

INFLUÊNCIA DAS DISTORÇÕES NA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE PAINÉIS PLANOS

T.P.Estefen, D.Amaral e S.F.Estefen

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica
Caixa Postal 68508/CEP 21945-970/RJ, tiago@lts.coppe.ufrj.br

Resumo - As novas concepções estruturais de plataformas semi-submersíveis de produção de petróleo e gás têm suas colunas constituídas de painéis planos enrijecidos longitudinalmente, sujeitos as cargas de compressão uniaxial. O presente trabalho consiste na análise de resistência limite de painéis típicos. Para esta análise foi utilizada como ferramenta um programa de elementos finitos, considerando não linearidades geométricas e do material. Distorções causadas pelo processo de fabricação são idealizadas visando estudar o comportamento dos painéis, através das curvas de resistência tensão-deformação. O estudo considera os efeitos da razão de aspecto, condição de contorno e amplitude e modo das imperfeições geométricas iniciais na resistência estrutural. Tecnologias de medição foram também avaliadas, com o objetivo de quantificar a sua forma e amplitude em plataformas em escala real, a serem incorporadas em análises numéricas para a obtenção da carga de colapso de painéis de estruturas oceânicas.

Abstract - New structural concepts of semi-submersible oil and gas production platforms have the columns constituted of longitudinal stiffened panels subjected to compressive loading. The present paper evaluates the limit strength of typical panels. A finite element computer program has been employed in the analyses, taking into account geometric and material nonlinearities. Distortions caused by the fabrication process are idealized aimed at studying the panels behavior by stress-strain curves representative of the ultimate strength behavior. The study considers the influence of aspect ratio, boundary condition and both amplitude and mode of the initial geometric imperfection on the structural strength. Measurement technologies for distortions have been also discussed in order to determine mode and amplitude in full scale platforms. The obtained data could then be incorporated in the numerical analyses to simulate the panel behavior in marine structures.

Nomenclatura

a	comprimento da placa (direção x)
b	largura da placa (direção y)
E	módulo de elasticidade
m	número de meias ondas de flambagem
t	espessura do chapeamento
t_w	espessura do enrijecedor
u_i	componente cartesiano do vetor deslocamento
x, y, z	sistema de coordenadas cartesianas
w_{max}	magnitude máxima da imperfeição inicial na direção z
α	= a/b
β	= $b/t\sqrt{\sigma_0/E}$
σ	tensão de engenharia
σ_0	tensão de escoamento
σ_v	tensão verdadeira
ε	deformação de engenharia
ε_v	deformação plástica logarítmica
θ_i	rotação

Introdução

As novas plataformas semi-submersíveis de grande porte tem sido projetadas com colunas de seção quadrada e arranjo estrutural constituído de painéis planos enrijecidos longitudinalmente. Os painéis enrijecidos são fabricados a partir de procedimentos de conformação e soldagem. Os principais fatores de fabricação que têm efeito deletério sobre a capacidade estrutural destes painéis são as distorções iniciais e as tensões residuais. As distorções de fabricação constituem um sério problema existente nas áreas de engenharia em que o calor é usado no processo de fabricação, mas em nenhuma área exerce tanta influência quanto na construção naval e offshore.

Os fatores que governam o comportamento de painéis enrijecidos são: condição de contorno, carregamento, geometria e comportamento do material. Já os parâmetros de

geometria que determinam o comportamento de painéis enrijecidos são geometria do enrijecedor, razão de aspecto da chapa entre enrijecedores, razão entre largura e espessura do chapeamento e deflexão inicial.

Pesquisas visando o melhor entendimento da influência das imperfeições iniciais no colapso de painéis foram realizadas por diversos autores. Sørense et al. (1976) estudaram os efeitos da condição de contorno e da amplitude das imperfeições em painéis enrijecidos. Outras pesquisas importantes aplicadas a estruturas oceânicas são apresentadas por Faulkner (1976), onde são relatados testes de compressão em painéis enrijecidos, Smith e Kirkwood (1976) que estudaram e quantificaram a influência das distorções iniciais e da tensão residual em painéis sob compressão uniaxial e Estefen e Harding (1983) que avaliaram o colapso de painéis cilíndricos enrijecidos por anéis, arranjo estrutural proposto para a primeira plataforma TLP instalada no Mar do Norte em 1984. Mateus e Witz (1999) obtiveram resultados que confirmaram que os três principais parâmetros que afetam a flambagem e o pós-colapso em painéis sob compressão uniaxial são razão de aspecto, condição de contorno do bordo e amplitude máxima da imperfeição inicial. Pasqualino et al. (2001) avaliaram o colapso de painel de navio sob carregamento compressivo uniaxial e biaxial. Gordo e Guedes Soares (2002) concluíram que o modo de colapso é o principal fator determinante do nível de resistência das placas esbeltas, sendo o modo de colapso função de duas condições iniciais, a amplitude máxima e a amplitude relativa dos diversos modos das imperfeições iniciais. Sendo a segunda condição mais importante do que a primeira.

Distorções de Fabricação

As distorções geradas pelo processo de fabricação, denominadas imperfeições geométricas iniciais, representam quantitativamente o afastamento da superfície real em relação à superfície idealizada durante a etapa de concepção da estrutura. Este tipo de imperfeição, caracterizado pela forma e magnitude de sua distribuição, é a principal causa da obtenção de cargas de colapso distintas, em componentes laminares nominalmente idênticos.

Conseqüentemente, os códigos de projeto procuram garantir a integridade de painéis sob compressão, associando as recomendações de projeto às tolerâncias admissíveis durante a fabricação.

Existem muitos fatores que podem gerar distorções, entre eles a forma como a chapa é fabricada, transportada e estocada, mas o principal fator está associado ao processo de soldagem. O calor não uniforme induzido no processo de soldagem gera expansão térmica diferencial ao redor da solda. A baixa temperatura do material próximo ao cordão de solda inibe a sua expansão, produzindo deformações plásticas e tensões residuais. A interação entre tensões residuais e deformações plásticas produz distorções. A Figura 1 mostra distorções após processos de soldagem.



Figura 1: Distorções causadas após processos de soldagem.

Masubuchi (1980) classificou as distorções em seis categorias, conforme indica a Figura 2.

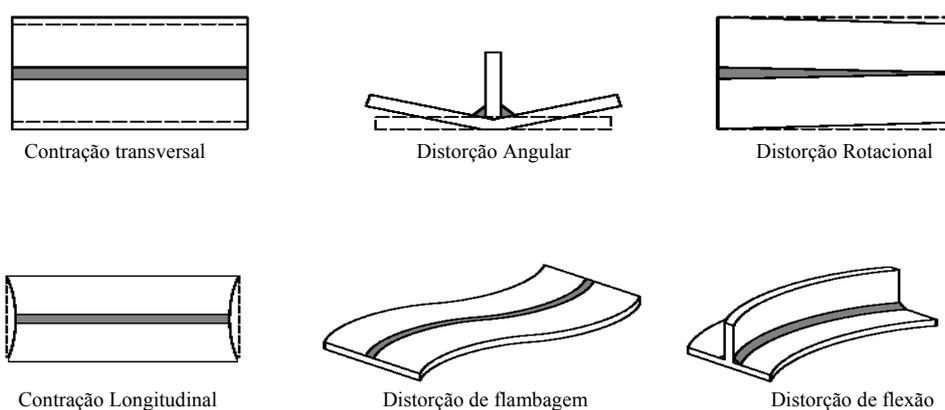


Figura 2: Tipos de distorções

Para determinar o método de prevenção mais efetivo, é necessário identificar o tipo de distorção que geralmente está induzido em uma determinada estrutura. Em ordem de importância, as principais distorções presentes na construção naval e offshore são as distorções de flambagem e angular. Estas resultam em vários problemas na construção naval e offshore. Os principais são: o desalinhamento de componentes estruturais, dificuldade de automação dos processos de fabricação, necessidade de trabalho manual adicional, aumento de custos, redução de eficiência dos processos de fabricação, imprecisão do produto final e perda de resistência estrutural.

Modelagem Numérica

Visando o melhor entendimento da influência das imperfeições geométricas iniciais no colapso de painéis foi realizada uma análise numérica da resistência limite de painéis planos de plataforma semi-submersível. Estudo paramétrico de chapas sob compressão uniaxial, utilizando o método dos elementos finitos, incorporando diferentes razões de aspecto, condições de contorno e magnitudes das imperfeições foram estudadas para verificar a influência destes parâmetros na carga de flambagem.

Para o estudo do colapso dos painéis, as análises foram executadas utilizando o programa de elementos finitos ABAQUS (versão 6.3), Hibbit et al. (2003). Os modelos foram discretizados utilizando o elemento de casca S4, capaz de analisar cascas finas e espessas, incorporando deformações de membrana finitas e grandes rotações. Grandes deslocamentos e plasticidade foram considerados nas simulações computacionais.

As análises em painéis foram realizadas com imperfeições geométricas iniciais do tipo senoidal. Estas foram introduzidas no modelo numérico através das coordenadas nodais da malha. A seguinte expressão é usada para representar as imperfeições:

$$w(x, y) = w_{\max} \operatorname{sen} \left[\frac{\pi x}{a} \right] \operatorname{sen} \left[\frac{\pi y}{b} \right] \quad (1)$$

Os passos de carga de compressão nos painéis foram introduzidos no modelo como deslocamentos prescritos nos nós da extremidade do modelo discretizado.

A curva do material foi obtida através de testes de tração uniaxial de amostras da chapa. A tensão de escoamento do aço é de 365 MPa. Os dados da curva tensão verdadeira versus deformação plástica logarítmica, Figura 3, são fornecidos diretamente ao programa de elementos finitos, assim como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, 207863 N/mm² e 0.3, respectivamente.

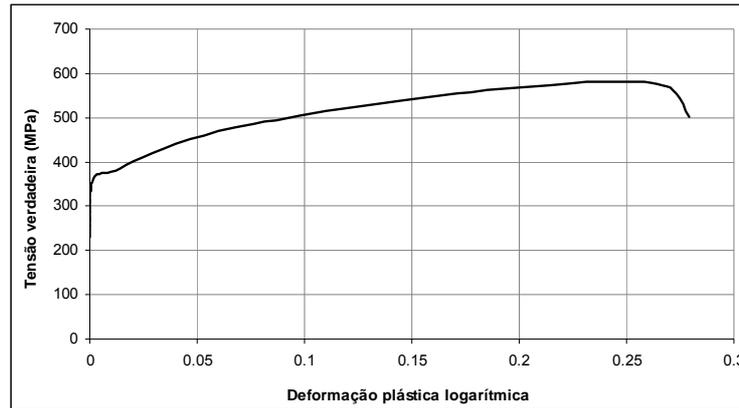


Figura 3: Tensão verdadeira versus deformação plástica logarítmica

Os dados da curva fornecida ao programa em termos da tensão verdadeira e deformação plástica logarítmica são transformados a partir dos valores de tensão-deformação de engenharia através das equações (2) e (3) respectivamente:

$$\sigma_v = \sigma (\varepsilon + 1) \quad (2)$$

$$\varepsilon_v = \ln (\varepsilon + 1) - \sigma_v / E \quad (3)$$

Para validação da malha de elementos finitos foi realizado primeiramente um estudo simultâneo de sensibilidade de malha e de variação dos incrementos. Com este concluído, chegou-se à razão adequada entre o deslocamento aplicado e o número de incrementos. A partir da razão determinada (deslocamento por número de incrementos), foi realizado um novo estudo de sensibilidade de malha. O resultado está ilustrado na Figura 4. Para esta análise foi considerada uma chapa simplesmente apoiada com as dimensões 3000 x 625 x 11.1 mm, com simetria transversal e longitudinal. As seguintes condições de contorno foram adotadas: bordo

de aplicação de carga $U_z = 0$ e $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$; bordo apoiado $U_y = U_z = 0$ e $\theta_y = \theta_z = 0$, onde U_x , U_y e U_z correspondem aos deslocamentos referentes aos eixos x , y e z e θ_x , θ_y , e θ_z as rotações em torno destes eixos. A posição relativa dos eixos é indicada na Figura 5.

A malha selecionada tem quinze elementos na longitudinal e cinco na transversal, apresentando um desvio em relação à malha mais refinada (50 x 16) de 1.76% da tensão máxima no modo de flambagem. Conseqüentemente, a razão de aspecto adotada para o elemento foi 1.6.

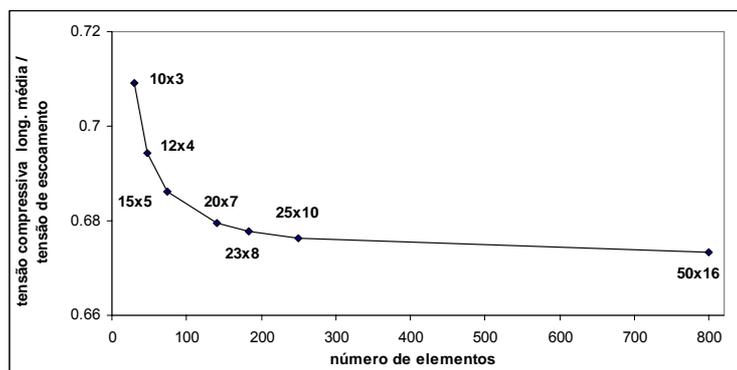
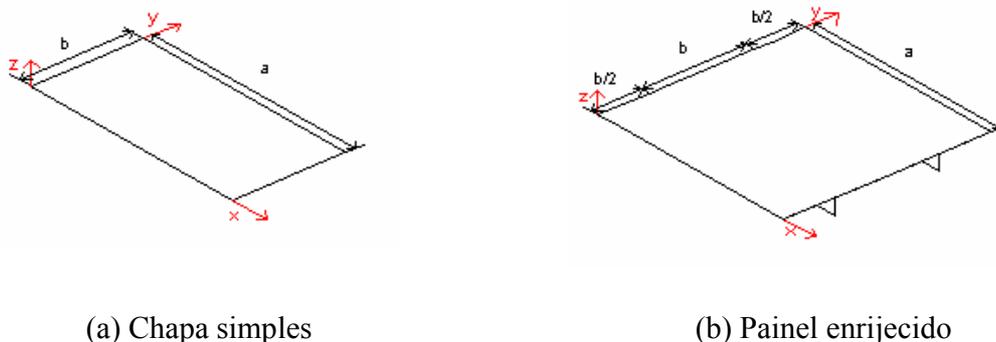


Figura 4: Estudo de sensibilidade de malha

Flambagem Local

Para a análise de flambagem local foram utilizados três modelos: chapeamento simplesmente apoiado e engastado e painel com dois reforços longitudinais, como ilustrado na Figura 5. O modelo com dois reforços busca representar uma condição de contorno mais realista para a chapa entre os mesmos e as condições de bordos apoiado e engastado ilustram condições extremas idealizadas.



(a) Chapa simples

(b) Painel enrijecido

Figura 5: Representação dos painéis analisados

Estudo paramétrico foi conduzido, variando-se o comprimento da chapa e mantendo-se espessura e largura constantes. Em todas as análises foram consideradas simetrias transversal e longitudinal. As dimensões longitudinais das chapas analisadas foram as seguintes: 3000, 2400, 1800, 1500, 1350 e 1200 mm. Espessura e largura foram de 11.1 mm e 625 mm, respectivamente. Em todas as análises as chapas foram discretizadas por quinze elementos na direção longitudinal e na direção transversal alterou-se o número de elementos para que a razão de aspecto do elemento fosse mantida. Dessa forma, as malhas para cada geometria foram: 15 x 5 (3000), 15 x 6 (2400), 15 x 8 (1800), 15 x 10 (1500), 15 x 11 (1350), 15 x 12 (1200).

Para cada geometria foram realizadas três análises, variando-se a amplitude máxima da distribuição de imperfeições geométricas, dada pela expressão (1). As imperfeições máximas iniciais leve e severa foram obtidas através das respectivas expressões: $w_{\max} / t = 0.025\beta^2$ ($w_{\max}=1.54$ mm) e $w_{\max} / t = 0.3\beta^2$ ($w_{\max}=18.54$ mm). A imperfeição média foi obtida através da média aritmética entre as imperfeições leve e severa ($w_{\max}=10.04$ mm). O parâmetro de esbeltez β é função da geometria do painel e das propriedades do material.

O primeiro modelo estudado consiste de chapa plana sem reforços. Duas diferentes condições de contorno foram consideradas para o bordo da chapa: apoiado e engastado. No bordo onde a carga compressiva é aplicada ($x = 0$) as seguintes condições de contorno foram adotadas: $U_z=0$ e $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$. Para o bordo ($y = 0$ e $y = b$) foram adotadas as seguintes condições para apoio e engaste respectivamente: $U_y = U_z = 0$ e $\theta_y = \theta_z = 0$; e $U_y = U_z = 0$ e $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$.

Os gráficos das Figuras 6 e 7 apresentam os resultados da tensão longitudinal média compressiva em relação à variação da amplitude máxima da imperfeição geométrica inicial para o modelo de chapa sem reforços para as condições de bordos apoiado e engastado respectivamente.

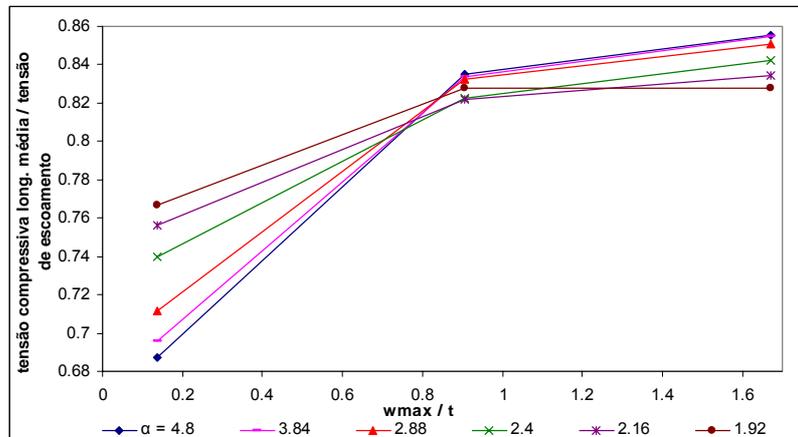


Figura 6: Tensão média versus amplitude máxima da imperfeição inicial / bordo apoiado

Para o bordo apoiado na condição de imperfeição inicial leve o aumento da razão de aspecto α representou uma queda na capacidade de carga. Já para imperfeição inicial média e severa o aumento de α causou um aumento da capacidade de carga, com exceção de $\alpha = 1.92$ que para a imperfeição média apresenta uma maior capacidade de carga do que as chapas com 2.16 e 2.40 de razão de aspecto. Em todas as geometrias o aumento da amplitude máxima inicial representou um respectivo aumento na resistência ao colapso, com exceção para $\alpha = 1.92$ que na condição de imperfeição média e severa apresentou praticamente o mesmo resultado. A maior variação na capacidade de carga da imperfeição leve para a severa, 24.53%, aconteceu para $\alpha = 4.80$.

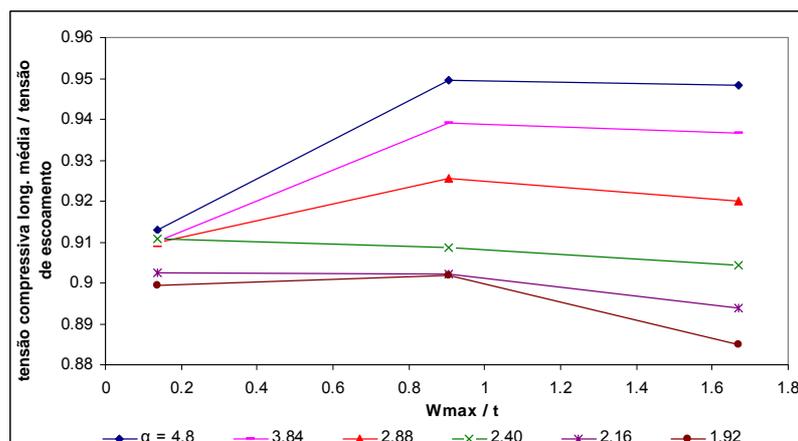


Figura 7: Tensão média versus amplitude máxima da imperfeição inicial / bordo engastado

Com a condição de bordo engastado as chapas com razão de aspecto 4.80, 3.84, 2.88 e 1.92 apresentam um aumento da capacidade de carga da imperfeição leve para a média e uma pequena queda para a severa. As chapas com 2.40 e 2.16 de razão de aspecto apresentam um declínio da capacidade de resistência com o aumento da imperfeição inicial. A maior variação na capacidade de carga da imperfeição leve para a severa, 3.89%, aconteceu para $\alpha = 4.80$.

O próximo modelo estudado foi o painel com dois reforços longitudinais. Para os bordos ($y = 0$ e $y = 2b$) foram consideradas as condições de bordo apoiado. As imperfeições iniciais do tipo senoidal foram introduzidas somente no chapeamento central. Foi modelado meio chapeamento adicional perfeito para cada lado. Para o enrijecedor foram consideradas espessura de 11.1 mm e altura de 111 mm.

A Figura 8 apresenta os resultados da tensão compressiva longitudinal média em relação à variação da amplitude máxima da imperfeição geométrica inicial para a chapa entre reforços.

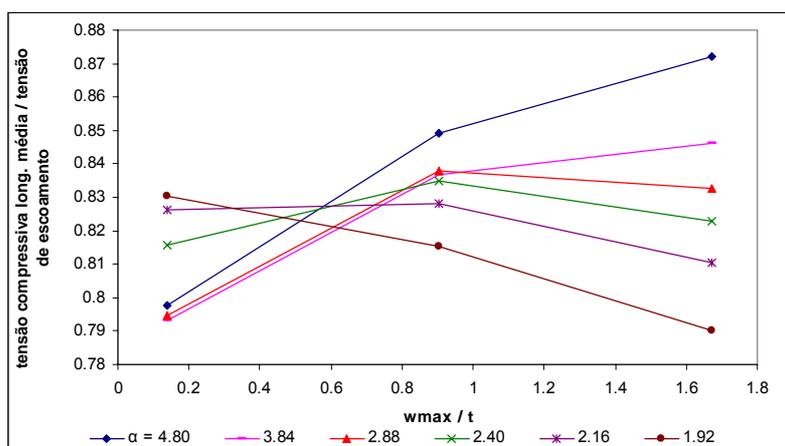


Figura 8: Tensão média versus amplitude máxima da imperfeição geométrica inicial / modelo de chapa entre reforços

Observa-se que as chapas com $\alpha = 4.8$ e 3.84 apresentam aumento da capacidade de carga com o aumento da magnitude da imperfeição inicial. Já as chapas com $\alpha = 2.88$ e 2.4 apresentam um aumento da capacidade de carga até a imperfeição média e posteriormente uma pequena queda para a condição de imperfeição severa. A chapa com $\alpha = 2.16$ apresenta para as imperfeições leve e média praticamente a mesma capacidade de carga e uma queda para a imperfeição severa. A chapa com $\alpha = 1.92$ apresenta um comportamento de queda da

capacidade de carga com o aumento das imperfeições iniciais. A maior variação na capacidade de carga da imperfeição leve para a severa, 9.33%, foi para $\alpha = 4.80$.

Os resultados obtidos para as tensões de flambagem em função da razão de aspecto e magnitude da imperfeição geométrica inicial indicaram que a capacidade estrutural do chapeamento, para as condições de contorno consideradas, não apresentam direta correlação entre aumento da magnitude da imperfeição e queda da tensão de flambagem para a variação de amplitude considerada.

Influência do Modo de Imperfeição Geométrica Inicial

Para o estudo da influência do modo de imperfeição geométrica inicial na capacidade de carga foi obtido o modo natural de flambagem da chapa perfeita para cada razão de aspecto previamente estudada.

Para efeito de comparação da influência do modo de falha na capacidade de carga, foi analisada a chapa com razão de aspecto (α) de 3.84. A Figura 9 ilustra o seu modo natural de flambagem, $m = 5$, onde m indica o número de meias ondas.

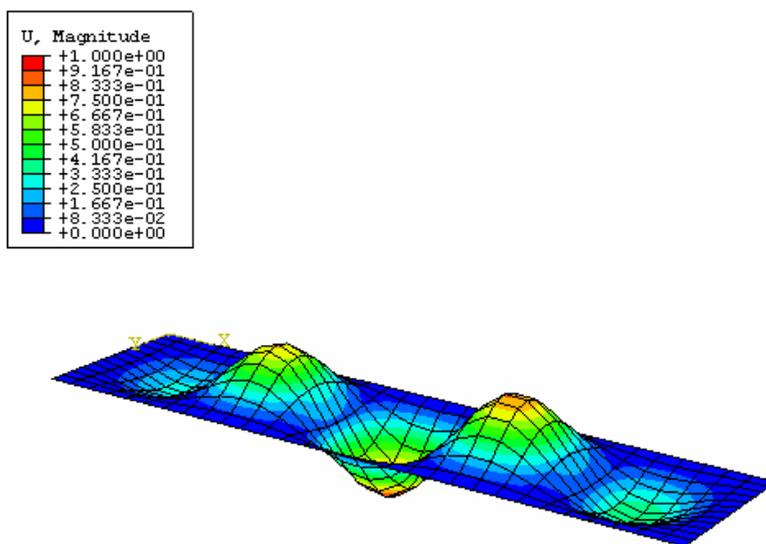


Figura 9: Modo natural de flambagem para $\alpha = 3.84$

Em seguida compararam-se os resultados obtidos de um modelo utilizando como modo de imperfeição uma meia onda e outro com cinco meias ondas ao longo do comprimento. A amplitude máxima de imperfeição inicial adotada foi de 10.04 mm, sendo considerada para o bordo a condição de engaste. O gráfico da Figura 10 apresenta o resultado de tensão média versus deformação média. Analisando o resultado observa-se uma queda na capacidade de carga de 32.25% quando se utiliza uma imperfeição com cinco meias ondas em comparação com a de uma meia onda.

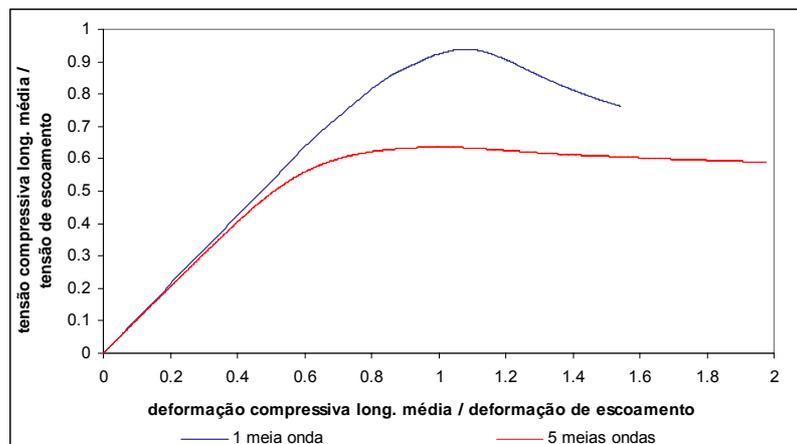


Figura 10: Tensão média versus deformação média

Embora os códigos vigentes somente impõem restrições quanto à magnitude máxima das imperfeições geométricas, os resultados indicam que outros fatores também influenciam a integridade estrutural no caso do modo de falha de flambagem. Como já indicado em estudos anteriores, o modo da distribuição de imperfeições geométricas pode ter influência considerável na tensão de flambagem e deve também ser considerado.

Assim, é imprescindível determinar com precisão os modos e as amplitudes das distorções presentes em chapas em escala real. A medição das distorções é recomendável para a obtenção da real resistência ao colapso de painéis de estruturas navais e offshore.

Foi realizada uma pesquisa em relação aos equipamentos de medição de alta precisão e, após uma avaliação tecnológica dos equipamentos disponíveis, o que se mostrou mais apropriado e com maior precisão foi o Laser Tracker. Trata-se de um sistema de medição portátil apresentando precisão sub-milimétrica. Para a execução da medição de uma superfície

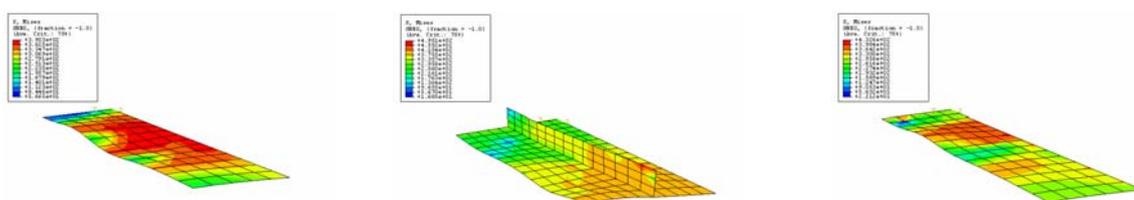
é necessário o posicionamento de uma esfera de metal sob o alvo a ser medido, como ilustrado na Figura 11.



Figura 11: Medição de uma superfície

Modos de Pós-Colapso

Analisando os modos de pós-colapso dos modelos, algumas particularidades são observadas. Em relação à chapa com $\alpha = 4.80$, como indica a Figura 12, para a condição de simetrias longitudinal e transversal (1/4 da chapa) os modos de pós-colapso para as condições de imperfeição média e severa foram praticamente os mesmos para as condições de bordos apoiado e engastado, o que não se observa para a chapa enrijecida.



(a) Bordo apoiado

(b) Placa enrijecida

(c) Bordo engastado

Figura 12: Modo de pós-colapso para imperfeição média / $\alpha = 4.80$

Para complementar o estudo da placa de $\alpha = 4.80$, dois modelos adicionais para a placa enrijecida na condição de imperfeição inicial média foram analisados. Em ambas as análises, apenas foi modificado o valor da espessura do enrijecedor, sendo suas novas espessuras de $2t$ e $3t$, respectivamente, sendo t a espessura da chapa. A curva tensão média versus deformação média do chapeamento entre reforços e do enrijecedor para as três espessuras de

enrijecedores estão ilustradas na Figura 13. Observa-se que, com o aumento da espessura do enrijecedor de t para $3t$, a capacidade de carga do chapeamento entre reforços apresenta pequena elevação de 3.30 %.

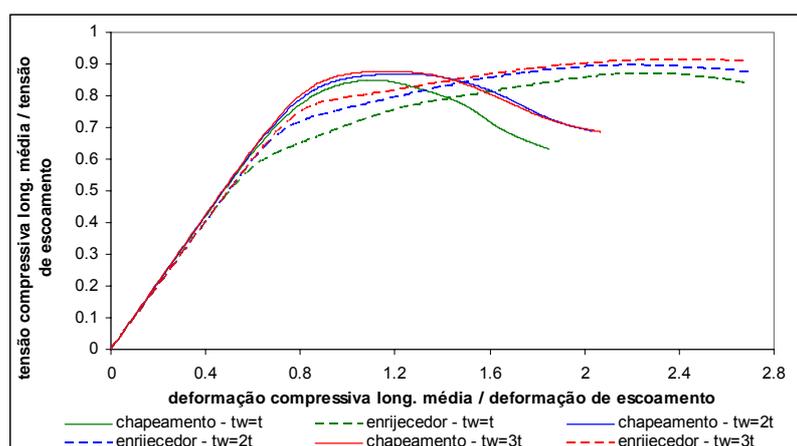
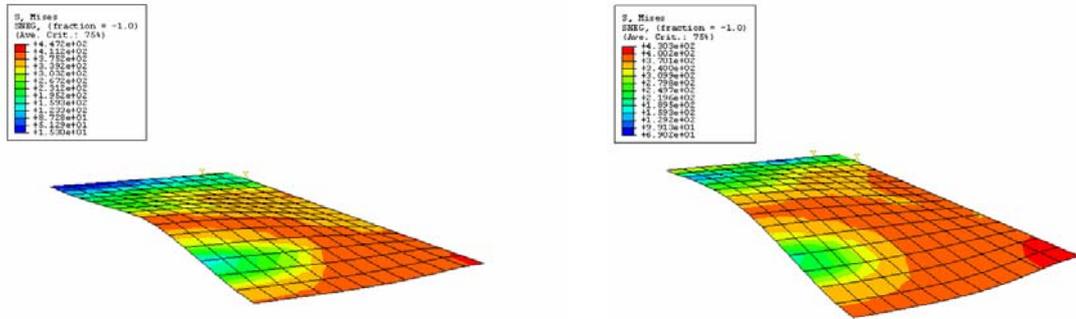


Figura 13: Tensão média versus deformação média para diferentes enrijecedores

Observando-se os modos de pós-colapso nas condições de bordos apoiado e engastado pode-se chegar à conclusão que existem dois grupos distintos em relação aos modos de falha. Com comportamento bastante similar à chapa de $\alpha = 4.80$ estão as chapas com $\alpha = 3.84$ e 2.88 . O outro grupo é composto pelas chapas com $\alpha = 2.4$, 2.16 e 1.92 , que apresentam no modo de falha de pós-colapso o mesmo número de meias ondas, $m = 3$, que os obtidos para o modo natural de flambagem para as respectivas chapas perfeitas, como indicado em Hughes (1988). A Figura 14 ilustra para $\alpha = 2.16$ (1/4 da chapa) o modo de pós-colapso para a condição inicial de uma meia onda e de 3 meias ondas para o bordo engastado e amplitude da imperfeição inicial de 10.04 mm. A queda na tensão de flambagem utilizando 3 meias ondas foi de $\sigma/\sigma_0 = 0.90$ para 0.62, ou seja, 31.11%.

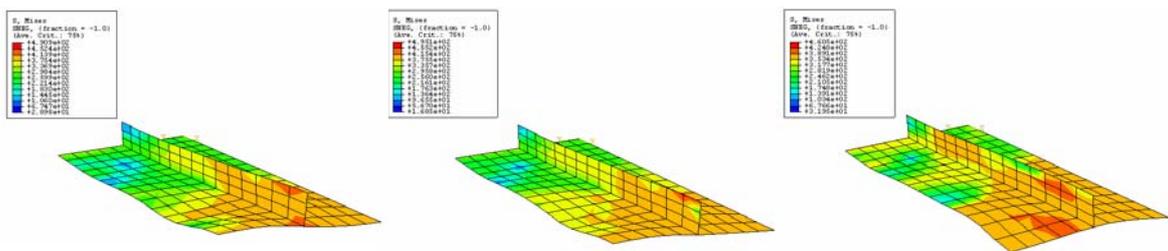


(a) 1 meia onda de imperfeição inicial

(b) 3 meias ondas de imperfeição inicial

Figura 14: Modo de pós-colapso para a condição de imperfeição inicial média / $\alpha = 2.16$

Em relação aos modelos de chapas enrijecidas, todas as geometrias apresentam praticamente o mesmo modo de pós-colapso, com exceção para as chapas de $\alpha = 4.80$ e $\alpha = 3.84$ para as condições de imperfeições severa e leve, respectivamente. As Figuras 15 e 16 ilustram respectivamente as chapas de razão de aspecto de 4.80 e 3.84 para as condições de imperfeição leve ($w_{\max}=1.54$ mm), média ($w_{\max}=10.04$ mm) e severa ($w_{\max}=18.54$ mm).

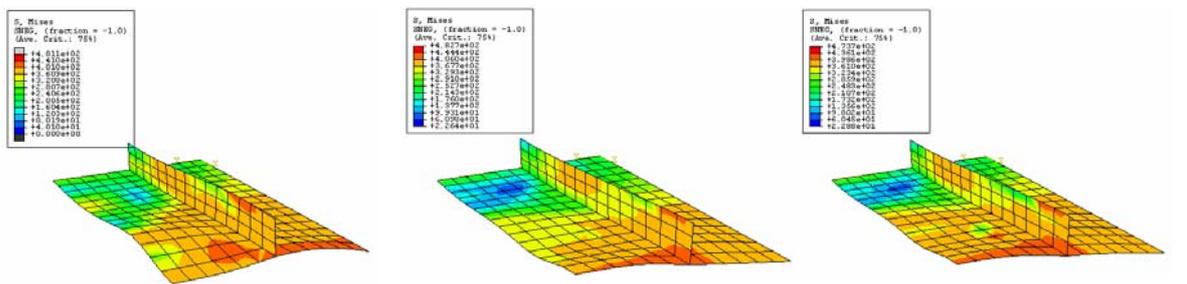


(a) Imperfeição leve

(b) Imperfeição média

(c) Imperfeição severa

Figura 15: Modo de pós-colapso para a chapa de razão de aspecto de 4.80



(a) Imperfeição leve (b) Imperfeição média (c) Imperfeição severa

Figura 16: Modo de pós-colapso para a chapa de razão de aspecto de 3.84

Conclusões

O estudo paramétrico de chapas sob compressão uniaxial, utilizando o método dos elementos finitos, incorporando diferentes razões de aspecto, condições de contorno e magnitudes das imperfeições geométricas confirmaram a influência destes parâmetros na carga de flambagem. Porém, o fator que se mostrou de maior importância e efeito deletério na capacidade de carga foi o modo da imperfeição inicial. Distorções iniciais que não coincidem com o modo natural de flambagem têm o efeito de aumentar a resistência ao colapso, enquanto aquelas que coincidem geram os menores valores da tensão compressiva de flambagem.

Assim, as medições das distorções, modo e amplitude, através de equipamentos de alta precisão, se mostram necessárias para a determinação da real resistência ao colapso da estrutura.

Estudos adicionais se fazem necessários para o melhor entendimento dos efeitos de diferentes amplitudes associadas a diferentes modos da distribuição das imperfeições geométricas iniciais. Todavia, deve-se enfatizar a necessidade do desenvolvimento de recomendações quanto aos modos das imperfeições geométricas nos códigos vigentes para projeto e construção de navios e plataformas oceânicas, além das recomendações usuais quanto à magnitude.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Agência Nacional de Petróleo (ANP) aos bolsistas de iniciação científica Tiago P. Estefen e Diogo do Amaral. Agradecem também ao CNPq e à FAPERJ pelo apoio às pesquisas em andamento no Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ sobre Painéis Enrijecidos de Estruturas Oceânicas.

Referências

- Estefen, S.F., Harding, J. Ring stiffener behaviour and its interaction with cylindrical panel buckling. *Proceedings Institution of Civil Engineers*, v.75, p. 243-264, 1983.
- Faulkner, D. Compression tests on welded eccentrically stiffened plate panels, in: *Steel Plated Structures*, Crosby Lockwood Staples Ed., London, 1976.
- Gordo, J. M., Guedes Soares, C. Efeito das imperfeições geométricas iniciais na resistência de placas, in: *o Mar Fonte de Desenvolvimento Sustentável, 8^{AS} Jornadas Técnicas de Engenharia Naval*, p. 385-404, 2002.
- Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc. *User`s and Theory Manuals*. Versão 6.3-5, 2003.
- Hughes, F. O. *Ship structural design*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, 1988.
- Mateus, A. F., Witz, J. A. Parametric study of the post-buckling behaviour of steel plates, in *Engineering Structures* 23, p. 172-185, 2001.
- Pasqualino, I. P., Estefen, S. F., Netto, F. A. Ultimate strength of ships`panels, in: *Int. Shipbuild. Progr.*, 48, no. 2, p. 103-116, 2001.
- Masubuchi, K, *Analysis of welded structures*, Pub. Pergammon Press, 1980.
- Smith, C. S., Kirkwood, W. Influence of initial deformations and residual stresses on inelastic flexural buckling of stiffened plates and shells, in: *Steel Plated Structures*, Crosby Lockwood Staples Ed., London, 1976.
- Søreide, T. H., Bergan, P. G., Moan, T. Ultimate collapse behaviour of stiffened plates using alternative finite element formulations, in: *Steel Plated Structures*, Crosby Lockwood Staples Ed., London, 1976.