

AVALIAÇÃO DO EFEITO *CURLING* EM LIGAÇÕES APARAFUSADAS EM AÇO INOXIDÁVEL SUBMETIDA A ESFORÇO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Evaluation of the curling effect in stainless steel bolted joints subjected to uniaxial tension

Kelvin de Paula Sobrinho (1)(P); Monique Cordeiro Rodrigues (2); André TENCHINI da Silva (3); Pedro Colmar Gonçalves da Silva VELLASCO (3); Luciano Rodrigues ORNELAS de Lima (3); José Alexandre Gouveia Henriques (4).

- (1) Aluno Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
(2) Dra. Profa, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
(3) Dr. Prof, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
(4) Dr. Prof., Universidade Hasselt, Hasselt, Limburgo - Bélgica.
Email para Correspondência: moniquecordeirorodrigues@gmail.com; (P) Apresentador

Resumo: Pesquisas para avaliação do uso de aço inoxidável em estruturas vem sendo desenvolvidas com mais frequência nos últimos anos. Tal fato está associado as excelentes propriedades que esse tipo de material pode proporcionar quando comparadas com o aço carbono, tais como: elevada resistência a corrosão, durabilidade, resistência ao fogo, e ao seu grande valor estético. Outro fator que influencia o aumento de pesquisas nessa área está relacionado as normas e códigos vigentes, que são ainda baseadas em pressupostos associados ao aço carbono, sem considerar os ganhos de resistência devido a elevada capacidade de deformação do aço inoxidável. Desta forma, esse artigo tem como objetivo principal avaliar o desempenho estrutural e a influência do efeito *curling* na resistência última de ligações aparafusadas em aço inoxidável submetidas a esforço de tração uniaxial. Para tanto, serão analisadas placas finas com ligações com um e dois planos de corte, com e sem a presença do efeito *curling*, conectadas por um parafuso. Também serão avaliadas ligações com placas finas enrijecidas, com o objetivo de verificar a capacidade do enrijecedor em minimizar a influência do efeito *curling*. O trabalho será baseado em resultados obtidos em ensaios experimentais e modelos numéricos desenvolvidos no programa de elementos finitos ABAQUS, por meio de elementos sólidos. Esses valores serão comparados com os valores de resistência última e modos de falhas encontrados pelas normas vigentes que possuem considerações sobre o aço inoxidável, sendo elas: Eurocode 3 - parte 1.4 e Australian/New Zealand Standard 4673. Ainda para embasamento teórico serão comparados os valores obtidos na literatura por outros autores. Pretende-se assim, conseguir analisar a influência do efeito *curling* na resistência última das ligações e formas de minimizar sua ocorrência.



Palavras chaves: ligações; aparafusadas; aço inoxidável; análise; numérica.

Abstract: Stainless steel structures Investigations have been developed more frequently in recent years due to their advantages in terms of material properties when compared to carbon steel, such as high corrosion resistance, durability, fire resistance, and its great aesthetic value. Another factor that contributes for the novel studies in this area is related to the fact that the stainless steel design standards are still based on carbon steel analogies, without considering the resistance gains due to their high deformation capacity. The present paper main objective was to evaluate the curling effect influence over the ultimate strength of stainless steel bolted joints under tension. This was accomplished by focusing on joints with thin plates and a single bolt with one and two shear planes, that could be subjected to curling effects. Plate configurations with stiffened plates were also investigated to evaluate if the curling effect could be avoided in these cases. This was made with the aid of experiments and numerical models developed in the finite element program ABAQUS using solid elements. These results were also compared with the predictions of the joints load carrying capacity and associated failure modes made by the current stainless steel standards such as Eurocode 3 - part 1.4 and Australian / New Zealand Standard 4673. The results were also compared to more advanced and updated recommendations found in literature. The main aim of the present paper is to understand the influence of the curling effect over the joints load carrying capacity while determining design strategies to minimise their occurrence.

Keywords: *joints; bolted; stainless steel; analysis; numerical.*

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais motivos que levaram ao tardio uso de ferro no Brasil (e conseqüentemente do aço) foram as altas temperaturas, necessárias para sua fabricação, e que encareciam seu processo de fabricação, dificultando tanto sua popularização quanto a comercialização (Ferraz, 2003). Hoje por outro lado, o aço estrutural é um dos materiais primordiais da construção civil. A sua composição é formada basicamente por ferro e carbono, contendo também algumas impurezas como enxofre e fósforo, devido ao seu processo de fabricação. Outros elementos como níquel, cromo e molibdênio são adicionados para modificar suas propriedades, tais como resistência, ductilidade e dureza. Sendo assim, sua classificação se dá basicamente devido a percentagem de carbono, composição química, constituição micro estrutural e aplicação (Soares, 2017).

As pesquisas para fins estruturais com a aplicação do aço inoxidável têm aumentado nos últimos anos. O aço inoxidável é um aço cuja composição apresenta cromo e níquel, podendo conter também, molibdênio, ferro e outros elementos. O aço inoxidável deve conter pelo menos 10,5% de cromo, sendo sua composição variada de acordo com sua classificação. De forma geral, esse aço é dividido em quatro grupos: austenítico, ferrítico, duplex, e martensítico (Duarte, 2017).

O aço inoxidável já é muito utilizado em situações especiais e apesar de seu alto custo inicial, pode proporcionar diversas vantagens em relação ao aço comum, podendo-se citar: resistência a corrosão, melhor comportamento a altas temperaturas, maior capacidade de reaproveitamento, ductilidade e resistência ao impacto. Outra vantagem está relacionada ao custo de manutenção, reduzido quando comparado ao aço carbono, o que reduz seu investimento quando considerado o ciclo de vida de sua utilização. A Figura 1 demonstra algumas aplicações do aço inoxidável no mundo.



(a) Estação de trem *Gent Saint Pieters*
Belgium



(b) Ponte Helix
Singapura

Figura 1. Obras em aço inoxidável.

Fonte: (a) (Patrick Lints, s.d. apud Baddoo, 2009); (b) (Insider.pro, 2016)

1.1 Ligações aparafusadas

Hoje os tipos de ligações mais empregadas são dos tipos soldadas e aparafusadas. A ligação exerce um papel muito importante em qualquer estrutura, pois tem como função

principal transmitir os esforços entre os elementos estruturais. Pode-se apontar como desvantagens de uma ligação aparafusada: diminuição da seção transversal do elemento devido a furação que conseqüentemente diminui a resistência do elemento e modifica o seu comportamento quando sujeito a solicitações; necessidade de controle de qualidade, de forma a evitar possíveis erros de montagem por furação descasadas. Freire (2016) indica que para o caso de ligações soldadas pode-se citar como desvantagens a questão relacionada ao aumento de custo de execução devido a uma demanda de tempo maior na montagem, mão de obra especializada e controle de qualidade que deve ser realizado em campo para garantir a eficiência da solda.

Nesse artigo é avaliado o comportamento de ligações aparafusadas sujeito a tração uniaxial. Os modos de falhas mais comuns desse tipo de ligação são apresentados na Figura 2.

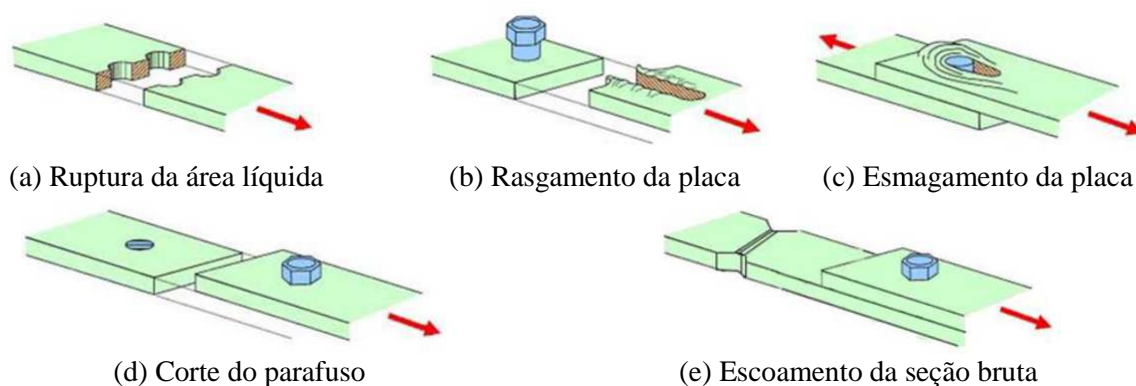


Figura 2. Modos de falhas de ligações aparafusadas sob tração

Fonte: (Santos, 2014 apud Batista, 2018)

Associado ao modo de falha esmagamento da placa, Figura 2 (c), em ligações com placas finas podem ocorrer o efeito *curling* que é devido a uma deformação na região de extremidade da ligação. Como essa parte da placa se encontra fixa em uma extremidade pela cabeça do parafuso ou pela porca, e no outro extremo livre, ocorre a deformação para fora do plano (Salih, Gardner & Nethercot, 2011), nomeada como efeito *curling*. Tal fenômeno possui maior relevância em ligações com distância elevada entre o bordo do furo e a extremidade da placa no sentido de aplicação do carregamento. Em materiais com grande capacidade de deformação, como o aço inoxidável, esse efeito é ainda maior. A Figura 3 apresenta uma ligação que ocorre o efeito *curling*.

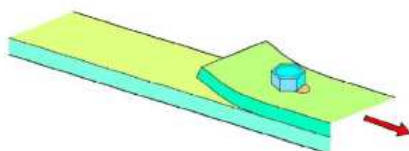


Figura 3. Efeito *curling*.

Fonte: (Batista, 2018)

1.2 Objetivo

O presente artigo tem como objetivo principal apresentar os resultados encontrados por meio de uma análise numérica. Os modelos numéricos desenvolvidos são calibrados usando os resultados de ensaios experimentais de ligações aparafusadas com placas de aço inoxidável, do tipo austenítico A304 e ferrítico 430. Será avaliada a influência do efeito *curling* na resistência última da ligação, para modelos com modo de falha de esmagamento da placa. Os resultados das análises são comparados com os valores encontrados pelas normas vigentes de aço inoxidável, para o mesmo modo de falha, e conclusões encontradas por outros autores na literatura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção são apresentadas as prescrições das normas vigentes de aço inoxidável: Eurocode 3, Parte 1.4 (2006), AS/NZS 4673 (2001) e ASCE 8-02 (2002). São também descritos os resultados obtidos por outros autores sobre o assunto, sendo apresentadas as equações associadas a influência do efeito *curling* em ligações aparafusadas.

2.1 Eurocode 3, Parte 1.4 (2006)

O código europeu trata de regras suplementares sobre aço inoxidável. Para projetos de ligações aparafusadas, o código diz que as provisões dadas pelo Eurocode 3, Parte 1.8 (2010) também são aplicadas ao aço inoxidável, e que se tratando de ligações aparafusadas é necessário fazer basicamente duas modificações, uma estando relacionada a resistência da ligação quanto ao esmagamento da placa, devendo-se substituir a tensão última do material (f_u) por $f_{u,red}$, dado pela Eq. (1), onde f_y é tensão de escoamento do aço inoxidável; a outra está associada ao cisalhamento.

$$f_{u,red} = 0.5 \cdot f_y + 0.6 \cdot f_u \leq f_u \quad (1)$$

O Eurocode 3, Parte 1.8 (2006) fornece duas equações para o modo de falha esmagamento da placa ($F_{b,Rd}$), uma para ligações com cisalhamento simples e um único parafuso, dado pela Eq. (2), onde d é o diâmetro do parafuso; t a espessura da placa; e γ_{M2} é o coeficiente de redução devido à resistência da seção transversal sob tensão de fratura, igual a 1,25.

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 \cdot f_{u,red} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (2)$$

Para os demais arranjos utiliza-se a Eq. (3), onde α_b é o menor valor entre $[\alpha_d; f_{ub}/f_u; 1,0]$, sendo na direção de aplicação da carga $\alpha_d = e_1/(3d_0)$ para parafuso de extremidade, e $\alpha_d = p_1/(3d_0) - 1/4$ para parafusos intermediários. Já na direção perpendicular ao carregamento, para parafusos de extremidade k_1 é o menor valor entre $[2,8e_2/d_0 - 1,7; 1,4p_2/d_0 - 1,7; 2,5]$, e para parafusos intermediários o menor valor entre $[1,4 p_2/d_0 - 1,7; 2,5]$; d_0 é o diâmetro do furo da placa de ligação, e e_2 a distância entre o eixo do furo e a borda da placa no sentido perpendicular ao carregamento.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{u,red} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

2.2 AS/NZS 4673 (2001) e ASCE 8 (2002)

As equações da norma *American Society of Civil Engineers* (ASCE 8, 2002) são idênticas as da norma Australiana/ Neozelandesa (AS/NZS 4673, 2001). A capacidade da ligação quanto ao rasgamento da placa entre furo e borda é determinada pela Eq. (4), onde ϕ é o coeficiente de segurança, igual a 0,7; t a espessura da placa; “ e ” a distância medida na direção de aplicação de carga do eixo de um furo até a borda mais próxima, sendo essa um furo adjacente ou o final da parte conectada; e f_{ut} é a resistência última do material na direção transversal de aplicação da carga.

$$V_f = \phi \cdot t \cdot e \cdot f_{ut} \quad (4)$$

Já a resistência ao esmagamento é determinada pela Eq. (5), onde ϕ é o coeficiente de segurança, igual a 0,65, e V_b a capacidade nominal ao esmagamento, determinada pela Eq. (6), para ligações com parafuso sujeito a um plano de corte, ou Eq. (7), para o caso de dois planos de corte, onde d_f é o diâmetro do parafuso; e f_u a resistência última da ligação na direção de aplicação da força.

$$V_b^* = \phi \cdot V_b \quad (5)$$

$$V_b = 2,0 \cdot d_f \cdot t \cdot f_u \quad (6)$$

$$V_b = 2,75 \cdot d_f \cdot t \cdot f_u \quad (7)$$

2.3 Estudos realizados por outros autores

Salih, Gardner & Nethercot (2011) fizeram uma investigação em ligações aparafusadas de aço inoxidável, do tipo austenítico (classe 1.4306) e ferrítico (classe 1.4016), onde foi avaliado o comportamento de placas finas e espessas sujeitas ao modo de falha esmagamento da placa. Por meio de um estudo paramétrico realizado pelos autores foram propostas equações para determinar a capacidade da ligação sujeita ao modo de falha de esmagamento da placa.

Os autores analisaram ligações em placas finas de 2 mm, chegando no resultado apresentado na Figura 4, onde o modelo I é uma ligação com cisalhamento duplo com as placas de extremidades finas, controlando o dimensionamento com condições de contorno apropriadas para impedir o efeito *curling*; o modelo II é uma ligação com a mesma geometria do modelo I, porém com a presença do efeito *curling*; por último, o modelo III é uma ligação com cisalhamento simples com placas de mesma espessura.

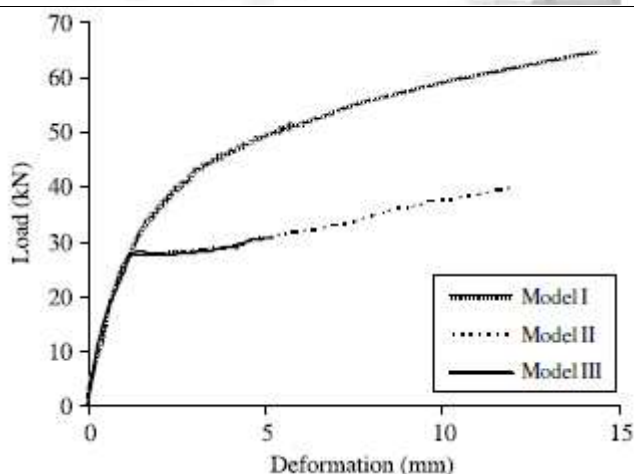


Figura 4. Comparação entre conexões com placas finas.

Fonte: (Salih, Gardner & Nethercot, 2011)

Com os resultados apresentados, os autores observaram que o efeito de flexão na placa induzida pela excentricidade de uma placa sob a outra, que ocorre apenas em ligação de placas finas com cisalhamento simples, não impede o modo de falha esmagamento da placa, tornando os modelos II e III equivalentes. Pode-se observar que devido à instabilidade nos modelos de ligações com cisalhamento simples e conseqüentemente a obtenção de soluções complexas para o estudo paramétrico o efeito das ligações com um plano de corte (modelo III) pode ser representada pelas ligações com dois planos de cortes (modelo II). Quando comparado ao modelo I, os autores concluíram que o efeito *curling* reduz consideravelmente a capacidade última da ligação.

Com os estudos realizados, foram propostas equações de dimensionamento. Para ligações com placas espessas e ligações com placas finas sujeita a cisalhamento duplo e a chapa central sendo a crítica, é utilizada a Eq. (8), onde α_1 é determinado pela Eq. (9).

$$N_{b,frac,prop} = \alpha_1 \cdot t \cdot d \cdot f_u \quad (8)$$

$$\alpha_1 = 2,5 \left(\frac{e_1}{3d_0} \right) \leq \begin{cases} 2,5 & \text{para } \frac{e_2}{d_0} > 1,5 \\ 2,0 & \text{para } \frac{e_2}{d_0} \leq 1,5 \end{cases} \quad (9)$$

Para ligações com dois planos de corte com placas finas de extremidade que controlam o dimensionamento e ligações com placas finas sob um plano de corte é utilizado a Eq. (10), onde α_3 é determinado pela Eq. (11).

$$N_{b,frac,prop,c} = \alpha_3 \cdot t \cdot d \cdot f_u \quad (10)$$

$$\alpha_3 = 1,6 \left(\frac{e_1}{2d_0} \right) \leq 1,6 \quad (11)$$

Para ligações em que é necessário controlar a deformação baseada em um estado limite de serviço utiliza-se a Eq. (12), onde α_2 é determinado pela Eq. (13).

$$N_{b,def,prop} = \alpha_2 \cdot t \cdot d \cdot f_u \quad (12)$$

$$\alpha_2 = 1,25 \left(\frac{e_1}{2d_0} \right) \leq 1,25 \quad (13)$$

Yancheng & Young (2014) estudaram ligações aparafusadas em aço inoxidável conformado a frio, onde foi avaliado o comportamento dessas ligações para três tipos de aço inoxidável: austenítico EN 1.4301, austenítico EN 1.4571 o *lean duplex* EN 1.4162. Foram realizados ensaios de caracterização para os diferentes aços estudados. As ligações possuíam um e dois planos de cortes, variando em cada um desses, cinco tipos de configuração: a primeira com apenas um parafuso; a segunda com uma linha de dois parafusos no sentido de aplicação da carga; a terceira uma linha com dois parafusos no sentido transversal de aplicação da força; a quarta com três parafusos, sendo um na primeira linha e dois na segunda, na direção transversal a carga; e por fim a quinta e última configuração são quatro parafusos simétricos em duas linhas. Os resultados obtidos nesse experimento foram comparados com os modos de falhas e a resistência nominal prevista pelas normas ASCE 8 (2002), AS/NZS 4673 (2001) e Eurocode 3, Parte 1.4 (2006) e Parte 1-8 (2010).

Para evitar o efeito *curling*, os autores utilizaram um enrijecedor na extremidade das placas, proveniente de um perfil tubular. Para tal foi utilizado uma altura de 1/5 da largura nominal das amostras, resultando em uma altura “h” do enrijecedor de 10 mm, e um comprimento do enrijecedor “L₂” igual à soma de 2e₁ (sendo e₁ a distância da borda da placa até o centro do primeiro furo na direção paralela ao carregamento) mais a distância p₁ (medida entre os eixos dos furos da direção paralela ao carregamento). Os autores verificaram que este efeito pode afetar o modo de falha das ligações, e o mesmo não representa o comportamento real de ligações com placas dobradas, tal como, perfis do tipo “C”.

A configuração das placas externas para as ligações com dois planos de cortes foi idêntica a das ligações com um plano de corte para uma mesma disposição de parafusos. Porém nesse tipo de ligação a placa interna que controlava o dimensionamento, uma vez que possuía a mesma espessura das externas.

No total, foram realizados 49 ensaios de ligações, sendo deste montante 15 repetições. Considerando-se que P_{Exp} representa a carga obtida no ensaio experimental, P_{ASCE} e P_{AS/NZS} as cargas previstas pelas normas Americana (ASCE) e Australiana/Nova Zelândia (AS/NZS) e P_{EC} a carga prevista pelo *Eurocode* (EC3), os seguintes resultados foram listados pelos autores:

1. O modo de falha previsto pelo código europeu para as ligações realizadas com cisalhamento simples e apenas um parafuso foi o esmagamento e para as normas ASCE e AS/NZS foi ruptura na seção líquida, sendo que no experimental aconteceu o esmagamento.



A relação entre a média das cargas P_{Exp}/P_{EC} para esse tipo de ligação foi de 1,94 para o austenítico, de 1,88 para o austenítico com menos titânio, e 1,58 para o *lean duplex*. Para outras normas essas relações foram inferiores. Considerando todos os arranjos das ligações realizadas com um plano de corte a média foi de 1,39 para o EC3 e de 1,56 para AS/NZS.

2. Para as ligações com cisalhamento duplo com um parafuso o modo de falha também foi o esmagamento, conforme previsto pelo EC3, porém a AS/NZS indicou a seção líquida como modo de falha. A relação P_{Exp}/P_{EC} foi de 1,28 para o austenítico, de 1,22 para o austenítico com menos titânio, e 1,38 para o *lean duplex*, sendo superiores para o caso do AS/NZS, exceto para o *lean duplex*. E para todos os ensaios com dois planos de corte de 1,13 para o EC3 e 1,38 para AS/NZS.

3. O modo de falha para todos os tipos de ligações realizadas em sua maior parte seguiram o prescrito pelo código europeu. As normas Americana e Australiana/Nova Zelândia foram capaz de prever uma pequena fração do total de ensaios realizados.

Com os resultados apresentados, Yancheng & Young (2014) concluíram que para os dois tipos de ligações as três normas apresentaram valores mais conservadores, sendo que para as ligações com apenas um plano de corte, esses valores se demonstraram ainda maiores. Das três normas, as formulações do código europeu apresentaram valores mais próximos aos obtidos nos ensaios experimentais. Mesmo acontecendo para a definição dos modos de falha. Apesar do Eurocode ter sido mais preciso, os valores fornecidos pela equação da norma Australiana/Nova Zelândia para ligações com um parafuso e um plano de corte, mesmo para um modo de falha errado, foi mais próximo ao obtido no ensaio experimental.

3 MODELO NUMÉRICO

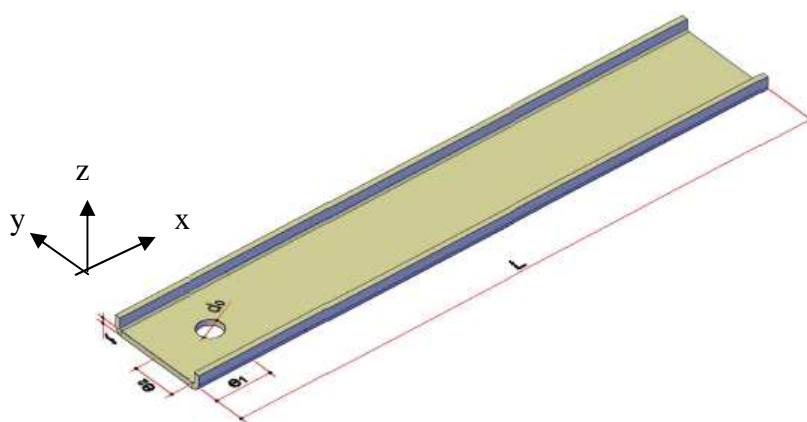
Os modelos foram realizados no programa de elementos finitos Abaqus 6.14 (2015), por meio de uma análise estática com não linearidade. Empregou-se elementos sólidos do tipo C3D8. No programa foi inserido o contato do tipo *surface-to-surface* entre cada elemento que compõe a ligação: corpo do parafuso e furo da placa; e entre as superfícies da arruela, cabeça do parafuso e placa de aço inoxidável. Foram considerados parafusos sextavados com porca e arruela em ambos os lados. O atrito considerado foi de 0,25 para todos os modelos.

As características dos modelos estudados são apresentadas na Tabela 1, onde cada modelo é identificado por um código composto por quatro parcelas, e todos possuem largura de 50 mm. A primeira, “Exx”, corresponde ao valor da variável e_1 do *Eurocode* (distância entre o eixo do furo e extremidade da placa no sentido do carregamento) em que “xx” valerá o valor dessa distância em milímetro. A segunda parcela “Y” é igual a “A” para as placas do tipo austenítico ou igual a “F” para as placas do tipo ferrítico. Na terceira “SE” significa placa “Sem Enrijecedor” ou “CE” para placa “Com Enrijecedor”, sendo a altura do enrijecedor de 1/5 da largura nominal. Por fim a última parcela do código representa se a ligação é com um plano de corte (1P) ou dois planos de cortes (2P). A ligação Exx-Y-SE-2P será analisada com uma condição suplementar para avaliar a influência do efeito *curling*, utilizando condição de contorno adequada para impedir esse fenômeno como foi proposto por Salih, Gardner & Nethercot (2011).

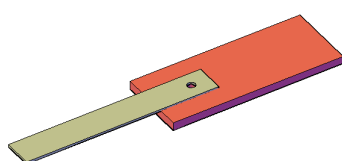
A configuração de cada grupo está descrita na Figura 5, onde a placa em cinza corresponde as em aço inoxidável e a em laranja, a placa base, em aço carbono.

Para definir as propriedades dos materiais utilizou-se a curva de caracterização do aço inoxidável austenítico e ferrítico, realizados por Batista (2018) em sua dissertação de mestrado. Os corpos de prova foram confeccionados por meio de uma máquina com corte por eletro-erosão a fio computadorizado, seguindo as especificações da ABNT NBR 6892-1 (2013). Os ensaios seguiram as descrições de Huang & Young (2014).

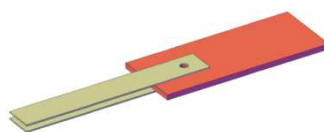
Tabela 1. Modelos estudados.



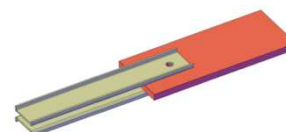
| Ligação | f_y (MPa) | f_u (MPa) | d_{parafuso} (mm) | t (mm) | d_0 (mm) | e_1 (mm) | e_2 (mm) |
|-------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| E22-A-SE-1P | 272,8 | 844,6 | 12 | 3,1 | 13 | 22 | 25 |
| E22-F-SE-1P | 274,5 | 468,0 | 12 | 3,1 | 13 | 22 | 25 |
| E32-A-SE-2P | 272,8 | 844,6 | 12 | 3,1 | 13 | 32 | 25 |
| E32-F-SE-2P | 274,5 | 468,0 | 12 | 3,1 | 13 | 32 | 25 |
| E32-A-CE-2P | 272,8 | 844,6 | 12 | 3,1 | 13 | 32 | 25 |
| E32-F-CE-2P | 274,5 | 468,0 | 12 | 3,1 | 13 | 32 | 25 |



(a) Exx-Y-SE-1P



(b) Exx-Y-SE-2P



(c) Exx-Y-CE-2P

Figura 5. Configuração dos modelos estudados.

Para calibração do modelo numérico foram utilizados os resultados experimentais realizados por Batista (2018), correspondentes aos modelos E22-A-SE-1P e E22-F-SE-1P. Um estudo de malha foi realizado para calibração dos modelos numéricos, onde a malha com tamanho de aproximadamente 3 mm em todo o elemento apresentou resultados satisfatórios quando comparados aos ensaios experimentais de Batista (2018). A Tabela 2 apresenta a comparação dos resultados obtidos, em relação à carga última e deslocamento axial, incluindo os resultados obtidos para a malha com elementos de 1 mm e de 3 mm, mostrando a proximidade dos resultados e o porquê da escolha da malha que gera menor custo computacional.

A Figura 6 apresenta a curva carga *versus* deslocamento comparando os resultados experimentais, numéricos e teóricos, sendo (a) para a ligação em aço austenítico e (b) para ferrítico, sendo Exp e Num as curvas experimental e numérica, respectivamente; EC, NZS e ASCE, e PROP, os valores obtidos pelo Eurocode, a norma americana e australiana/neozelandesa e a proposta por Salih, Gardner & Nethercot (2011), respectivamente. Observa-se a boa concordância entre os valores numéricos e experimentais, podendo-se considerar portanto que o modelo está calibrado. Em relação aos resultados teóricos, é possível verificar que para todos os casos foram inferiores aos obtidos numérica e experimentalmente.

Tabela 2. Comparação entre experimental e numérico.

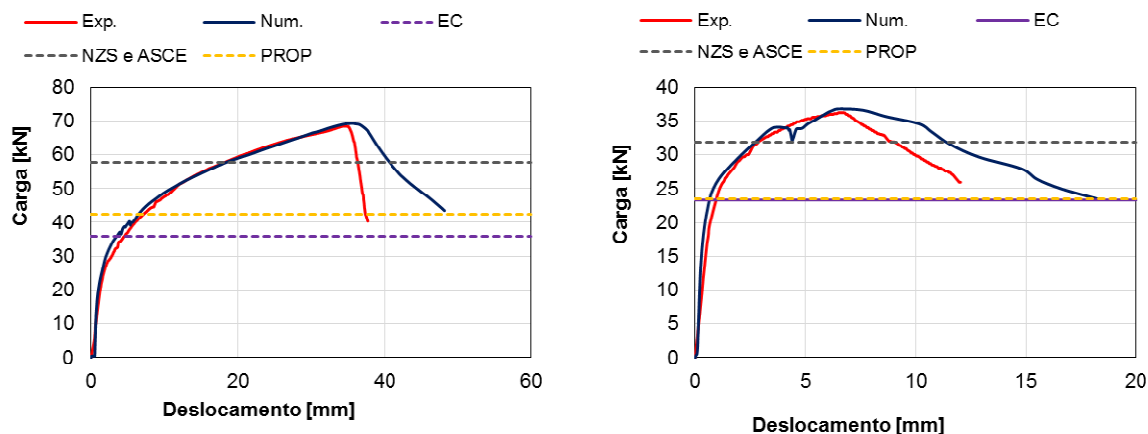
| Ensaio | N_{exp} (kN) | δ_{exp} (mm) | N_{num_1} (mm) | δ_{num_1} (mm) | $\frac{N_{exp}}{N_{num_1}}$ | $\frac{\delta_{exp}}{\delta_{num_1}}$ |
|-------------|-------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|--|
| E22-A-SE-1P | 68,47 | 34,75 | 68,55 | 35,51 | 1,00 | 0,98 |
| E22-F-SE-1P | 36,07 | 6,54 | 36,51 | 6,50 | 0,99 | 0,98 |

| Ensaio | N_{exp} (kN) | δ_{exp} (mm) | N_{num_3} (mm) | δ_{num_3} (mm) | $\frac{N_{exp}}{N_{num_3}}$ | $\frac{\delta_{exp}}{\delta_{num_3}}$ |
|-------------|-------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|--|
| E22-A-SE-1P | 68,47 | 34,75 | 69,28 | 35,58 | 0,99 | 0,98 |
| E22-F-SE-1P | 36,07 | 6,54 | 36,82 | 6,49 | 1,00 | 1,00 |

3.1 Análise paramétrico

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam as curvas carga *versus* deslocamento para os modelos em aço austenítico e ferrítico, sendo (a) referente ao deslocamento x e (b) o deslocamento z. Observa-se, para ambos os aços, que nos primeiros modelos (E32-A-SE-2P e E32-F-SE-2P) foi impedido o efeito *curling*. Os dimensionamentos apresentados correspondem ao valor de 32 mm para e_1 , sendo incluídos os modelos de 22 mm para fins de comparação, podendo-se verificar que os valores alcançados são inferiores ao modelo com maior e_1 , mas próximos às normas vigentes para as medidas maiores.

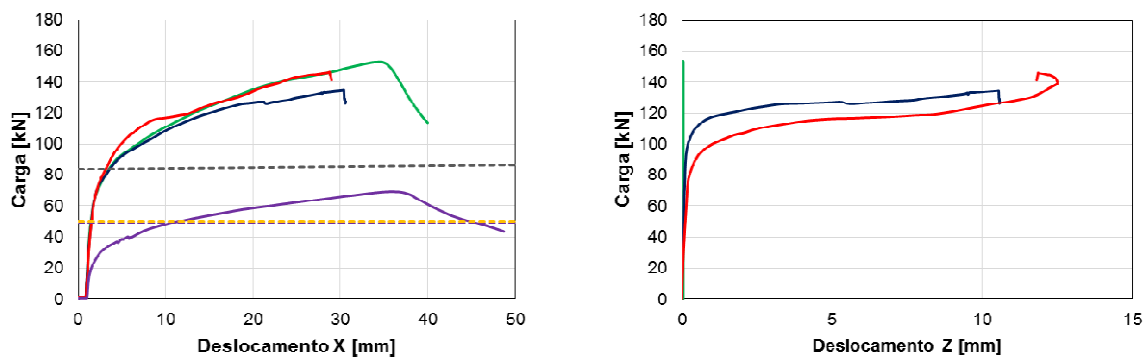
Destaca-se que foi desenvolvido um modelo referente a configuração E32-A/F-SE-2P, em que foi incluído a restrição do deslocamento na placa de aço inoxidável, de forma a impedir o efeito *curling*, conforme descrito por Salih, Gardner & Nethercot (2011). Pode-se observar que em termos de carga última, os modelos sem o efeito curling apresentaram valores ligeiramente maiores que os modelos em que o efeito *curling* não foi impedido de ocorrer.



a) Ligação E22-A-SE-1P

b) Ligação E22-F-SE-1P

Figura 6. Curva carga versus deslocamento axial.



(a) Carga versus deslocamento X

(b) Carga versus deslocamento Z

Figura 7. Carga versus deslocamento.

A Tabela 3 apresenta a comparação dos resultados numéricos da carga última (P_{num}) com os valores obtidos pelo Eurocode 3, Parte 1-4 (2006), P_{EC} , pela norma americana ASCE 8 (2002), P_{ASCE} , Australiana/Nova Zelândia AS/NZS 4673 (2001), P_{NZS} , e pela proposta por

Salih, Gardner & Nethercot (2011), P_{PROP} . Pode-se verificar que para o caso de um plano de corte, a norma americana e australiana/ neozelandesa são as que mais se aproximam dos valores numéricos; porém para o estudo de dois planos de corte, apesar de permanecerem mais próximos, diferenças superiores a 60%, ainda podem ser notadas sendo desta forma conservadores.

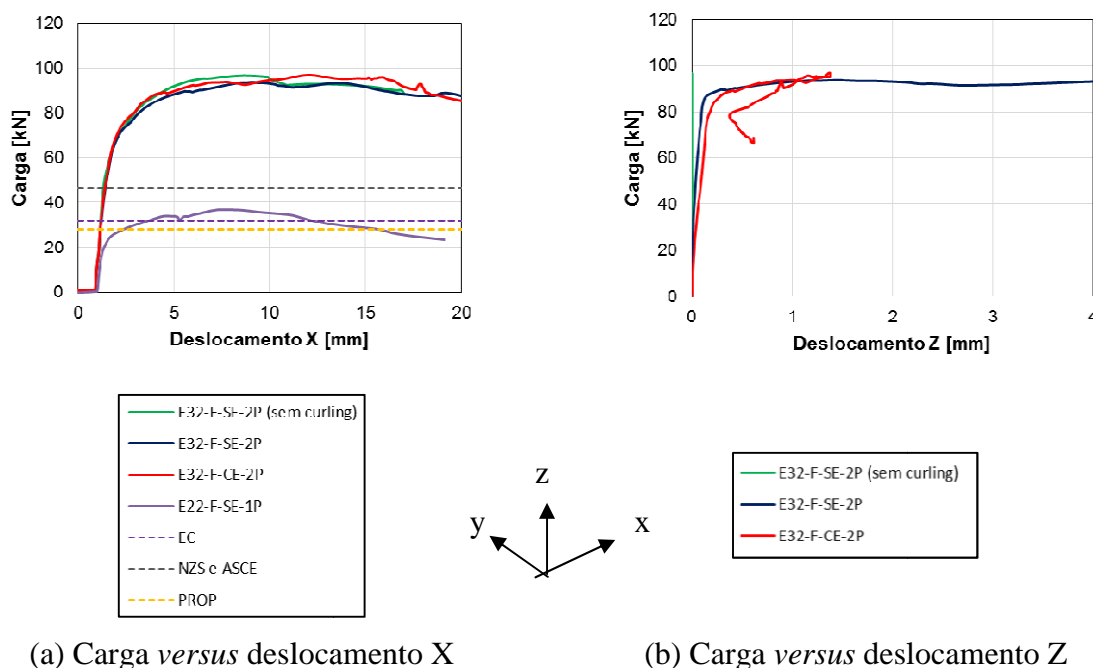


Figura 8. Carga versus deslocamento.

Tabela 3. Comparação entre numérico e analítico.

| Modelo | P_{num} / P_{EC} | P_{num} / P_{ASCE} ou P_{num} / P_{NZS} | P_{num} / P_{PROP} |
|-------------|--------------------|--|----------------------|
| E22-A-SE-1P | 1,93 | 1,20 | 1,63 |
| E22-F-SE-1P | 1,58 | 1,15 | 1,57 |
| E32-A-SE-2P | 2,74 | 1,61 | 2,68 |
| E32-F-SE-2P | 2,94 | 2,02 | 3,36 |
| E32-A-CE-2P | 2,98 | 1,75 | 2,91 |
| E32-F-CE-2P | 3,04 | 2,09 | 3,49 |

A Figura 9 mostra uma ligação com enrijecedor para o aço austenítico. Para as ligações com aço ferrítico não houve diferença significativa na carga última utilizando o enrijecedor ou

trabalhando com as condições de contorno para impedir esse fenômeno. Porém, para a ligação em aço austenítico a prevenção do efeito *curling* permitiu que cargas últimas superiores fossem atingidas.

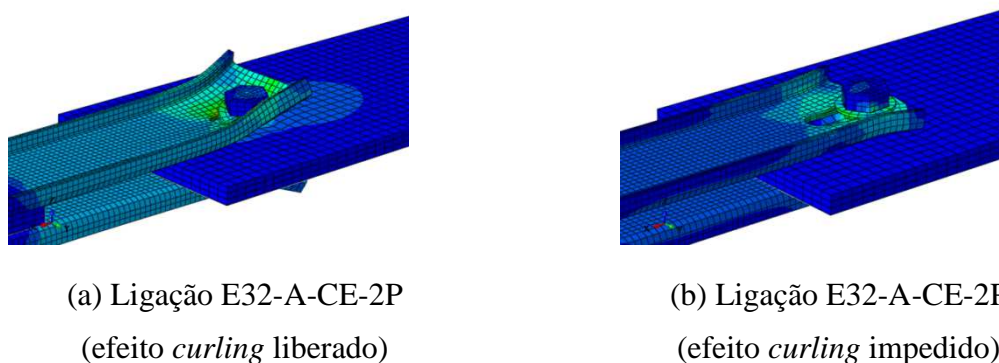


Figura 9. Deformada na ligação com enrijecedor

4 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que as normas vigentes sobre aço inoxidável são ainda conservadoras, em especial em ligações com apenas um parafuso, sendo as normas Americana e da Austrália/Nova Zelândia, que apresentam dimensionamentos semelhantes, e tiveram os melhores resultados considerando as equações para carga última com os modos de falha esmagamento e rasgamento da placa.

Quanto ao efeito *curling*, com os resultados obtidos para o aço inoxidável austenítico, observa-se que existe influência desse efeito na carga última da ligação, sendo de 11,8% quando comparado o valor da mesma ligação com e sem o efeito *curling*. Com a utilização do enrijecedor para minimizar esse efeito a diferença diminuiu para 8,1%, sendo de fato uma forma de reduzir o efeito *curling*, com menores impactos na carga última. Ainda pode-se verificar que a ligação em aço austenítico com enrijecedor apresentou uma maior deformação para fora do seu plano. Para a ligação em aço inoxidável austenítico, observou-se que o impedimento do efeito *curling* permitiu que cargas últimas maiores fossem atingidas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio da CAPES, CNPq e FAPERJ a este programa de pesquisa.

REFERÊNCIAS

Abaqus/CAE 6.14-5, 2015. *Theory Reference*. SIMULIA - Inc.

American Society Of Civil Engineers, 2002. SEI/ASCE-8-02: Specification for the design of cold-formed stainless steel structural. Reston.



Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT., 2013. *NBR 6892-1 - Materiais metálicos - Ensaio de tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*. ABNT.

Australian/New Zealand Standard, 2001. *AS/NZS 4673: Cold-formed stainless steel structures*. Sydney/Wellington, p. 130.

Baddoo, N., 2009, *Designing Structural Stainless Steel Members To Eurocode 3*. SCI Manager, Materials, explains the engineering techniques required to design stainless steel sections to Eurocode 3. Disponível em: <http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/NSC1704_features_EN.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2018.

Batista, G. C., 2018. *Estudo experimental e numérico de ligações aparafusadas de em aço inoxidável submetidas à tração*. Dissertação de mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro/Rio de Janeiro.

Duarte, H. P. C. S. G., 2017. *Avaliação de colunas tubulares quadradas em aço inoxidável*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

European Standard, 2006. Eurocode 3 - Design of steel structures: Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels. Brussels: European committee for standardization, p. 35.

European Standard, 2010. *Eurocode 3 - Design of steel structures: Part 1-8: Design of joints*. Brussels: European committee for standardization, p. 133.

Ferraz, H., 2003. *O Aço na Construção Civil*. Revista Eletrônica de Ciências. Disponível em: <<https://www.ft.unicamp.br/~mariaacm/ST114/O%20A%C7O%20NA%20CONSTRU%C7O%20C3O%20CIVIL.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2018.

Huang, Y., & Young, B., 2014. *The art of coupon tests*. Journal of Constructional Steel Research, v. 96, p. 159-175, mai. 2014. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.01.010>

Freire, Raphael, 2016. *Estudo experimental e numérico do comportamento de peças tracionadas em aço inoxidável*. Dissertação de mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro/Rio de Janeiro.

Insider.pro, 2016. *11 Pontes espetaculares*. Disponível em: <<https://pt.insider.pro/technologies/2016-05-07/11-pontes-espetaculares/>>. Acesso em 06 ago. 2018.

Salih, E. L., Gardner, L., & Nethercot, D. A., 2011. *Bearing failure in stainless steel bolted connections*. Engineering Structures, v. 33, p. 549-562, fev. 2011. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.013>.

Soares, M. V. C., 2017. *Comportamento Estrutural de Tubos Circulares de Aço Inoxidável submetidos a Compressão, Flexão e Flexo-Compressão*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Yancheng, C., Young, B., 2014. *Structural behavior of cold-formed stainless steel bolted connections*. Thin-Walled Structures, v. 83, p. 147-156, out. 2014. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.01.014>.