  | 60,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 19,50 | 80,0  | 78,97  | 580   | 286,6 | 247,56 | 101,6  | -22,6 | -28,6 | 0,777 | 0,708 | 0,550 |       |
| 95                         |            | UAN4              | 40,00  | 80,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 28,30 | 40,0  | 66,00  | 580   | 346,6 | 307,56 | 26,9   | 39,1  | 59,2  | 2,450 | 0,151 | 0,370 |       |
| 96                         |            | UAN5              | 40,00  | 80,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 28,30 | 60,0  | 76,70  | 580   | 346,6 | 307,56 | 77,4   | -0,7  | -0,9  | 0,991 | 0,434 | 0,430 |       |
| 97                         |            | UAN6              | 40,00  | 80,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 28,30 | 80,0  | 76,70  | 580   | 346,6 | 307,56 | 102,7  | -26,0 | -33,8 | 0,747 | 0,576 | 0,430 |       |
| 98                         |            | UAN7              | 50,00  | 75,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 24,00 | 40,0  | 76,70  | 580   | 361,6 | 322,56 | 52,4   | 24,3  | 31,7  | 1,464 | 0,280 | 0,410 |       |
| 99                         |            | UAN8              | 50,00  | 75,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 24,00 | 60,0  | 86,06  | 580   | 361,6 | 322,56 | 97,3   | -11,2 | -13,0 | 0,885 | 0,520 | 0,460 |       |
| 100                        |            | UAN9              | 50,00  | 75,00  | 3,000 | 2     | 13,00 | 24,00 | 80,0  | 86,06  | 580   | 361,6 | 322,56 | 119,7  | -33,7 | -39,1 | 0,719 | 0,640 | 0,460 |       |
| 101                        |            | UAN10             | 50,00  | 100,00 | 3,000 | 2     | 13,00 | 34,90 | 40,0  | 76,09  | 580   | 436,6 | 397,56 | -10,8  | 86,9  | 114,2 | -7,01 | -0,04 | 0,330 |       |
| 102                        |            | UAN11             | 50,00  | 100,00 | 3,000 | 2     | 13,00 | 34,90 | 60,0  | 85,32  | 580   | 436,6 | 397,56 | 69,6   | 15,7  | 18,4  | 1,225 | 0,302 | 0,370 |       |
| 103                        |            | UAN12             | 50,00  | 100,00 | 3,000 | 2     | 13,00 | 34,90 | 80,0  | 89,93  | 580   | 436,6 | 397,56 | 109,9  | -19,  |       |       |       |       |       |

da cantoneira)  $T_n$ , a diferença  $(T_{exp} - T_n)$  e a diferença em porcentagem em relação a  $T_{exp}$  e também a razão  $(T_{exp}/T_n)$ . Os valores da Equação (2) da NBR 14762 (2010) são ainda relatados na Tabela 1 e o valor ideal do coeficiente de redução  $C_{t,exp}$  obtido do valor da carga final experimental  $T_{exp}$  dividido por  $A_n F_u$ , segundo a Equação (4).

A Figura 2 (a) mostra  $T_{exp}$  comparado a  $T_n$ . Dessa forma pode-se observar que para a maioria dos casos testados,  $T_{exp} < T_n$ , o que é contra a segurança. A Figura 2 (b) apresenta um gráfico no qual os coeficientes  $(C_{t,exp})$ , calculados a partir dos dados da Tabela 2, são comparados com a Equação (2) do coeficiente  $C_t$  retirado da norma NBR-14762 (2010). O comportamento do coeficiente  $C_t$  varia de acordo com o número de parafusos e relação  $(\bar{x}/L)$ . Observando a Figura 2 (b), os valores de  $C_{t,exp}$  abaixo de  $C_t$  obtido pela aplicação da equação da NBR-14762 (2010) mostram que a equação de  $C_t$  da NBR-14762 (2010) não é conservadora, devendo, portanto, ser adequadamente reavaliada para levar o dimensionamento a um estado seguro. Este artigo propõe na seção 6 outra expressão para o cálculo de  $C_t$ .

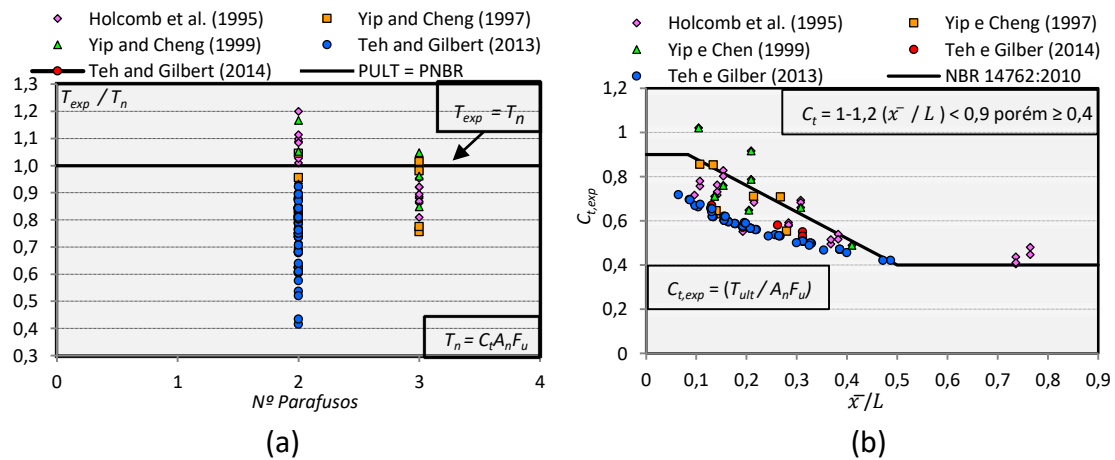


Figura 2 – (a) Comportamento do coeficiente de redução da área líquida baseados em experimentos apresentados na Tabela 1 e (b) Coeficientes experimentais de redução da seção líquida baseados em ensaios apresentados na Tabela 1.

Com o intuito de avaliar a Equação (2), advinda da Norma AISI-S100 (2007) e adotada pela NBR-14762 (2010), este artigo apresenta 86 ensaios experimentais. Tais ensaios foram feitos em cantoneiras de aço brasileiro, comercialmente conhecido como COR 420, cantoneiras estas formadas a frio e conectadas por parafusos. Tais ensaios, juntamente com os dados de Holcomb et al. (1995), Yip e Cheng (2000) e Teh e Gilbert (2013 e 2014), forneceram informações para que também se possa propor uma equação mais precisa para o coeficiente  $C_t$  de redução da seção líquida.



## 4 Metodologia experimental

Os ensaios experimentais reportados neste trabalho visaram à obtenção de parâmetros para qualificar e quantificar o fenômeno da ruptura da seção líquida em cantoneiras de chapas finas de aço, com conexões parafusadas e sob tração. Portanto, foram preparados perfis com dimensões e configurações reais, os quais foram posteriormente submetidos a ensaios de tração.

Os resultados desses testes foram estatisticamente analisados para obter uma expressão matemática que detalhasse com maior clareza o coeficiente de redução da seção líquida,  $C_t$ . Para atingir esse objetivo foram ensaiados 86 perfis. Desses perfis ensaiados, 86 cantoneiras, com duas ou mais seções de parafusos, apresentaram modo de falha de ruptura da seção líquida.

As chapas são de aço COR 420 cuja tensão nominal de escoamento ( $F_y$ ) é de 300 MPa e a tensão nominal de ruptura ( $F_u$ ) vale 420 MPa. O aço foi produzido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e tem propriedades anticorrosivas. As cantoneiras ensaiadas têm 600 mm de comprimento e foram produzidas a partir do dobramento, em prensa dobradeira, de chapas de 3000 mm de comprimento, na largura total da seção transversal especificada. Essas chapas foram cortadas com guilhotina.

A Figura 3 (a) mostra a dimensão das seções transversais das cantoneiras de abas iguais. As configurações típicas dos perfis, com uma e com duas linhas de parafusos, são apresentadas na Figura 3 (b). Foram utilizados nos ensaios os modelos com abas iguais e com abas diferentes contendo espessura de 2,25; 3,35 e 3,75 mm. As dimensões das cantoneiras estão representadas na Figura 3 (a). A Tabela 2 reporta as propriedades geométricas das cantoneiras testadas experimentalmente. Para as configurações das ligações, foram executados furos por punção e com uso de brocas, e as cantoneiras foram conectadas com uma linha de parafusos e duas linhas de parafusos, conforme mostrado na Figura 3 (b).

De modo a possibilitar a instalação dos perfis na máquina de ensaios, foram confeccionadas chapas de fixação, nas quais os perfis foram parafusados. Essas chapas foram fabricadas em aço SAE-1040, com espessura de 12,7 mm. Essas chapas foram dimensionadas para sofrerem pequenas deformações, quando comparadas com as

sofridas pelos perfis ensaiados, e de modo a garantir que a ruptura da seção líquida ocorresse nos perfis e não nas chapas de fixação.

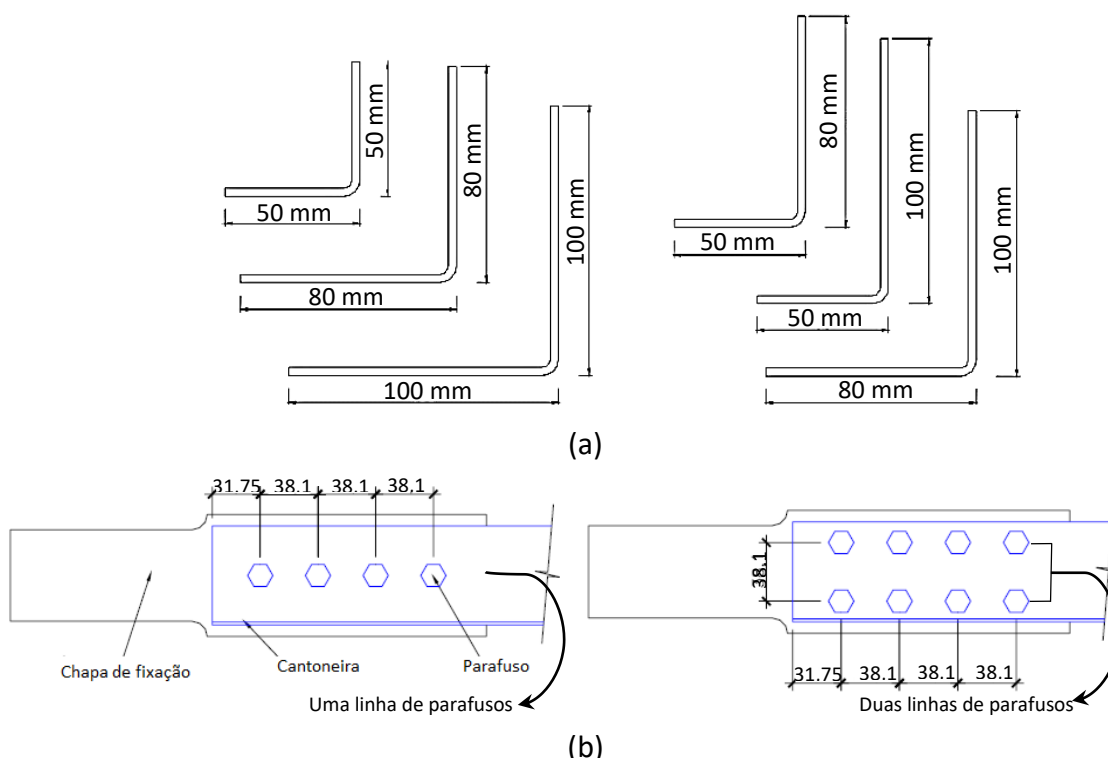


Figura 3 – (a) Dimensão das seções transversais das cantoneiras de abas iguais; (b) Configurações típicas dos perfis com uma linha e duas linhas de parafusos.

Em todos os casos, os furos foram realizados com diâmetro 14,2 mm, de modo a permitir uma folga de 1,5 mm para o uso de parafusos de alta resistência ASTM A325 com 12,7 mm de diâmetro. Nos perfis típicos, com apenas uma linha de parafusos, os furos foram executados no eixo da aba, afastados entre si de 38,1 mm, correspondente a 3 diâmetros do parafuso, sendo o primeiro furo distante 31,75 mm da borda do perfil na direção da solicitação, correspondendo a 2,5 diâmetros do parafuso. Para a realização da conexão foi mantido um torque de 100 Nm.

A Figura 4 mostra o esquema geral, o detalhe de uma instalação do transdutor de deslocamento na máquina de ensaios e uma vista geral do equipamento, que é acionado e controlado por computador.

Uma vez parafusadas as cantoneiras nas chapas de fixação, o conjunto é instalado nas garras da prensa eletromecânica EMIC-DL-60000, cuja capacidade máxima de carga de ensaio é de 600 kN.

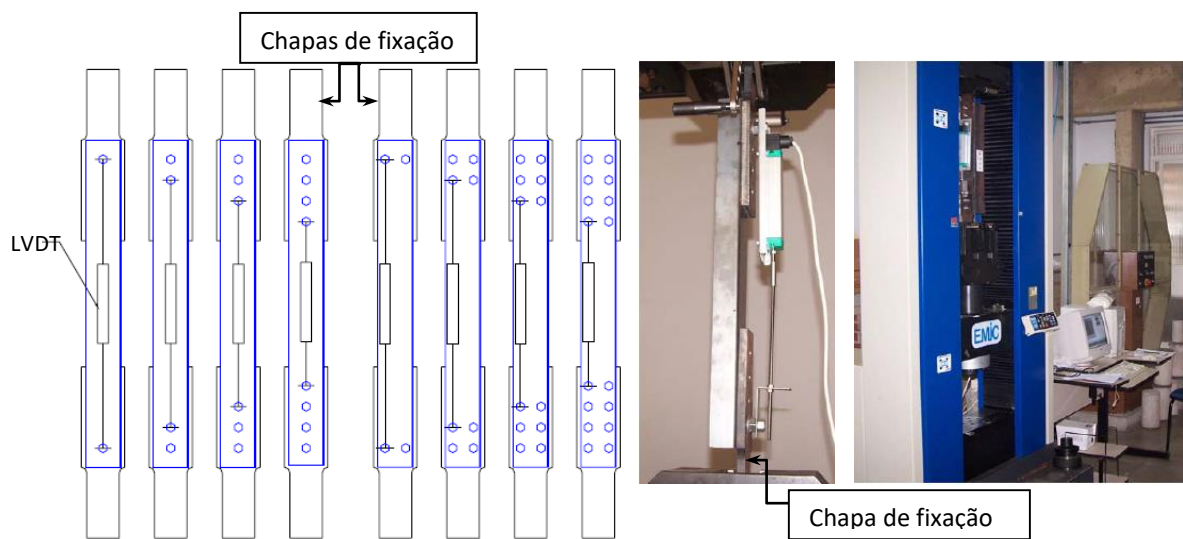


Figura 4- Esquema geral, detalhe de instalação típica do transdutor de deslocamento nos parafusos das cantoneiras com uma e duas linhas de parafusos e prensa eletromecânica empregada nos ensaios.

O equipamento EMIC é conectado a um microcomputador para aquisição dos dados. A frequência de aquisição desses dados foi de 2Hz e a carga foi aplicada com controle de deslocamento de 2 mm/min. Além das cargas aplicadas, obtidas diretamente da célula de carga da máquina de ensaios, a deformação axial relativa do perfil foi obtida através da instalação do transdutor de deslocamento (LVDT) fixado com parafusos nas extremidades opostas da cantoneira sob ensaio.

A Tabela 2 mostra a identificação e descrição das características especiais dos perfis ensaiados. Assim, de modo a compor a identificação única dos espécimes foi montado um esquema de letras (L), números (N) e uma característica especial (Ce). A forma geral de identificação de uma amostra é, portanto, "LNNN-Ce". Cada modelo, em uma determinada posição, também especificada na Tabela 2.

De um total de 86 espécimes, todas as cantoneiras de aço formadas a frio obtiveram o seu modo de falha, ruptura da seção líquida. Portanto, nesse trabalho, foram utilizados os dados dos espécimes ensaiados para considerar a análise estatística, pois apresentaram modo de falha correspondente à ruptura da seção líquida. A Figura 5 apresenta ruptura da seção líquida ocorrida em cantoneiras com ligação excêntrica em relação ao eixo da aba conectada e, em cantoneiras com uma aba conectada com uma linha de parafusos e duas linhas de parafusos.

Tabela 2 - Identificação e descrição das características especiais dos perfis ensaiados

| Amostra        | Identificação especial | Descrição especial                                                                               |
|----------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>LNNN-Ce</b> | P                      | Furos executados por puncionamento                                                               |
|                | T                      | Parafusos instalados sem aplicação de torque mínimo                                              |
|                | W                      | Parafusos instalados sem uso de arruelas                                                         |
|                | X1                     | Furos executados com excentricidade de 19 mm em relação ao eixo da aba, na direção da outra aba. |
|                | X3                     | Furos executados com excentricidade de 24 mm em relação ao eixo da aba, na direção da outra aba. |

**LNNN-Ce =**

- Primeira posição (L) Letra A, B, C, D, E e F representa a dimensão em mm da cantoneira, onde A = 50 x 50, B = 80 x 80, C = 100 x 100, D = 50 x 80, E = 50 x 80 e F = 80 x 100.
- Segunda posição (N) é a espessura da cantoneira 1 = 2,25 mm; 2 = 3,35 mm e 3 = 3,75 mm
- Terceira posição (N) número inteiro de 1-4 representa o número de seções de parafusos ao longo de cada linha.
- Quarta posição (N) número inteiro de 1-2 representa o número de parafusos por linha.
- Quinta posição (Ce) característica especial, a letra P, T, W, X1 e X2 após o hífen significa a cantoneira com descrição, i.e., identificação especial.

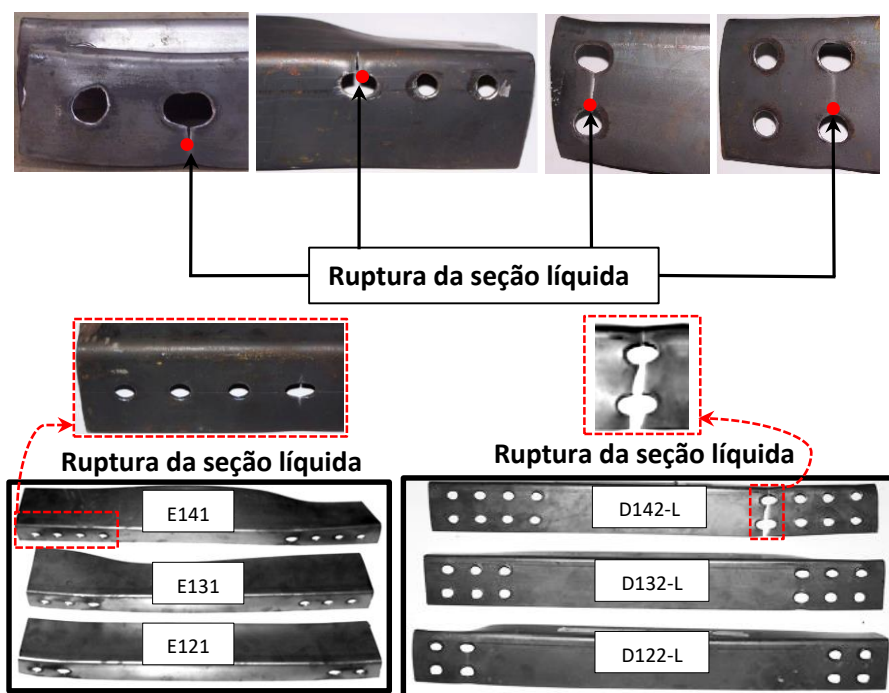


Figura 5 - Ruptura da seção líquida ocorrida em cantoneiras com ligação excêntrica em relação ao eixo da aba conectada e, em cantoneiras com uma aba conectada com uma linha de parafusos e duas linhas de parafusos.

## 5 Resultado dos testes

Dos 86 espécimes testados, todos têm dois ou mais parafusos na direção da solicitação conforme recomenda a NBR-14762 (2010) e a AISI-S100 (2016). Os modelos testados apresentaram, como principal modo de falha, a ruptura na seção líquida.

Os resultados apresentados na Tabela 3 demonstraram que para um grande número de espécimes, o valor experimental é confiável, onde  $T_{exp}$  é menor do que a seção nominal líquida e a força  $T_n$ , cujo cálculo está de acordo com a Equação (1).

Nesses casos, como  $T_{exp} / T_n < 1$ , o coeficiente de redução da seção líquida experimental  $C_{t,exp}$  é inferior ao coeficiente de redução da seção líquida da AISI-S100 (2016) da Equação (3). O  $C_t$  da NBR-14762 (2010) baseia-se apenas em duas variáveis existentes na equação: excentricidade da ligação ( $\bar{x}$ ); e o comprimento da ligação parafusada ( $L$ ). Os resultados na Tabela 3 demonstram claramente que a ruptura da seção líquida pode também depender de outras variáveis. Estas outras variáveis podem ser incorporadas em uma equação alternativa para " $C_t$ ", que pode ser obtida através da estatística e regressão múltipla, como é feito na próxima seção. A Tabela 3 apresenta o comportamento do coeficiente da seção líquida dos testes experimentais conduzidos no Laboratório de Construção Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG-Câmpus Goiânia) e no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília (UnB).

Tabela 3 - Dados geométricos das cantoneiras e coeficiente de redução da seção líquida dos testes experimentais ( $C_{t,exp}$ )

| Nº<br>Ensaio | Perfil | t<br>(mm) | $\bar{x}$<br>(mm) | L<br>(mm) | $T_{exp}$<br>(kN) | $F_u$<br>(MPa) | A<br>(mm²) | $A_n$<br>(mm²) | $T_n$<br>(kN) | $\frac{T_{exp}}{T_n}$ | $C_{t,exp}$ |
|--------------|--------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|----------------|------------|----------------|---------------|-----------------------|-------------|
| 1            | A121   | 2.23      | 13.53             | 38.1      | 54.83             | 502            | 214.83     | 183.16         | 52.76         | 1.039                 | 0.596       |
| 2            | A131   | 2.26      | 13.54             | 76.2      | 64.59             | 502            | 217.61     | 185.51         | 73.27         | 0.882                 | 0.694       |
| 3            | A141   | 2.34      | 13.58             | 114.3     | 78.06             | 502            | 225.00     | 191.77         | 82.54         | 0.946                 | 0.811       |
| 4            | A221   | 3.51      | 14.13             | 38.1      | 89.15             | 463            | 330.75     | 280.91         | 72.18         | 1.235                 | 0.685       |
| 5            | A231   | 3.49      | 14.12             | 76.2      | 97.76             | 463            | 328.98     | 279.42         | 100.60        | 0.972                 | 0.756       |
| 6            | A241   | 3.57      | 14.15             | 114.3     | 102.00            | 463            | 336.05     | 285.36         | 112.49        | 0.907                 | 0.772       |
| 7            | A321   | 3.70      | 14.22             | 38.1      | 81.65             | 457            | 347.50     | 294.96         | 74.42         | 1.097                 | 0.606       |
| 8            | A331   | 3.72      | 14.23             | 76.2      | 97.46             | 457            | 349.26     | 296.43         | 105.11        | 0.927                 | 0.719       |
| 9            | A341   | 3.66      | 14.20             | 114.3     | 109.57            | 457            | 343.98     | 292.01         | 113.55        | 0.965                 | 0.821       |
| 10           | B131   | 2.40      | 21.10             | 76.2      | 93.94             | 502            | 374.53     | 340.45         | 114.12        | 0.823                 | 0.550       |
| 11           | B141   | 2.26      | 21.04             | 114.3     | 92.01             | 502            | 353.21     | 321.11         | 125.59        | 0.733                 | 0.571       |
| 12           | B221   | 3.54      | 21.63             | 38.1      | 108.14            | 463            | 545.80     | 495.54         | 73.13         | 1.479                 | 0.471       |
| 13           | B231   | 3.55      | 21.63             | 76.2      | 130.50            | 463            | 547.29     | 496.88         | 151.69        | 0.860                 | 0.567       |
| 14           | B241   | 3.68      | 21.69             | 114.3     | 142.30            | 463            | 566.54     | 514.29         | 183.89        | 0.774                 | 0.598       |
| 15           | B321   | 3.86      | 21.78             | 38.1      | 115.37            | 457            | 593.11     | 538.30         | 77.25         | 1.493                 | 0.469       |
| 16           | B331   | 3.81      | 21.76             | 76.2      | 140.25            | 457            | 585.74     | 531.64         | 159.70        | 0.878                 | 0.577       |
| 17           | B341   | 3.76      | 21.73             | 114.3     | 142.92            | 457            | 578.36     | 524.97         | 185.18        | 0.772                 | 0.596       |
| 18           | B122   | 2.43      | 21.11             | 38.1      | 98.39             | 502            | 379.10     | 310.08         | 52.16         | 1.886                 | 0.632       |
| 19           | B132   | 2.43      | 21.11             | 76.2      | 103.96            | 502            | 379.10     | 310.08         | 103.91        | 1.000                 | 0.668       |
| 20           | B142   | 2.43      | 21.11             | 114.3     | 109.18            | 502            | 379.10     | 310.08         | 121.16        | 0.901                 | 0.701       |
| 21           | B222   | 3.50      | 21.61             | 38.1      | 119.38            | 463            | 539.87     | 440.47         | 65.13         | 1.833                 | 0.585       |
| 22           | B232   | 3.53      | 21.62             | 76.2      | 128.95            | 463            | 544.32     | 444.07         | 135.60        | 0.951                 | 0.627       |
| 23           | B242   | 3.53      | 21.62             | 114.3     | 131.62            | 463            | 544.32     | 444.07         | 158.94        | 0.828                 | 0.640       |
| 24           | C131   | 2.25      | 26.03             | 76.2      | 110.31            | 502            | 441.68     | 409.73         | 121.37        | 0.909                 | 0.536       |
| 25           | C141   | 2.56      | 26.17             | 114.3     | 115.23            | 502            | 501.23     | 464.88         | 169.25        | 0.681                 | 0.494       |
| 26           | C221   | 3.51      | 26.61             | 38.1      | 122.18            | 463            | 681.75     | 631.91         | 47.36         | 2.580                 | 0.418       |
| 27           | C231   | 3.49      | 26.60             | 76.2      | 152.15            | 463            | 677.98     | 628.42         | 169.08        | 0.900                 | 0.523       |
| 28           | C241   | 3.69      | 26.70             | 114.3     | 164.91            | 463            | 715.62     | 663.22         | 220.99        | 0.746                 | 0.537       |
| 29           | C331   | 3.91      | 26.80             | 76.2      | 160.51            | 457            | 756.87     | 701.35         | 185.24        | 0.866                 | 0.501       |
| 30           | C341   | 3.87      | 26.78             | 114.3     | 179.14            | 457            | 749.39     | 694.43         | 228.13        | 0.785                 | 0.564       |
| 31           | C122   | 2.66      | 26.22             | 38.1      | 99.56             | 502            | 520.37     | 444.83         | 38.89         | 2.560                 | 0.446       |

Continuação na próxima pag...

...continuação da Tabela 3

|    |         |      |       |       |        |     |        |        |        |        |       |
|----|---------|------|-------|-------|--------|-----|--------|--------|--------|--------|-------|
| 32 | C132    | 2.42 | 26.11 | 76.2  | 115.90 | 502 | 474.38 | 405.65 | 119.90 | 0.967  | 0.569 |
| 33 | C142    | 2.45 | 26.12 | 114.3 | 122.42 | 502 | 480.13 | 410.55 | 149.58 | 0.818  | 0.594 |
| 34 | C222    | 3.58 | 26.64 | 38.1  | 139.59 | 463 | 694.94 | 593.26 | 44.21  | 3.158  | 0.508 |
| 35 | C232    | 3.59 | 26.65 | 76.2  | 154.20 | 463 | 696.82 | 594.86 | 159.83 | 0.965  | 0.560 |
| 36 | C242    | 3.56 | 26.64 | 114.3 | 161.75 | 463 | 691.17 | 590.07 | 196.79 | 0.822  | 0.592 |
| 37 | C322    | 3.86 | 26.77 | 38.1  | 143.98 | 457 | 747.51 | 637.89 | 45.72  | 3.149  | 0.494 |
| 38 | C332    | 3.85 | 26.77 | 76.2  | 170.16 | 457 | 745.64 | 636.30 | 168.20 | 1.012  | 0.585 |
| 39 | C342    | 3.84 | 26.76 | 114.3 | 171.61 | 457 | 743.77 | 634.71 | 208.57 | 0.823  | 0.592 |
| 40 | D121    | 2.41 | 25.84 | 38.1  | 62.06  | 502 | 303.75 | 269.53 | 25.19  | 2.464  | 0.459 |
| 41 | D131    | 2.43 | 25.85 | 76.2  | 71.06  | 502 | 306.20 | 271.69 | 80.87  | 0.879  | 0.521 |
| 42 | D141    | 2.36 | 25.82 | 114.3 | 78.40  | 502 | 297.65 | 264.13 | 96.65  | 0.811  | 0.591 |
| 43 | E121    | 2.49 | 34.67 | 38.1  | 64.36  | 502 | 363.31 | 327.95 | -15.14 | -4.251 | 0.391 |
| 44 | E131    | 2.58 | 34.72 | 76.2  | 76.70  | 502 | 376.06 | 339.42 | 77.23  | 0.993  | 0.450 |
| 45 | E141    | 2.38 | 34.61 | 114.3 | 81.55  | 502 | 347.69 | 313.89 | 100.32 | 0.813  | 0.517 |
| 46 | F121    | 2.34 | 28.90 | 38.1  | 68.57  | 502 | 412.20 | 378.97 | 17.08  | 4.015  | 0.360 |
| 47 | F131    | 2.34 | 28.90 | 76.2  | 80.77  | 502 | 412.20 | 378.97 | 103.66 | 0.779  | 0.425 |
| 48 | F141    | 2.30 | 28.88 | 114.3 | 89.25  | 502 | 405.31 | 372.65 | 130.35 | 0.685  | 0.477 |
| 49 | F122    | 2.46 | 28.96 | 38.1  | 92.24  | 502 | 432.85 | 362.99 | 16.01  | 5.761  | 0.506 |
| 50 | F132    | 2.48 | 28.97 | 76.2  | 99.44  | 502 | 436.29 | 365.86 | 99.87  | 0.996  | 0.541 |
| 51 | F142    | 2.38 | 28.92 | 114.3 | 107.59 | 502 | 419.09 | 351.50 | 122.88 | 0.876  | 0.610 |
| 52 | D121-L  | 2.29 | 10.61 | 38.1  | 67.01  | 502 | 289.08 | 256.56 | 85.75  | 0.781  | 0.520 |
| 53 | D131-L  | 2.26 | 10.59 | 76.2  | 77.51  | 502 | 285.41 | 253.31 | 105.95 | 0.732  | 0.610 |
| 54 | D141-L  | 2.24 | 10.58 | 114.3 | 85.42  | 502 | 282.95 | 251.15 | 112.07 | 0.762  | 0.678 |
| 55 | D122-L  | 2.21 | 10.57 | 38.1  | 78.61  | 502 | 279.27 | 216.51 | 72.50  | 1.084  | 0.723 |
| 56 | D132-L  | 2.23 | 10.58 | 76.2  | 86.61  | 502 | 281.73 | 218.40 | 91.37  | 0.948  | 0.790 |
| 57 | D142-L  | 2.23 | 10.58 | 114.3 | 92.73  | 502 | 281.73 | 218.40 | 97.46  | 0.951  | 0.846 |
| 58 | E131-L  | 2.25 | 9.29  | 76.2  | 89.63  | 502 | 329.18 | 297.23 | 127.38 | 0.704  | 0.601 |
| 59 | E141-L  | 2.29 | 9.31  | 114.3 | 102.71 | 502 | 334.88 | 302.36 | 136.95 | 0.750  | 0.677 |
| 60 | E122-L  | 2.27 | 9.30  | 38.1  | 81.67  | 502 | 332.03 | 267.56 | 94.97  | 0.860  | 0.608 |
| 61 | E132-L  | 2.29 | 9.31  | 76.2  | 93.41  | 502 | 334.88 | 269.85 | 115.60 | 0.808  | 0.690 |
| 62 | E142-L  | 2.27 | 9.30  | 114.3 | 96.06  | 502 | 332.03 | 267.56 | 121.20 | 0.793  | 0.715 |
| 63 | B221-X1 | 3.57 | 21.64 | 38.1  | 111.27 | 463 | 550.25 | 499.56 | 73.65  | 1.511  | 0.481 |
| 64 | B231-X1 | 3.57 | 21.64 | 76.2  | 131.88 | 463 | 550.25 | 499.56 | 152.47 | 0.865  | 0.570 |
| 65 | B241-X1 | 3.57 | 21.64 | 114.3 | 144.53 | 463 | 550.25 | 499.56 | 178.75 | 0.809  | 0.625 |
| 66 | C221-X3 | 3.63 | 26.67 | 38.1  | 122.24 | 463 | 704.34 | 652.80 | 48.36  | 2.528  | 0.404 |
| 67 | C231-X3 | 3.63 | 26.67 | 76.2  | 149.23 | 463 | 704.34 | 652.80 | 175.30 | 0.851  | 0.494 |
| 68 | C241-X3 | 3.63 | 26.67 | 114.3 | 169.70 | 463 | 704.34 | 652.80 | 217.62 | 0.780  | 0.561 |
| 69 | B131-P  | 2.24 | 21.03 | 76.2  | 76.06  | 502 | 327.75 | 295.95 | 99.36  | 0.765  | 0.512 |
| 70 | B141-P  | 2.24 | 21.03 | 114.3 | 85.24  | 502 | 327.75 | 295.95 | 115.77 | 0.736  | 0.574 |
| 71 | B221-P  | 3.51 | 21.62 | 38.1  | 116.25 | 463 | 506.25 | 456.41 | 67.42  | 1.724  | 0.550 |
| 72 | B231-P  | 3.37 | 21.55 | 76.2  | 133.49 | 463 | 486.83 | 438.98 | 134.27 | 0.994  | 0.657 |
| 73 | B241-P  | 3.49 | 21.61 | 114.3 | 141.42 | 463 | 503.48 | 453.92 | 162.48 | 0.870  | 0.673 |
| 74 | B321-P  | 3.75 | 21.73 | 38.1  | 106.63 | 457 | 539.39 | 486.14 | 70.11  | 1.521  | 0.480 |
| 75 | B331-P  | 3.74 | 21.72 | 76.2  | 127.85 | 457 | 538.01 | 484.90 | 145.80 | 0.877  | 0.577 |
| 76 | B341-P  | 3.79 | 21.75 | 114.3 | 135.98 | 457 | 544.89 | 491.07 | 173.17 | 0.785  | 0.606 |
| 77 | B221-W  | 3.63 | 21.67 | 38.1  | 119.42 | 463 | 559.14 | 507.60 | 74.61  | 1.601  | 0.508 |
| 78 | B231-W  | 3.63 | 21.67 | 76.2  | 133.56 | 463 | 559.14 | 507.60 | 154.82 | 0.863  | 0.568 |
| 79 | B241-W  | 3.65 | 21.68 | 114.3 | 150.43 | 463 | 562.10 | 510.27 | 182.48 | 0.824  | 0.637 |
| 80 | C221-W  | 3.54 | 26.63 | 38.1  | 125.94 | 463 | 687.40 | 637.14 | 47.57  | 2.647  | 0.427 |
| 81 | C231-W  | 3.68 | 26.69 | 76.2  | 155.40 | 463 | 713.74 | 661.49 | 177.54 | 0.875  | 0.507 |
| 82 | C241-W  | 3.60 | 26.65 | 114.3 | 175.38 | 463 | 698.70 | 647.58 | 215.94 | 0.812  | 0.585 |
| 83 | A121-T  | 2.38 | 13.60 | 38.1  | 56.84  | 502 | 228.69 | 194.89 | 55.93  | 1.016  | 0.581 |
| 84 | A131-T  | 2.41 | 13.61 | 76.2  | 65.62  | 502 | 231.45 | 197.23 | 77.79  | 0.844  | 0.663 |
| 85 | A221-T  | 3.53 | 14.14 | 38.1  | 83.92  | 463 | 332.52 | 282.39 | 72.52  | 1.157  | 0.642 |
| 86 | A231-T  | 3.52 | 14.13 | 76.2  | 96.28  | 463 | 331.64 | 281.65 | 101.39 | 0.950  | 0.738 |

Tabela 4 – Verificação do coeficiente de redução da seção líquida dos testes experimentais ( $C_t$ ) dado pelas Equações (2), (3), (7) e (6) aplicados aos ensaios experimentais efetuados no IFG e na UnB

| Nº<br>Ensaio | Perfil | $C_{t\ exp}$ | $C_t$<br>NBR<br>14762-<br>(2010) | $\Delta_1$ | $\Delta_1$<br>(%) | $C_t$<br>AISI-<br>(2016) | $\Delta_2$ | $\Delta_2$<br>(%) | $C_{t\ prop}$<br>UnB<br>Proposto | $\Delta_3$ | $\Delta_3$ (%) | $C_t$<br>UnB<br>(2008) | $\Delta_4$ | $\Delta_4$<br>(%) |
|--------------|--------|--------------|----------------------------------|------------|-------------------|--------------------------|------------|-------------------|----------------------------------|------------|----------------|------------------------|------------|-------------------|
| 1            | A121   | 0.596        | 0.574                            | 0.022      | 3.7%              | 0.485                    | 0.111      | 18.6%             | 0.605                            | -0.009     | -1.5%          | 0.672                  | -0.076     | -12.7%            |
| 2            | A131   | 0.694        | 0.787                            | -0.093     | -13.4%            | 0.586                    | 0.108      | 15.5%             | 0.658                            | 0.036      | 5.2%           | 0.719                  | -0.025     | -3.6%             |
| 3            | A141   | 0.811        | 0.857                            | -0.046     | -5.7%             | 0.630                    | 0.181      | 22.3%             | 0.679                            | 0.132      | 16.2%          | 0.737                  | 0.074      | 9.1%              |
| 4            | A221   | 0.685        | 0.555                            | 0.130      | 19.0%             | 0.478                    | 0.207      | 30.2%             | 0.665                            | 0.020      | 2.9%           | 0.711                  | -0.026     | -3.8%             |
| 5            | A231   | 0.756        | 0.778                            | -0.022     | -2.9%             | 0.581                    | 0.175      | 23.1%             | 0.718                            | 0.038      | 5.1%           | 0.759                  | -0.003     | -0.4%             |
| 6            | A241   | 0.772        | 0.851                            | -0.079     | -10.3%            | 0.626                    | 0.146      | 18.9%             | 0.740                            | 0.032      | 4.2%           | 0.777                  | -0.005     | -0.7%             |
| 7            | A321   | 0.606        | 0.552                            | 0.054      | 8.9%              | 0.477                    | 0.129      | 21.3%             | 0.674                            | -0.068     | -11.2%         | 0.717                  | -0.111     | -18.3%            |

Continuação na próxima pag...

...continuação da Tabela 4

|    |         |       |        |        |        |       |        |        |       |        |        |       |        |        |
|----|---------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 8  | A331    | 0.719 | 0.776  | -0.057 | -7.9%  | 0.580 | 0.139  | 19.3%  | 0.729 | -0.010 | -1.4%  | 0.766 | -0.047 | -6.6%  |
| 9  | A341    | 0.821 | 0.851  | -0.030 | -3.6%  | 0.626 | 0.195  | 23.8%  | 0.744 | 0.077  | 9.4%   | 0.780 | 0.041  | 4.9%   |
| 10 | B131    | 0.550 | 0.668  | -0.118 | -21.4% | 0.525 | 0.025  | 4.5%   | 0.533 | 0.017  | 3.2%   | 0.555 | -0.005 | -1.0%  |
| 11 | B141    | 0.571 | 0.779  | -0.208 | -36.4% | 0.582 | -0.011 | -1.9%  | 0.555 | 0.016  | 2.8%   | 0.577 | -0.006 | -1.0%  |
| 12 | B221    | 0.471 | 0.319  | 0.152  | 32.3%  | 0.402 | 0.069  | 14.6%  | 0.484 | -0.013 | -2.8%  | 0.504 | -0.033 | -7.0%  |
| 13 | B231    | 0.567 | 0.659  | -0.092 | -16.3% | 0.521 | 0.046  | 8.0%   | 0.567 | 0.000  | 0.1%   | 0.578 | -0.011 | -2.0%  |
| 14 | B241    | 0.598 | 0.772  | -0.174 | -29.1% | 0.578 | 0.020  | 3.3%   | 0.598 | 0.000  | 0.0%   | 0.605 | -0.007 | -1.2%  |
| 15 | B321    | 0.469 | 0.314  | 0.155  | 33.0%  | 0.401 | 0.068  | 14.5%  | 0.493 | -0.024 | -5.1%  | 0.510 | -0.041 | -8.7%  |
| 16 | B331    | 0.577 | 0.657  | -0.080 | -13.9% | 0.521 | 0.056  | 9.8%   | 0.574 | 0.003  | 0.5%   | 0.583 | -0.006 | -1.1%  |
| 17 | B341    | 0.596 | 0.772  | -0.176 | -29.5% | 0.578 | 0.018  | 3.0%   | 0.600 | -0.004 | -0.7%  | 0.607 | -0.011 | -1.8%  |
| 18 | B122    | 0.632 | 0.335  | 0.297  | 47.0%  | 0.407 | 0.225  | 35.6%  | 0.453 | 0.179  | 28.3%  | 0.484 | 0.148  | 23.4%  |
| 19 | B132    | 0.668 | 0.668  | 0.000  | 0.1%   | 0.525 | 0.143  | 21.4%  | 0.534 | 0.134  | 20.1%  | 0.556 | 0.112  | 16.8%  |
| 20 | B142    | 0.701 | 0.778  | -0.077 | -11.0% | 0.582 | 0.119  | 17.0%  | 0.560 | 0.141  | 20.1%  | 0.580 | 0.121  | 17.3%  |
| 21 | B222    | 0.585 | 0.319  | 0.266  | 45.4%  | 0.403 | 0.182  | 31.2%  | 0.483 | 0.102  | 17.4%  | 0.503 | 0.082  | 14.0%  |
| 22 | B232    | 0.627 | 0.660  | -0.033 | -5.2%  | 0.522 | 0.105  | 16.8%  | 0.566 | 0.061  | 9.7%   | 0.578 | 0.049  | 7.9%   |
| 23 | B242    | 0.640 | 0.773  | -0.133 | -20.8% | 0.579 | 0.061  | 9.6%   | 0.594 | 0.046  | 7.3%   | 0.602 | 0.038  | 5.9%   |
| 24 | C131    | 0.536 | 0.590  | -0.054 | -10.1% | 0.492 | 0.044  | 8.2%   | 0.476 | 0.060  | 11.3%  | 0.489 | 0.047  | 8.8%   |
| 25 | C141    | 0.494 | 0.725  | -0.231 | -46.8% | 0.553 | -0.059 | -12.0% | 0.516 | -0.022 | -4.4%  | 0.523 | -0.029 | -5.9%  |
| 26 | C221    | 0.418 | 0.162  | 0.256  | 61.3%  | 0.364 | 0.054  | 12.9%  | 0.404 | 0.014  | 3.4%   | 0.417 | 0.001  | 0.2%   |
| 27 | C231    | 0.523 | 0.581  | -0.058 | -11.1% | 0.488 | 0.035  | 6.6%   | 0.504 | 0.019  | 3.5%   | 0.508 | 0.015  | 2.9%   |
| 28 | C241    | 0.537 | 0.720  | -0.183 | -34.0% | 0.550 | -0.013 | -2.5%  | 0.543 | -0.006 | -1.1%  | 0.541 | -0.004 | -0.8%  |
| 29 | C331    | 0.501 | 0.578  | -0.077 | -15.4% | 0.487 | 0.014  | 2.8%   | 0.514 | -0.013 | -2.6%  | 0.514 | -0.013 | -2.6%  |
| 30 | C341    | 0.564 | 0.719  | -0.155 | -27.5% | 0.550 | 0.014  | 2.5%   | 0.547 | 0.017  | 3.0%   | 0.544 | 0.020  | 3.5%   |
| 31 | C122    | 0.446 | 0.174  | 0.272  | 60.9%  | 0.367 | 0.079  | 17.8%  | 0.385 | 0.061  | 13.6%  | 0.405 | 0.041  | 9.1%   |
| 32 | C132    | 0.569 | 0.589  | -0.020 | -3.5%  | 0.491 | 0.078  | 13.7%  | 0.479 | 0.090  | 15.7%  | 0.491 | 0.078  | 13.7%  |
| 33 | C142    | 0.594 | 0.726  | -0.132 | -22.2% | 0.553 | 0.041  | 6.8%   | 0.513 | 0.081  | 13.6%  | 0.521 | 0.073  | 12.2%  |
| 34 | C222    | 0.508 | 0.161  | 0.347  | 68.3%  | 0.364 | 0.144  | 28.4%  | 0.405 | 0.103  | 20.2%  | 0.418 | 0.090  | 17.7%  |
| 35 | C232    | 0.560 | 0.580  | -0.020 | -3.6%  | 0.488 | 0.072  | 12.9%  | 0.507 | 0.053  | 9.5%   | 0.509 | 0.051  | 9.1%   |
| 36 | C242    | 0.592 | 0.720  | -0.128 | -21.7% | 0.551 | 0.041  | 7.0%   | 0.540 | 0.052  | 8.8%   | 0.539 | 0.053  | 8.9%   |
| 37 | C322    | 0.494 | 0.157  | 0.337  | 68.2%  | 0.363 | 0.131  | 26.5%  | 0.411 | 0.083  | 16.8%  | 0.422 | 0.072  | 14.6%  |
| 38 | C332    | 0.585 | 0.578  | 0.007  | 1.1%   | 0.487 | 0.098  | 16.7%  | 0.513 | 0.072  | 12.3%  | 0.513 | 0.072  | 12.3%  |
| 39 | C342    | 0.592 | 0.719  | -0.127 | -21.5% | 0.550 | 0.042  | 7.1%   | 0.547 | 0.045  | 7.7%   | 0.544 | 0.048  | 8.2%   |
| 40 | D121    | 0.459 | 0.186  | 0.273  | 59.4%  | 0.362 | 0.097  | 21.2%  | 0.577 | 0.017  | 3.6%   | 0.616 | -0.033 | -7.2%  |
| 41 | D131    | 0.521 | 0.593  | -0.072 | -13.8% | 0.479 | 0.042  | 8.0%   | 0.617 | -0.021 | -4.0%  | 0.652 | -0.060 | -11.5% |
| 42 | D141    | 0.591 | 0.729  | -0.138 | -23.3% | 0.538 | 0.053  | 9.0%   | 0.630 | 0.020  | 3.4%   | 0.664 | -0.017 | -2.8%  |
| 43 | E121    | 0.391 | -0.092 | 0.483  | 123.5% | 0.307 | 0.084  | 21.4%  | 0.575 | 0.064  | 16.3%  | 0.615 | 0.025  | 6.3%   |
| 44 | E131    | 0.450 | 0.453  | -0.003 | -0.7%  | 0.427 | 0.023  | 5.2%   | 0.616 | -0.014 | -3.0%  | 0.651 | -0.038 | -8.3%  |
| 45 | E141    | 0.517 | 0.637  | -0.120 | -23.1% | 0.490 | 0.027  | 5.1%   | 0.629 | 0.019  | 3.7%   | 0.664 | -0.003 | -0.7%  |
| 46 | F121    | 0.360 | 0.090  | 0.270  | 75.1%  | 0.345 | 0.015  | 4.0%   | 0.604 | 0.001  | 0.4%   | 0.631 | -0.026 | -7.3%  |
| 47 | F131    | 0.425 | 0.545  | -0.120 | -28.2% | 0.468 | -0.043 | -10.1% | 0.617 | -0.044 | -10.2% | 0.642 | -0.060 | -14.1% |
| 48 | F141    | 0.477 | 0.697  | -0.220 | -46.1% | 0.531 | -0.054 | -11.3% | 0.569 | -0.027 | -5.7%  | 0.599 | -0.040 | -8.4%  |
| 49 | F122    | 0.506 | 0.088  | 0.418  | 82.6%  | 0.345 | 0.161  | 31.8%  | 0.605 | 0.144  | 28.5%  | 0.631 | 0.117  | 23.2%  |
| 50 | F132    | 0.541 | 0.544  | -0.003 | -0.5%  | 0.468 | 0.073  | 13.5%  | 0.616 | 0.068  | 12.6%  | 0.642 | 0.053  | 9.8%   |
| 51 | F142    | 0.610 | 0.696  | -0.086 | -14.2% | 0.531 | 0.079  | 13.0%  | 0.442 | 0.104  | 17.0%  | 0.492 | 0.091  | 15.0%  |
| 52 | D121-L  | 0.520 | 0.666  | -0.146 | -28.0% | 0.541 | -0.021 | -4.0%  | 0.542 | -0.057 | -11.1% | 0.581 | -0.096 | -18.5% |
| 53 | D131-L  | 0.610 | 0.833  | -0.223 | -36.6% | 0.637 | -0.027 | -4.4%  | 0.571 | -0.007 | -1.1%  | 0.608 | -0.042 | -6.9%  |
| 54 | D141-L  | 0.678 | 0.889  | -0.211 | -31.1% | 0.677 | 0.001  | 0.2%   | 0.327 | 0.048  | 7.1%   | 0.366 | 0.014  | 2.1%   |
| 55 | D122-L  | 0.723 | 0.667  | 0.056  | 7.7%   | 0.541 | 0.182  | 25.1%  | 0.464 | 0.148  | 20.4%  | 0.488 | 0.108  | 14.9%  |
| 56 | D132-L  | 0.790 | 0.833  | -0.043 | -5.5%  | 0.637 | 0.153  | 19.4%  | 0.498 | 0.174  | 22.0%  | 0.520 | 0.139  | 17.5%  |
| 57 | D142-L  | 0.846 | 0.889  | -0.043 | -5.1%  | 0.677 | 0.169  | 20.0%  | 0.359 | 0.217  | 25.6%  | 0.386 | 0.182  | 21.6%  |
| 58 | E131-L  | 0.601 | 0.854  | -0.253 | -42.0% | 0.662 | -0.061 | -10.2% | 0.469 | -0.003 | -0.5%  | 0.485 | -0.030 | -4.9%  |
| 59 | E141-L  | 0.677 | 0.902  | -0.225 | -33.3% | 0.700 | -0.023 | -3.3%  | 0.504 | 0.060  | 8.9%   | 0.517 | 0.035  | 5.2%   |
| 60 | E122-L  | 0.608 | 0.707  | -0.099 | -16.3% | 0.570 | 0.038  | 6.3%   | 0.362 | 0.039  | 6.4%   | 0.389 | 0.009  | 1.4%   |
| 61 | E132-L  | 0.690 | 0.853  | -0.163 | -23.7% | 0.662 | 0.028  | 4.1%   | 0.473 | 0.085  | 12.3%  | 0.488 | 0.059  | 8.5%   |
| 62 | E142-L  | 0.715 | 0.902  | -0.187 | -26.2% | 0.700 | 0.015  | 2.2%   | 0.506 | 0.099  | 13.8%  | 0.519 | 0.073  | 10.3%  |
| 63 | B221-X1 | 0.481 | 0.318  | 0.163  | 33.8%  | 0.402 | 0.079  | 16.4%  | 0.485 | -0.004 | -0.8%  | 0.505 | -0.024 | -4.9%  |
| 64 | B231-X1 | 0.570 | 0.659  | -0.089 | -15.7% | 0.521 | 0.049  | 8.5%   | 0.567 | 0.003  | 0.5%   | 0.578 | -0.008 | -1.5%  |
| 65 | B241-X1 | 0.625 | 0.773  | -0.148 | -23.6% | 0.578 | 0.047  | 7.4%   | 0.595 | 0.030  | 4.8%   | 0.603 | 0.022  | 3.5%   |
| 66 | C221-X3 | 0.404 | 0.160  | 0.244  | 60.4%  | 0.364 | 0.040  | 10.0%  | 0.406 | -0.002 | -0.5%  | 0.419 | -0.015 | -3.7%  |
| 67 | C231-X3 | 0.494 | 0.580  | -0.086 | -17.4% | 0.488 | 0.006  | 1.3%   | 0.508 | -0.014 | -2.8%  | 0.510 | -0.016 | -3.2%  |
| 68 | C241-X3 | 0.561 | 0.720  | -0.159 | -28.3% | 0.550 | 0.011  | 1.9%   | 0.542 | 0.019  | 3.5%   | 0.540 | 0.021  | 3.7%   |
| 69 | B131-P  | 0.512 | 0.669  | -0.157 | -30.6% | 0.526 | -0.014 | -2.7%  | 0.528 | -0.016 | -3.1%  | 0.552 | -0.040 | -7.9%  |
| 70 | B141-P  | 0.574 | 0.779  | -0.205 | -35.8% | 0.582 | -0.008 | -1.4%  | 0.555 | 0.019  | 3.4%   | 0.576 | -0.002 | -0.4%  |
| 71 | B221-P  | 0.550 | 0.319  | 0.231  | 42.0%  | 0.402 | 0.148  | 26.8%  | 0.483 | 0.067  | 12.1%  | 0.504 | 0.047  | 8.5%   |
| 72 | B231-P  | 0.657 | 0.661  | -0.004 | -0.6%  | 0.522 | 0.135  | 20.5%  | 0.561 | 0.096  | 14.6%  | 0.575 | 0.082  | 12.6%  |
| 73 | B241-P  | 0.673 | 0.773  | -0.100 | -14.9% | 0.579 | 0.094  | 14.0%  | 0.592 | 0.081  | 12.0%  | 0.601 | 0.072  | 10.6%  |
| 74 | B321-P  | 0.480 | 0.316  | 0.164  | 34.3%  | 0.402 | 0.079  | 16.4%  | 0.490 | -0.010 | -2.1%  | 0.508 | -0.028 | -5.8%  |
| 75 | B331-P  | 0.577 | 0.658  | -0.081 | -14.0% | 0.521 | 0.056  | 9.7%   | 0.572 | 0.005  | 0.8%   | 0.582 | -0.005 | -0.8%  |
| 76 | B341-P  | 0.606 | 0.772  | -0.166 | -27.3% | 0.578 | 0.028  | 4.6%   | 0.601 | 0.005  | 0.8%   | 0.608 | -0.001 | -0.2%  |
| 77 | B221-W  | 0.508 | 0.317  | 0.191  | 37.5%  | 0.402 | 0.106  | 20.9%  | 0.487 | 0.021  | 4.2%   | 0.506 | 0.002  | 0.5%   |

Continuação na próxima pag...

...continuação da Tabela 4

|                                                                                                              |        |       |       |        |        |       |        |        |       |        |        |       |        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 78                                                                                                           | B231-W | 0.568 | 0.659 | -0.091 | -16.0% | 0.521 | 0.047  | 8.2%   | 0.569 | -0.001 | -0.2%  | 0.580 | -0.012 | -2.0%  |
| 79                                                                                                           | B241-W | 0.637 | 0.772 | -0.135 | -21.3% | 0.578 | 0.059  | 9.2%   | 0.597 | 0.040  | 6.3%   | 0.605 | 0.032  | 5.1%   |
| 80                                                                                                           | C221-W | 0.427 | 0.161 | 0.266  | 62.2%  | 0.364 | 0.063  | 14.8%  | 0.404 | 0.023  | 5.3%   | 0.418 | 0.009  | 2.2%   |
| 81                                                                                                           | C231-W | 0.507 | 0.580 | -0.073 | -14.3% | 0.488 | 0.019  | 3.8%   | 0.509 | -0.002 | -0.4%  | 0.511 | -0.004 | -0.7%  |
| 82                                                                                                           | C241-W | 0.585 | 0.720 | -0.135 | -23.1% | 0.551 | 0.034  | 5.9%   | 0.541 | 0.044  | 7.5%   | 0.540 | 0.045  | 7.7%   |
| 83                                                                                                           | A121-T | 0.581 | 0.572 | 0.009  | 1.6%   | 0.485 | 0.096  | 16.6%  | 0.612 | -0.031 | -5.4%  | 0.676 | -0.095 | -16.4% |
| 84                                                                                                           | A131-T | 0.663 | 0.786 | -0.123 | -18.5% | 0.586 | 0.077  | 11.7%  | 0.665 | -0.002 | -0.4%  | 0.724 | -0.061 | -9.2%  |
| 85                                                                                                           | A221-T | 0.642 | 0.555 | 0.087  | 13.6%  | 0.478 | 0.164  | 25.6%  | 0.666 | -0.024 | -3.7%  | 0.712 | -0.070 | -10.9% |
| 86                                                                                                           | A231-T | 0.738 | 0.777 | -0.039 | -5.3%  | 0.581 | 0.157  | 21.3%  | 0.719 | 0.019  | 2.6%   | 0.760 | -0.022 | -2.9%  |
| Erro residual Máximo                                                                                         |        |       |       | 0.483  | 123.5% |       | 0.225  | 35.6%  |       | 0.217  | 28.5%  |       | 0.182  | 23.4%  |
| Erro residual Mínimo                                                                                         |        |       |       | -0.253 | -46.8% |       | -0.061 | -12.0% |       | -0.068 | -11.2% |       | -0.111 | -18.5% |
| Média de erro residual                                                                                       |        |       |       | -0.019 | -0.8%  |       | 0.069  | 11.3%  |       | 0.036  | 5.7%   |       | 0.015  | 2.0%   |
| Desvio padrão de erro residual = $\sigma$                                                                    |        |       |       | 0.169  | 34.0%  |       | 0.066  | 10.4%  |       | 0.055  | 8.7%   |       | 0.057  | 9.4%   |
| <hr/>                                                                                                        |        |       |       |        |        |       |        |        |       |        |        |       |        |        |
| $\Delta 1$ = Diferença do (Ctexp - Ct NBR14762 (2010)) & $\Delta 1(\%) = 100 * \Delta 1 / C_{t \text{ exp}}$ |        |       |       |        |        |       |        |        |       |        |        |       |        |        |
| $\Delta 2$ = Diferença do (Ctexp - Ct AISI (2016)) & $\Delta 2(\%) = 100 * \Delta 2 / C_{t \text{ exp}}$     |        |       |       |        |        |       |        |        |       |        |        |       |        |        |
| $\Delta 3$ = Diferença do (Ctexp - Ct UnB Proposto) & $\Delta 3(\%) = 100 * \Delta 3 / C_{t \text{ exp}}$    |        |       |       |        |        |       |        |        |       |        |        |       |        |        |
| $\Delta 4$ = Diferença do (Ctexp - Ct UnB (2008)) & $\Delta 4(\%) = 100 * \Delta 4 / C_{t \text{ exp}}$      |        |       |       |        |        |       |        |        |       |        |        |       |        |        |

## 6 Análise estatística e resultados experimentais

A distribuição de tensões na vizinhança da ligação parafusada é muito complexa, com altos gradientes de tensão na região dos conectores. Essa é uma região de tensão não uniforme, de alta concentração, formação de zonas plásticas e mudança de direção das tensões. O fenômeno *shear lag* reduz a capacidade resistente da peça sob tração tem como modo de falha a ruptura da seção líquida na ligação. É importante para os engenheiros utilizar expressões apropriadas para o cálculo do coeficiente de redução da seção líquida,  $C_t$ . As informações fornecidas nas Tabelas 1, 3 e 4 demonstram como a eficiência da conexão de parafusos muda quando certas variáveis são modificadas. As informações apresentadas nas Tabelas 1 e 2 são importantes para identificar as dimensões dos espécimes ensaiados, aba conectada, números de parafusos e disposições dos parafusos. De fato, ao estudar as diversas variáveis, pode-se observar que a largura da aba não conectada ( $b_d$ ) e o número de parafusos por seção ( $n$ ), além da tradicional excentricidade de conexão ( $\bar{x}$ ) e o comprimento de conexão ( $L$ ), controlam o coeficiente de redução da seção líquida experimental  $C_{t,exp}$ , identificado na décima segunda coluna da Tabela 3 que reporta os experimentos feitos na UnB. Portanto, outras variáveis como ( $b_d$ ) largura da aba não conectada, ( $b_c$ ) largura da aba conectada e  $\bar{x}/L$  na Equação (2) podem ser consideradas na construção de uma expressão para " $C_t$ ". A expressão alternativa proposta depende de mais de uma variável independente e, por isso, foi aplicada regressão múltipla da estatística.

Na estatística, regressão múltipla é usada para estabelecer o efeito de cada variável independente, quando outra variável independente é mantida constante (Kennedy e



Neville, 1986). Aqui uma regressão linear múltipla é conduzida com o objetivo geral de confirmar se existe uma correlação entre uma determinada variável independente e o coeficiente de redução da seção líquida ( $C_t$ ).

A equação proposta para  $C_t$  basea-se nas variáveis independentes  $X_{i,1}, X_{i,2}, X_{i,3}, \dots, X_{i,(p-1)}$  associados à geometria da cantoneira e às características da conexão parafusada. Kennedy e Neville, (1986) e Spiegel et al. (2000) definem a equação proposta para a regressão linear:  $C_{ti} = b_0 + b_1X_{i,1} + b_2X_{i,2} + \dots + b_{p-1}X_{i,(p-1)} + \varepsilon_i$ . Portanto, os 86 dados são analisados, e os parâmetros significativos foram considerados para explicar os resultados experimentais através do estudo estatístico dos testes na Tabela 3.

A análise estatística realizada com o software Statistica, versão 6.0 de 2001, permitiu-nos identificar que alguns parâmetros desempenham um papel importante na computação do fator de eficiência da seção líquida experimental ( $C_{t,exp}$ ). Apenas aquelas variáveis que se mostraram estatisticamente significativas foram incorporadas ao modelo, a saber:  $\bar{x}$  é a distância do plano da aba conectada até o centro de gravidade,  $L$  é o comprimento total da ligação parafusada,  $b_c$  é a largura total da aba conectada,  $b_d$  é a largura total da aba desconectada,  $b_{cn}$  é a largura líquida da aba conectada, e  $t$  é a espessura da aba do perfil. Nota-se que além das formulações para  $C_t$  prescritas pela NBR-14762 (2010), Equação (2), e AISI-S100 (2016), Equação (3), essa pesquisa também avaliou uma formulação alternativa de  $C_t$ , proposta por De Paula, Bezerra e Matias (2008), expressa pela Equação (6), baseada então em 66 ensaios em cantoneiras de aço formadas a frio.

$$C_{t(2008)} = 1,19 - 0,26(\bar{x}/L) - (0,63b_{cn} + 0,17b_d - 0,47d - 1,70t)/b_c \quad (6)$$

Voltando aos 86 experimentos reportados na Tabela 3, ao final das etapas de remoção dos extremos e de avaliação dos resíduos, permaneceram ainda 80 casos, ou ensaios. A análise desses casos produziu um modelo altamente significativo ( $p < 0.001$ ), sendo  $p$  o  $p$ -value, notando-se que o  $p$ -value é uma medida estatística de evidência contra a hipótese nula. Quanto menor o  $p$ -value, mais evidência se tem. Além disso, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é de 89,6%, o coeficiente de correlação múltiplo ( $R$ ) de 94,6%, e o erro padrão da estimativa de  $C_t$  igual a 0,0296 constitui alta significância estatística dos parâmetros testados (estatística  $p$ ).

Avaliadas as informações e com base nos resultados pode-se finalmente escrever uma nova proposta para o coeficiente de redução da seção líquida, ou seja ( $C_{t,prop}$ ) em função das grandezas apresentadas:

$$C_{t,prop} = 1,12 - 0,29(\bar{x}/L) - (0,55b_{cn} + 0,13b_d - 2,51t)/b_c \quad (7)$$

A viabilidade dessa equação está estaticamente verificada através dos valores inseridos no software Statistica. A Equação (7) é aplicada para os modelos testados experimentalmente e os resultados são mostrados na Tabela 3.

As Figuras 6 e 7 apresentam as diferenças de comportamento do coeficiente da seção líquida dos testes experimentais  $C_{t,exp}$  em relação às equações da NBR-14762 (2010) ou Equação (2), AISI-S100 (2016) ou Equação (3), Equação (6) sugerida em 2008 por De Paula, Bezerra e Matias e a Equação (7) agora proposta nesse artigo – ver Tabela 4. Nota-se nas Figuras 6 e 7 que quanto mais próximo de zero for a diferença entre o valor calculado e o valor obtido experimentalmente para o coeficiente de redução da área líquida  $C_t$ , melhor é a equação do cálculo de  $C_t$ . Dessa forma, com o menor desvio padrão entre os valores calculados e os experimentais apresentados na Tabela 4, a Equação (7) proposta ( $C_{t,prop}$ ) é superior às equações (2), (3) e (6).

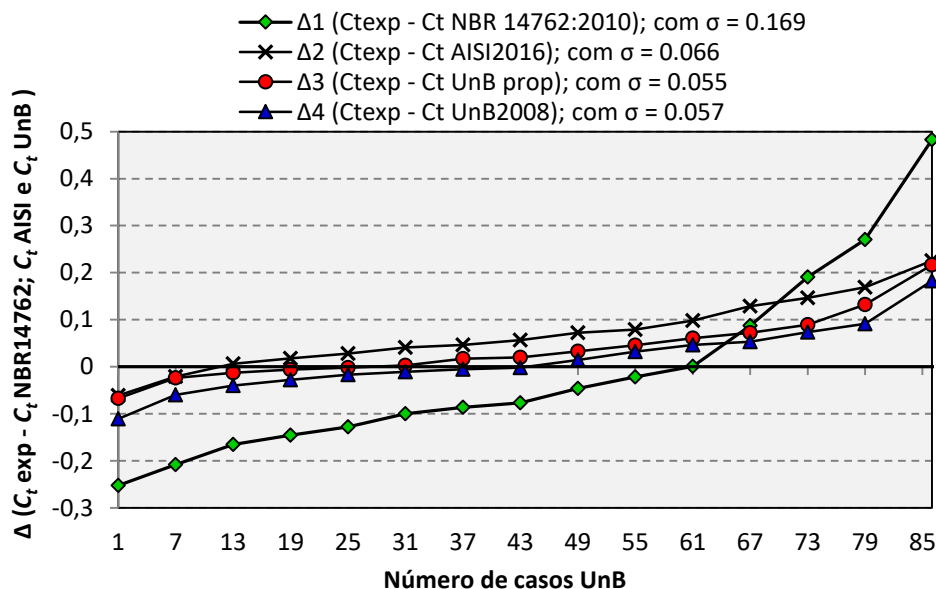


Figura 6 - Diferenças no comportamento de  $C_t$  das Eqs.(2), (3), (6) e (7) (ver Tabela 4)

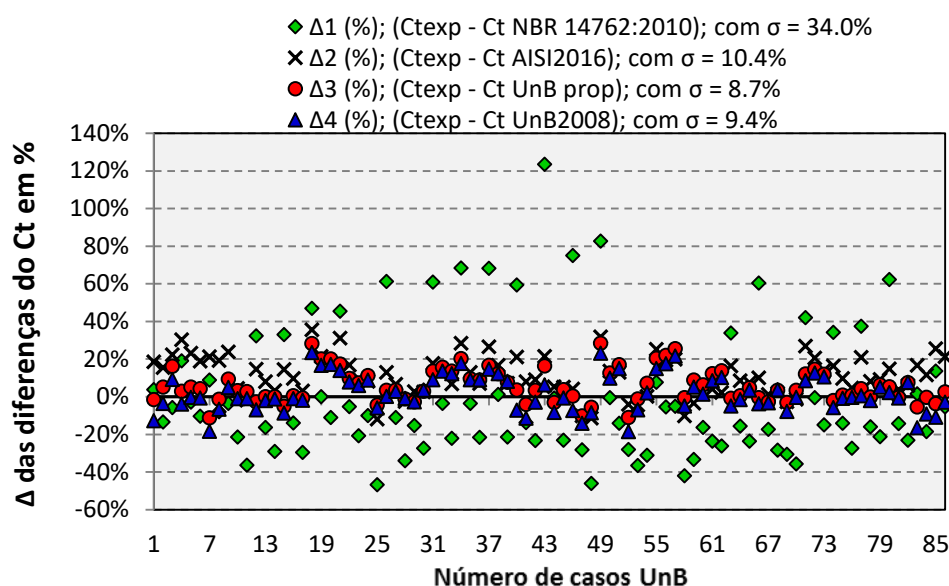


Figura 7 – Diferenças em % dos  $C_t$  das Eqs.(2), (3), (6) e (7) (ver Tabela 4)

## 7 Conclusões

Foram apresentados nesse estudo, os resultados inéditos de 86 ensaios experimentais efetuados na Universidade de Brasília, em cantoneiras de aço formadas a frio e conectadas por parafusos, com aço COR 420. Observou-se que o modo de falha apresentado em todos os ensaios foi a ruptura da seção líquida. Os espécimes testados tinham abas iguais, abas diferentes, diferentes seções transversais, espessuras de 2,25; 3,35 e 3,75 mm e um número variado de parafusos por seção. Usando regressão múltipla nos resultados experimentais, com as variáveis  $\bar{x}/L$ ;  $b_{cn}/b_c$ ;  $b_d/b_c$ ;  $t/b_c$  propôs-se na Equação (7) uma nova expressão para o coeficiente de redução da área líquida  $C_{t,prop}$  para cantoneiras feitas em aço brasileiro, COR 420. Na equação proposta,  $\bar{x}$  = posição do centro de gravidade da cantoneira em relação à chapa de ligação,  $L$  = comprimento total da ligação parafusada,  $b_{cn}$  = largura líquida da aba conectada,  $b_c$  = largura total da aba conectada,  $b_d$  = largura total da aba desconectada,  $t$  = espessura das abas. Os resultados das diferenças entre os valores experimentais,  $C_{t,exp}$ , e aqueles calculados pelas equações (2), (3), (6) e (7), respectivamente, revelam que  $C_t$  calculado pela NBR 14762 (2010) é o que mais difere dos valores experimentais,  $C_{t,exp}$ . Todas as outras equações, em especial a Equação (7), se mostraram satisfatórias aos valores experimentais do coeficiente de redução da área líquida,  $C_t$ . A Equação (7) proposta mostra um menor desvio padrão (0.055 e 8.7%) que a NBR-14762 (2010) cujo valor é 0.169 e 34%, a AISI-S100 (2016), cujo valor é 0.066 e 10.4%, e a Equação (6), cujo valor

é 0.057 e 9.4%. A Equação (7) mostra que o valor calculado para  $C_{t,prop}$  se aproxima mais dos resultados do  $C_{t,exp}$  do que as outras equações testadas. Nota-se ainda que a equação proposta, Equação (7), é bem mais simples de ser usada do que a equação da AISI-S100 (2016), mais prática para uso em projetos com aço fabricado no Brasil. A partir da Equação (7) pode-se observar que as variáveis escolhidas foram adequadamente selecionadas, de modo a contemplar o coeficiente de redução da área líquida " $C_t$ " devido ao fenômeno *shear lag*.

## 8 Referências bibliográficas

- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. **North American specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington DC, 2007.
- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI. **North American specification for the design of cold-formed steel structural members**. Washington DC, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 14762:2010. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010.
- CHUNG, K. F; LAU L. Experimental investigation on bolted moment connections among cold formed steel members. **Engineering Structures**. 1999;21:898–911.
- DE PAULA, V. F. ; BEZERRA, L. M.; MATIAS. W. T.; Efficiency reduction due to shear lag on bolted cold-formed steel angles. **J. of Const. Steel Research**. University of Brasília, 2008.
- HOLCOMB BD, YU WW, Laboube RA. Tensile and bearing capacities of bolted connections. Second summary report. **Civil Engineering Study 95-1**. University of Missouri-Rolla; 1995.
- KENNEDY. JB, NEVILLE. AM. Basic statistical methods for engineering and scientists. **Harper e Row Publishers**; New York ,1986.
- KULAK GL,Wu EY. Shear lag in bolted angle tension members. **Journal of Structural Engineering**, ASCE 1997;123:1144–52.
- LABOUBE RA, YU WW. Tensile and bearing capacities of bolted connections. **Final summary report. Civil Engineering Study 95-6**. University of Missouri-Rolla; 1995.
- MAIOLA CH. Ligações parafusadas em chapas finas e perfis de aço formados a frio. Tese (doutorado). **EESC – USP**. São Carlos, 2004.
- SPIEGEL. MR, SCHILLER. JJ, SRINIVASAN RA. Schaum’s outline of theory and problems of probability and Statistics. **2nd ed. New York: McGraw-Hill**, New York, 2000.
- STATSOFT, Inc. STATISTICA (data analysis software system). Version 6. 2001.
- TEH, L. H; GILBERT, B. P. Net section tension capacity of cold-reduced sheet steel angle braces bolted at one leg. **Journal of Structural Engineering**, Vol., 139 (3).University of Wollongong, Austrália, 2013.
- TEH, L. H; GILBERT, B. P. Net section tension capacity of equal angle braces boltedat different legs . **Journal of Structural Engineering**, 06014002. University of Wollongong, Austrália, 2014.
- YIP ASM, CHENG JJR. Shear lag in bolted cold-formed steel angles and channels in tension. **Structural engineering report no. 233**. Edmonton: University of Alberta; Canada, 2000.
- YU, WW. Cold-formed steel design. **3rd ed. John Wiley e Sons**; New York, 2000.