FLEXÃO TRANSVERSAL DE PAINÉIS REFORÇADOS INDUZIDA POR ESFORÇO LONGITUDINAL COMPRESSIVO

José Manuel Gordo

CENTEC Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa Av. Rovisco Pais, Lisboa e-mail: jose.gordo@ist.utl.pt

Palavras-chave: Compressão de painéis, Flexão induzida, Colapso de placas reforçadas

Resumo. A estrutura resistente dos navios de dimensões médias e grandes é composta por chapas finas reforçadas por elementos longitudinais, os quais são suportados e travados por uma estrutura transversal, as balizas e anteparas, normalmente de maiores dimensões e mais resistentes.

Na análise da resposta estrutural de painéis reforçados à compressão segundo a direcção longitudinal negligencia-se, usualmente, a acção do travamento transversal devido à presença das balizas. A acção destas é simulada considerando que as mesmas podem ser substituídas por apoios simples e desprezando a sua rigidez segundo a sua maior dimensão por esta se apresentar perpendicular ao carregamento.

No entanto, quer a compressão quer a tracção longitudinais conduzem inevitavelmente ao desenvolvimento de tensões e deslocamentos na direcção transversal. Estes esforços são contra actuados pelas balizas, atingindo-se um equilíbrio em que as placas constituintes dos painéis reforçados ficam sujeitos a uma compressão biaxial e as balizas ficam sob tracção e eventual flexão sob a aplicação de esforços axiais longitudinais externos de compressão, e vice-versa no caso de tracção.

O presente estudo analisa a resposta estrutural de painéis reforçados sob compressão axial, quantificando o estado de tensões dos elementos constitutivos do painel nas diferentes fases de carga: pré-colapso, colapso e pós-colapso.

É ainda estudada a dependência da resistência máxima à compressão relativamente às dimensões das balizas.

1 INTRODUÇÃO

Os navios são, do ponto de vista estrutural, construções normalmente metálicas e em aço, concebidas de forma a serem bastante resistentes mas simultaneamente muito leves. Neste pressuposto, a sua estrutura resistente é constituída maioritariamente por placas contínuas reforçadas por elementos lineares resistentes segundo as duas direcções principais.

Um dos aspectos fundamentais do dimensionamento estrutural do casco resistente é a previsão da resistência à compressão dos diversos painéis contínuos que o constituem. Esta previsão de resistência pode ser feita com base em códigos de projecto, tais como o Eurocódigo 3 [1], regras das Sociedades Classificadoras [2], métodos semi-empíricos [3], simulação por elementos finitos [4] ou em ensaios em laboratório [5-7].

Em todos os métodos não laboratoriais a resistência à compressão é estimada assumindo que a resistência do painel pode ser representada pela resistência de uma placa reforçada com uma largura da chapa associada igual ao espaçamento entre reforços existentes na direcção do carregamento e reforçada a meio com um dos perfis, os quais normalmente são todos iguais. O comprimento da placa reforçada é igual à distância entre os reforços perpendiculares ao carregamento, sendo estes reforços substituídos por condições tradicionais de apoio simples. Nestas circunstâncias, é desprezada a acção dos reforços transversais (balizas) na resposta da coluna placa reforçada. Esta acção caracteriza-se pela restrição ao livre movimento das bainhas da direcção transversal ao carregamento uniaxial. Este estado biaxial de tensões na placa tem uma resultante não nula que é absorvida pela baliza levando à sua flexão e originando deformações fora do plano inicial que poderão afectar a resistência de todo o painel, reduzindo a sua capacidade de carga à compressão ou afectando a sua integridade geométrica por deformações permanentes nas balizas.

Este último tipo de situação foi detectado em ensaios laboratoriais de placas reforçadas com 3 vãos e vários reforços sujeitas a compressão uniaxial [5-7] e em ensaios de flexão pura em caixões de parede fina e reforçada com 3 ou 4 vãos de baliza [8] em que, nalguns casos, foi detectado um colapso violento com flexão permanente das balizas.

O presente estudo pretende quantificar o nível de tensões envolvidas na flexão transversal induzida das balizas e avaliar os seus efeitos na resistência à compressão de painéis, tomando como modelo um dos ensaios acima mencionados.

2 MODELAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

Para o presente estudo considerou-se como modelo uma placa reforçada com quatro reforços longitudinais em barra e duas balizas em 'L', correspondente a três vãos de baliza e idêntica à utilizada nos ensaios realizados por Gordo e Guedes Soares [5], tal como se mostra na Figura 1.

2.1 Características geométricas e propriedades mecânicas

A placa de referência tem um espaçamento entre balizas (*a*) de 300mm e um espaçamento entre reforços longitudinais (*b*) de 150mm, sendo a razão de dimensões *a/b* de 2. Analisou-se ainda placas similares com vão (*a*) igual a 200mm e 400mm, respectivamente menos e mais esbeltas do que a de referência. Os reforços longitudinais em todas elas são barras de 30 mm de altura e 8 mm de espessura em aço com uma tensão de cedência (σ_{ys}) de 343 MPa.

A chapa associada é feita de aço de alta resistência S690 com uma tensão de cedência (σ_{yp}) de 690 MPa. O módulo de elasticidade (*E*) considerou-se igual a 200 GPa para todos os tipos de aço. A espessura das chapas (*t*) é 4mm pelo que a esbelteza das placas, dada pela equação 1, é constante e igual 2.2.

(1)

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{yp}}{E}}$$



Figura 1- Geometria da placa reforçada com barras (B300) [5] e deformações após ensaio na teste do painel B200 [6].

As balizas de referência são perfis 'L' com 50mm de altura da alma, 10mm de largura da flange e 6mm de espessura em aço de 240 MPa de tensão de cedência. Para o estudo da influência das balizas variou-se a altura dos perfis para 35, 40, 60 e 100mm, a que correspondem áreas transversais e módulos resistentes das balizas crescentes.

2.2 Modelo de elementos finitos

Os modelos foram criados em Ansys e simulados na versão 13.0, tendo-se utilizado o elemento SHELL281. Na Figura 2 apresenta-se o modelo e a respectiva malha. As imperfeições iniciais introduzidas modelam as imperfeições resultantes da manufactura na placa entre reforços longitudinais, reforços longitudinais entre balizas e falta de perpendicularidade dos reforços entre balizas.



Figura 2 – Modelo de elementos finitos da placa B300T50

3 INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DAS BALIZAS EM PAINÉIS HIBRIDOS

Os painéis utilizados nos ensaios e descritos atrás apresentam diferentes propriedades mecânicas e em particular na tensão de cedência. Este aspecto levanta problemas para a análise dos resultados e sua comparação, já que os reforços cedem a tensões inferiores à da chapa associada. No entanto, mantém-se alguma capacidade de absorver carga após a tensão de cedência do reforço ter sido excedida. A força máxima (F_{sq}) que o painel suporta é dada por:

$$F_{sq} = \sigma_{Yp} A_p + \sigma_{Ys} A_s \tag{2}$$

 A_p e A_s são as áreas da chapa associada e do reforço e pode-se definir uma tensão de cedência equivalente dada por:

$$\sigma_{Yeq} = \frac{\sigma_{Yp}A_p + \sigma_{Ys}A_s}{A_p + A_s}$$
(3)

A extensão de cedência equivalente define-se por:

$$\varepsilon_{Yeq} = \frac{\sigma_{Yeq}}{E} \tag{4}$$

Nos modelos apresentados, a tensão equivalente é 591 MPa e a Figura 3 compara as propriedades mecânicas do aço equivalente com as do modelo híbrido real.

A extensão de cedência equivalente é intermédia entre a do reforço e da placa mas não corresponde a nenhum ponto real mecanicamente relevante.



Figura 3 - Propriedades mecânicas dos materiais, painel e modelo equivalente

3.1 Acção das balizas

A existência de balizas restringe o movimento da chapa e dos reforços longitudinais na direcção perpendicular ao carregamento.

Considere-se um corte transversal no painel reforçado entre duas balizas. A secção é constituída por uma chapa de espessura *t* e largura igual ao espaçamento entre balizas *a*, reforçada por um perfil com uma área transversal A_b e um momento de inércia I_b. A área total do conjunto é A e o momento de inércia é I, em que o eixo neutro está à distância δ da intersecção entre a chapa e a baliza. A área da chapa associada para efeito da flexão da baliza é A_{pl} (= *a.t*).

Considere-se ainda que este modelo não tem imperfeições iniciais e se está numa fase linear e elástica do carregamento longitudinal do painel, isto é, perpendicular a esta estrutura reforçada.

Devido ao efeito de Poisson, v, desenvolvem-se na chapa tensões transversais, σ_t , induzidas pelo carregamento longitudinal, σ_l , cujo valor máximo pode ser expresso pela equação (5), se os movimentos transversais estiverem totalmente restringidos:

$$\sigma_t = \mathbf{v} \cdot \sigma_l \tag{5}$$

Estas tensões transversais vão flectir o conjunto baliza/chapa associada. Na junção chapa reforço o estado de tensão correspondente (σ_y) é a soma da tensão axial uniforme e da tensão de flexão do conjunto devido à acção da força *F* resultante da tensão induzida pelo carregamento. Assim tem-se:

$$F = -\sigma_i \cdot A_{pl} \tag{6}$$

$$\sigma_y = \frac{F}{A} + \frac{F \cdot \delta^2}{I} \tag{7}$$

Esta tensão gera uma extensão na placa dada por:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \left(\frac{F}{A} + \frac{F \cdot \delta^2}{I} \right) \tag{8}$$

A extensão reduz a tensão induzida na placa pelo carregamento longitudinal conduzindo à modificação da eq. (5).

$$\sigma_i = \mathbf{v} \cdot \sigma_l + E \varepsilon_{\mathbf{v}} \tag{9}$$

Resulta, finalmente, que a relação entre a tensão na chapa associada e a tensão aplicada no painel, afectada da flexão da baliza, é:

$$\sigma_{i} = k \cdot \nu \cdot \sigma_{l}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{A_{pl}}{A} \left(1 + \frac{A \cdot \delta^{2}}{I}\right)}$$
(10)

A baliza, por si só, está sujeita a uma tensão máxima, na junção, de:

$$\sigma_{y} = -k \cdot v \cdot \sigma_{l} \frac{A_{pl}}{A} \left(1 + \frac{A \cdot \delta^{2}}{I} \right)$$
(11)

A flange da baliza de altura *h* está sujeita a uma tensão de:

$$\sigma_{h} = k \cdot \nu \cdot \sigma_{l} \frac{A_{pl}}{A} \left(\frac{A \cdot \delta(h - \delta)}{I} - 1 \right)$$
(12)

Assim, num painel reforçado com balizas sob a acção de carregamentos longitudinais, a chapa associada está sujeita a uma tensão induzida dada pela eq. (10) e a baliza está sujeita a tensões de sinal contrário junto à chapa de acordo com a eq. (11) e tensões na flange dadas pela eq. (12).

Note-se que o factor k é ainda afectado pelas imperfeições iniciais, reduzindo-se o seu valor na presença destas e com a intensidade do carregamento aplicado.

4 SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

4.1 Série B300

Nesta série de referência estudou-se em detalhe os vários aspectos sobre as consequências da modelização de placas reforçadas na resistência das mesmas, resultante da variação da rigidez dos elementos transversais.

Analisaram-se oito modelos com diferentes geometrias de baliza. Para além do modelo do ensaio que tem uma altura de alma de 50mm (B300T50), estudou-se os modelos com almas menores, de 35 e 40mm, e maiores, com 100mm e 100mm com dupla espessura (T100x12).

Finalmente analisou-se a resposta de um modelo tradicional sem baliza (T0SB), com baliza mas restrição ao movimento fora do plano (TZ0) e ainda restrição às rotações nas balizas (T0ZR0). Os resultados estão apresentados na Figura 4.

A análise dos resultados permite concluir que a partir de uma determinada rigidez das balizas transversais não existe grande variação da curva de resposta da placa reforçada à compressão. Para esta placa os modelos com uma altura da alma de 100mm apresentam a mesma resposta e o mesmo valor de resistência máxima quer a espessura seja 6 ou 12 mm. Note-se que a duplicação da espessura da baliza corresponde sensivelmente a uma duplicação do momento de inércia da baliza. Os modelos tradicionais sem balizas (TOSB, TZO, TOZRO) apresentam uma resposta semelhante aos anteriores com balizas muito rígidas.



Figura 4 - Curvas tensão média normalizada, extensão média normalizada para a série B300

No entanto, ao reduzir o momento de inércia das balizas, assiste-se a uma redução da resistência máxima do painel que tende a agravar-se com a diminuição das dimensões da baliza. No presente caso tem-se uma redução máxima da resistência de 14,6%, isto é, de 0,662 para 0,572.

Salienta-se ainda que o alongamento ao qual ocorre a resistência máxima reduz-se substancialmente com a redução do momento de inércia da baliza.

Para todas as curvas dá-se uma redução acentuada no módulo tangente no ponto onde o reforço atinge a cedência, isto é para uma eficiência acima de 0,5 aproximando-se do valor teórico de 0,58 com o aumento da rigidez das balizas.

A análise da deformada do painel na fase de resistência máxima permite identificar as razões para a redução de resistência, como se mostra na Figura 5.



Figura 5 – Deformada do painel com altura de alma da baliza de 35mm (esquerda), 50mm (centro) e 100mm (direita)

A deformada vertical ao centro da baliza duplica aproximadamente ao reduzir-se a altura da alma de 100 para 50 e de 50 para 35mm, e em estados de carregamento compressivo mais baixos. Esta flexão acentuada das balizas com menor área transversal e momento de inércia é exclusivamente resultado do desenvolvimento de tensões transversais na chapa associada, σ_t , e que atinge valores proporcionais às tensões de compressão longitudinais aplicadas, σ_t , e ao coeficiente de Poisson, v, como se apresentou na eq. (10), e *k* que depende da deformada vertical do painel, da área e do momento de inércia das balizas, e que se reduz com a intensificação do carregamento externo.

Na Figura 6 apresenta o estado de tensões do painel de referência B300T50 na fase de colapso por falha do reforço no vão central. É evidente o nível elevado de tensões transversais induzidas de compressão (à direita) resultantes das forças longitudinais aplicadas à placa (à esquerda), associadas a uma distribuição vertical de tensões na baliza que variam entre a tracção na base para compressão na flange.



Figura 6 – Distribuição de tensões longitudinais aplicadas (esquerda) e transversais induzidas (direita) no painel com alma de 50 mm à resistência máxima.

Esta distribuição de tensões na baliza está de acordo, qualitativamente, com os valores referidos nas eq. (11) e (12). Esta distribuição de tensões segundo a direcção da baliza é mais explicita a baixas tensões de compressão do painel em regime elástico (Figura 7 à esquerda) e na ausência de imperfeições iniciais (Figura 7 à direita).



Figura 7 – Distribuição de tensões transversais induzidas na fase inicial de carregamento para o painel B300 com e sem imperfeições iniciais, respectivamente à esquerda e direita

Neste painel sem imperfeições iniciais e na fase elástica para uma tensão aplicada de 100 MPa, têm-se uma induzida na placa de 16 MPa, de -14,5 MPa na junção da baliza com a chapa e de 4,5 MPa na flange da baliza, de acordo com as equações 10, 11 e 12. Estes níveis de tensões induzidas podem conduzir, em determinadas condições, à plastificação local da baliza. Na Figura 8 é possível identificar as deformações plásticas na baliza junto à chapa associada numa imediatamente a seguir ao colapso da chapa.



Figura 8 – Extensões plásticas da direcção transversal ao carregamento (esquerda) e na direcção do carregamento (direita)

4.2 Série B200 e B400

Um dos factores que influenciam as tensões longitudinais induzidas é a área longitudinal da chapa associada que depende directamente do vão entre baliza. Por sua vez, o vão entre

balizas afecta a resistência do painel à compressão por fazer variar a esbelteza de coluna [1-3].

Assim, é expectável que a flexão induzida tenha diferente efeito em função do comprimento do vão de baliza. Foram, então analisados os casos de painéis menos esbeltos [6], série B200, e mais esbeltos [7], série B400.

Na Figura 9 apresenta-se as curvas de resposta dos painéis B200 para diferentes geometrias das balizas e ainda com imperfeições iniciais inversas das do modelo de referência, (B200T50I), que tendem a contrair o colapso por falha do reforço.

A resistência à compressão dos painéis B200 é superior à dos painéis B300, como seria de esperar, por serem menos esbeltos.

Confirma-se a redução de resistência à compressão do painel com a redução das dimensões da baliza, tendo-se uma redução de 8,7% da resistência do painel B200T35 (35mm de altura da alma) em relação ao painel B200T100 (100mm de altura de alma).

Na Figura 10 apresenta-se os resultados para os painéis mais esbeltos da série B400 (400mm de vão entre balizas).

A resistência à compressão já é bastante baixa devido à elevada esbelteza de coluna, ultrapassando em pouco metade da tensão equivalente do painel. Por esta razão a variação de resistência entre o painel com balizas mais reforçadas e o painel com balizas mais fracas é de 5,6%. No entanto a tendência é a mesma quer na resistência máxima quer na redução do alongamento à resistência máxima.



Figura 9 - Curvas tensão média normalizada, extensão média normalizada para a série B200

Note-se que a resistência máxima é muito mais dependente da forma das imperfeições do que na série B200, como se pode ver pela forma da curva de resposta do painel B400T50I com as



imperfeições iniciais simétricas das dos restantes painéis, contrariando a forma de colapso natural ou crítica.

Figura 10 - Curvas tensão média normalizada, extensão média normalizada para a série B400

4.3 Síntese

Na Figura 11 e Tabela 1 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos para a resistência máxima normalizada pela resistência à cedência de todo o painel (eq. 2) em função da rigidez da baliza, expressa pela altura da sua alma, e pelo vão entre balizas que afecta a esbelteza de coluna do painel e a respectiva carga crítica.

Tabela 1 - Resistência máxima normalizada pela resistência à cedência em função da altura da alma da baliza e do vão entre balizas

Alma h	35	40	50	60	100
B200	0.587	0.599	0.620	0.632	0.644
B300	0.490	0.511	0.546	0.556	0.567
B400	0.428	0.436	0.446	0.447	0.453



Para cada uma das curvas nota-se a existência de uma zona a partir da qual a degradação de resistência se torna irrelevante. Este ponto de comportamento diferencial aumenta em termos da altura da alma com a diminuição do vão de baliza, isto é, com a diminuição da esbelteza de coluna. Tal facto é perfeitamente justificável do ponto de vista mecânico pois painéis menos esbeltos suportam tensões máximas maiores e consequentemente as tensões induzidas são maiores, tal como é expresso pela eq. (10) para o regime elástico.

A taxa máxima de degradação da resistência do painel dá-se para vãos de baliza intermédios.

5 CONCLUSÕES

O carregamento longitudinal de painéis contínuos induz tensões transversais ao carregamento que provocam a flexão das balizas de travamento do painel e conduzem a um estado biaxial de tensões nas chapas. As tensões de flexão na baliza podem atingir valores significativos, da ordem de 15% das tensões aplicadas.

Em consequência da deformação para fora do plano inicial do painel resultante desta flexão, a resistência máxima pode degradar-se podendo atingir valores significativos nos casos analisados.

Também as tensões de flexão induzidas devem ser consideradas sempre que os painéis estejam sujeitos a compressão longitudinal e a pressão lateral significativa. Neste caso as tensões induzidas deverão corrigir as tensões resultantes da pressão lateral.

Os níveis de tensão poderão atingir valores tão elevados que levem a deformações plásticas na baliza e a deformações permanentes. Esta situação é particularmente importante quando os painéis são construídos com materiais de propriedades mecânicas diferentes em que a tensão de cedência da chapa associada é muito superior à dos reforços e em particular da baliza.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-5: General Strength and stability of planar plated structures without transverse loading.
- [2] IACS, International Association of Classification Societies, Common Structural Rules, <u>http://www.iacs.org.uk/</u>.
- [3] Guedes Soares, C. e Gordo, J. M. (1997), Design Methods for Stiffened Plates Under Predominantly Uniaxial Compression, *Marine Structures*. **10**:465-497.
- [4] Paik, J.K.; Gordo, J.M. e Hess, P.E. (2009), "Ultimate Strength (Committee III.1)". editado por *15th International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC)*, Coreia.
- [5] Gordo, J.M., Guedes Soares, C. (2011). Compressive Tests on Stiffened Panels of Intermediate Slenderness, *Thin Walled Structures*, <u>doi:10.1016/j.tws.2011.02.004</u>.
- [6] Gordo, J.M., Guedes Soares, C. (2008). Compressive Tests on Short Continuous Panels, *Marine Structures*, **21** (2-3): 113-326.
- [7] Gordo, J.M., Guedes Soares, C. (2008), Compressive Tests on Continuous Long Stiffened Panels, Proc. 27th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engng. Conf. (OMAE), Portugal, ASME paper OMAE2008-57873.
- [8] Gordo, J. M., Guedes Soares, C. (2009) Tests on ultimate strength of hull box girders made of high tensile steel. *Marine Structures*, 22, 770-790.