

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS TRACIONADOS EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO E DUPLEX

William M. Pereira^a, Luciano R. de Lima^a,
Pedro C. G. da S. Vellasco^a e José Guilherme S. da Silva^a

^a *Departamento de Estruturas e Fundações, Faculdade de Engenharia,
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, 20550-013, Rio de
Janeiro, RJ, Brasil*

Palavras-Chave: Aço Inoxidável Austenítico, Aço Inoxidável Duplex, Método dos Elementos Finitos, Análise Não-Linear

Resumo: Atualmente, a utilização do aço inoxidável em elementos estruturais ainda é considerada uma solução extravagante para os problemas da engenharia estrutural. Todavia, mudanças de atitudes dentro da construção civil e uma transição global para um desenvolvimento sustentável e redução em impactos ambientais tem seguramente provocado um aumento do uso do aço inoxidável. As normas de projeto de aço inoxidável são em grande parte baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas desenvolvidas com aço carbono. Com o objetivo de se avaliar a resistência a tração de elementos estruturais em aço inoxidável S304 e UNS2205, este trabalho apresenta um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos através do programa Ansys (versão 12). A não-linearidade do material foi considerada através do critério de plastificação de Von Mises e curvas tensão versus deformação verdadeira. A não-linearidade geométrica foi introduzida no modelo através da Formulação de Lagrange Atualizado. O modelo numérico foi calibrado com resultados experimentais obtidos em ensaios de laboratório produzindo resultados satisfatórios.

1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável é um elemento de resistência elevada a corrosão, durabilidade, resistência a chamas, facilidade de manutenção, etc., embora raramente seja utilizado em membros estruturais devido ao alto custo. Contudo, uma recente mudança de atitude dentro da construção civil e uma transição global para o desenvolvimento sustentável tem seguramente provocado um aumento na utilização do aço inoxidável conforme pode-se observar na Fig. 1. Nesta figura são apresentadas algumas passarelas de pedestres existentes. As normas de projetos atuais como o Eurocode 3, parte 1.4 (2003) são em grande parte baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas de aço carbono. Todavia, o aço inoxidável apresenta quatro curvas tensão *versus* deformação (tração e compressão, paralelas e perpendiculares a direção das fibras) sem patamar de escoamento e encruamento claramente definidos, modificando assim o comportamento global das estruturas que o utilizam.



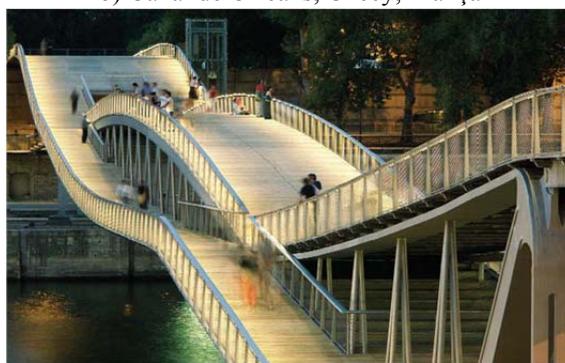
a) Arco di Malizia, Siena, Itália



b) Canal de Orleans, Chécy, França



c) Piove di Sacco, Pádua, Itália



d) Simone-de-Beauvoir, Paris, França

Figura 1: Passarelas e pontes em aço inoxidável

Um passo importante para aumentar a compreensão e o uso do aço inoxidável em sistemas estruturais foi o desenvolvimento e posterior publicação das normas de projeto, inclusive regulamentos europeus. Entretanto, tendo em vista que estas normas representaram uma primeira consideração sobre a utilização do aço inoxidável em elementos estruturais, um fator importante no desenvolvimento das mesmas foi assegurar que um projetista familiarizado com estruturas em aço carbono pudesse fazer uma transição direta para o projeto estrutural com o aço inoxidável. Em elementos estruturais submetidos a tensões normais de tração, a ruptura da seção líquida representa um dos estados limites últimos usualmente verificados. Com o objetivo de se avaliar a resistência a tração de elementos estruturais em aço inoxidável austenítico (A304) e Duplex (UNS 2205), este trabalho apresenta um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos através do programa Ansys (2009). Os modelos numéricos foram calibrados com resultados experimentais obtidos em ensaios de laboratório.

2 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Conforme citado anteriormente, este trabalho utiliza as normas européias para o dimensionamento de elementos constituídos de aço inoxidável (Eurocode 3, part 1.4, 2003). Em uma chapa com presença de furo, o colapso é caracterizado quando ocorre o escoamento da área bruta ou ruptura da área líquida. Na Fig. 2, apresenta-se o comportamento de chapas com furo sujeita a um esforço de tração devido a uma carga axial crescente.

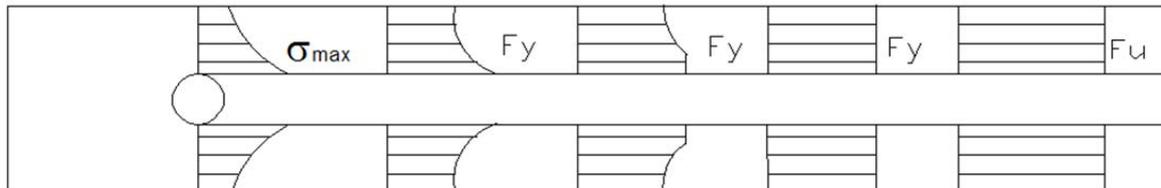


Figura 2 - Evolução de tensões normais – placa sujeita a carregamento axial

Com o furo, a área bruta diminui, provocando assim um escoamento precoce da seção da chapa, porém a carga que leva a estrutura a ruína será a mesma. Com a presença de mais furos na seção transversal, e estes com defasagem, dificulta-se a identificação da seção mais crítica da peça. A análise da ruptura das ligações em estruturas de aço foi primeiramente caracterizada por Crochrane (1922), que formulou uma expressão, Eq. (1), que adiciona um termo a largura líquida original para se obter a área da seção líquida final. Esta equação ainda está presente nas normas mais modernas de dimensionamento de estruturas de aço para avaliação dos possíveis caminhos da ruptura que uma chapa com furos possui.

$$b_n = b - d_b + \frac{s^2}{4g} \quad (1)$$

onde b é a largura da placa, d_b é o diâmetro do furo, s é o espaçamento horizontal entre parafusos e g é o espaçamento vertical entre parafusos.

A norma europeia Eurocode 3, part 1.4 (2003), estabelece as diretrizes para o dimensionamento de placas de aço submetidas a um esforço de tração constituídas de aço inoxidável. Para a ruína do elemento estrutural considera-se a menor força normal de tração obtida entre dois estados limites últimos: escoamento da seção bruta cuja resistência é dada pela Eq. (2), ou a ruptura da seção líquida, cuja resistência é expressa pela Eq. (3).

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2)$$

onde, $N_{pl,Rd}$ é o esforço normal resistente de tração, A_g é a área bruta da seção, f_y é a tensão de escoamento do material e γ_{M0} é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,00.

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r \times A_n \times f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3)$$

onde A_n é a área líquida da seção, f_u é a tensão última do material e k_r é dado pela Eq. (4) e γ_{M2} é o coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,25.

$$k_r = (1 + 3r(d_0 / u - 0,3)) \quad (4)$$

onde r é a razão entre o número de parafusos na seção considerada e o número total de parafusos na ligação, d_0 representa o diâmetro do furo, $u = 2.e_2$ mas $u \leq p_2$ onde e_2 representa a distância vertical da extremidade da placa até o centro do parafuso na direção perpendicular ao sentido de aplicação da carga, e p_2 representa o espaçamento, furo a furo, entre parafusos na direção perpendicular a direção de transferência de carga.

Para o dimensionamento de ligações submetidas a esforços de tração, consideram-se alguns critérios:

- a) em ligações aparafusadas, a largura dos furos deve ser considerada 2,0 mm maior que a dimensão nominal desses furos, perpendicular à direção da força aplicada;
- b) no caso de uma série de furos distribuídos transversalmente ao eixo da barra, em diagonal a esse eixo ou em ziguezague, a largura líquida dessa parte da barra deve ser calculada deduzindo-se da largura bruta a soma das larguras de todos os furos em cadeia, e somando-se para cada linha ligando dois furos, a quantidade $s^2/4g$;
- c) a largura líquida crítica daquela parte da barra será obtida pela cadeia de furos que produza a menor das larguras líquidas, para as diferentes possibilidades de linhas de ruptura;
- d) para cantoneiras, o gabarito g dos furos em abas opostas deve ser considerado igual à soma dos gabaritos, medidos a partir da aresta da cantoneira, subtraída de sua espessura;
- e) na determinação da área líquida de seção que compreenda soldas de tampão ou soldas de filete em furos, a área do metal da solda deve ser desprezada;
- f) não havendo furos $A_n = A_g$.

3 ENSAIO EXPERIMENTAL

A simulação de estruturas reais em modelos computacionais representa uma ligação importante com as análises experimentais, as deduções analíticas e a implementação de formulações numéricas no atual momento da modernidade para o estudo do comportamento estrutural. Uma análise numérica permite avaliar a resposta de uma determinada estrutura, de modo a objetivar a formulação implementada, a sua extensão para outros materiais e a aplicabilidade das condições de carregamento. Os métodos numéricos são capazes de transformar estruturas contínuas em sistemas discretos, com números finitos de graus de liberdade.

Entre os métodos numéricos, o mais conhecido é o método de elementos finitos (MEF) que prevê a divisão do domínio de integração em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos, interconectadas entre si através de um número discreto de pontos nodais. Atualmente, a modelagem por este método apresenta-se como uma ferramenta indispensável para a elaboração de projetos de engenharia, e para que haja uma aproximação dos resultados reais das estruturas, faz-se necessária a escolha ideal da quantidade e tipos de elementos finitos, de forma adequada para cada tipo de problema.

Segundo Chung e Ip (2000), a primeira modelagem numérica de ligação aparafusada utilizando elementos finitos tridimensionais foi realizada e apresentada em 1976 onde realizou-se uma análise linear elástica, simulando as condições de contato na ligação por meio da liberação ou restrição de determinados nós após cada passo de incremento de carregamento.

Em Kim and Kuwamura (2007) é apresentada uma modelagem de uma ligação aparafusada em aço inoxidável austenítico SUS304, no campo bidimensional e tridimensional, simulando elementos de contato. Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com resultados experimentais obtidos por Kuwamura e Isozaki (2002), ver Fig. 3.

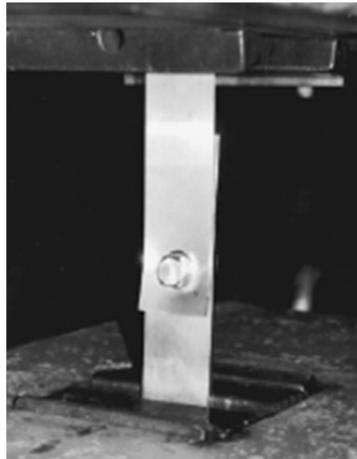


Figura 3 – Ensaio experimental, (Kuwamura, 2002)

Tendo em vista os bons resultados apresentados em Kim and Kuwamura (2007), no presente trabalho, foram realizadas simulações numéricas, fazendo uma análise não-linear geométrica e física, para reproduzir os modelos do autor de forma a calibrar a malha proposta para posterior comparação com os ensaios experimentais de Santos (2008). Foram utilizados elementos finitos tipo sólido, para simular as placas e o parafuso. Para simular o contato entre placa e parafuso, foram utilizados elementos finitos do tipo contato. As simulações numéricas foram realizadas no programa Ansys - versão 11 (2007), elaborado com base no Método dos Elementos Finitos.

O trabalho experimental realizado por Kuwamura e Isozaki (2002) considerou três diferentes configurações de furos, como ilustrado na Fig. 4, caracterizado por apenas um plano de corte, constituído de chapas de aço inoxidável austenítico SUS304, com 1,5 mm e 3 mm de espessura, utilizando parafusos com diâmetro de 12 mm (A2-50; SUS parafuso comum ou 10T-SUS, parafusos de alta resistência). As duas extremidades das amostras foram fixadas através de garras em uma máquina universal de ensaios - Amsler, através da qual uma força foi aplicada gradualmente na amostra do ensaio. Os resultados experimentais podem ser vistos na Tab. 1, com as respectivas dimensões para cada ensaio.

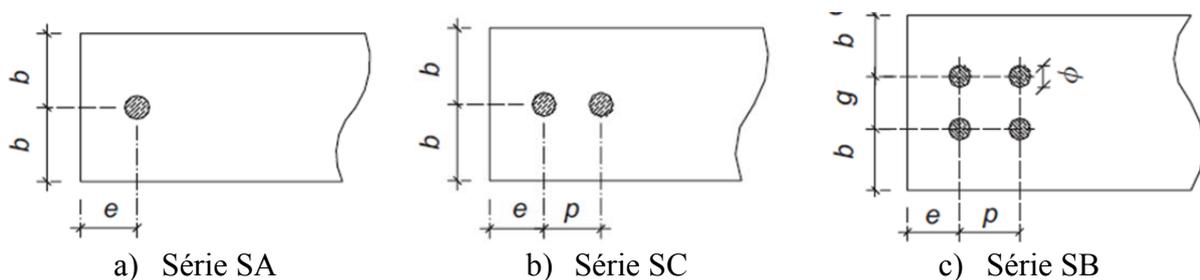


Figura 4 – Geometria das ligações, (Kim e Kuwamura, 2007)

A curva tensão *versus* deformação nominal utilizada nesta modelagem para os aços inoxidáveis A304 e UNS2205 estão ilustradas na Fig. 5 e na Fig. 6, respectivamente, junto com a curva tensão *versus* deformação verdadeira de acordo com a Eq. 5 e a Eq. 6. A Tab. 2 apresenta as propriedades mecânicas encontradas no ensaio de tração para caracterização da lei constitutiva do material.

$$\sigma_t = f_y(1 + \varepsilon_n) \quad (5)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_n) \quad (6)$$

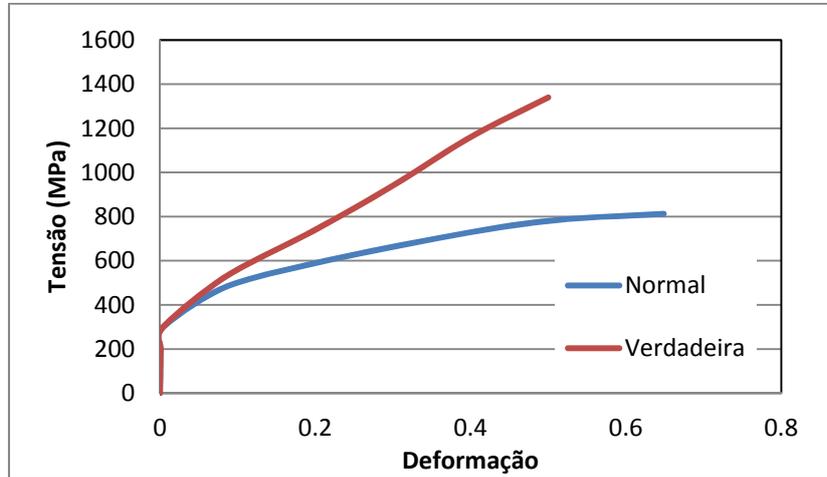


Figura 5 – Aço Inoxidável A304

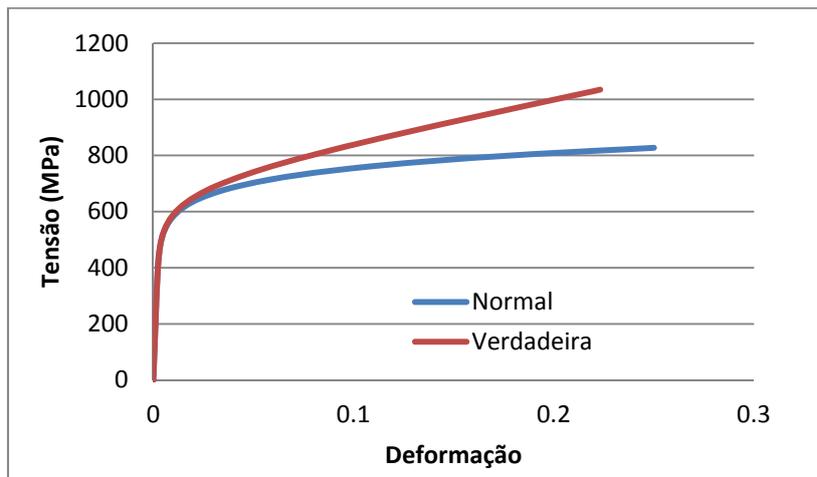


Figura 6 – Aço Inoxidável UNS2205

Tabela 1 – Dados geométricos e resultados experimentais

Série	Modelo	Espessura (mm)	e (mm)	b (mm)	g (mm)	p (mm)	Carga última (kN)
SA (1 furo)	SA1-1	1,5	12	25	-	-	12,28
	SA2-2	3,0	18	25	-	-	48,05
SB (2 furos)	SB1-4	1,5	60	25	-	30	43,34
	SB2-4	3,0	60	25	-	30	85,62
SC (3 furos)	SC1-4	1,5	60	55	30	30	79,53
	SC2-1	3,0	12	55	30	30	115,62
	SC2-3	3,0	30	55	30	30	162,34
	SC2-4	3,0	60	55	30	30	163,30

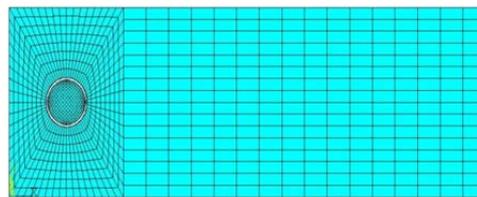
4 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo de elementos finitos utilizado neste artigo para avaliação de uma ligação cobrejunta aparafusada concebido no programa Ansys 11.0 (2007) foi constituído de elementos sólidos com oito nós (SOLID185 - Ansys Manual Reference) com três graus de liberdade por nó, nomeadamente, translações nas direções x, y e z. A malha utilizada foi escolhida de forma que os elementos tivessem uma proporção e tamanho de forma a evitar problemas numéricos (Kim & Kuwamura, 2007). A Figura 7 apresenta as malhas consideradas para caracterização do comportamento dessa ligação para um, dois e quatro furos, respectivamente (Silva, 2009).

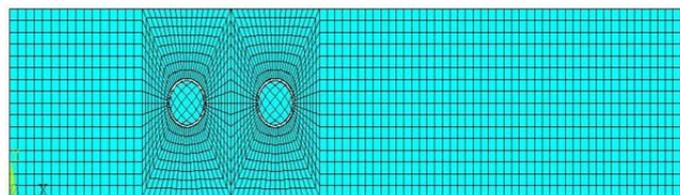
As propriedades do material utilizado para o aço inoxidável duplex UNS2205 e para o aço inoxidável austenítico A304 encontram-se apresentadas na Tab. 2. Para ambos os materiais, foram utilizadas curvas tensão *versus* deformação verdadeira para a análise numérica, como dito anteriormente.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas nominais

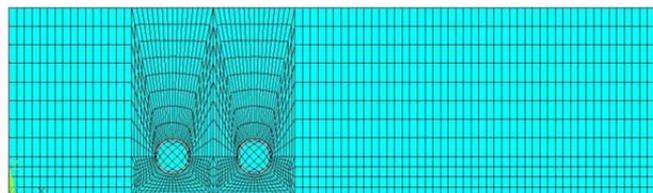
Material (aço inoxidável)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão última (MPa)
Austenítico A304	204	288,0	842,3
Duplex UNS2205	186	563,0	827,4



a) SA - 1 furo



b) SB - 2 furos



d) SC - 3 furos

Figura 7 – Malhas de elementos finitos utilizadas

Para as diversas geometrias utilizadas, efetuou-se uma análise não linear completa considerando a não linearidade geométrica e do material. A não linearidade do material foi considerada através do critério de plastificação de Von Mises e a não linearidade geométrica foi introduzida no modelo através da Formulação de Lagrange Atualizada. Este tipo de análise possibilita obter uma resposta global da ligação efetuando uma comparação coerente entre os

resultados obtidos através do Eurocode 3, part 1.4 (2003) e os numéricos em termos de estados limites últimos da ligação. O carregamento foi aplicado na forma de deslocamentos na extremidade da placa de aço inoxidável, na direção X. Os parafusos foram restringidos, na direção Y e Z, em suas extremidades.

Com respeito ao fenômeno do contato entre a borda interna do furo e o corpo do parafuso, utilizou-se o elemento de contato presente na biblioteca do Ansys (CONTACT173 e TARGET170) entre as superfícies de forma a evitar a penetração de um corpo no outro. Geralmente, não é possível definir a priori as zonas que sofrem contato devido às diferenças de estágios de carga e correspondentes deformações. A introdução do elemento de contato desenvolveu-se através de aplicação de um coeficiente de atrito (μ) entre as áreas de contato.

A escolha do coeficiente de atrito baseou-se em trabalhos anteriores e pela experiência desses com os resultados obtidos. Desta forma, adotou-se o valor do coeficiente de atrito igual a 0,25 e 0,05, para as superfícies de contato entre o fuste do parafuso e as placas e entre placas, respectivamente. A Fig. 8 apresenta a superfície de contato entre o furo e o parafuso.

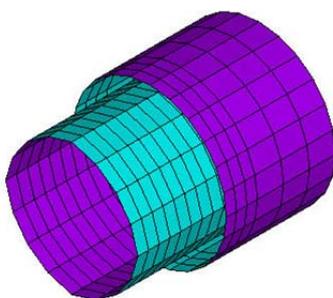


Figura 8 – Superfícies de contato utilizada no modelo

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Resultados Experimentais e Numéricos (Kim e Kuwamura, 2007)

Conforme citado anteriormente, Kim e Kuwamura (2007) realizaram ensaios experimentais e análises numéricas referentes aos modelos constituídos de aço inoxidável austenítico A304 apresentados na Fig. 4. Para o modelo SA2-2 com um furo, foram obtidos os valores de carga última experimental e numérica iguais a 48,05 kN e 44,85 kN, respectivamente. Para o modelo SB2-4 com dois furos, estes valores foram de 85,62 kN e 86,81 kN, respectivamente. E finalmente, para o modelo SC2-4 com quatro furos, foram obtidos os valores de 162,32 kN e 152,79 kN, respectivamente.

5.2. Resultados Numéricos

Os resultados numéricos obtidos através dos modelos desenvolvidos no presente trabalho são apresentados neste item e tiveram como base os ensaios experimentais apresentados anteriormente. Na Tab. 3 apresentam-se os valores de cargas últimas encontradas nos modelos numéricos SA2-2, SB2-4 e SC2-4, bem como os valores citados anteriormente obtidos por Kim e Kuwamura (2007). Pode-se observar nesta tabela que os resultados obtidos no presente trabalho encontram-se próximos aos obtidos experimentalmente. Todavia, para o modelo SC2-4, a diferença encontrada entre o valor experimental e o valor numérico foi da ordem de 12%. Isto deve-se ao fato de, neste modelo, ter ocorrido o fenômeno denominado *curling* caracterizado pelo surgimento de deslocamentos para fora do plano conforme apresentado na Fig. 12(c). Nesta tabela, apresentam-se também, os resultados obtidos para os modelos numéricos constituídos de aço inoxidável duplex UNS2205. Para estes modelos, verifica-se o

ganho de resistência, principalmente para os modelos com dois e quatro furos, respectivamente. Apresentam-se na Fig. 9, as curvas carga *versus* deslocamento para os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho com apenas um furo. Pode-se observar que em termos de carga última, tanto o modelo com aço inoxidável austenítico quanto o modelo com aço inoxidável duplex apresentaram valores semelhantes. Todavia, em termos de ductilidade, o aço inoxidável austenítico apresenta maior capacidade de deformação.

Tabela 3 – Cargas últimas – experimentais e numéricas (em kN)

Modelo	Kim and Kawamura (2007)		Este trabalho (numérico)	
	Experimental	Numérico	A304 (kN)	UNS2205 (kN)
SA (1 furo)	48,05	44,85	48,66	46,41
SB (2 furos)	85,62	86,81	84,32	89,22
SC (4 furos)	162,32	152,79	183,75	241,80

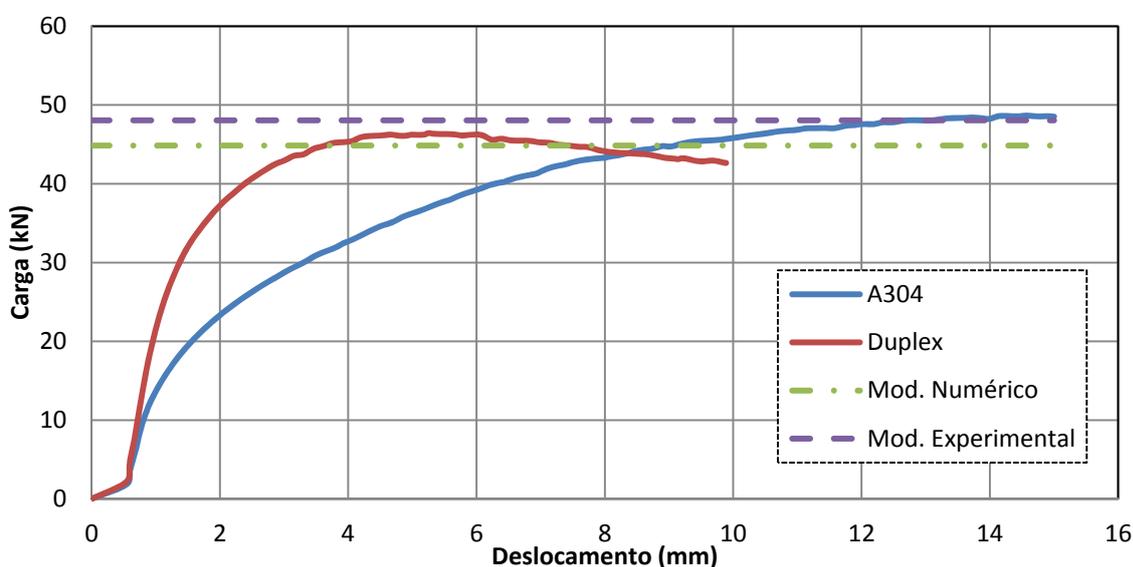


Figura 9 – Curvas carga *versus* deslocamento – modelos SA – um furo

Já na Fig. 10, são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento para os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho com apenas dois furos. Pode-se observar que em termos de carga última, o modelo com aço inoxidável austenítico apresentou valor inferior ao modelo com aço inoxidável duplex. E como no caso anterior, em termos de ductilidade, o aço inoxidável austenítico apresenta maior capacidade de deformação.

Finalmente na Fig. 11, são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento para os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho com apenas quatro furos. Pode-se observar que em termos de carga última, o modelo com aço inoxidável austenítico apresentou valor bastante inferior ao modelo com aço inoxidável duplex, algo em torno de 25%. E como no caso anterior, em termos de ductilidade, o aço inoxidável austenítico apresenta maior capacidade de deformação.

Nas Figs. 12 e 13, apresentam-se a distribuição de tensões de Von Mises para todos os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho, para os respectivos valores de carga última. Verificam-se níveis elevados de tensões entre a borda da placa e o furo para todos os modelos. Os modelos numéricos apresentaram critérios de ruína similares aos dos ensaios experimentais. No modelo SA2-2, a ruína ocorreu através do esmagamento da chapa, no

modelo SB2-4, ocorreu a ruína pela ruptura da área líquida e a ruína do modelo SC2-4 deu-se através do bloco de cisalhamento.

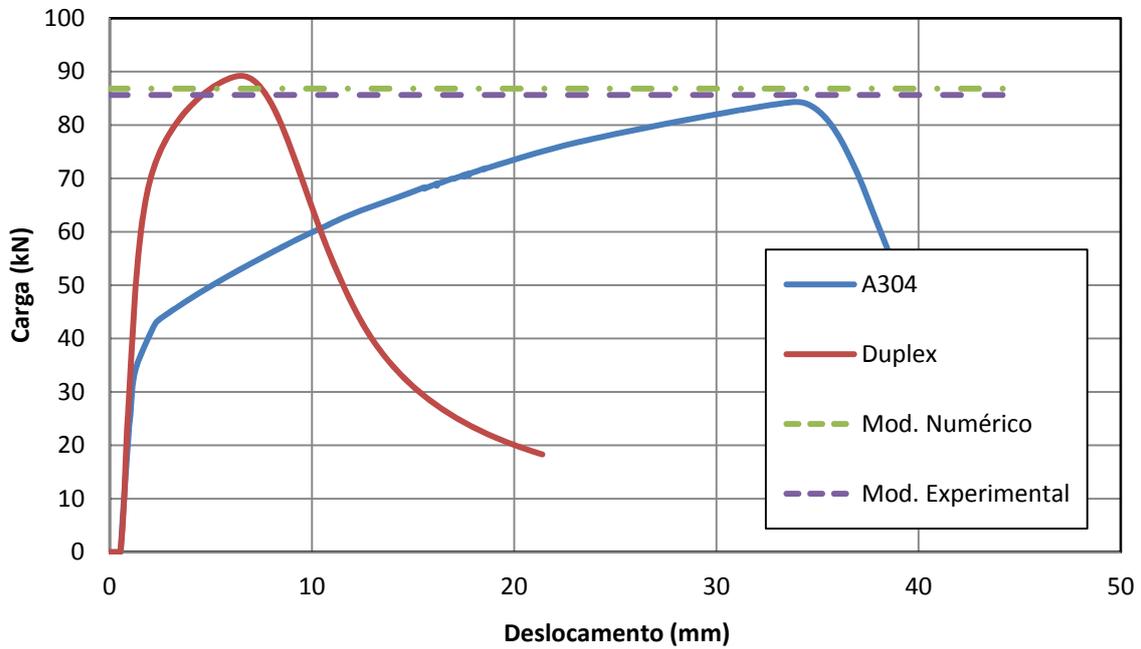


Figura 10 – Curvas carga *versus* deslocamento – modelos SB – dois furos

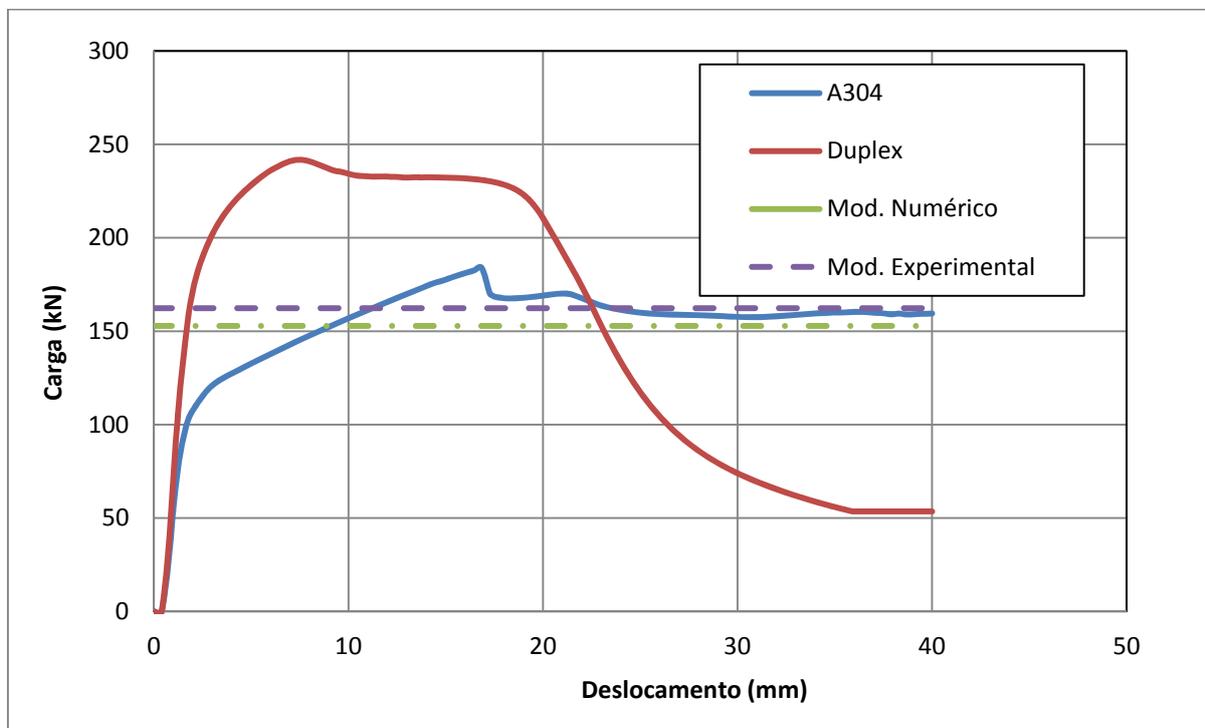
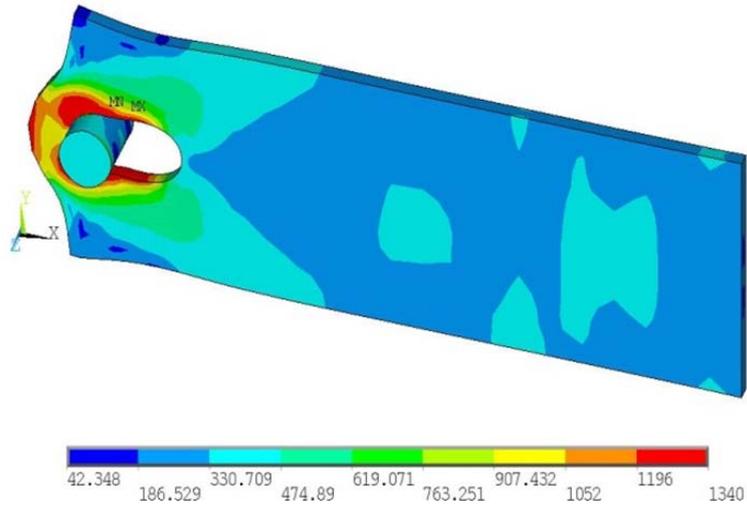
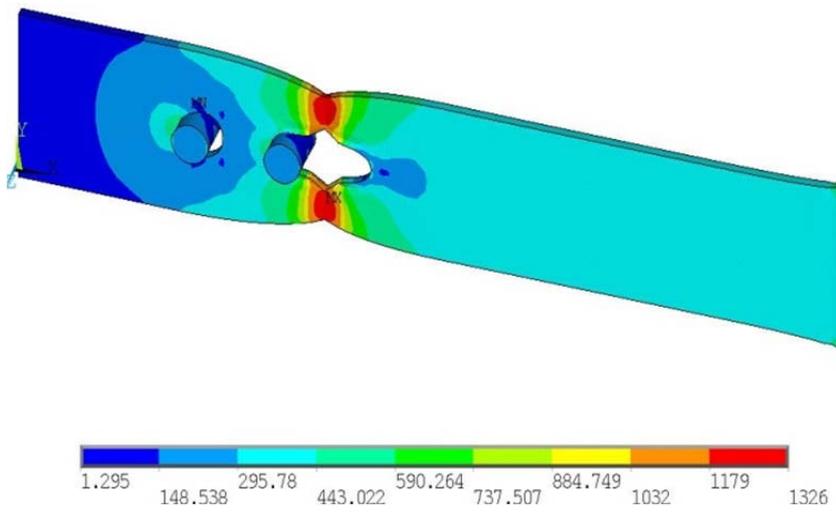


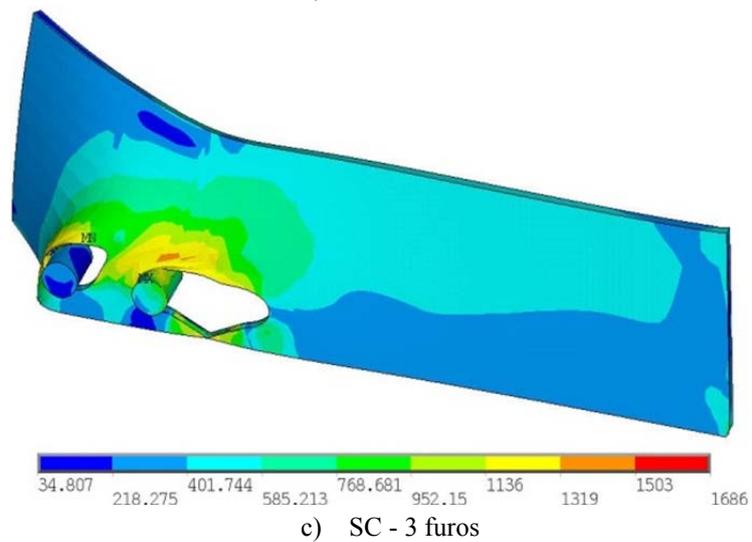
Figura 11 – Curvas carga *versus* deslocamento – modelos SC – quatro furos



a) SA - 1 furo

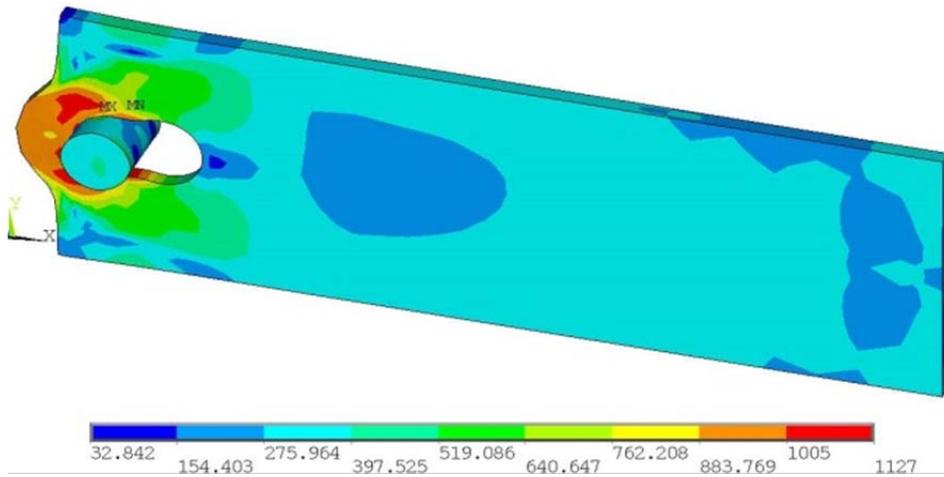


b) SB - 2 furos

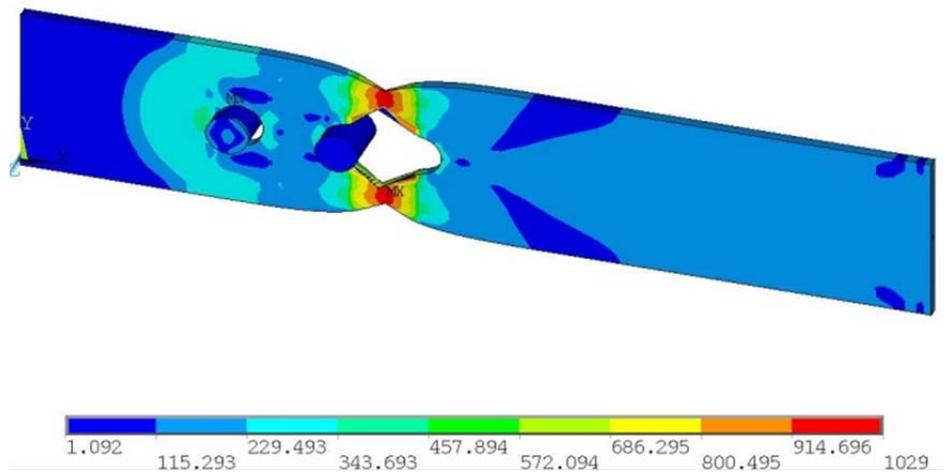


c) SC - 3 furos

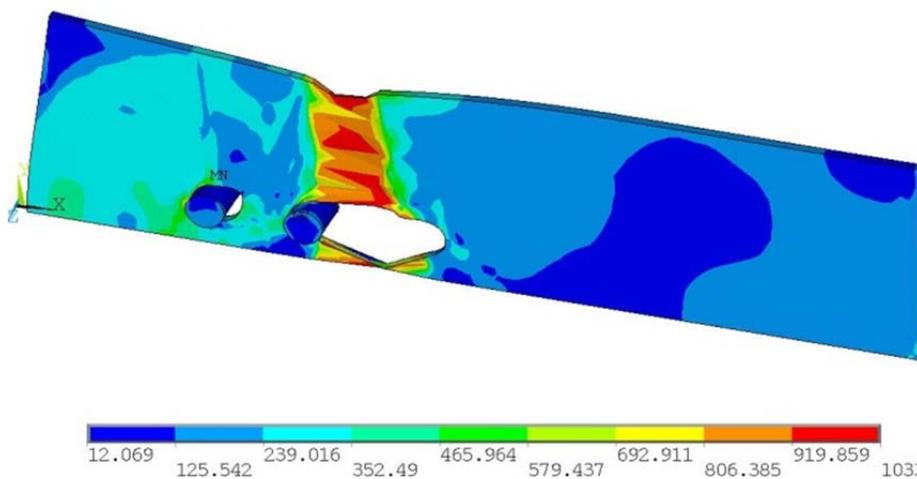
Figura 12- Distribuição de tensões de Von Mises - modelos aço inoxidável austenítico A304



a) SA - 1 furo



b) SB - 2 furos



c) SC - 3 furos

Figura 13- Distribuição de tensões de Von Mises - modelos aço inoxidável duplex UNS2205

5.3. Comparação Experimental *versus* Numérico e Numérico *versus* Numérico

Esta seção tem por objetivo comparar os resultados obtidos por Kim; Kuwamura (2007) em seu modelo numérico e com os valores obtidos por Kuwamura e Isozaki (2002), no modelo experimental, citados anteriormente. Esta comparação visa validar os modelos numéricos simulados para o aço inoxidável A304.

Conforme comentado anteriormente, é possível observar na Tabela 3 que os resultados obtidos nos modelos numéricos aproximam-se dos valores experimentais obtidos por Kuwamura e Isozaki (2002). Comparando-se os modelos numéricos, os modelos propostos apresentaram valores mais próximos aos experimentais que os obtidos por Kim; Kawamura (2007) nos modelos SA2-2 e SB2-4.

Com esta validação, a Tabela 3 também apresenta os valores obtidos nos modelos de aço inoxidável duplex UNS2205. Comparando-se os resultados do A304 e do UNS2205, nos modelos SB2-4 e SC2-4, o aço duplex apresenta uma carga última superior comparada aos modelos de aço austenítico. Observando-se as Figs. 9 a 11, é possível notar que os modelos gerados com aço inoxidável duplex atingem a carga última com deslocamentos menores que os de aço inoxidável austenítico.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo inicial apresentar um modelo numérico calibrado com resultado experimental obtido por Kawamura (2002) de resistência a tração de placas de aço inoxidável austenítico A304 com um, dois e quatro furos, respectivamente. Assim, foi desenvolvido um modelo numérico no programa Ansys 12.0 (2009) que se baseia no método dos elementos finitos. Foram levadas em consideração as não linearidades do material e de sua geometria através do critério de plastificação de Von Mises e da formulação de Lagrange Atualizado, respectivamente. Obtidos os resultados, o modelo foi calibrado com os resultados experimentais de Kawamura (2002) e os resultados numéricos de Kim e Kawamura (2007). Como visto nas tabelas e gráficos anteriores, os modelos numéricos apresentaram pequenas variações em relação aos resultados experimentais, podendo essas diferenças serem devidas a modelagem numérica do material adotada no modelo. No modelo numérico a lei constitutiva do material foi considerada com valores de deformações e tensões verdadeiras, ou seja, diferentes da lei constitutiva real do material obtida em um ensaio à tração.

O segundo objetivo deste trabalho foi, após a calibração do modelo, realizar uma comparação entre os valores de carga última de placas sujeitas a tração dos aços inoxidáveis A304 e UNS2205 em termos de resultados numéricos. Foi visto que o aço inoxidável duplex UNS2205 apresenta uma curva tensão *versus* deformação com valores de tensão de escoamento e tensão última com menor diferença do que o aço inoxidável austenítico A304. Os modelos de aço inoxidável duplex UNS2205 apresentaram uma carga última superior ou muito próxima aos modelos gerados com aço inoxidável austenítico A304. Porém, os modelos gerados com o aço inoxidável duplex chegaram a ruína com deformações muito inferiores comparando-se com os modelos gerados com o aço inoxidável austenítico. Isto deve-se ao fato de que, conforme apresentado na Figs. 5 e 6, o aço inoxidável duplex possui um comportamento menos dúctil do que o aço inoxidável austenítico.

Próximas etapas desta investigação irão considerar o desenvolvimento de mais testes em chapas aparafusadas em aço inoxidável submetidas à tração para ampliar o conjunto de dados experimentais que permitam a sua utilização em outras simulações numéricas. Com esses resultados em mãos, os autores preveem a apresentação de algumas alterações ao atual código de dimensionamento de placas de aço inoxidável sujeitas a tração criando regras visando à obtenção de soluções mais econômicas e mais seguras.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a UERJ, ao CNPq e a CAPES, pelo apoio financeiro. Agradecimentos também são devidos ao LABCIV - Laboratório de Computação da Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da UERJ pelo suporte computacional.

REFERÊNCIAS

- Ansys, Inc. Theory Reference (version 12.0), 2009.
- Bursi, O. and Jaspart, J. P., 1997. Calibration of a Finite Element Model for Isolated Bolted End-Plate Steel Connections *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 44, nº 3, pp. 225-262.
- Chung KF, Ip KH. Finite element modeling of bolted connections between cold-formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear. *Engineering Structures* 2001;22:1271–84.
- Cochrane, V. H., 1922, Rules for Rivet Hole Deduction in Tension Members, *Engineering News-Record*, vol. 80, November 16.
- Eurocode 3, ENV 1993-1-4, 2003: Design of steel structures – Part 1.4: General rules – Supplementary rules for stainless steel, CEN - European Committee for Standardisation 1996.
- Eurocode 3, prEN 1993-1.8, 2003. Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints (“final draft”), CEN - European Committee for Standardisation, Brussels.
- Kim, T. S. and Kuwamura, H. 2007. Finite element modeling of bolted connections in thin-walled stainless steel plates under static shear, *Thin-Walled Structures* 45, 407–421, Japan.
- Kuwamura H, Isozaki A. Ultimate behavior of fastener connections of thin stainless steel plates. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of Architectural Institute of Japan)* 2002;556:159–66 (in Japanese).
- Silva, A.T., Modelagem Numérica de Elementos Tracionados em Aço Inoxidável com Parafusos Defasados. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).