

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS EM AÇO INOXIDÁVEL

João de Jesus Santos

paraduc@click21.com.br

PGECIV – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UERJ

André Tenchini da Silva

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Sebastião Arthur Lopes de Andrade

andretsilva@gmail.com

lucianolima@uerj.br

vellasco@uerj.br

andrade@civ.puc-rio.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Faculdade de Engenharia, UERJ

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, UERJ

Resumo. Atualmente, a utilização do aço inoxidável em elementos estruturais ainda é por muitos engenheiros e arquitetos, 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 no uso do aço inoxidável. As normas de projeto de aço inoxidável atuais 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 não-lineares sem patamar de escoamento e região de encruamento claramente definidas (tração e compressão, paralela e perpendicular a direção de laminação), modificando assim, seu o comportamento global. Em elementos estruturais submetidos a tensões normais de tração, usualmente a ruptura da seção líquida representa um dos estados limites últimos a serem verificados. Com o objetivo de avaliar a resistência a tração de elementos estruturais aparafusados em aço inoxidável, este artigo apresenta um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos através do programa Ansys. As não-linearidades do material e geométrica foram consideradas através do critério de plastificação de Von Mises e da Formulação de Lagrange atualizada. A calibração destes modelos foi feita comparando seus resultados com ensaios pioneiros envolvendo comportamento de chapas aparafusadas de aço inox sob tração.

Palavras-Chave: Aço Inoxidável, Resistência a tração, Análise Não-Linear.

1. INTRODUÇÃO

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 na utilização do aço inoxidável conforme pode ser observado na Figura 1. As normas de projeto de aço inoxidável atuais (Eurocode 3, part 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 não-lineares (tração e compressão, paralela e perpendicular a direção de laminação) sem patamar de escoamento e região de encruamento claramente definidos (ver Figura 4), modificando assim, seu o comportamento global modificando assim, o comportamento global das estruturas que o utilizam.

Um passo importante para aumentar a compreensão e o uso do aço inoxidável em sistemas estruturas 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 aparafusados em aço inoxidável, este artigo apresenta um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos através do programa Ansys. Os resultados numéricos obtidos foram comparados com resultados experimentais em termos de curvas carga *versus* deformação e modos de ruína.



Figura 1 - Aeroporto Sá Ferreira, Porto, Portugal

2. CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Conforme citado anteriormente, este trabalho utiliza as normas europeias para o dimensionamento de elementos constituídos de aço carbono (Eurocode 3, part 1.8, 2003) e 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 Figura 2, apresenta-se o

comportamento de chapas com furo sujeita a um esforço de tração devido a uma carga axial crescente.

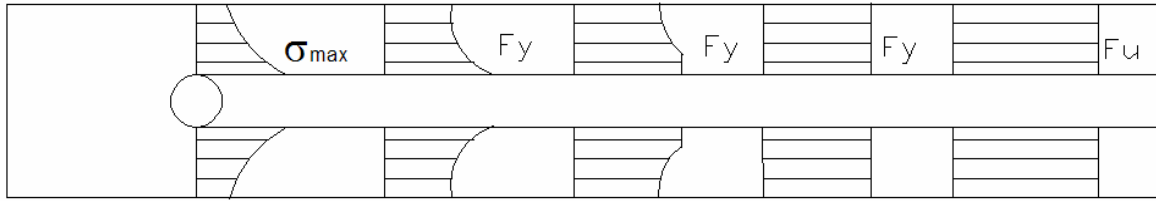


Figura 2 - Evolução de tensões normais – placa sujeita a carregamento axial

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 como mostra a Figura 3, dificulta-se a identificação da seção mais crítica da peça. A análise da ruptura das ligações em estruturas de aço foi primeiro 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 ainda estando presente nas normas mais modernas de dimensionamento de estruturas de aço para avaliação dos possíveis caminhos da ruptura que uma ligação aparafusada 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 da estrutura 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 força 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 1,10.

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

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 igual 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 da face 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 $s^2/4g$, sendo s e g , respectivamente, os espaçamentos longitudinal e transversal entre estes dois furos;
- 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. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Para efeitos de calibração do modelo numérico apresentado neste trabalho, este item apresenta os resultados experimentais de dois ensaios realizados, sendo um com a placa cobrejunta constituída de aço carbono MR250 denominado E3_CARB_50 e o outro com a placa produzida em aço inoxidável A304 denominado E5_INOX_50 (Santos, 2008). Esta ligação cobrejunta considera duas placas de aço carbono/inoxidável com 3 mm de espessura que servem para efetuar a ligação de duas placas de 15 mm de espessura espaçadas de 5 mm. Em ambos os casos, o espaçamento horizontal entre parafusos s é igual a 50 mm e o espaçamento vertical g é igual a 55 mm (ver Figura 3).

As curvas obtidas em ensaios de corpos-de-prova a tração para ambos os materiais estão apresentadas na Figura 4(a) onde pode-se observar um comportamento bastante diferente entre os dois materiais. A obtenção da tensão de escoamento para o aço inoxidável é feita através da reta correspondente a uma deformação de 0,2%, paralela ao trecho inicial, trecho este que não apresenta uma reta bem definida conforme pode ser observado na Figura 4 (b). Para o aço carbono, obteve-se uma tensão de escoamento da ordem de 386,8MPa e tensão de última de 478,7 MPa. Já para o aço inoxidável, os valores obtidos foram iguais a 350,6 MPa e 710,2 MPa, respectivamente (ver Figura 4).

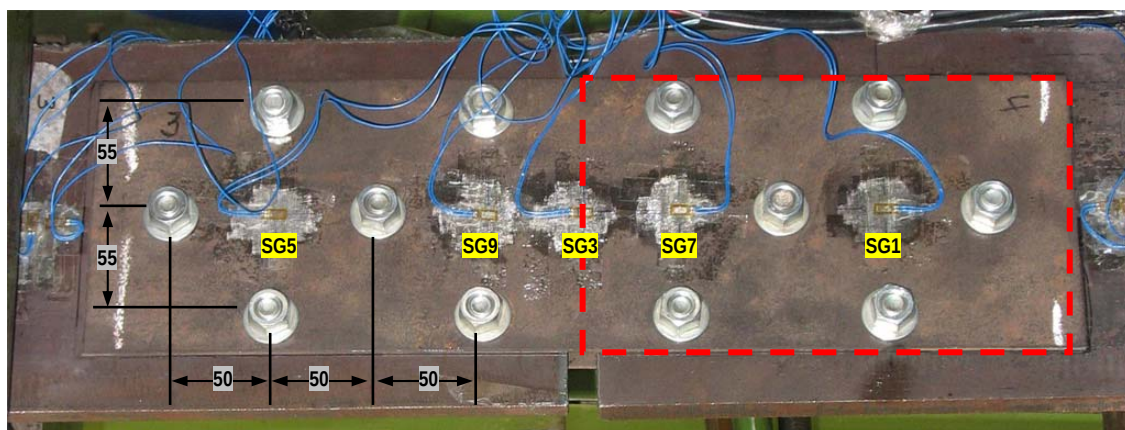
Para a realização dos ensaios das ligações, utilizou-se uma máquina universal de ensaios Lousenhausen com capacidade de 600kN conforme pode ser observado na Figura 5(a). A aquisição de dados (deformações, deslocamentos e carga) foi feita através do sistema NI-PXI-1050 da *National Instruments*, conforme apresentado na Figura 5(b).

4. CARACTERIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

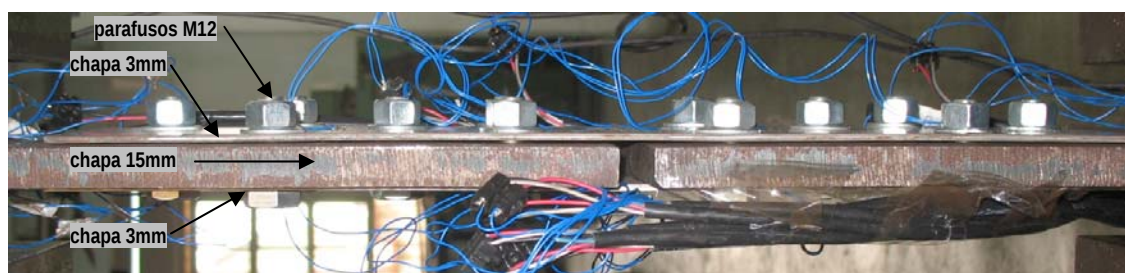
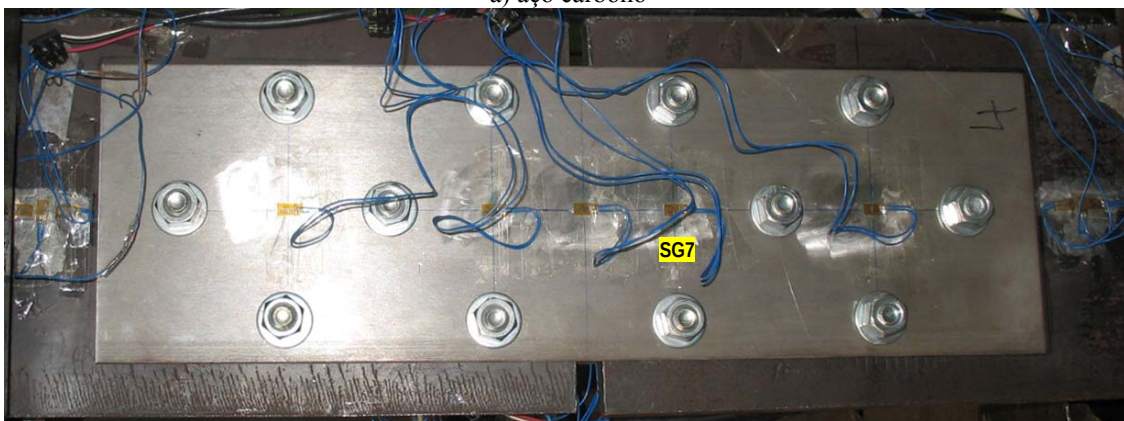
O modelo de elementos finitos utilizado neste artigo para avaliação de uma ligação cobrejunta aparafusada concebido no programa Ansys 10.0 (2005) foi constituído de elementos sólidos com oito nós (SOLID45 - Ansys Manual Reference, 2003) com três graus de liberdade por nó, nomeadamente, translações nas 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 (Bursi and Jaspart, 1997). A Figura 6(a) apresenta uma malha típica do

modelo completo para caracterização do comportamento dessa ligação. Ressalta-se aqui que somente uma das placas da ligação foi modelada conforme pode ser visualizado na Figura 6 pois este modelo é suficiente para a caracterização dos estados limites últimos da ligação.

As propriedades do material utilizado para o aço carbono MR250 e para o aço inoxidável A304 foram: módulo de elasticidade $E = 210 \text{ GPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. Para ambos os materiais, foram utilizadas curvas tensão *versus* deformação de acordo com ensaios à tração de corpos-de-prova realizados em laboratório e apresentadas na Figura 4.



a) aço carbono



b) aço inoxidável

Figura 3 – Detalhe da ligação ensaiada e região modelada em elementos finitos

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, na direção X.

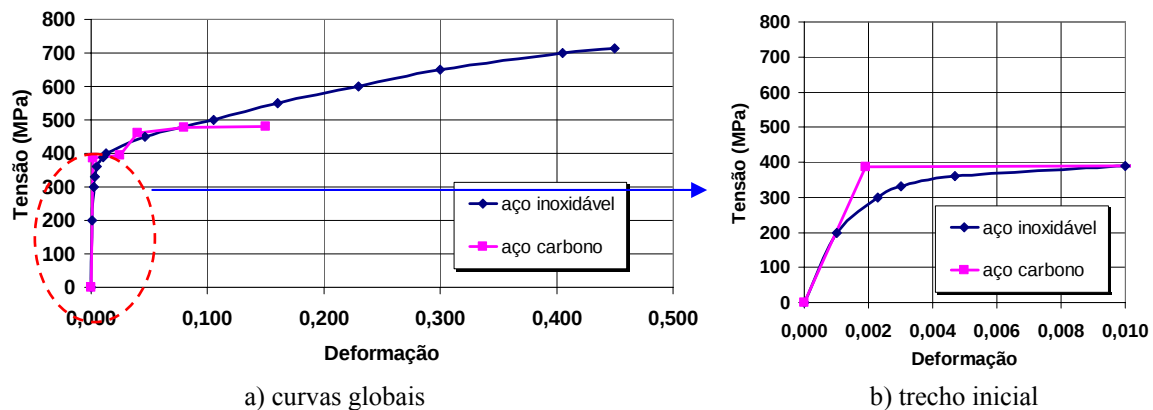
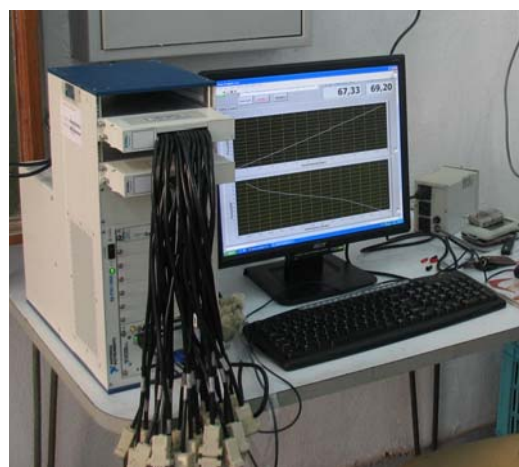


Figura 4 – Curvas tensão versus deformação – aço carbono MR250 e aço inoxidável A304

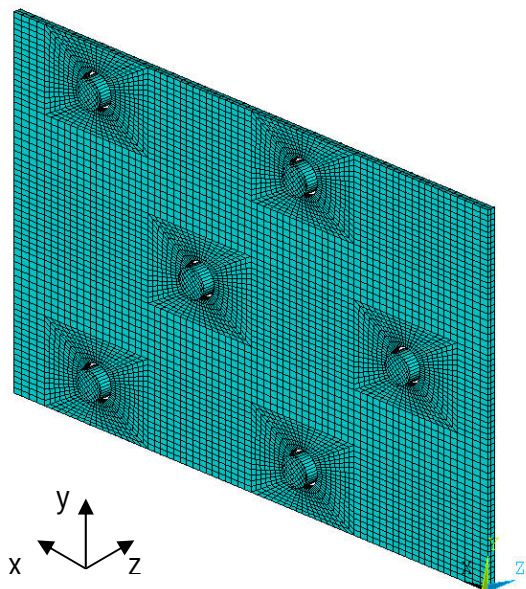


a) máquina universal de ensaios
Lousenhausen 600kN

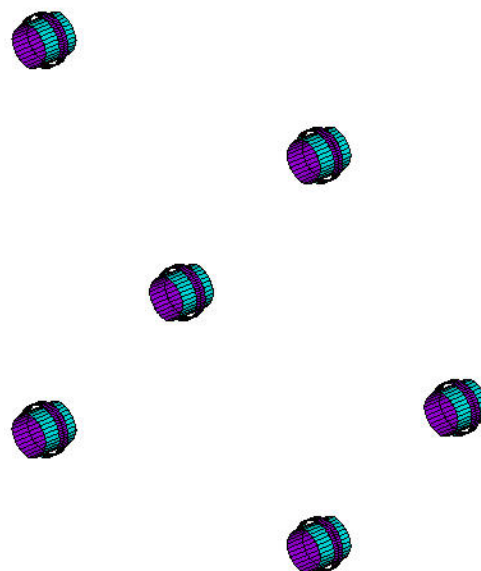


b) sistema de aquisição de dados National
Instruments PXI-1050

Figura 5 – Esquema experimental



a) malha global



b) superfícies com elemento de contato

Figura 6 – Malha utilizada no modelo em elementos finitos

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 (CONTA174 e

TARGE170) entre as partes de forma a evitar a penetração de um corpo no outro. Geralmente, não é possível definir a priori as zonas que sofrem contato devido as 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. A Figura 6(b) representa a área de atuação do contato entre a chapa e o parafuso.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Resultados Experimentais

A Figura 7 apresenta a curva carga *versus* deslocamento para ambos os ensaios E3_CARB_50 e E5_INOX_50 onde o deslocamento representa o afastamento entre as garras da máquina de ensaios e por este motivo, não serão efetuadas comparações em termos de curvas carga *versus* deslocamento entre os resultados numéricos e experimentais. Nesta figura, pode-se observar que as cargas máximas atingidas nos ensaios para o aço carbono e inox foram de aproximadamente 350,4 kN e 470,0 kN.

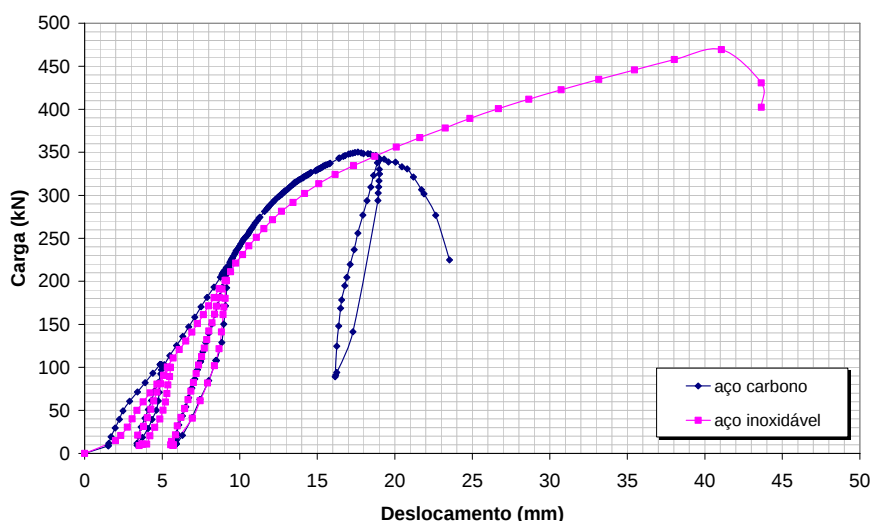


Figura 7 – Curva carga *versus* deslocamento – ensaios experimentais

Observa-se que em ambos os ensaios, o estado limite de ruptura da seção líquida (seção com dois furos mais próxima da emenda das placas de 15 mm) controlou a carga última da ligação conforme pode ser observado na Figura 8 e na Figura 9, respectivamente. De acordo com o dimensionamento efetuado através das eq. (2) e (3), as resistências obtidas para os estados limites últimos da ligação no que diz respeito a plastificação da seção bruta ou ruptura da área líquida com coeficientes de ponderação tomados iguais a 1,0, foram respectivamente, para o aço carbono de 300,7 kN e 211 kN e para o aço inoxidável, 272,3 kN e 348,3 kN. Estes valores foram obtidos usando os valores medidos das tensões de escoamento e ruptura, respectivamente.

Desta forma, verifica-se que, principalmente para o aço inoxidável, a carga última obtida no ensaio E5_INOX_50 foi bastante superior a obtida através do Eurocode 3, part 1.4 (2003).

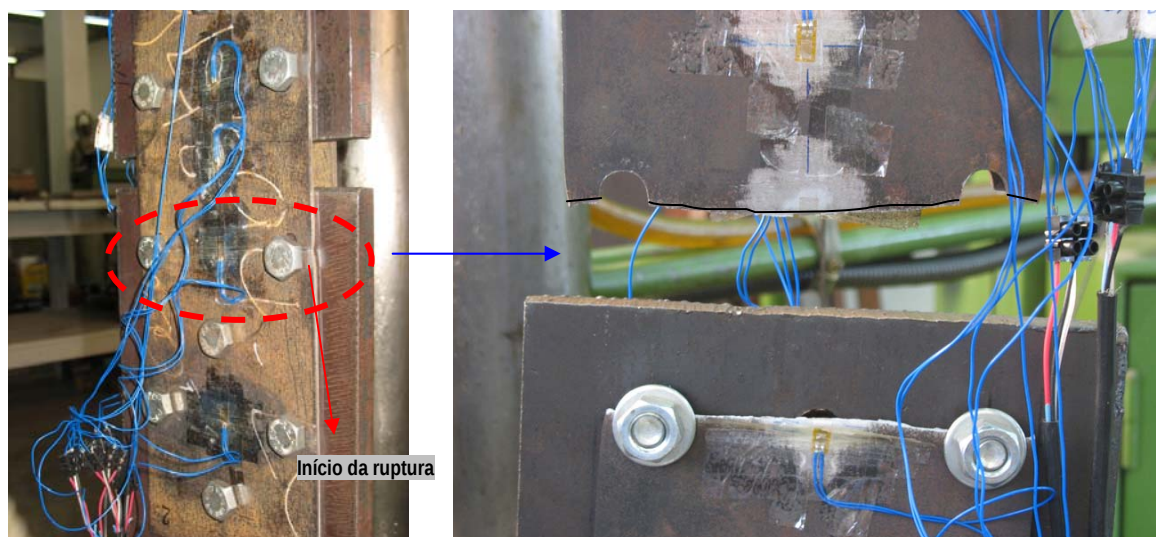


Figura 8 – Estado limite último – aço carbono (experimental)

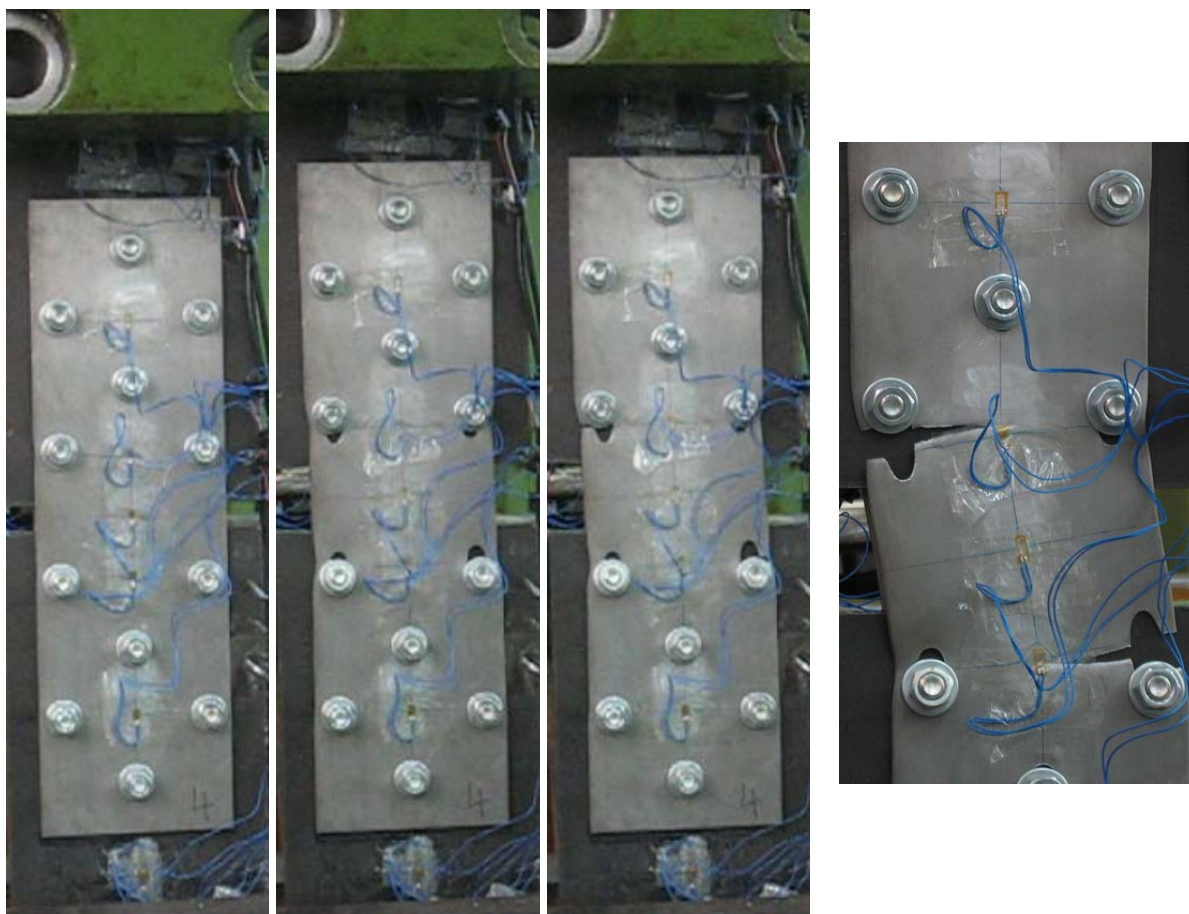


Figura 9 – Estado limite último – aço inoxidável (experimental)

5.2 Resultados Numéricos

Este item apresenta os resultados obtidos através do modelo numérico apresentado anteriormente. Na Figura 10 são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento para a placa individualmente onde pode-se verificar que o modelo constituído de aço inoxidável apresentou uma carga última da ordem de 334 kN enquanto que para o aço carbono, esta resistência última foi da ordem de 316 kN. Entretanto, este valor foi obtido para um nível de

deformação bem superior ao valor para o modelo constituído de aço carbono.

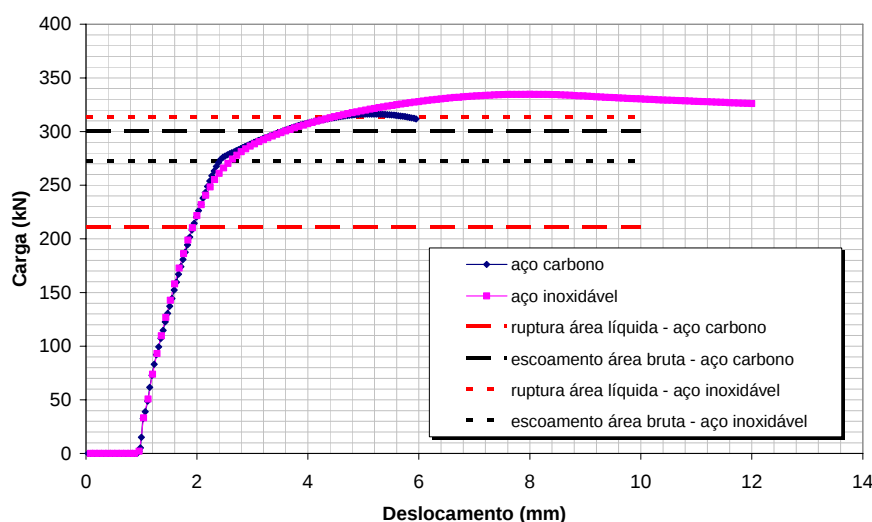


Figura 10 – Curva carga *versus* deslocamento – modelo numérico (aço carbono e aço inoxidável)

Observando-se a Figura 11 e a Figura 12, respectivamente, verifica-se que em ambos os modelos, ou seja, aço inoxidável e aço carbono, o estado limite último de ruptura da seção líquida foi devidamente reproduzido.

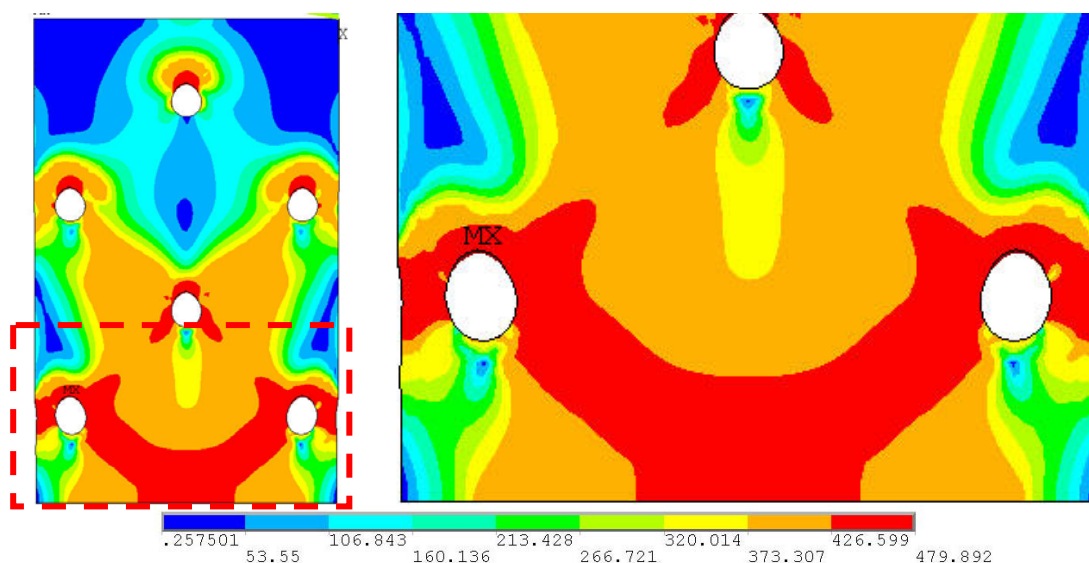


Figura 11 – Tensões de Von Mises (em MPa) – aço carbono (numérico) – P = 316 kN

5.3 Comparação Experimental *versus* Numérico

Com o objetivo de validar o modelo numérico desenvolvido neste trabalho, são apresentadas nesta seção, curvas carga *versus* deformação para alguns pontos medidos experimentalmente. A Figura 13 apresenta a comparação de deformações medidas no ensaio com aço carbono E3_CARB_50 na seção entre parafusos mais próxima da linha de centro da ligação representados pelos extensômetros 7 e 9, respectivamente onde se verifica uma boa concordância no trecho elástico mas entretanto, não foi possível reproduzir o trecho pós-

limite. Com o desenvolvimento do modelo completo, considerando-se ambas as placas de 3 mm e a placa intermediária de 15 mm, novos resultados poderão vir a ser obtidos.

Estas mesmas observações valem para a curva apresentada na Figura 14 e na Figura 15, respectivamente, que consideram as deformações medidas pelos extensômetros 1 e 3.

Quando uma comparação equivalente é feita para o ensaio E5_INOX_50 cuja placa foi constituída de aço inoxidável, gerou-se a curva carga *versus* deformação para o extensômetro 7 posicionado na seção de ruptura da ligação, Figura 16. Novamente, verifica-se uma boa concordância no trecho elástico enquanto que na parte pós-limite, o modelo numérico não foi capaz de caracterizar tal comportamento.

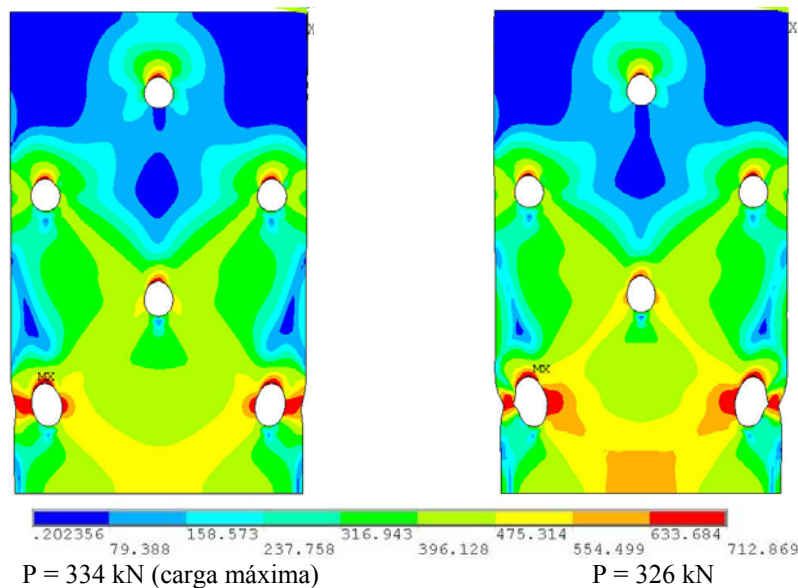


Figura 12 – Tensões de Von Mises (em MPa) – aço inoxidável (numérico)

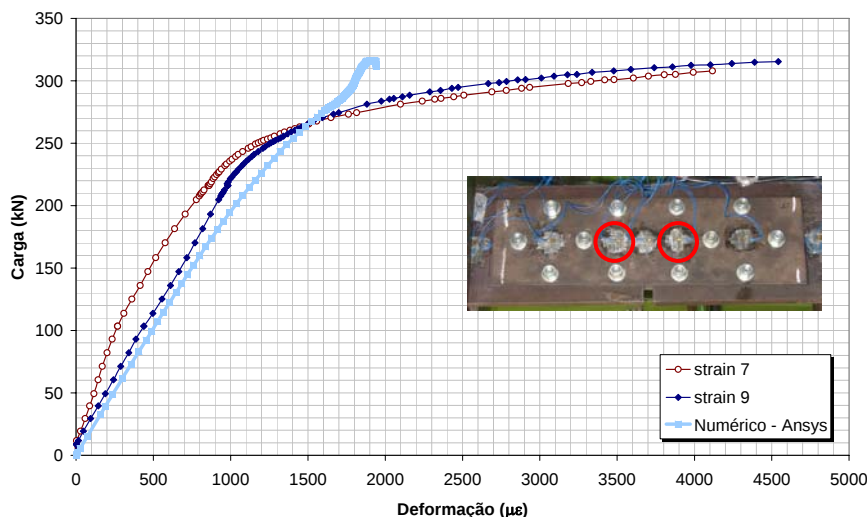


Figura 13 – Comparação de deformações: numérico *versus* experimental – aço carbono (I)

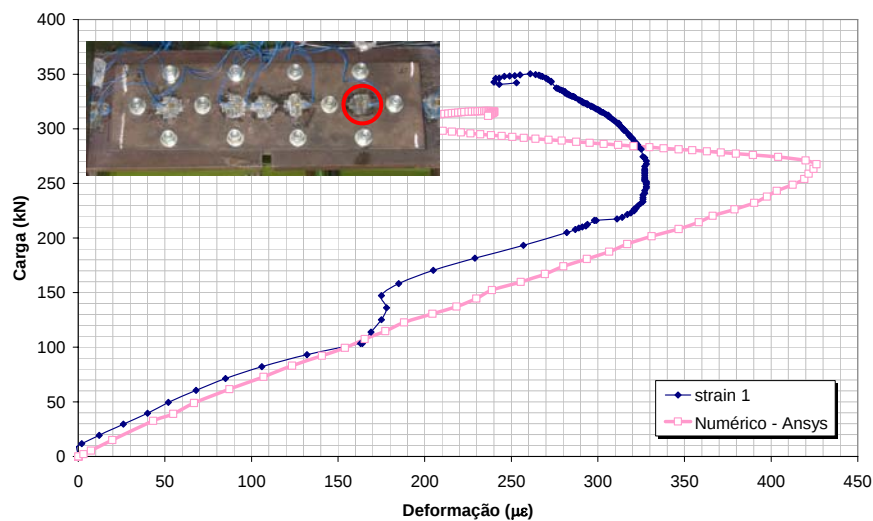


Figura 14 – Comparação de deformações: numérico *versus* experimental – aço carbono (II)

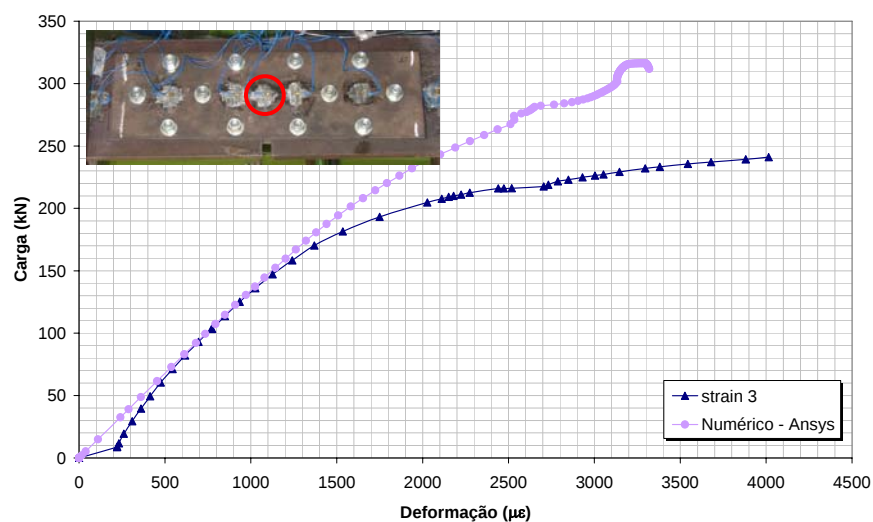


Figura 15 – Comparação de deformações: numérico *versus* experimental – aço carbono (III)

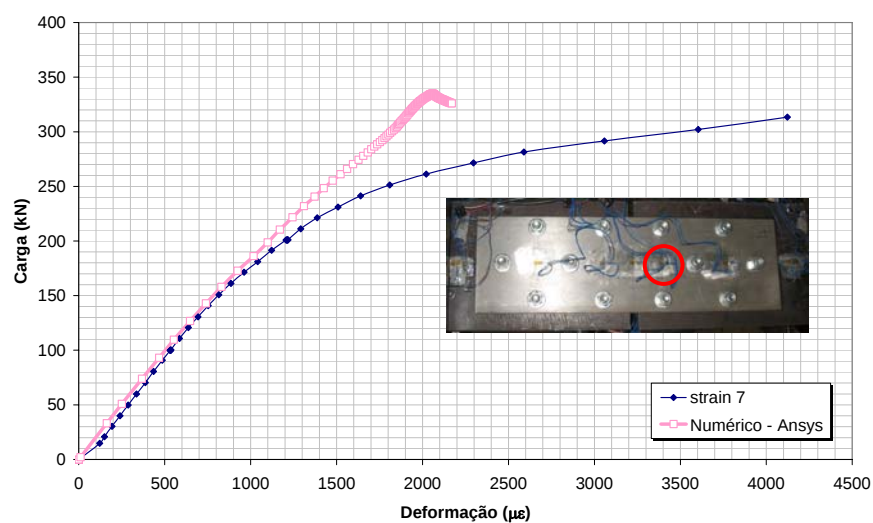


Figura 16 – Comparação de deformações: numérico *versus* experimental – aço inoxidável (I)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a resistência a tração de elementos estruturais aparafusados em aço inoxidável. A metodologia empregada consistiu, em uma primeira etapa, da revisão das normas de dimensionamento de elementos de aço inoxidável sob solicitação de tração onde se destacou o Eurocode 3, parte 1.4 (2003). Isto se seguiu com o desenvolvimento de um modelo numérico, baseado no método dos elementos finitos, através do programa Ansys 10.0 onde as não-linearidades do material e geométrica foram consideradas através do critério de plastificação de Von Mises e da formulação de Lagrange atualizada. A calibração destes modelos foi feita comparando seus resultados com ensaios pioneiros envolvendo comportamento de chapas aparafusadas de aço carbono e inoxidável sob tração.

A Tabela 1 abaixo apresenta uma comparação entre os resultados numéricos, experimentais e prescritos pelo Eurocode 3 (2003) para os ensaios a tração executados em chapas de aço carbono e inoxidável. Diferenças da ordem de 40% foram encontradas na comparação dos resultados fornecidos pelo Eurocode 3 (2003) e os experimentais. Por outro lado, diferenças variando entre 10% e 29% foram encontradas na comparação dos resultados numéricos e experimentais. Por fim diferenças variando entre 19% e 33% foram encontradas na comparação dos resultados fornecidos pelo Eurocode 3 (2003) e os numéricos. Estas diferenças devem-se em parte a modelagem do material adotada no modelo de elementos finitos e ao conservadorismo implícito presente no Eurocode 3, parte 1.4 (2003). Este conservadorismo deve-se em grande parte à pouca disponibilidade de ensaios experimentais em aço inoxidável.

Tabela 1 – Comparação dos resultados numéricos, experimentais e Eurocode 3 para os ensaios a tração executados em chapas de aço carbono e inoxidável

Ensaio	Aço Carbono (kN)	Aço Inox (kN)
Eurocode 3, Eq. (2), $\gamma_{M0}=1,0$	300,7	272,3
Eurocode 3, 1.4 Eq. (3), $\gamma_{M2}=1,0$	211,0	348,3
Eurocode 3, 1.4 Final (P_{EC3})	211,0	272,3
Carga Última Experimental P_{EXP}	350,4	470,0
Modelagem Numérica P_{FEM}	316,0	334,0
P_{EC3}/P_{EXP} (diferença %)	0,60 (40%)	0,58 (42%)
P_{FEM}/P_{EXP} (diferença %)	0,90 (10%)	0,71 (29%)
P_{EC3}/P_{FEM} (diferença %)	0,67 (33%)	0,81 (19%)

Etapas futuras da presente investigação contemplarão a execução de mais ensaios experimentais em aço carbono e aço inoxidável assim como uma nova série de modelagens numéricas incorporando uma modelagem do material mais precisa. De posse destes resultados espera-se sugerir alterações nas equações de dimensionamento de elementos estruturais sob tração de forma a torná-las mais precisas e possibilitando sua inclusão em versões revisadas das normas de projeto vigentes. Estas novas propostas de dimensionamento proporcionarão uma maior confiabilidade e economia dos elementos estruturais em aço inoxidável que servirão como mais um incentivo para seu uso na construção civil.

Agradecimentos

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

computacional e ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC) coordenado pelo Eng. Antônio Rodrigues Inácio pela realização dos ensaios experimentais. Agradece-se também à USIMINAS e à ACESITA pela doação do material, aço carbono e aço inoxidável, respectivamente.

REFERÊNCIAS

Ansys, Inc. Theory Reference (version 10.0), 2005.

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.

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.

Santos, J. de J. dos, 2008, Comportamento Estrutural de Elementos em Aço Inoxidável, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ.

Silva, A. T. da, 2008, Comportamento de Peças Tracionadas em Estruturas de Aço-Carbono e Aço Inoxidável, Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ.