X CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
9 a 11 de maio - Rio de Janeiro
2018 XCBPE

Avaliação da Resistência de Painéis Enrijecidos Fabricados em Aços Carbono e Inoxidável

Flávio Rodrigues[1], Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco[2], André Tenchini da Silva[2], Luciano Rodrigues Ornelas de Lima[2].

[1] Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ / PGECIV – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Aluno de Doutorado / E-mail: rodriguesflavio@oi.com.br

[2] Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ / Departamento de Estruturas e Fundações
E-mails: vellasco@eng.uerj.br; tenchini@eng.uerj.br, luciano@eng.uerj.br

Resumo

Painéis enrijecidos apresentam várias aplicações na Engenharia, como em estruturas do tipo Naval/*Offshore*, quando são empregados como elementos primários de navios e embarcações. Um aspecto relevante nos mecanismos de falha de painéis enrijecidos é o nível de imperfeições geométricas e de tensões residuais presentes nestas estruturas oriundas dos processos de fabricação. O presente artigo tem por objetivo a avaliação da carga última de painéis enrijecidos em aço carbono e aço inoxidável, bem como analisar a influência de diferentes níveis de imperfeições iniciais na resistência dos mesmos.

Palavras-chave

Painéis enrijecidos; elementos finitos; análise não linear; aço carbono; aço inoxidável.

Introdução

Painéis enrijecidos apresentam várias aplicações na Engenharia, como em estruturas do tipo Naval/*Offshore*, quando são empregados como elementos primários de navios e embarcações, conforme pode ser observado nas figuras 1 e 2. Um aspecto relevante nos mecanismos de falha de painéis enrijecidos é o nível de imperfeições geométricas e de tensões residuais presentes nestas estruturas oriundas dos processos de fabricação. A resistência de painéis enrijecidos decresce rapidamente com o aumento das imperfeições geométricas iniciais e das tensões residuais presentes nos mesmos.

Várias são as Normas Técnicas que regulam o dimensionamento de painéis enrijecidos em aço carbono, como por exemplo: *ABS* (2014) *e DNV-RP-201* (2010). Contudo, com a evolução tecnológica dos materiais e exigências cada vez maiores dos mesmos em termos de resistência mecânica e à corrosão, faz-se necessário o emprego de aços especiais cujo dimensionamento não está presente nas Normas supracitadas.

O presente artigo tem por objetivo a avaliação da carga última de painéis enrijecidos em aço carbono e em aço inoxidável, bem como analisar a influência de diferentes níveis de

imperfeições iniciais na resistência dos mesmos.

Figura 1. Blocos de navio

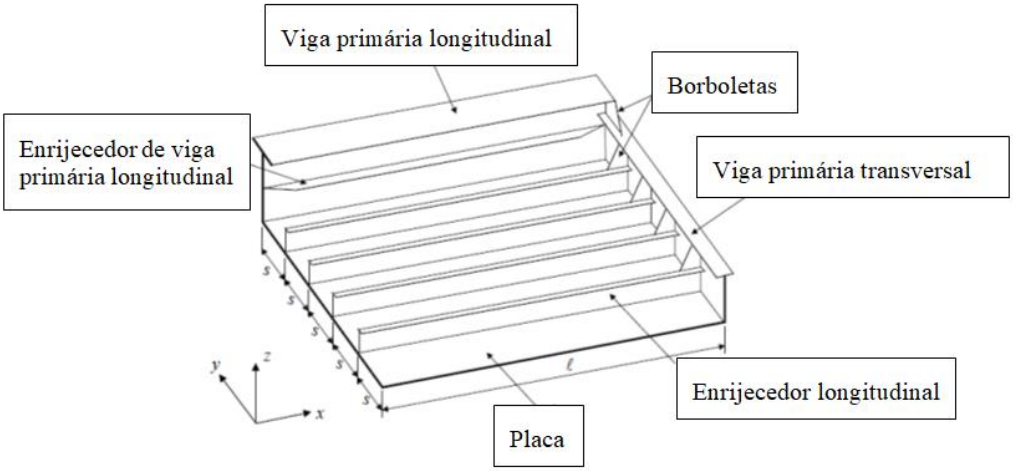

Figura 2. Configuração geral de painel enrijecido (ABS, 2014)

Critérios de Resistência

Ao longo do desenvolvimento das metodologias para a avaliação da resistência de painéis enrijecidos, vários critérios têm sido propostos na literatura. De uma forma geral, os modos de falha de painéis enrijecidos podem ser ordenados em três diferentes níveis: a placa entre enrijecedores, o enrijecedor com sua respectiva placa colaborante e o sistema de painel enrijecido como um todo, composto por placa, enrijecedor e respectivas vigas primárias de suporte, como pode ser visto na figura 3.

Uma estrutura do tipo Naval/*Offshore* eficiente, deve levar em consideração os diferentes níveis de falha citados anteriormente. Desta forma, deve haver redundância estrutural entre cada nível de falha e seu respectivo predecessor, ou seja, ainda que uma determinada placa falhe, seu respectivo enrijecedor deve suportar o carregamento oriundo desta placa. De modo análogo, a falha do sistema de enrijecedores com suas respectivas placas, não deve causar o colapso imediato da estrutura, pois espera-se que as vigas primárias principais tenham capacidade de redistribuição e ductilidade tais para se evitar um colapso progressivo e abrupto da estrutura.

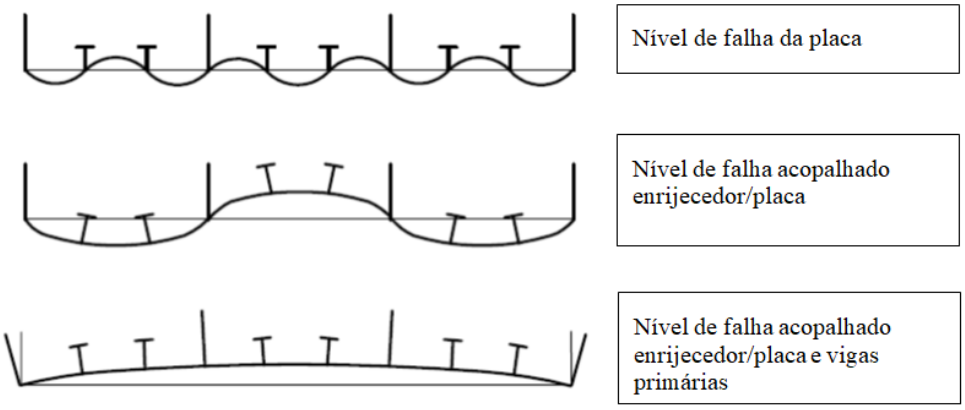

Figura 3. Níveis de falha de painéis enrijecidos (ABS, 2014)

Metodologia

Para avaliar a influência das imperfeições geométricas e das tensões residuais na resistência de painéis enrijecidos, tomou-se como base o trabalho de Amante et al. (2011) que avaliaram experimentalmente, conforme exibido na figura 4, e numericamente a resistência de painéis enrijecidos em escala reduzida 1:14. Os ensaios experimentais foram utilizados para calibrar e validar os modelos de elementos finitos, para sua posterior avaliação de painéis enrijecidos em escala real.

De acordo com Amante et al. (2011), as imperfeições iniciais nos modelos de painéis enrijecidos em escala reduzida foram medidas e digitalizadas com um equipamento portátil a laser, observado na figura 5. Posteriormente, foram feitas comparações entre os modos de falha dos modelos experimentais em escala reduzida, com os respectivos modelos de elementos finitos com imperfeições iniciais reais e com imperfeições geométricas idealizadas de acordo com os modos de flambagem dos painéis.

Para a consideração das imperfeições geométricas idealizadas nos modelos em elementos finitos, segundo os modos de flambagem dos painéis enrijecidos, adotou-se um nível de imperfeição inicial máxima preconizado pela norma *DNV-OS-C401* (2014). De acordo com a referida norma, o nível máximo de imperfeição admitido para efeitos construtivos é de 0,5% da largura entre enrijecedores de placas, figura 6.

Diferentes magnitudes de imperfeição geométricas foram também considerados nos modelos para avaliar a influência destas imperfeições na resistência dos painéis enrijecidos. Para tal realizou-se uma análise de autovalores e autovetores, que produziu um campo de deslocamentos com amplitude máxima unitária, que posteriormente foi escalado de modo a se obter o nível de imperfeição geométrica desejado para o modelo. Assim por exemplo, para a obtenção de uma imperfeição geométrica de 0,5% da largura entre enrijecedores de placas, escalou-se o campo de deslocamentos por um fator de 268 x 10^{-3}. A figura 7, ilustra o campo de deslocamentos obtidos pela análise de autovalores e autovetores obtido pelo *software* Nastran (2013). Cabe ressaltar, que para a introdução das imperfeições geométricas nos modelos em elementos finitos, adotou-se o campo de deslocamentos produzidos pelo primeiro modo de flambagem dos painéis enrijecidos.

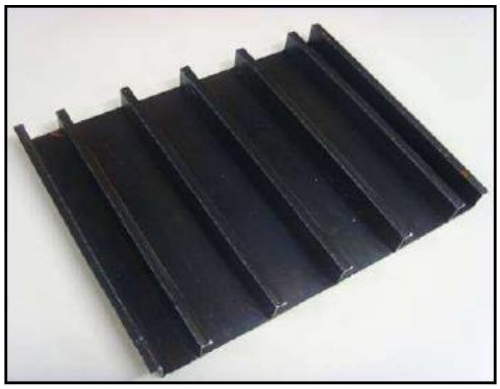

Figura 4. Painel enrijecido ensaiado (2011)

Figura 5. Equipamento portátil para digitalização de imperfeições (2011)

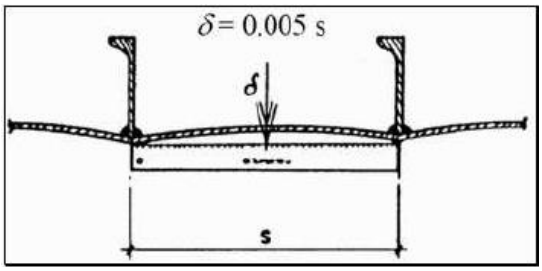

Figura 6. Imperfeição máxima admitida para construção (2014)

Na figura 8 são exibidos os diagramas carga *versus* deslocamento vertical (na direção do eixo Y) para o modelo sem imperfeições iniciais e para os experimentos de Amante et al. (2011). A figura 8 apresenta também o diagrama carga *versus* deslocamento vertical (na direção do eixo Y) para o modelo sem imperfeições iniciais do presente trabalho.

Da observação dos resultados obtidos por Amante et al. (2011) e sua comparação com a análise em elementos finitos deste artigo para o painel enrijecido em aço carbono com imperfeição inicial mínima, pode-se perceber uma carga última de cerca de 137,0 kN e 134,7 kN respectivamente. A diferença dos resultados de carga última é de cerca de 1,7%. Contudo, a forma dos diagramas carga *versus* deslocamento vertical (na direção

do eixo Y) obtidos por Amante et al. (2011) e aquele verificado neste trabalho apresenta diferenças. Pode-se imputar estas diferenças ao nó do modelo em elementos finitos, segundo o qual foram obtidos os referidos diagramas carga *versus* deslocamento vertical. Amante et al. (2011) não descreveu de qual nó foram extraídos os resultados, dificultando, portanto, uma comparação mais precisa entre os modelos.

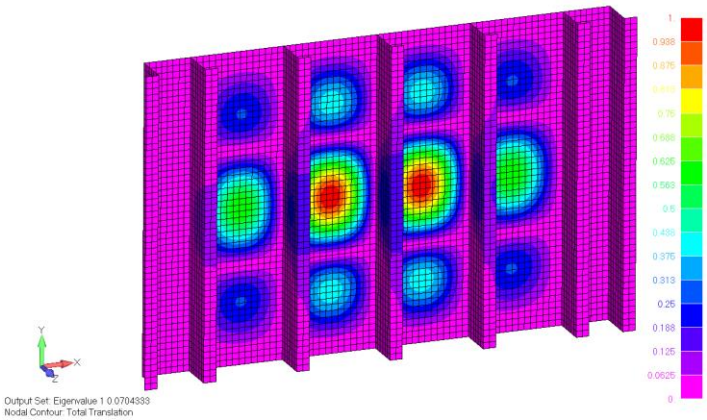

Figura 7. Campo de deslocamentos obtido por análise de autovalores e autovetores

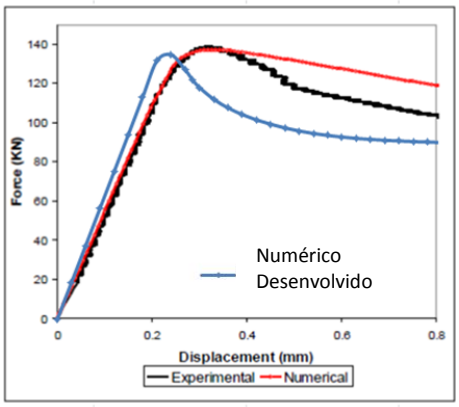

Figura 8. Carga x deslocamento vertical (2011) – Aço carbono

Modelos numéricos

Para se avaliar a resistência dos painéis enrijecidos, doze modelos em elementos finitos foram elaborados, cujas geometrias são apresentadas nas tabelas 1 e 2. Para a elaboração dos modelos em elementos finitos, foram utilizados o software Abaqus (2015) e o software Femap/NX Nastran (2013). Os modelos foram compostos por elementos do tipo *shell* S4R (Abaqus) e *shell* CQUAD4 (NX Nastran). Os elementos do tipo *shell* foram utilizados para modelar as placas e os enrijecedores. Tais elementos apresentam quatro nós e seis graus de liberdade por nó, sendo três graus de liberdade de translação e três graus de liberdade de rotação.

Após um estudo de convergência de resultados, no qual foram testados diferentes tamanhos de malha para os modelos elaborados, adotou-se uma malha de elementos

finitos da ordem de 3,5 mm, gerando modelos com 6916 nós e 6732 elementos. Para facilitar a convergência da análise estrutural, foram aplicados deslocamentos prescritos na face superior dos painéis enrijecidos de forma monotônica na direção Y. Os painéis enrijecidos foram modelados com as seguintes propriedades mecânicas para os materiais aço carbono e aço inoxidável apresentados na tabela 2. O aspecto geral dos modelos em elementos finitos elaborados está exibido na figura 9.

Tabela 1 – Geometria dos modelos em aço carbono e em aço inoxidável

Placas (mm)	Enrijecedores (mm)	Imperfeições geométricas (mm)
Comprimento - 178	Espessura da alma - 0,77	0,00005 x Espaçamento – 2,68 x 10^{-3}
Largura - 268	Altura da alma - 21,6	0.001 x Espaçamento – 53,6 x 10^{-3}
Espessura - 1,03	Espessura do flange - 1,03	0.002 x Espaçamento – 107,2 x 10^{-3}
Espaçamento entre	Largura do flange - 7,10	0.003 x Espaçamento – 160,8 x 10^{-3}
enrijecedores - 53,6		0.004 x Espaçamento – 214,4 x 10^{-3}
		0.005 x Espaçamento – 268,0 x 10^{-3}

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais

Aço carbono	Aço inoxidável
Módulo de elasticidade - 207863 MPa Coeficiente de Poisson - 0,3 Tensão de escoamento - 315 MPa Tensão de ruptura – 315 MPa Módulo de elasticidade tangente – 0 MPa	Módulo de elasticidade - 200000 MPa Coeficiente de Poisson - 0,3 Tensão de escoamento - 330 MPa Tensão de ruptura – 730 MPa Coeficiente n – 6 Alongamento após a fratura – 0,45 Módulo de elasticidade tangente – 24175,8 MPa Coeficiente m – 2,58 Deformação última – 0,45

As propriedades mecânicas do aço inoxidável foram consideradas conforme as orientações do Anexo C do *Eurocode 3 - Pt 1-4* (2006). Para os modelos dos painéis enrijecidos foi adotado um aço austenítico de grau 1.4318. As curvas tensão *versus* deformação dos materiais empregados nos modelos podem ser verificadas na figura 10.
A não-linearidade física pode se manifestar na forma de plasticidade, quando o carregamento atuante na estrutura provoca tensões e deformações que excedem o limite de escoamento do material. Para a avaliação do escoamento do material foi utilizado o critério de tensões de von Mises. A não-linearidade geométrica foi incluída nos modelos para a atualização da matriz de rigidez dos mesmos a cada passo de carga, prevendo-se a possibilidade de grandes deslocamentos e deformações. Para a atualização da matriz de rigidez dos modelos em elementos finitos foi utilizado o algoritmo de Lagrange atualizado. As condições de contorno exibidas na tabela 3 foram adotadas para as análises estruturais.

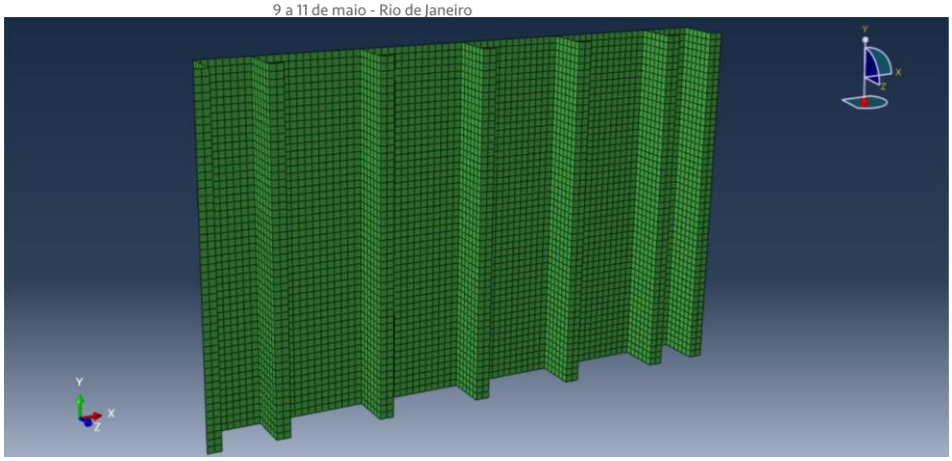

Figura 9. Modelo em elementos finitos de painel enrijecido

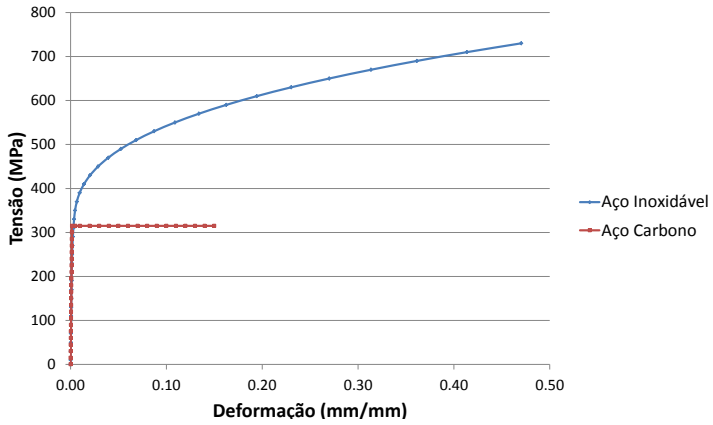

Figura 10. Curvas tensão x deformação dos materiais

Tabela 3 – Condições de contorno dos modelos

Topo e base dos painéis	Laterais dos painéis
Translação X - Restrita	Translação X - Restrita
Translação Y - Restrita	Translação Y - Livre
Translação Z - Restrita	Translação Z - Restrita
Rotação X - Restrita	Rotação X - Restrita
Rotação Y – Restrita	Rotação Y – Livre
Rotação Z - Restrita	Rotação Z - Restrita

Resultados

As análises estruturais em elementos finitos efetuadas para os painéis enrijecidos compostos por aço carbono e aço inoxidável, apresentaram os diagramas carga *versus* deslocamento vertical (na direção do eixo Y), mostrados nas figuras 11 e 12. Os diagramas foram gerados a partir dos resultados de carga e deslocamento obtidos para os nós horizontais do topo dos painéis enrijecidos.

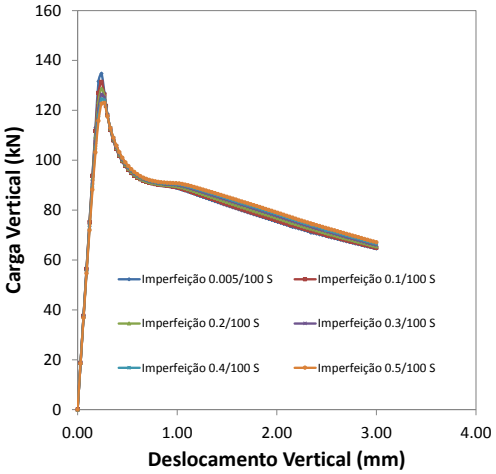

Figura 11. Carga x deslocamento vertical – Aço carbono

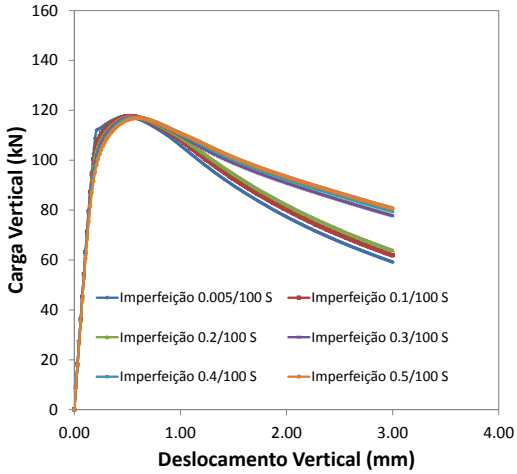

Figura 12. Carga x deslocamento vertical – Aço inoxidável

Pode-se verificar que os painéis fabricados em aço carbono apresentaram um comportamento típico de instabilidade, caracterizado por uma redução brusca de resistência no regime pós-flambagem. Para os painéis fabricados em aço inoxidável, observa-se um comportamento mais dúctil no regime pós-flambagem quando comparado com os painéis em aço carbono. Para os modelos deste trabalho, verifica-se que para os painéis em aço inox, quanto maior o nível de imperfeição geométrica inicial, maior a ductilidade apresentada pelo modelo no regime pós-flambagem.

Na tabela 4 estão exibidas as cargas últimas dos modelos em elementos finitos para os diferentes níveis de imperfeições geométricas inseridas nos painéis e a comparação de seus valores para os dois materiais analisados.

Uma comparação entre as cargas últimas dos painéis enrijecidos fabricados em aço carbono para os diferentes níveis de imperfeições geométricas, permite observar que a resistência do painel com maior imperfeição decresce em 8,7% quando comparado com seu par de menor imperfeição geométrica. Já quando se compara as cargas últimas dos modelos em aço inox, para os diferentes níveis de imperfeições geométricas, observa-se que a resistência do painel com maior imperfeição decresce em apenas 0,5% quando comparado com seu par de menor imperfeição geométrica.

As figuras 13 e 14 mostram o resultado do ensaio experimental realizado por Amante et al. (2011), bem como os resultados dos modelos em elementos finitos obtidos neste trabalho para os painéis em aço carbono, com imperfeição geométrica de 0,5% do espaçamento entre enrijecedores. Da observação do resultado da análise experimental (2011) e sua comparação com o método dos elementos finitos (Abaqus e Nastran), pode-se perceber que a configuração deformada da estrutura mostra um comportamento similar com pequenas diferenças pois o ensaio experimental foi produzido com imperfeições reais enquanto as imperfeições dos modelos foram produzidas por análises de modos de flambagem.

Adicionalmente, deve-se atentar ao fato de que o problema é extremamente sensível às imperfeições geométricas existentes nos modelos, ou seja, ligeiras diferenças nestas imperfeições podem produzir configurações deformadas diferentes no regime pós-flambagem. Além disto as chapas das amostras dos modelos são extremamente finas,

acentuando-se os efeitos de tensões residuais e distorções nos painéis. A figura 15 compara os resultados dos modelos de elementos finitos em aço inoxidável com imperfeições de 0,5% do espaçamento entre enrijecedores. Os modelos foram analisados com softwares Abaqus (2015) e Nastran (2013).

Tabela 4 – Cargas últimas dos painéis enrijecidos

Imperfeições geométricas (mm)	Aço carbono Carga última (kN)	Aço inoxidável Carga última (kN)
0,00005 x Espaçamento – 2,68 x 10^{-3}	134,7	117,5
0.001 x Espaçamento – 53,6 x 10^{-3}	131,4	117,7
0.002 x Espaçamento – 107,2 x 10^{-3}	128,7	117,5
0.003 x Espaçamento – 160,8 x 10^{-3}	126,4	117,3
0.004 x Espaçamento – 214,4 x 10^{-3}	124,4	117,1
0.005 x Espaçamento – 268,0 x 10^{-3}	123,0	116,9

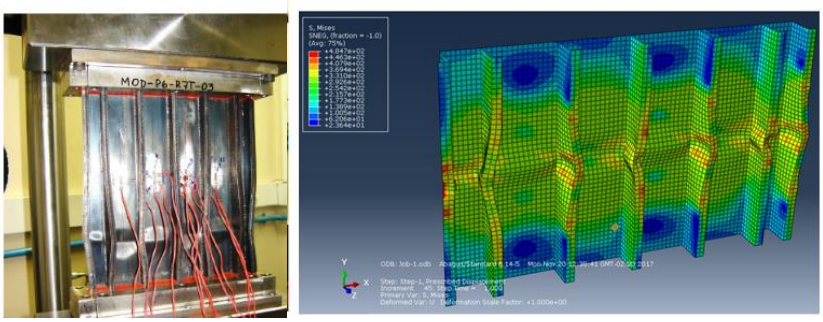

Figura 13. Ensaio experimental (2011) versus MEF (Abaqus) – Aço carbono

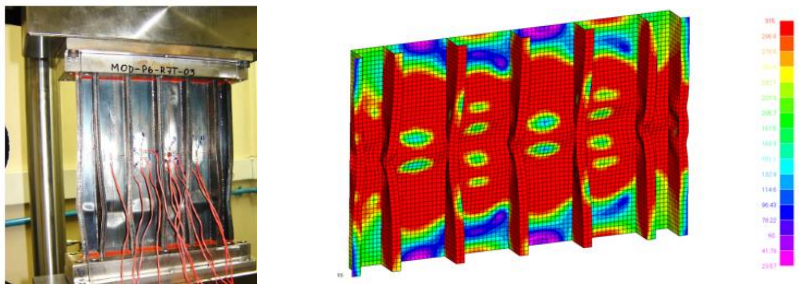

Figura 14. Ensaio experimental (2011) versus MEF (Nastran) – Aço carbono

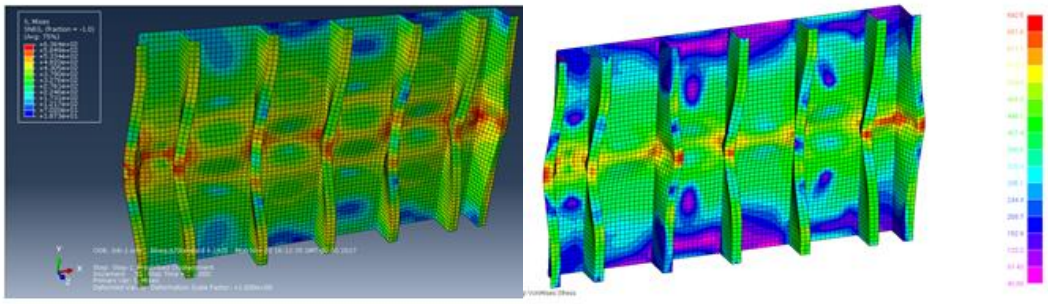

Figura 15. MEF (Abaqus) versus MEF (Nastran) – Aço inoxidável

A configuração deformada dos painéis no regime pós-flambagem é bastante similar quando se compara os resultados obtidos pelo software Abaqus e o *software* Nastran. A distribuição de tensões de von Mises também se assemelha bastante, diferenciando-se provavelmente apenas pela forma como cada *software* interpola e exibe os resultados.

Conclusões

As resistências últimas de painéis enrijecidos fabricados em aço carbono foram avaliadas pelo método dos elementos finitos para diferentes níveis de imperfeições geométricas. Conforme esperado, um aumento da imperfeição inicial resultou em menor resistência última dos painéis. Particularmente para os modelos analisados neste trabalho, a resistência do painel com maior imperfeição decresceu em 8,7% quando comparado com seu par de menor imperfeição geométrica.

Para os painéis enrijecidos fabricados em aço inoxidável, um aumento da imperfeição inicial praticamente não alterou a resistência última dos painéis. Para os modelos analisados neste trabalho, a resistência do painel com maior imperfeição decresceu em apenas 0,5% quando comparado com seu par de menor imperfeição geométrica.

A observação dos diagramas de carga *versus* deslocamento vertical (na direção do eixo Y), revelou que os painéis fabricados em aço carbono apresentaram um comportamento típico de instabilidade, caracterizado por uma redução brusca de resistência no regime pós-flambagem. Para os painéis fabricados em aço inox observou-se um comportamento mais dúctil no regime pós-flambagem quando comparado com os painéis em aço carbono. Verificou-se que para os painéis em aço inoxidável, quanto maior o nível de imperfeição geométrica inicial, maior a ductilidade apresentada pelo modelo estrutural no regime pós-flambagem.

A comparação dos modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho com os ensaios experimentais realizados por Amante et al. (2011), mostrou boa concordância em termos de carga última e configuração deformada no regime pós-flambagem.

Finalmente, a comparação das análises numéricas em elementos finitos com os softwares Abaqus e Nastran, apresentou boa concordância em termos de configuração deformada dos painéis no regime pós-flambagem. A distribuição de tensões de von Mises dos modelos também se assemelhou bastante, diferenciando-se provavelmente apenas pela forma como cada software interpola e exibe os resultados.

Referências

ABS – Buckling and Ultimate Strength Assessment for Offshore Structures – 2014.

DNV-RP-C201 – Buckling Strength of Plated Structures – 2010.

AMANTE, D. do A. M., ESTEFEN, S. F., (2011) Buckling Strength of Stiffened Panels Considering Actual Geometric Imperfections. Proceedings of COBEM 2011. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering - October 24-28, 2011, Natal, RN, Brazil.

DNV-OS-C401 – Fabrication and Testing of Offshore Structures – 2014.

Abaqus Theory Manual – Release 6.14 – 2015.

NX Nastran User's Guide/Theoretical Manual - Release 11.0.1 – 2013.

Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-4: General Rules - Supplementary Rules for Stainless Steels – 2006.