



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

ANÁLISE NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA LIMITE DE PAINÉIS PLANOS DE PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL

Tiago Pace Estefen¹, Segen Farid Estefen²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica / Departamento de Engenharia Naval e Oceânica / Caixa Postal 68508/CEP 21945-970/RJ, tiago@lts.coppe.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE / Programa de Engenharia Oceânica / Caixa Postal 68508/CEP 21945-970/RJ, segen@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 a 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, com e sem reforços, 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.

Palavras-chave: resistência limite, flambagem, pós flambagem, modo de falha

Abstract – The new structural concepts of semi-submersible platforms for oil and gas production have columns formed by stiffened flat panels, under uniaxial load compression. The present work consists of analyzing the ultimate strength of typical panels. For this analysis a finite element program was employed, considering geometric and material non-linearities. Distortions caused by the manufacture process are idealized aiming at the study of the panel behaviour with and without stiffeners, through the curves of resistance stress-strain. The study considers the effect of the aspect ratio, boundary conditions and both amplitude and mode of the initial geometric imperfections on the structural strength.

Keywords: ultimate strength, buckling, post buckling, failure mode

Nomenclatura

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

1. 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 iniciais 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.

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. Sørensen 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 então instalada. 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 relevante no 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.

2. Descrição da Análise

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.

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:

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

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 1, 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.

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 (2.1) e (2.2), respectivamente:

$$\sigma_v = \sigma (\varepsilon + 1) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_v = \ln (\varepsilon + 1) - \sigma_v / E \quad (2.2)$$

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 e o resultado encontrado está ilustrado na Figura 2. 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 $\theta_y = \theta_z = 0$.

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.

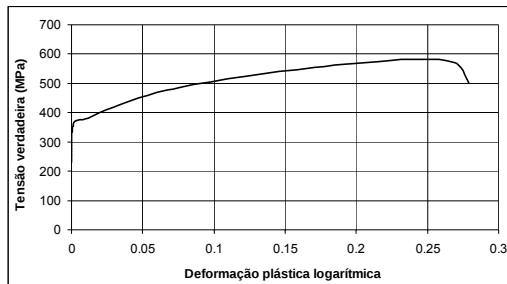


Figura 1: Tensão verdadeira x deform. plástica logarítmica

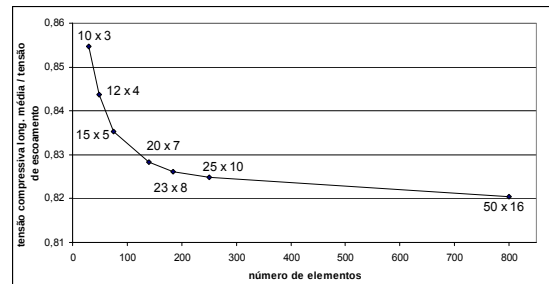
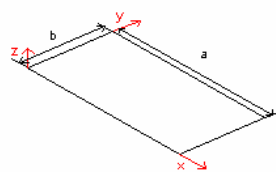


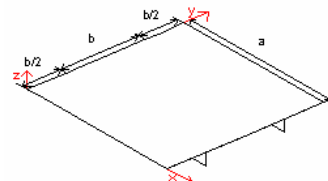
Figura 2: Estudo de sensibilidade de malha

3. Análise de 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 3. O modelo com dois reforços busca representar uma condição de contorno mais realista para a chapa entre os mesmos e a condição de bordo apoiado resultados mais conservadores.



(a) Chapa simples



(b) Painel enrijecido

Figura 3: Representação dos painéis analisados

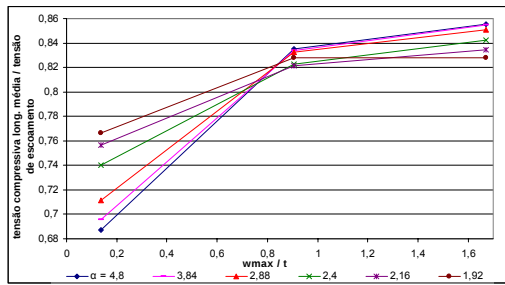
Estudo paramétrico foi conduzido, variando-se o comprimento da chapa e mantendo-se a espessura e a largura constantes. Em todas as análises foram consideradas simetrias transversal e longitudinal. As dimensões longitudinais das chapas analisadas foram as seguintes: 3000, 2400, 1800, 1500, 1350 e 1200 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 inicial leve e severa foram obtidas através das respectivas expressões: $w_{\max} / t = 0.025\beta^2$ e $w_{\max} / t = 0.3\beta^2$. A imperfeição média foi obtida através da média aritmética entre as imperfeições leve e severa. O parâmetro de esbeltez β é função da geometria do painel e das propriedades do material.

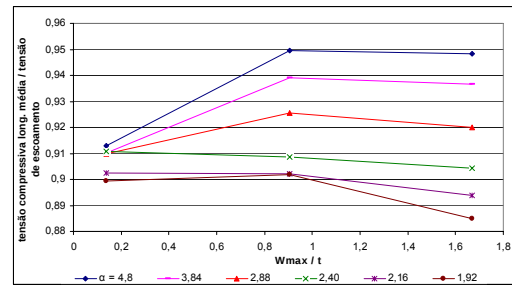
O primeiro modelo estudado consiste de chapa plana sem reforços. Duas diferentes condições de contorno foram consideradas para o bordo da chapa: apoiado e engastado. No bordo onde a carga compressiva é aplicada ($x = 0$) as seguintes condições de contorno foram adotadas: $U_z = 0$ e $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$. 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 da Figura 4 apresentam os resultados da tensão longitudinal média compressiva em relação à variação da amplitude máxima da imperfeição geométrica inicial para as condições de bordos apoiado e engastado.



(a) borda apoiado



(b) borda engastado

Figura 4: Tensão média versus amplitude máxima da imperfeição inicial – modelo de chapa sem reforços

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 $\alpha = 4,80$.

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 modelo seguinte 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 5 apresenta os resultados da tensão compressiva longitudinal média em relação à variação da amplitude máxima da imperfeição geométrica inicial para a chapa entre reforços.

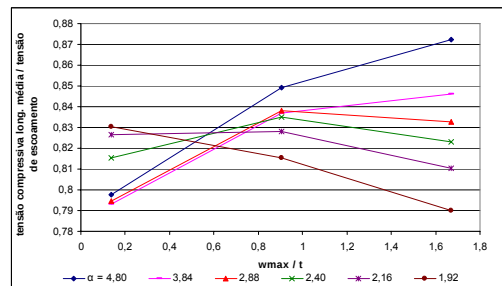


Figura 5: Tensão média versus amplitude máxima da imperfeição geométrica inicial – modelo de chapa entre reforços

Observa-se que as chapas com $\alpha = 4,8$ e 3,84 apresentam aumento da capacidade de carga com o aumento da 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.

3.1 Influência dos modos 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 6 ilustra o seu modo natural de flambagem, $m = 5$. Em seguida comparou-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 7 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.

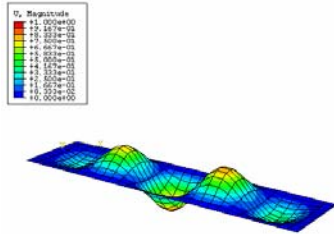


Figura 6: Modo natural de flambagem para $\alpha = 3,84$

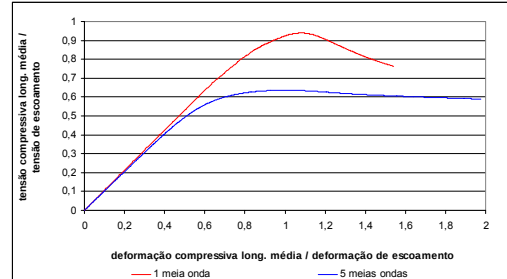


Figura 7: Tensão média versus deformação média

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 analisado quanto à sua influência.

3. 2 Comparação dos 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 8, 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.

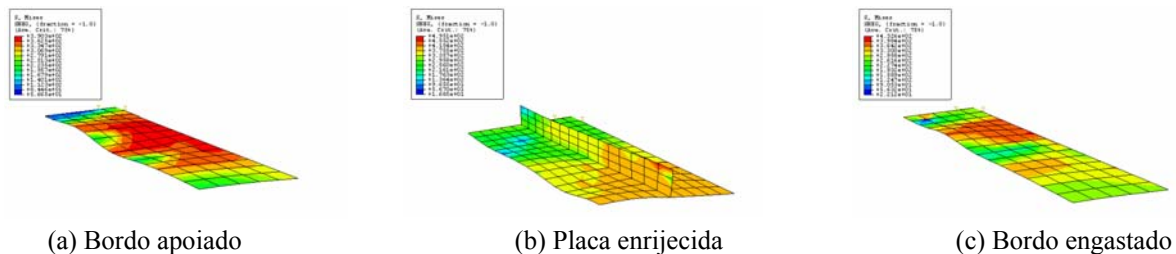


Figura 8: Modo de pós-colapso para imperfeição média – $\alpha = 4,80$

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. A curva tensão média versus deformação média do chapeamento entre reforços e do enrijecedor para as três espessuras de enrijecedores estão ilustradas na Figura 9. 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 %.

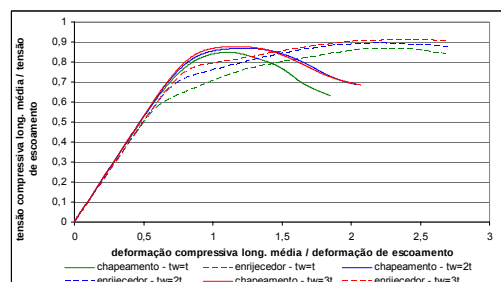
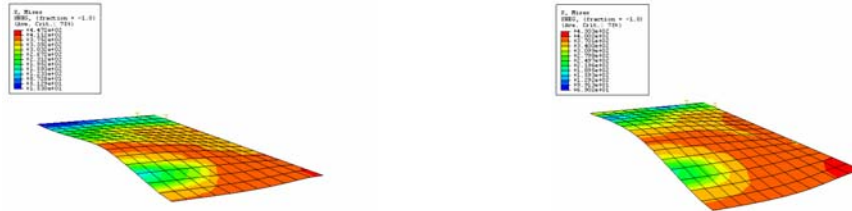


Figura 9: Tensão média versus deformação média para diferentes enrijecedores

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 10 ilustra para $\alpha = 2,16$ 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 10: 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.

4. 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 mostraram 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.

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 de inclusão 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.

5. Agradecimentos

O autor Tiago Pace Estefen agradece a Agência Nacional de Petróleo (ANP) pela bolsa de iniciação científica e ao Laboratório de Tecnologia Submarina – COPPE / UFRJ pelo suporte técnico.

6. 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.
- 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.