

## Comportamento mecânico sob cisalhamento de ligações de chapas metálicas finas com parafusos autoperfurantes

Gabriel C. de Macêdo<sup>1</sup>, Geraldo J. B. dos Santos<sup>2</sup> e Paulo R. L. Lima<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECEA - DTEC/UEFS, Av. Transnordestina, s/n - Novo Horizonte - Feira de Santana / BA, [gabrielcm.ec@gmail.com](mailto:gabrielcm.ec@gmail.com)

<sup>2</sup> Professor, Departamento de Tecnologia - PPGECEA - DTEC/UEFS, [belmonte@uefs.br](mailto:belmonte@uefs.br)

<sup>3</sup> Professor, Departamento de Tecnologia - PPGECEA - DTEC/UEFS, [prllima@uefs.br](mailto:prllima@uefs.br)

### Mechanical behavior of self-drilling screw connections in thin walled steel plates under single shear

#### Resumo

Neste trabalho foram realizados ensaios experimentais em ligações compostas por duas chapas metálicas de espessura de 1,270 mm, 1,984 mm e 3,175 mm, conectadas por dois parafusos autoperfurantes de 6,35 mm de diâmetro, dispostos longitudinalmente. Foram testadas nove conexões diferentes, em que se variou a espessura da chapa em contato com a cabeça do parafuso (chapa1) e a espessura da outra chapa (chapa 2). Os resultados foram classificados e confrontados com as previsões da norma NBR 14762:2010. Verificou-se que a relação entre as espessuras das chapas afeta de forma relevante o comportamento mecânico da ligação, e que quatro modos de falha distintos podem acontecer, com cisalhamento do parafuso, esmagamento da chapa 1, inclinação excessiva do parafuso e esmagamento da chapa 2. Uma análise estatística dos resultados demonstrou que a interação entre as espessuras das chapas afeta o valor da força de cisalhamento resistente da ligação. A comparação dos resultados de cálculo com os experimentais demonstrou que a norma brasileira é conservadora para a maioria dos casos.

**Palavras-chave:** *Ligações rosqueadas, parafusos autoperfurantes, modos de falha, perfis formados a frio.*

#### Abstract

In this work, experimental tests were carried out on connections with two metallic plates, with thicknesses of 1,270 mm, 1,984 mm and 3,175 mm, connected by two self-drilling screws of 6,35 mm in diameter, arranged longitudinally. Nine different connections were tested, varying the thickness of the plate in contact with the screw head (plate1) and the thickness of the other plate (plate 2). The results were classified and compared with the predictions of the NBR 14762: 2010 standard. It was found that the relationship between the thickness of the plates significantly affects the mechanical behavior of the connection. Four distinct failure modes were identified, with shearing of the screw, crushing of the plate 1, excessive inclination of the screw and crushing of the plate 2. A statistical analysis of the results showed that the interaction between the thicknesses of the plates affects the value of the resistant shear force connection. The comparison of the calculation results with the experimental results showed that the Brazilian standard is conservative for most of the cases.

**Keywords:** *Screw connections, self-drilling screws, failure modes, cold-formed steel.*

\* autor correspondente

## 1 Introdução

A necessidade de economia de recursos naturais e o apelo mundial pela minimização do consumo de energia e geração de CO<sub>2</sub> têm forçado todos os setores produtivos a buscar soluções mais sustentáveis. Como o processo de produção do aço é intensivo em relação ao consumo de matérias-primas, insumos e geração de poluentes (CARVALHO *et al.*, 2015), o uso técnicas e elementos construtivos metálicos que possam minimizar esse impacto ambiental, como os perfis leves, é primordial para melhorar a sustentabilidade do setor.

Dubina *et al.* (2012) definem como perfil leve, os perfis de chapa dobrada com espessura inferior a 3 mm. O uso destes perfis reduz o consumo de aço utilizado nas construções, pois eles são eficientes quando analisamos a sua resistência e rigidez em relação ao seu peso próprio. Com o uso de novas tecnologias, os perfis podem ser produzidos a partir de chapas formadas a frio com espessuras menores que 1 mm.

Por conta da sua alta relação inércia/peso, os perfis leves formados a frio apresentam um menor custo para transporte, montagem e armazenamento, quando comparados aos perfis laminados ou soldados, e podem ser usados com segurança em estruturas de edificações de pequeno porte. Por outro lado, devido sua alta esbeltez, a capacidade de resistência dos perfis é geralmente limitada pela resistência da seção efetiva ou pela capacidade de flambagem, o que depende também do comprimento dos vãos (SOLIMAN *et al.*, 2013). Outro cuidado importante, para estruturas montadas com estes perfis, é com as ligações e conexões que, segundo Rezende *et al.* (2006), podem apresentar diferenças significativas quando comparadas ao comportamento das ligações entre perfis laminados ou soldados. Devido a pequena espessura da chapa que forma o perfil leve, a ligação passa a ter um efeito preponderante sobre o modo de falha da estrutura que é influenciado ainda pelo tipo de conector utilizado nas ligações.

Atualmente tem sido muito comum a utilização de parafusos auto-atarraxantes ou autoperfurantes (PAP), mostrado na Figura 1a, nas ligações entre perfis formados a frio ou entre os perfis e os elementos de vedação e cobertura. Esses parafusos autoperfurantes são capazes de produzir seus próprios furos e ainda formarem roscas nos perfis ou chapas a que serão conectados através do uso de uma parafusadeira

elétrica manual (DUBINA *et al.*, 2012) e permitem reduzir etapas do processo construtivo. No entanto, essa interação entre o parafuso e o perfil, altera a forma de transferência de tensões na ligação e, conseqüentemente, pode mudar a sua forma de ruptura.

Segundo Moen *et al.* (2014), as ligações com PAP falham por quatro modos distintos: (I) inclinação do PAP; (II) esmagamento da chapa 1; (III) esmagamento da chapa 2 e (IV) cisalhamento do parafuso. É referenciado com chapa 1 (ch1) a chapa formadora do perfil metálico em contato com a cabeça do PAP, por sua vez, referenciamos como chapa 2 (ch2) a chapa formadora do perfil apenas em contato com o fuste do PAP, ver Figura 1b. Seguindo o mesmo princípio, referenciamos com  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente, as espessuras das chapas conectadas.

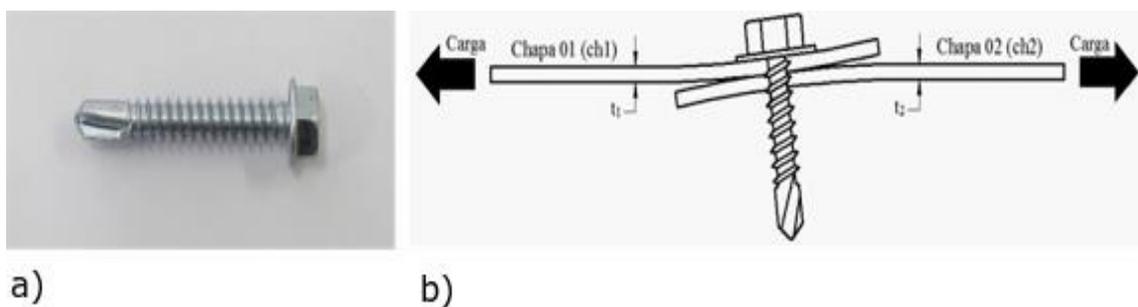


Figura 1 - Ligação com parafuso autoperfurante: a) detalhe do parafuso; b) detalhe da ligação sob cisalhamento simples.

O dimensionamento das ligações rosqueadas é previsto em várias normas e suas formulações são baseadas no estudo com perfis normalmente dúcteis realizado por Perok (1990) para readequação das especificações da norma inglesa BS 5990-5:1987. Contudo, Daudet e Labobe (1996) mostraram que a previsão de cargas baseada nas equações existentes é conservadora para perfis de baixa ductilidade.

Os parâmetros utilizados para o cálculo da resistência das ligações na NBR 14762:2010 e no AISI S100:2016 são as espessuras e as resistências das chapas dos perfis conectados, o diâmetro dos parafusos e o número de parafusos empregados. No entanto, outros parâmetros podem influenciar a resistência mecânica das ligações. Corner (2014), apresentou um modelo em que idealizou o comportamento mecânico das ligações rosqueadas com o diâmetro da arruela dos PAPs e correlacionou a inclinação dos parafusos com o passo da rosca e a relação entre a espessura dos perfis conectados.

Moen *et al.* (2014), diferente do preconizado pelas normas, descreveram que em ligações com espessuras distintas, terá a menor inclinação do parafuso aquela que apresentar uma maior espessura para a ch1. Mosqueira (2016) indicou que a relação entre a espessura dos perfis é um fator preponderante e que deve ser mais bem investigada para adequação das equações de previsão da carga limite última para ligações rosqueadas.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da espessura das chapas no comportamento mecânico de ligações metálicas rosqueadas compostas por chapas conectadas por parafusos autoperfurantes. Foram avaliados o modo de falha e resistência máxima da ligação sob ações de cisalhamento. Para isso, foram realizados ensaios experimentais com aplicação de tração direta em ligações com chapas formadas a frio em espessuras de 1,270 mm, 1,984 mm e 3,175 mm, unidas por dois parafusos autoperfurantes alinhados e com diâmetro de 6,35mm.

## 2 Cálculo da resistência das ligações rosqueadas

Diversas normas internacionais (BS 5950-5,1998; AS/NZS 4600, 2005; EN 1993-1-3, 2006; AISI s100, 2016) preveem o dimensionamento das ligações de perfis metálicos com parafusos autoperfurantes (PAP). No Brasil, a NBR 14762:2010 determina, no seu item 10.5, a força de cisalhamento resistente de cálculo ( $F_{c,Rd}$ ) desse tipo de ligação, considerando a relação entre as espessuras das chapas dos perfis conectados ( $t_2/t_1$ ) de acordo com as seguintes equações:

a) Quando  $t_2/t_1 \leq 1$ ,  $F_{c,Rd}$  é o menor dos valores:

$$F_{c,Rd} = 4,2(t_2^3 d)^{1/2} f_{u2} / \gamma \quad (1)$$

$$F_{c,Rd} = 2,7 t_1 d f_{u1} / \gamma \quad (2)$$

$$F_{c,Rd} = 2,7 t_2 d f_{u2} / \gamma \quad (3)$$

b) Quando  $t_2/t_1 \geq 2,5$ ,  $F_{c,Rd}$  é o menor dos valores:

$$F_{c,Rd} = 2,7 t_1 d f_{u1} / \gamma \quad (4)$$

$$F_{c,Rd} = 2,7 t_2 d f_{u2} / \gamma \quad (5)$$

c) Fora dos intervalos apresentado ( $1,0 < t_2/t_1 < 2,5$ ),  $F_{c.Rd}$  deve ser calculado por interpolação linear entre os menores valores obtidos nas equações acima.

A força de cisalhamento resistente de cálculo da ligação será dada pelas Equações (1) a (5) se o valor obtido for menor que a resistência do parafuso ao cisalhamento ( $F_{ss.Rd}$ ), dada por:

$$F_{ss.Rd} = F_{ss.Rk} / \gamma \quad (6)$$

A Equação (1) está associada ao modo de falha da ligação por inclinação do PAP, as Equações (2) a (5) são associadas ao modo de falha por esmagamento de uma das chapas, enquanto a Equação (6) se refere a falha por cisalhamento do PAP.

Nas Equações (1) a (6) tem-se que:

- d diâmetro nominal do PAP.
- $d_1$  distância entre o centro de PAPs, paralela ao sentido da aplicação da carga (colunas).
- $d_2$  distância entre o centro de PAPs, perpendicular ao sentido da aplicação da carga (linhas).
- e distância entre o centro do PAP e a borda, paralela ao sentido da aplicação da carga.
- $e_1$  distância entre o centro do PAP e a borda, paralela ao sentido da aplicação da carga.
- $e_2$  distância entre o centro do PAP e a borda, perpendicular ao sentido da aplicação da carga.
- $f_u$  resistência à ruptura na tração do perfil,  $f_{u1}$  ou  $f_{u2}$ .
- $f_{u1}$  resistência à ruptura na tração da chapa 01.
- $f_{u2}$  resistência à ruptura na tração da chapa 02.
- $F_{v.Rd}$  força de cisalhamento resistente de cálculo por PAP.
- $F_{c.Rd}$  força de cisalhamento resistente de cálculo por parafuso, associada à resistência e à geometria dos perfis da ligação.
- $F_{ss.Rk}$  força de cisalhamento resistente nominal do parafuso, fornecido pelo fabricante ou determinada por ensaio.
- $F_{ss.Rd}$  força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso.
- $t_1$  espessura da chapa 1.
- $t_2$  espessura da chapa 2.

$\gamma$  coeficiente de ponderação da resistência (especificado ou calculado nas respectivas normas).

### 3 Programa Experimental

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Chapas

Foram utilizadas chapas de bitola MSG 11, 14 e 18, com espessura de 3,175 mm, 1,984 mm e 1,270 mm, respectivamente.

O material especificado para a chapa foi o SAE1020. A avaliação da resistência foi realizada através do ensaio de tração direta, de acordo com ASTM E8/E8M-15a:2015 em quatro amostras (Figura 2a), com espessura de 1,984 mm e largura na região central de 12,5 mm. Foi utilizada uma máquina universal de ensaio servocontrolada de 100 kN de capacidade, com uma taxa de aplicação de deslocamento de 1,2 mm/mim e medida de deformações axiais com um extensômetro, tipo clip gage, de 50 mm de base de medida, como mostra a Figura 2b.

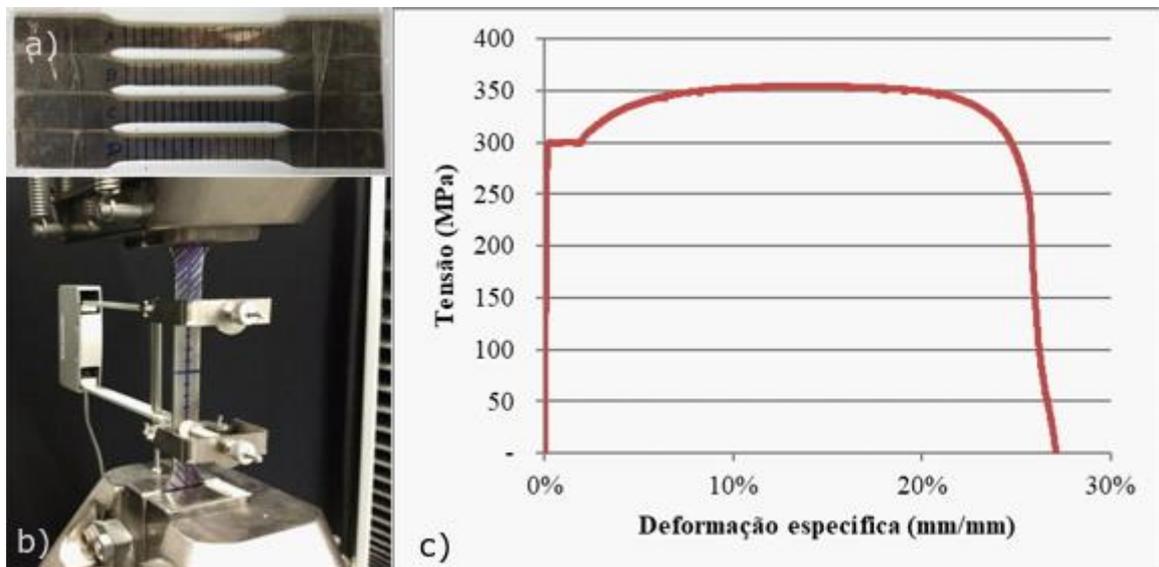


Figura 2 - Avaliação do aço das chapas: a) amostras; b) configuração do ensaio; c) resultado experimental.

Verificou-se, a partir dos diagramas tensão-deformação obtido, mostrado na Figura 2c, que o aço apresenta uma tensão de escoamento  $f_y$  de  $306,59 \pm 9,67$  MPa, tensão máxima  $f_u$  de  $356,55 \pm 2,98$  MPa e módulo de elasticidade de  $204,95 \pm 10,11$  GPa. O aço pode então ser classificado como estrutural, de acordo com a NBR 14762:2010, já que apresenta limite  $f_u/f_y > 1,08$  e alongamento após ruptura superior a 7%.

### 3.1.2 Parafusos

Foi utilizado parafuso autoperfurante modelo CR 212 14x14, de 6,35 mm de diâmetro, comprimento de 25,4 mm, espaçamento de rosca de 14 TPI e chave de 3/8", fabricados pela Chong Reen, mostrado na Figura 1a.

Foi realizado ensaio de cisalhamento nos parafusos, de acordo as especificações do AISI 904-13, com parafusos instalados de forma oposta, visando minimizar as possíveis interferências geradas pela cabeça dos parafusos, como mostra o detalhe da Figura 3. A partir da curva carga-deslocamento, obteve-se uma carga máxima de ruptura de 2,5 tf, que corresponde a uma resistência ao cisalhamento de  $662,78 \pm 2,65$  MPa.

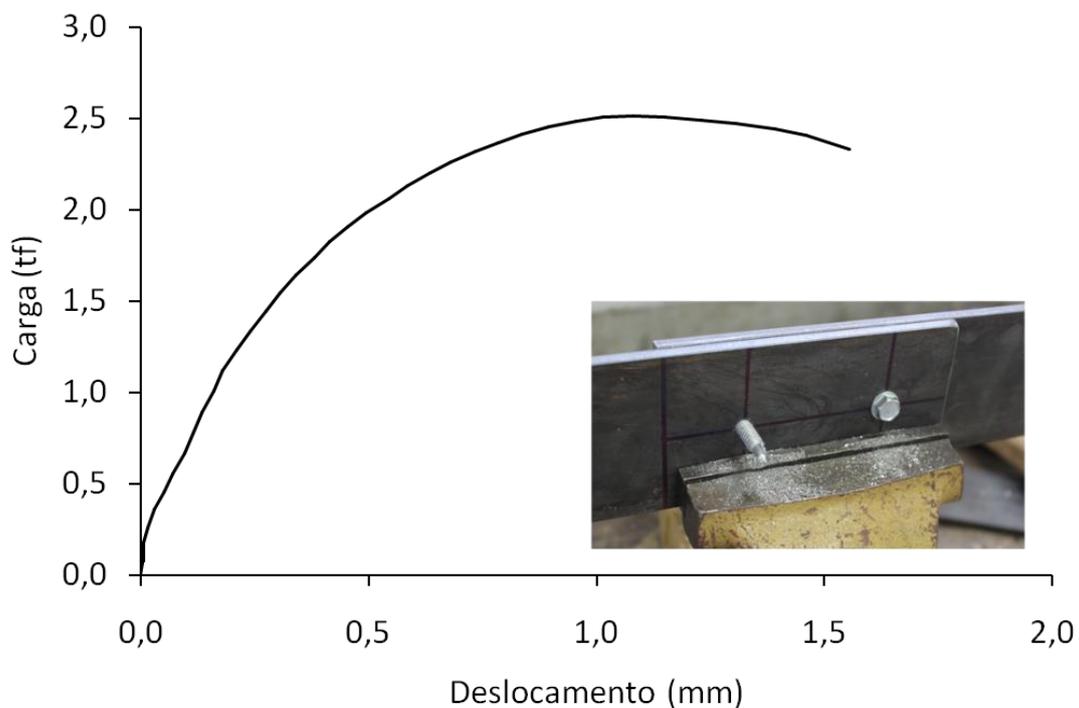


Figura 3 - Curva carga-deslocamento do parafuso no ensaio de cisalhamento

### 3.2 Ensaio das ligações

O ensaio de cisalhamento das ligações foi realizado de acordo com a norma AISI 905-15, usando uma configuração de dois parafusos espaçados longitudinalmente de 60 mm. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios servocontrolada com uma taxa de aplicação de deslocamento na direção axial de 3,0 mm/mim. Para monitoramento da força foi utilizada uma célula de carga de 5 tf e a medida dos deslocamentos foi realizada por dois extensômetros elétricos de 50 mm, com espaçamento de medida de 150 mm. A configuração do ensaio está apresentada na Figura 4.

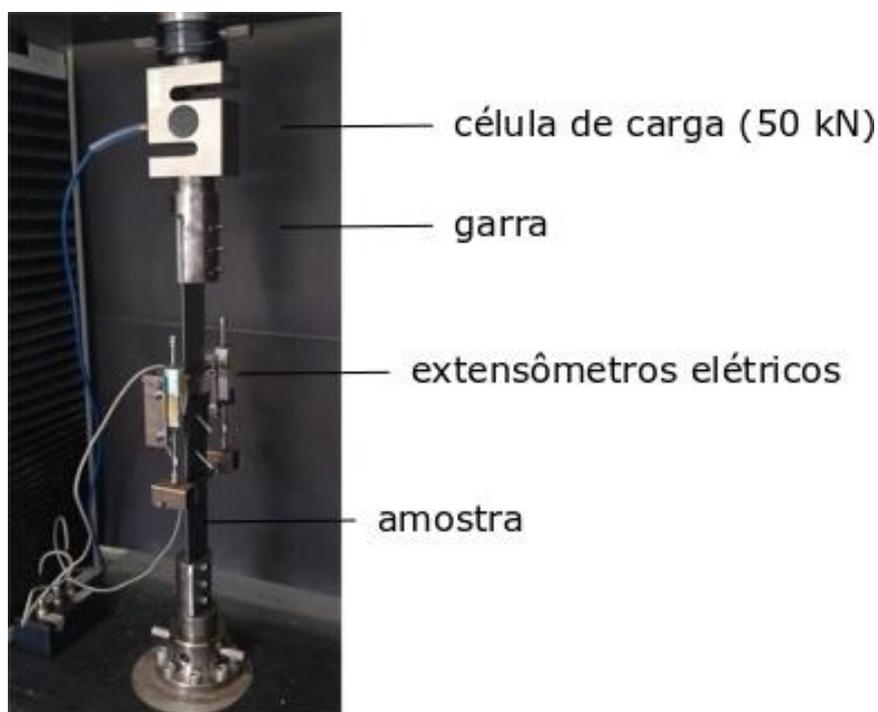


Figura 4 - Configuração do ensaio de cisalhamento das ligações

Cada chapa da ligação tem largura de 60 mm e comprimento de 350 mm. Foram testadas 9 configurações de ligação, variando a espessura de cada chapa (3,175 mm, 1,984 mm e 1,270 mm) e seu posicionamento na ligação, com relação à cabeça do parafuso, como mostra o planejamento experimental da Figura 5.

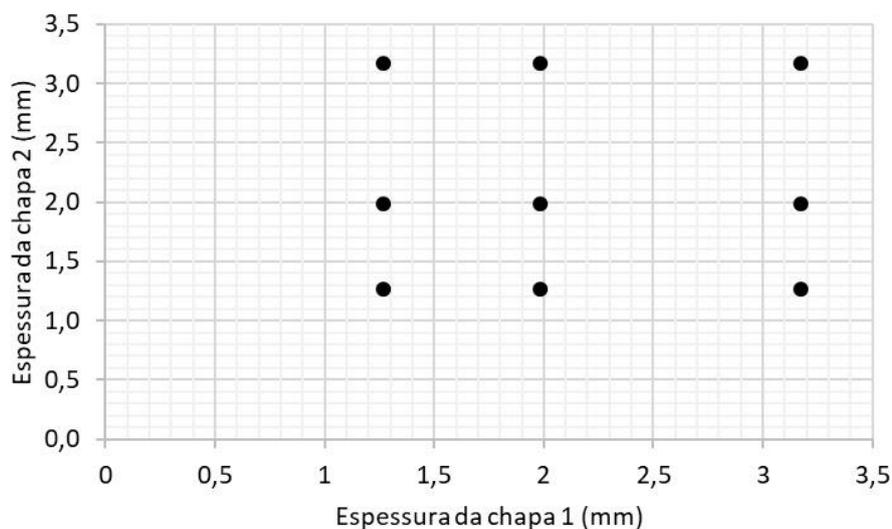


Figura 5 - Planejamento experimental com indicação das espessuras de chapas investigadas.

## 4 Resultados e discussão

### 4.1 Resultados experimentais

As curvas carga-deslocamento para todas as ligações avaliadas estão apresentadas nas Figuras 6 a 8. Na Tabela 1 são apresentados os valores de carga máxima e os modos de falha observados no ensaio experimental.

Tabela 1 - Resumo dos resultados experimentais e analíticos para os ensaios de cisalhamento das ligações

Espessura (mm)		Resistência da ligação		Modo de Falha*
t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	F <sub>max</sub> (tf)	CV (%)	
1,270	1,270	0,84	3,72%	I-PAP
	1,984	1,66	3,25%	I-PAP
	3,175	1,67	2,67%	E-ch1
1,984	1,270	1,27	12,25%	E-ch2
	1,984	2,12	3,36%	C-PAP
	3,175	2,29	5,82%	C-PAP
3,175	1,270	1,17	7,19%	E-ch2
	1,984	2,34	6,73%	C-PAP
	3,175	2,27	2,68%	C-PAP

\* PAP = Inclinação dos PAP; C-PAP = Cisalhamento dos PAPs  
E-ch1 = Esmagamento da ch1; E-ch2 = Esmagamento da ch2

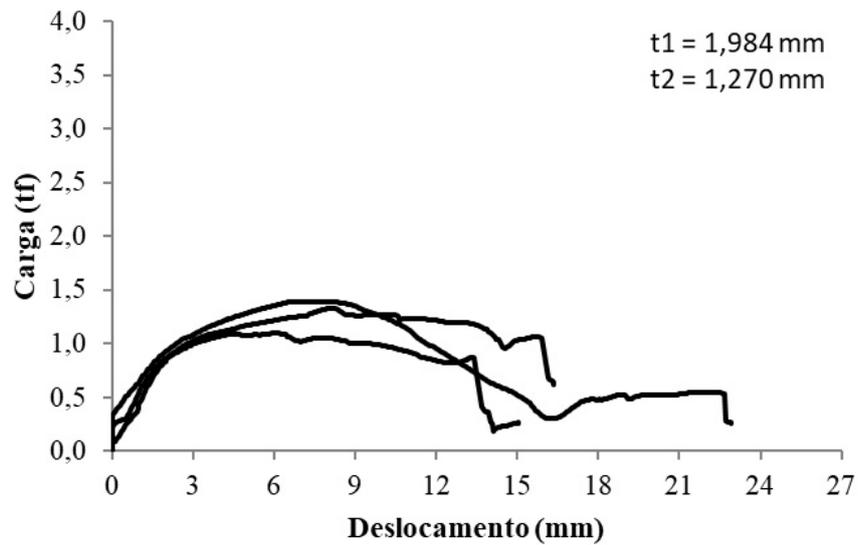
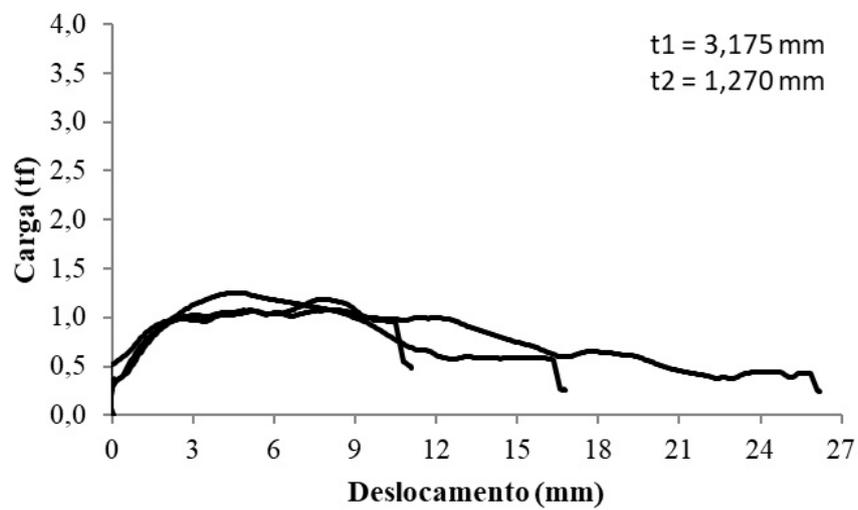
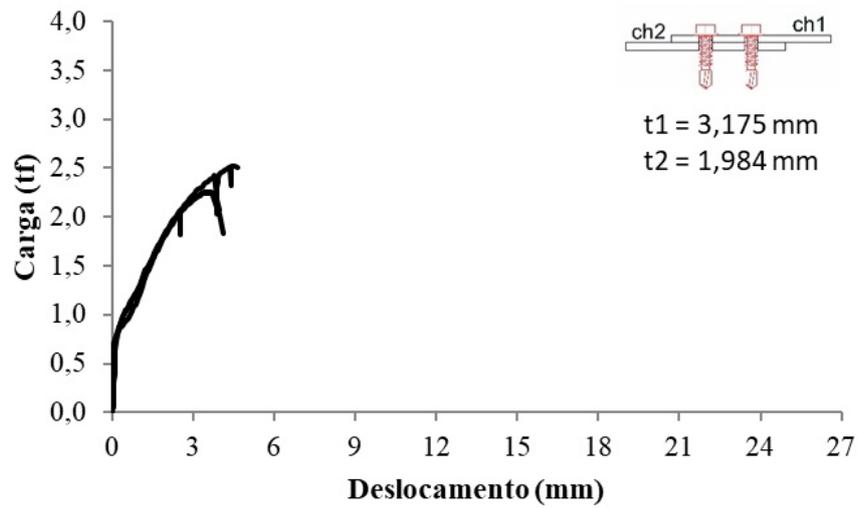


Figura 6 - Comportamento carga-deslocamento de ligações com  $t_1 > t_2$

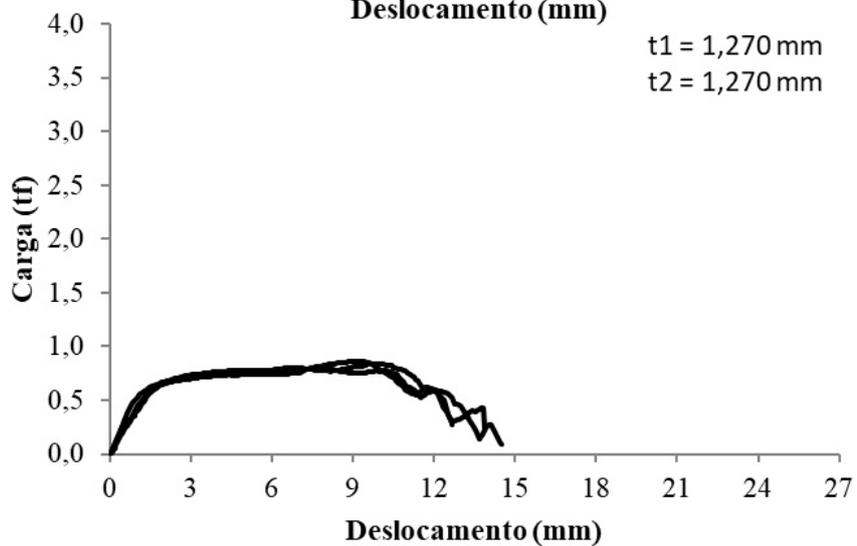
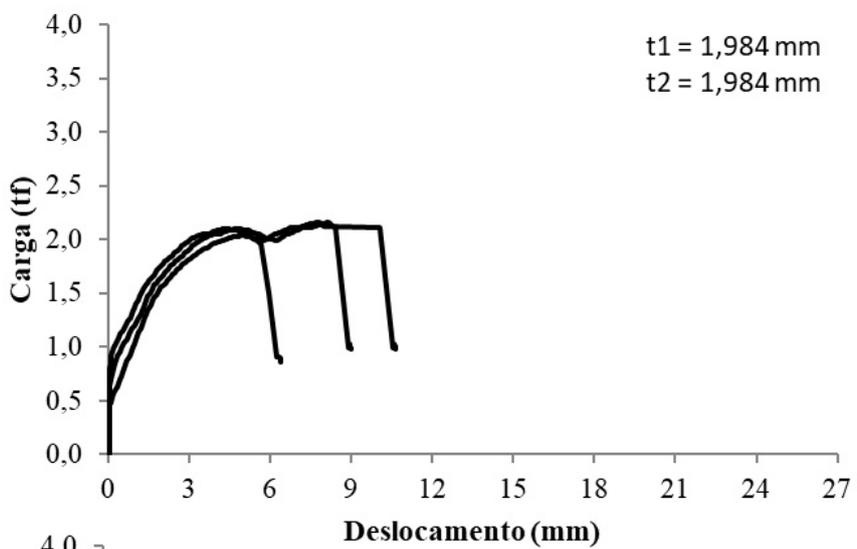
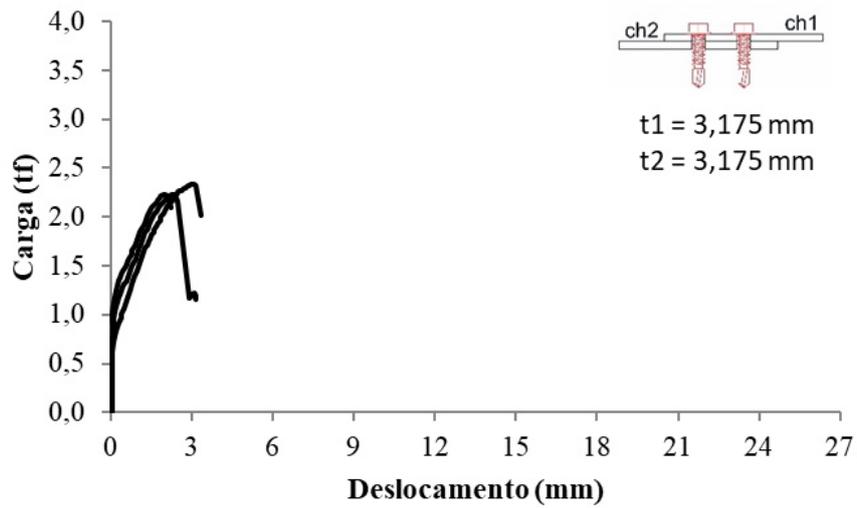


Figura 7 - Comportamento carga-deslocamento de ligações com  $t_1 = t_2$

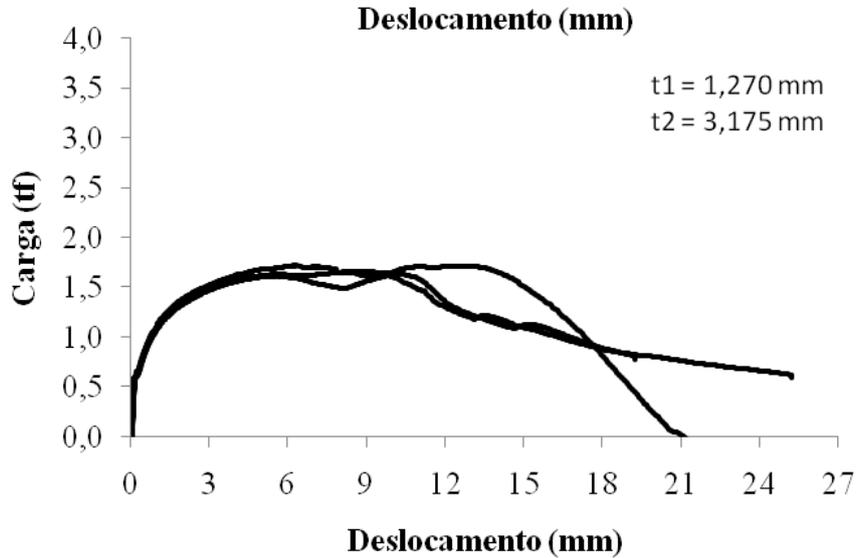
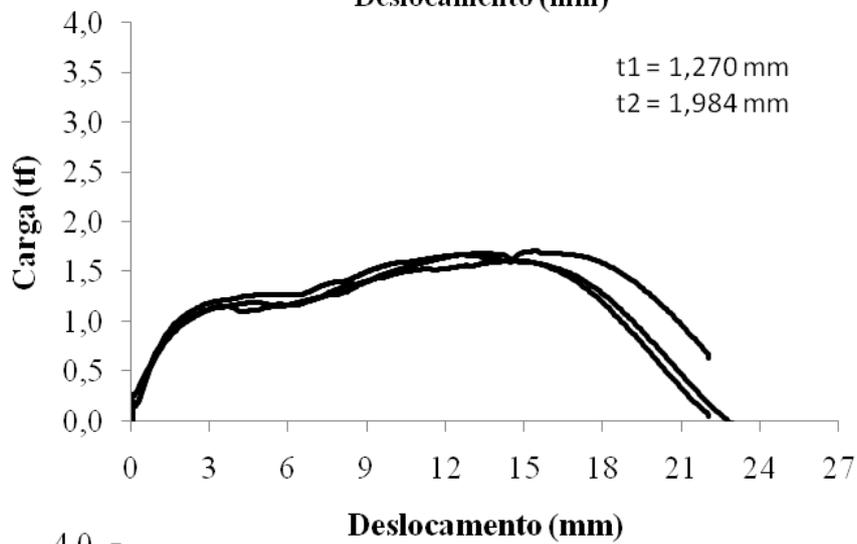
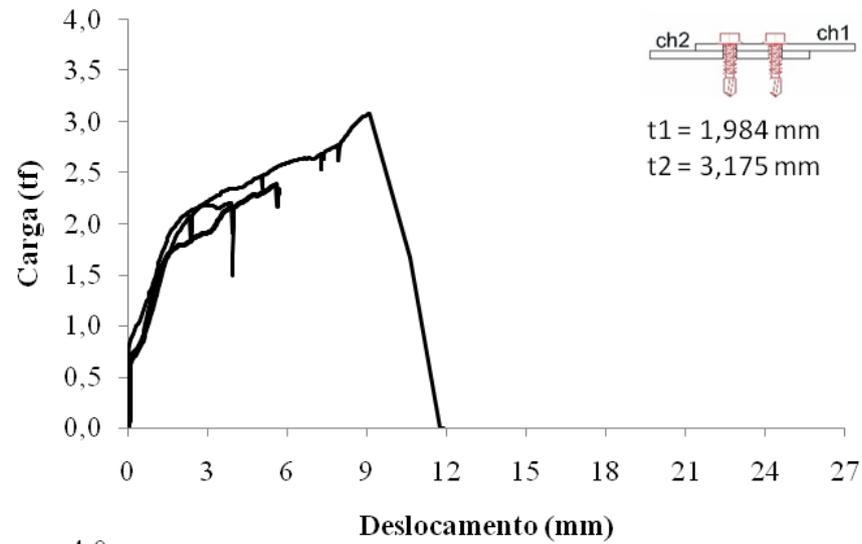


Figura 8 - Comportamento carga-deslocamento de ligações com  $t_1 < t_2$

Verifica-se que o comportamento mecânico da ligação está diretamente associado à espessura das chapas e ao posicionamento da cabeça do parafuso, o que afeta o esmagamento da chapa e a rotação dos parafusos.

#### a) Ligações com $t_1 > t_2$

Na figura 6 são apresentadas as curvas carga-deslocamento para as ligações em que a espessura da chapa  $t_1$  é maior que a espessura  $t_2$ .

Verifica-se que, quando se mantém a espessura de  $t_1 = 3,175$  mm, mas a espessura da chapa  $t_2$  varia de 1,984 mm para 1,270 mm, há uma mudança significativa de comportamento mecânico, com redução de 50% no valor da carga máxima e um aumento do deslocamento último. A mudança de comportamento está associada ao modo de falha identificado na ligação. Na primeira configuração de chapas foi identificado o cisalhamento dos parafusos (mostrado na Figura 9), que se caracteriza por uma queda brusca de carga. Neste caso, verifica-se que a carga máxima da ligação corresponde aproximadamente ao valor da resistência ao cisalhamento dos parafusos.



Figura 9 – Falha por cisalhamento do parafuso

Na segunda configuração de chapas, por outro lado, o modo de falha foi caracterizado pelo rasgamento da chapa 2, como mostra a Figura 10a. De acordo com Moen *et al.* (2014) uma ligação formada por perfis de espessuras distintas pode apresentar diferentes modos de falha que vão depender do posicionamento da chapa mais espessa em relação à cabeça do parafuso.

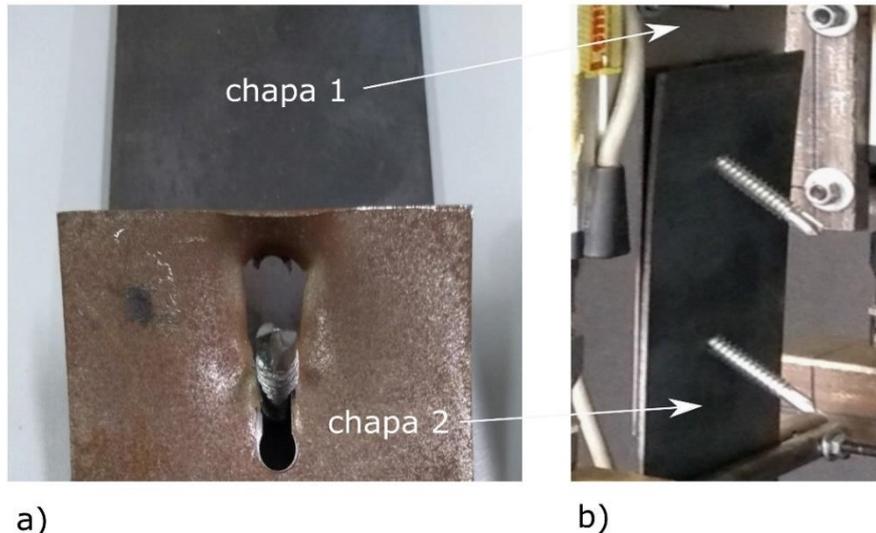


Figura 10 - Modos de falha das ligações: a) rasgamento da chapa 2; b) inclinação dos parafusos.

As ligações com  $t_1$  igual 3,175 mm ou igual a 1,984 mm, mas com  $t_2$  igual a 1,270 mm, apresentaram comportamento mecânico semelhantes. A força máxima resistida entre estas ligações variou de cerca de 8,5%. O modo de falha observado para ambas foi o esmagamento da chapa 2, que possuía menor espessura. No entanto, no momento da ruptura, a ligação com  $t_1$  igual a 3,175 mm apresentou uma inclinação dos parafusos  $11,7^\circ$  enquanto para a ligação com  $t_1$  igual a 1,984 mm, a inclinação observada foi de  $28,7^\circ$ .

#### **b) Ligações com $t_1 = t_2$**

O comportamento mecânico das ligações em que as chapas possuem a mesma espessura é apresentado na Figura 7. Verifica-se que a ligação com espessura de chapa igual a 3,175 mm apresenta maior carga máxima, igual a 2,27 tf, e menor deslocamento. A mudança da espessura das chapas para 1,984 mm, reduz a carga máxima para 2,12 tf, ou seja, uma redução de apenas 7%. Como ambas as ligações apresentaram modo de falha por cisalhamento do parafuso, a espessura da chapa afeta de forma menos significativa a carga máxima.

Para ligações com chapas de 1,270 mm, por outro lado, a ruptura aconteceu por inclinação dos PAP, visto que a rigidez das chapas não foi suficiente para ultrapassar a resistência ao cisalhamento do parafuso. Isso resultou em uma expressiva redução da capacidade resistente da ligação, de cerca de 152%, com relação às ligações com chapa

de 3.175 mm. O modo de falha identificado foi a inclinação excessiva dos parafusos, como mostra a Figura 10b. A inclinação excessiva dos parafusos autoperfurantes é mais suscetível em ligações com chapas de menor espessura por conta da falta de porcas neste tipo de parafuso e por isso é tratado como um possível modo de falha (CORNER, 2014)

Os resultados desse estudo corroboram o estudo de Daudet e Laboube (1996), que realizaram 264 ensaios com ligações metálicas com parafusos autorperfurantes e chapas com espessuras de 1,04 mm, 1,35 mm, 1,83 mm e 2,49 mm, com  $t_1 = t_2$ . Foi concluído pelos autores que a utilização de perfis com espessura iguais ou superiores a 1,83 mm conduziram a ligação à falha por cisalhamento direto dos PAPs. Nos perfis mais finos, os modos de falha observados foram de inclinação do parafuso em combinação com o esmagamento das chapas.

### **c) Ligações com $t_1 < t_2$**

O comportamento mecânico das ligações em que a espessura da chapa  $t_1$  é menor que a espessura  $t_2$  é mostrado na Figura 8. A ligação com chapa 2 de espessura de 3,175 mm e chapa 1 com espessura de 1,984 mm apresentou ruptura por cisalhamento, e carga máxima de 2,29 tf. Quando é utilizada uma chapa 1 de 1,270 mm, verifica-se uma redução de 27% da carga máxima e uma mudança na forma de falha, que passa a ser de esmagamento da chapa 1, como mostra a Figura 11.



Figura 11 - Modo de falha da ligação com esmagamento da chapa 1

Para a ligação com chapa  $t_2$  de 1,984 mm e chapa  $t_1$  de 1,270 mm o modo de falha observado é a inclinação excessiva dos parafusos. A força máxima resistida pela ligação é de 1,67 tf, o que pode estar associado pela combinação de esforços de cisalhamento e tração no fuste dos parafusos, como observado por Draganic *et al.* (2014).

## 4.2 Efeito da interação entre espessuras das chapas

Verifica-se que, além da espessura de cada chapa utilizada, a posição que a mesma ocupa, com relação a cabeça do parafuso, afeta a capacidade portante da ligação. Isso demonstra que há uma interação entre as chapas que influencia o comportamento mecânico da ligação.

Para determinação do efeito da interação das espessuras das chapas sobre a resistência ao cisalhamento da ligação foi realizado, com base nos resultados experimentais, um planejamento estatístico do experimento  $3^2$  com 2 fatores e 3 níveis (baixo, alto e intermediário), como mostra a Figura 5: i) Fator 1 - espessura da chapa 1 ( $t_1$ ), com níveis 1,270 mm, 1,984 mm e 3,175 mm; ii) Fator 2 - espessura da chapa 2 ( $t_2$ ), com níveis 1,270 mm, 1,984 mm e 3,175 mm.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 1, é possível estabelecer uma equação de predição da resistência ao cisalhamento a partir da espessura das chapas. Para isso, foi utilizado um modelo de regressão múltipla não linear que relaciona a resistência ao cisalhamento com os valores de espessura das chapas:

$$f_{\max} = -4,195 + 1,751 \cdot t_1 + 3,420 \cdot t_2 - 0,357 \cdot t_1^2 - 0,680 \cdot t_2^2 + 0,055 \cdot t_1 t_2 \quad (8)$$

Verifica-se que o último termo da Equação (8) indica a interação que existe entre a espessura das chapas  $t_1$  e  $t_2$ , e que contribui para a não-linearidade da curva de resposta mostrada na Figura 11. Além disso, é observado que, para determinação da força máxima, a espessura de ambas as chapas deve ser considerada na equação, diferentemente do que prescreve as Equações normativas de (1) a (7) que usa apenas uma delas no cálculo.

Esse resultado corrobora a investigação de Mosqueira (2016) a qual indicou que a relação entre a espessura dos perfis é um fator preponderante na previsão da carga limite ultima para ligações rosqueadas.

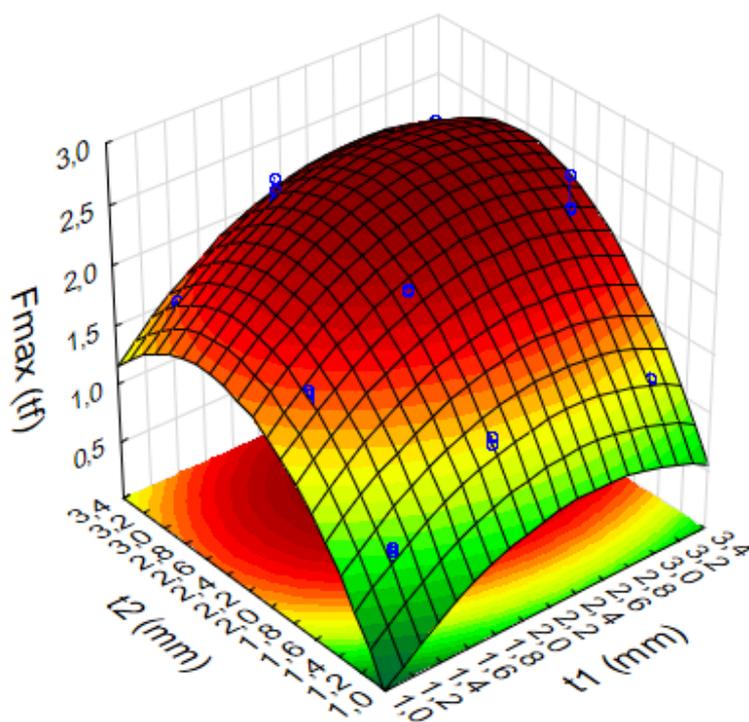


Figura 11 - Influência da interação entre  $t_1$  e  $t_2$  sobre a carga máxima de cisalhamento

Observando o resultado mostrado na Figura 11, verifica-se que, para os limites do experimento realizado, o valor máximo de resistência da ligação é atingido quando os valores de  $t_1$  e de  $t_2$  são ambos iguais a 2,6 mm. Acima ou abaixo desse valor ótimo de espessura é verificada uma redução da carga máxima de cisalhamento da ligação.

### 4.3 Comparação com resultados normativos

Na Tabela 2 são apresentadas as forças máximas teóricas, obtidas pelo uso das Equações (1) a (7) da norma ABNT NBR 14762:2010, e o erro obtido quando em comparação com os resultados experimentais apresentados na Tabela 1.

Tabela 2 - Resultados teóricos para os ensaios de cisalhamento das ligações

Espessura das chapas (mm)		Resistência teórica da ligação	
t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	F <sub>c.Rd.γ</sub> (tf)	Erro(%)
	1,270	1,08	28,57
1,270	1,984	1,55	-6,63
	3,175	1,55	-7,19
	1,270	1,08	-14,96
1,984	1,984	2,11	-0,47
	3,175	2,43	6,11
	1,270	1,08	-7,69
3,175	1,984	2,11	-9,83
	3,175	2,50	10,13

I-PAP = Inclinação dos PAP; C-PAP = Cisalhamento dos PAPs  
E-ch1 = Esmagamento da ch1; E-ch2 = Esmagamento da ch2

Observa-se na Tabela 2 que, para a maioria das ligações, o valor normativo manteve-se conservador, com valores abaixo do valor experimental e um erro máximo de, aproximadamente, 15%. Considerando os resultados obtidos nesse trabalho, verifica-se que uma das limitações das equações normativas é considerar, na determinação da força resistente, a espessura de apenas uma das chapas.

Para dois tipos de ligações, no entanto, foram verificados valores teóricos maiores que o valor experimental, com um erro de até 28%. Para estas ligações, em que os valores de espessura das chapas são iguais e, conseqüentemente, a relação  $t_2/t_1 = 1$ , foram utilizadas as Equações (1) a (3) na determinação da resistência de cálculo. Mesmo utilizando coeficientes de segurança para prevenir possíveis incertezas relativas ao material ou método de cálculo, usualmente as normas devem ser conservadoras com relação à estimativa da capacidade resistente das estruturas, incluindo suas ligações.

## 5. Conclusões

A partir dos resultados experimentais obtidos neste trabalho, com 9 tipos diferentes de ligações com parafusos autoperfurantes, foi possível observar que o modo de falha e a força máxima resistente da ligação são dependentes da relação entre a espessura das chapas e também da posição da chapa com relação a cabeça do parafuso.

Enquanto a norma brasileira prevê que o cálculo da força resistente depende da espessura de apenas uma das chapas, os resultados experimentais e a análise estatística demonstraram que a interação entre as duas chapas influencia o comportamento mecânico da ligação e a forma de ruptura.

Quatro tipos de modo de falha foram observados experimentalmente, a saber, ruptura do parafuso por cisalhamento, esmagamento da chapa 1, inclinação excessiva do parafuso e esmagamento da chapa 2. Sendo que, as equações utilizadas pela NBR 14762:2010 não preveem este último tipo de ruptura da ligação.

A comparação da força resistente obtida nos resultados experimentais com os valores calculados pela NBR 14762:2010, de fato, indica que o modelo de cálculo não é adequado para prever a capacidade portante das ligações com parafusos autoperfurantes.

## 5 Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelos pelo apoio para desenvolvimento do trabalho.

## 6 Referências bibliográficas

ABNT NBR 14762. Associação Brasileira de Normas Técnicas - **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**, seção 10.5. Rio de Janeiro. 2010.

AISI S100, A. I. A. S. I. AISI s100: **North American specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members**, section J4. Washington. 2016.

ASTM E8 / E8M-15a, **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015

AS/NZS, A. Z. S. AS/NZS 4600: **Cold-formed steel structures**, section 5.4. [S.I.]. 2005.

BS, B. S. BS 5950-5: **Structural use of steelwork in building - Part 5**. Code of practice for design of cold formed thin gauge sections, Annex A. [S.I.]. 1998.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P.P.D.; ARAÚJO, E.L.G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **BNDES Setorial**, v. 41, p. 181-236, 2015.

CORNER, S. M. W. **Screw-Fastened Cold-Formed Steel-to-Steel Shear Connection Behavior and Models**. 2014. 66 f. Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering)– Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2014.

DAUDET, R. L.; LABOUBE, R. A. **Shear Behavior of Self Drilling Screws Used in Low Ductility Steel**. International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 1996.

DRAGANIC, H.; DOKSANOVIC, T.; MARKULAK, D. Investigation of bearing failure in steel single bolt lap connections. **Journal of Constructional Steel Research**, 2014.

DUBINA, D.; UNGUREAMU, V.; LANDOLFO, R. **Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-3: Design of Cold-formed Steel Structures** (Section 7-Connections). [S.l.]: Ernst & Sohn, 2012.

EN, E. S. EN 1993-1-3, **Eurocode 3 - Design of steel structures - part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheting**, section 8.3. [S.l.]. 2006.

MOEN, C. D., PADILLA-LLANO, D. A., CORNER, S., & DING, C. TOWARDS Load-Deformation Models for Screw-Fastened Cold-Formed Steel-to-Steel Shear Connections. **Internacional Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures**. 2014.

MOSQUEIRA, G. A. H. **Análise experimental do comportamento de ligações entre chapas finas de aço com emprego de parafusos auto-atarraxantes**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro. 2016.

PEROK, T. **Design of Cold-formed Steel Screw Connections**, St. Louis, 1990.

REZENDE, P.G., MALITE, M. MUNAIAR NETO, J. Análise numérica de ligações parafusadas em chapas final e em perfis formados a frio. **Seminário de Ciências Exatas e tecnológicas**. v. 27, n.1 , p. 23-37, 2006.

SOLIMAN, M. S. A. D.; ABU-SENA, A. B. B.; DARWISH, E. E. H.; SALEH, M. S. R. Resistance of cold-formed steel sections to combined bending and web crippling. **AinShams Engineering Journal**, v. 4, n. 3, p. 435-453, 2013.