Engenharia e Tecnologia Marítima, C. Guedes Soares e N. A. Santos, (Eds.), Salamandra, Lisboa, 2012, (ISBN 978-972-689-248-9), pp.151-162

# **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO DUPLO FUNDO SOB A ACÇÃO DE CARREGAMENTO EM PORÕES ALTERNADOS**

José Manuel Gordo

Centro de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal jose.gordo@ist.utl.pt

#### Resumo

A flexão alternada do fundo, resultado da acção da pressão exterior devida ao mar e do carregamento em tanques alternados, provoca flexão de segunda ordem entre as anteparas a qual se sobrepõe à flexão primária da viga navio, podendo constituir uma fonte importante de redução de resistência última do navio quando o mesmo se encontra em alquebramento. Nesta situação, todo o duplo fundo está sob tensões compressivas podendo colapsar por instabilidade elasto-plástica. A flexão de segunda ordem devida ao carregamento alternado de porões e tanques aumenta substancialmente as tensões de compressão nos painéis de fundo dos porões sem carga e nos painéis do duplo-fundo dos porões com carga, conduzindo normalmente ao colapso prematuro dos mesmos e, por consequência, a uma redução drástica da contribuição do fundo e duplo-fundo para a resistência à flexão longitudinal do navio.

No presente estudo, analisa-se e quantifica-se a redução de resistência à compressão do duplo-fundo de um navio graneleiro através do método dos elementos finitos. Introduz-se, ainda, um método para inclusão de tal redução na estimativa da resistência global do navio à flexão longitudinal, quantificando-se o impacto negativo na mesma.

Pretende-se também analisar a importância das estruturas longitudinais do casco do navio no controlo desta degradação de resistência, nomeadamente do encolamento e das anteparas longitudinais.

#### 1. Introdução

Diversos tipos de navios estão sujeitos à acção conjugada da flexão da viga navio e da pressão lateral em tanques ou porões alternados durante parte do seu tempo de serviço.

Esta flexão alternada do duplo fundo, resultado da acção da pressão exterior devida ao mar e do carregamento em tanques alternados, provoca flexão de segunda ordem entre anteparas a qual se sobrepõe à flexão primária da viga navio devido ao momento flector vertical, podendo constituir uma fonte importante de redução de resistência última do navio quando o mesmo se encontra em alquebramento (Amlashi e Moan, 2008). Nesta situação, todo o duplo fundo está sob tensões compressivas podendo colapsar por instabilidade elasto-plástica (Amlashi e Moan, 2009). A flexão de segunda ordem devida ao carregamento alternado de porões e tanques aumenta substancialmente as tensões de compressão nos painéis de fundo dos porões sem carga e nos painéis do duplo-fundo dos porões com carga, conduzindo normalmente ao colapso prematuro dos mesmos e, por consequência, a uma redução drástica da contribuição do fundo e duplo-fundo para a resistência à flexão longitudinal do navio.

No presente estudo, analisa-se e quantifica-se a redução de resistência à compressão do duplo-fundo de um navio graneleiro através do método dos elementos finitos. Introduz-se, ainda, um método para inclusão de tal redução na estimativa da resistência global do navio à flexão longitudinal, quantificando-se o impacto negativo na mesma.

Analisa-se também a importância das estruturas longitudinais do casco do navio no controlo desta degradação de resistência, nomeadamente do encolamento e das anteparas longitudinais.

## 2. Descrição do carregamento em tanques alternados

Os navios graneleiros são concebidos para transportar carga a granel que muitas vezes pode ter uma densidade maior que a da água. Este facto leva a que, frequentemente, estes navios naveguem no calado máximo apesar dos espaços de carga não irem completamente cheios. Por norma, opta-se por não utilizar tanques parcialmente cheios a fim de evitar que a carga a granel corra a um bordo provocando grandes ângulos de adornamento. Como os porões não podem ir todos os cheios nem meio vazios é normal nestes navios carregar porão sim porão não. Este tipo de carregamento induz momentos e forças de corte elevadas nas estruturas do navio, uma vez que sobre a estrutura do duplo fundo actuam pressões provocadas pelo peso da carga no fundo dos tanques e pressões provocadas pela água do mar na chaparia do fundo. Na Figura 1 pode ver-se o esquema de carga usual em navios graneleiros e as pressões que actuam sobre as estruturas de duplo-fundo, nos tanques centrais.

O modelo construído em elementos finitos para estudar a resistência última do duplo fundo de um graneleiro foi feito com base no modelo apresentado por Amlashi e Moan (2008), cuja secção mestra se apresenta na Figura 2.



Figura 1 - Vista lateral do navio com os porões carregados alternadamente.



Figura 2 – Secção mestra do graneleiro

Este modelo já tinha sido utilizado num estudo da ISSC (Yao et al. 2000) para a estimativa da resistência última do navio à flexão sem considerar a pressão lateral.

## 2.1 Modelo

O modelo estudado pretende simular um duplo fundo de um navio graneleiro que está carregado em porões alternados. Para simplificar os cálculos optou-se por reduzir o modelo ao comprimento de dois tanques, um tanque em vazio e dois meios

tanques em carga e a largura a meio navio, uma vez que a outra metade é simétrica, sendo portanto a resposta estrutural a mesma desde que se assuma condições de simetria a meio.

Usou-se ainda um segundo modelo com metade da dimensão deste, abrangendo metade do tanque carregado e metade do tanque sem carga por se ter verificado que a resposta estrutural era a mesma, como seria de esperar.

### 2.2 Geometria

A secção transversal dos tanques é apresentada na Figura 2 em que todas as medidas estão em mm. A legenda dos reforços é apresentada na Tabela 1 em que são apresentadas as características do aço de cada peça.

| 1   | 1<br>4         | 1            | 1   | 3 - | 1  | 1   | 3 - | 1        | 1   | 3 - | 1 | 1    | 1     | 3 | 1 | 1  | 1  | 1 | 698  |
|-----|----------------|--------------|-----|-----|----|-----|-----|----------|-----|-----|---|------|-------|---|---|----|----|---|------|
|     |                |              |     |     |    |     |     |          |     |     |   |      |       |   |   |    |    |   | 1395 |
| 2   | 2 <sup>4</sup> | <b>2</b><br> | 2   | 3 – | 2  | 2   | 3 - | <b>2</b> | 2   | 3 - | 2 | 2    | 2<br> | 3 | 2 | 2  | 2  | 2 | 698  |
| 264 | 0              | 26           | 540 |     | 26 | 640 |     | 26       | 640 |     |   | 3520 |       |   |   | 44 | 00 |   |      |

Figura 3 - Secção transversal dos tanques utilizados

Os reforços identificados com o número 3 são no modelo original perfis bolbo, que devido à dificuldade de modelar este tipo de peça em elementos finitos, optou-se por transformá-los em perfis barra com área transversal igual.

| Identificação | Tipo de perfil | Dimensões<br>(mm) | σ <sub>y</sub> Aço<br>(MPa) |
|---------------|----------------|-------------------|-----------------------------|
| 1             | Т              | 333x9/100x16      | 352.8                       |
| 2             | Т              | 283x9/100x16      | 352.8                       |
| 3             | Barra          | 180x12            | 235.2                       |
| 4             | Т              | 333x9/100x17      | 352.8                       |
|               | Fundo          | 18.5              |                             |
| Chapa         | Duplo fundo    | 20.5              | 313.6                       |
|               | Baliza         | 12.5              |                             |

Tabela 1- Propriedades do aço

O espaçamento entre reforços é 880 mm e o espaçamento entre balizas é 2610 mm. Cada tanque é reforçado por 10 espaçamentos de baliza iguais o que perfaz um comprimento total do modelo de 52200 mm e 21 balizas transversais.

### 2.3 Condições de fronteira

As condições de fronteira adoptadas para o modelo são as seguintes:

Longitudinais – Restringiram-se os deslocamentos transversais ao longo da quilha de meia-nau e as rotações segundo o eixo longitudinal e vertical nas longarinas

laterais do modelo. As restrições permitem simular simetria na longarina de meianau e o efeito do encolamento.

<u>Transversais</u> – Foram restringidos os deslocamentos segundo o eixo vertical nas balizas 5 e 15, balizas estas onde se inicia e finaliza o tanque em vazio, para que o modelo não se desloque verticalmente apesar do carregamento lateral estar equilibrado. As reacções nestes pontos devem ser mínimas. Na primeira e última baliza aplicou-se restrições ao movimento longitudinal e à rotação vertical e transversal para simular a simetria, sendo portanto permitido o deslocamento vertical das mesmas.

### 2.4 Malha

O tipo de elementos utilizado foi o SHELL281 do programa de análise por elementos finitos Ansys, versão 12 (2008). A malha com que se trabalhou apresenta um refinamento nas zonas em que se espera o colapso da estrutura, entre as duas primeiras balizas, entre as quatro balizas centrais e nas duas últimas balizas. Mostrase o pormenor da malha na Figura 4.



Figura 4 - Refinamento da malha nas zonas criticas

Para o modelo inteiro a malha é composta por 87342 elementos e por 241129 nós e para o meio modelo 44130 elementos e 121913 nós.

### 2.5 Imperfeições

Para modelar as imperfeições iniciais associadas à geometria inicial média da estrutura entre anteparas transversais, alterou-se a coordenada vertical z de cada nó segundo a fórmula:

$$\Delta z_1 = 26 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{20 \cdot sl}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot y}{42 \cdot sf}\right) \tag{1}$$

em que *x*, *y*, *z* representam as coordenadas de cada nó, *sl* a distância entre balizas e *sf* a distância entre reforços longitudinais. Para meio modelo esta fórmula sofre alterações, uma vez que este só tem 10 balizas. Esta equação simula uma deformação duplamente sinusoidal do fundo entre as anteparas transversais e entre as longarinas do encolamento com amplitude máxima de 26mm. A amplitude foi estimada por  $0,001 \cdot (10 \cdot sl)$ , isto é, igual a um milésimo do comprimento do tanque.

A modelação das imperfeições da superfície média das chapas do fundo e do duplo fundo foi feita da mesma forma, assumindo uma deformação sinusoidal com meia onda entre longitudinais e três meias ondas entre balizas, de que resulta a fórmula:

$$\Delta z_2 = 4 \cdot \sin\left(\frac{3 \cdot \pi \cdot x}{sl}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot y}{sf}\right) \tag{2}$$

A imperfeição máxima assumida é de 4mm e a escolha da forma da deformada resulta da razão de aspecto da placa ser aproximadamente igual a 3 (~2610/880), o que faz com que o modo de instabilidade mínimo seja também de 3 semi-ondas na direcção longitudinal para placas simplesmente apoiadas.

#### 3 Material e propriedades equivalentes

O duplo fundo é fabricado com três tipos diferentes de aço com as propriedades mecânicas que se apresentam na Tabela 2.

| Tipo de<br>escantilhão | Tensão cedência<br>(MPa) | Módulo Young<br>(GPa) | Área transversal total (mm <sup>2</sup> ) |  |  |  |
|------------------------|--------------------------|-----------------------|---|--|--|--|
| Chaparia               | 313.6                    | 200                   | 987165                                    |  |  |  |
| Perfis T               | 352.8                    | 200                   | 140354                                    |  |  |  |
| Perfis bolbo           | 235.2                    | 200                   | 17280                                     |  |  |  |
| Total                  | 317.2                    | 200                   | 1144799                                   |  |  |  |

Tabela 2 - Propriedades mecânicas e áreas transversais respectivas

A tensão de cedência equivalente pode ser definida pela média da tensão de cedência de cada tipo de material,  $\sigma_{oi}$ , ponderada pela respectiva área transversal,  $A_i$ , de acordo com a expressão:

$$\sigma_{oe} = \frac{\sum \sigma_{oi'} A_i}{\sum A_i} \tag{3}$$

cuja aplicação conduz ao valor médio da tensão de cedência de 317.2 MPa, tal como se apresenta na tabela supra.

### 4 Resposta estrutural

A resposta estrutural do duplo fundo depende muito das condições-fronteira aplicadas ao modelo. Estas, por sua vez, tentam reproduzir as restrições reais a que a estrutura está sujeita devido à restante estrutura do navio e ao tipo de carregamento.

Foram analisadas três situações diferentes a que correspondem diferentes estados de restrição e portanto diferente influência da estrutura adjacente, isto é, encolamento e anteparas longitudinais:

- 1) Duplo-fundo suportado exclusivamente pelas anteparas transversais
- 2) Duplo-fundo suportado pelo encolamento verticalmente e à rotação
- 3) Duplo-fundo suportado pelo encolamento verticalmente e livre de rodar

### 4.1 Suporte das anteparas transversais

Esta condição é a que dá menos suporte à estrutura do fundo e, portanto, mais flexibilidade. O duplo fundo comporta-se globalmente como uma viga contínua entre apoios com carregamento alternado a um lado e outro. Sendo *L* o comprimento dos porões e *p* a pressão lateral líquida aplicada à estrutura, o momento máximo devida à flexão secundária resultante da pressão lateral,  $M_2$ , é dado por:

$$M_2 = \pm \frac{pbL^2}{8} \tag{4}$$

O esforço de corte máximo dá-se nos apoios (anteparas transversais) e tem o valor de:

$$q_2 = \pm \frac{pbL}{2} \tag{5}$$

Para esta situação foram analisados 8 modelos de elementos finitos: 3 modelos de dimensões reduzidas (MDB) e 5 com 2 vãos entre anteparas de comprimento (DB).

A Figura 5 apresenta as curvas de resposta à carga axial compressiva para diferentes níveis de pressão lateral no fundo (p= 10, 20, 50, 100, 150 e 200 kPa). A pressão lateral nos porões carregados é o dobro da pressão hidrostática no fundo. A normalização das curvas foi feita através da tensão e da extensão equivalentes.

Verificou-se que os modelos com metade da dimensão tinham uma resposta igual à dos modelos completos, como seria de esperar e se pode atestar pela resposta igual dos modelos com pressão de 200 kPa, MDB200 e DB200.

Em regime elástico, isto é, para cargas compressivas reduzidas, a pressão lateral não afecta a resposta. A tensão máxima atinge-se de forma progressiva e com o

desenvolvimento de grandes deformações verticais do duplo fundo, não se detectando um ponto nítido a partir do qual a tensão diminua.

A resistência máxima à compressão axial depende muito do nível de pressão lateral aplicada como se apresenta na Figura 6.

A resistência máxima à compressão do fundo do navio quando sujeito a pressão lateral exterior alternada, p (MPa), varia através da expressão:

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{oe}} = 1.096 - 3.3 \cdot p \tag{6}$$

Note-se que a dependência é linear até a tensão máxima exceder a tensão de cedência equivalente para níveis de pressão lateral muito baixos.



Figura 5 – Curvas tensão axial versus extensão axial normalizadas para diferentes níveis de pressão lateral (p= 10, 20, 50, 100, 150 e 200 kPa) em meio modelo (MDB) ou modelo completo (MD)

O colapso do duplo fundo dá-se por falha a meio vão entre anteparas, mais precisamente nas duas balizas centrais de cada tanque. Quando a pressão lateral é muito baixa o colapso é dominado pela falha dos elementos de placa ou do reforço gerando-se linhas de cedência a 45° ao longo dos painéis em compressão, como se pode ver na Figura 7.

Como se vê na Figura 8, para uma pressão lateral muito elevada de 200 kPa, as deformações plásticas ficam limitadas à zona onde o momento flector devido à pressão lateral é máximo, isto é, na zona central do porão. É ainda possivel identificar uma zona junto à ligação à antepara, no centro do meio modelo, onde se dá uma forte deformação plástica devido ao corte.



Figura 6 – Resistência à compressão do duplo fundo sob a acção de pressão lateral em tanques alternados



Figura 7 – Modelo MDF010: deformações verticais (esquerda) e extensões plásticas de von Mises (à direita) na fase de inicio de colapso para uma pressão lateral de 10 kPa.



Figura 8 - Modelo MDF200: deformações verticais (esquerda) e extensões plásticas de von Mises (à direita) na fase de inicio de colapso para uma pressão lateral de 200 kPa.

### 4.2 Encastramento lateral ou restrição lateral vertical

A condição de encastramento lateral é a mais rígida e proporciona grande suporte lateral ao duplo fundo, diminuindo os momentos flectores por absorção lateral de parte da pressão lateral. É representativa de encolamentos bastante reforçados ou anteparas longitudinais de tanques laterais suportadas por uma estrutura transversal muito resistente.

A condição de restrição lateral vertical com liberdade de rotação é uma condição intermédia representativa de duplo-fundo suportado por encolamento pouco reforçado.

A Figura 9 apresenta o comportamento do duplo fundo sob compressão nas condições de encastramento lateral (FMD) e suporte vertical simples (RMD) comparado com a resposta do modelo sem apoio e um nível de pressão lateral no fundo muito baixo (p=10 kPa).



Figura 9 - Curvas tensão axial versus extensão axial normalizadas para diferentes níveis de pressão lateral (p= 10, 50, 100, 150 e 200 kPa) em meio modelo (MD) para as condições fixo (FMD) e rotação livre (RMD)

Como seria de esperar, ao aumentar as restrições laterais do duplo fundo a resistência à compressão aumenta e a degradação de resistência à compressão com a pressão lateral diminui. Tal facto está apresentado na Figura 10, onde se apresenta ainda as tensões a que se dá a primeira cedência para cada nível de pressão.



Figura 10 – Influência das condições fronteira e pressão lateral na resistência à compressão

#### 5 Critérios de falha

Podem-se enunciar diversos critérios de falha de estruturas sujeitas a compressão com flexão associada. Exemplifica-se a sua aplicação para o caso por falha por cedência.

## 5.1 Falha por cedência

A falha por cedência dá-se quando é atingida a primeira plastificação da estrutura. Neste caso tem-se a acção conjugada da compressão axial,  $\sigma_x$ , e da tensão axial resultante da flexão secundária,  $\sigma_2$ , de que resulta o critério:

$$\sigma_x + \sigma_2 = \sigma_o \tag{7}$$

tendo-se:

$$\sigma_2 = \frac{M_2 \cdot z}{l} \cong \frac{M_2 \cdot H}{2 \cdot l} \tag{8}$$

Em que H é a altura do duplo fundo e assumindo que o eixo neutro do duplo fundo está a meia altura do mesmo.  $M_2$  é o momento máximo resultante da pressão lateral entre anteparas definido pela equação (4) e I é o momento de inércia da secção transversal do duplo fundo.

Assim as tensões axiais resultantes da flexão devida à pressão lateral reduzem a tensão de compressão máxima do valor  $\sigma_2$ , o qual é proporcional ao nível de pressão.

O caso apresentado está nesta condição por o duplo fundo ser constituído por painéis pouco esbeltos a que correspondem níveis de resistência próximos da resistência à cedência total da secção.

Assim para este tipo de duplo fundo pode-se estimar facilmente a degradação de resistência em função da pressão lateral e do suporte lateral dado pelo encolamento e antepara longitudinal.

#### 6 Conclusões

A pressão lateral afecta significativamente a resistência do duplo-fundo à compressão em navios com porões carregados alternadamente. A degradação de resistência é linear e depende do grau de suporte dado pelo encolamento e antepara longitudinal ou costado do navio.

O aumento da rigidez da estrutura envolvente aumenta a resistência do duplo fundo nestas situações de carregamento.

A degradação da resistência desta estrutura afecta negativamente a resistência ao momento flector longitudinal a que está sujeito o navio como um todo.

#### 7 Agradecimento

Agradece o esforço e disponibilidade do Eng. João da Camara Ruas na geração dos modelos de elementos finitos que suportaram o estudo apresentado.

#### 8 Referências

Amlashi, K.K.H. e Moan, T., (2008), "Ultimate strength analysis of a bulk carrier hull girder under alternate hold loading condition – A case study: Part 1: Nonlinear finite element modelling and ultimate hull girder capacity", *Marine Structures*, Vol. 21, pp. 327-352.

Amlashi, K.K.H. e Moan, T., (2009) "Ultimate strength analysis of a bulk carrier hull girder under alternate hold loading condition – A case study: part 2: stress distribution in the double bottom and simplified approaches". *Marine Structures*; Vol. 22, pp. 522–544.

Ansys, (2008), versão 12, www.ansys.com.

Yao, T., et al., (2000), Report committee VI.2: ultimate hull girder strength. In: *Proceedings of the 14th international ship and offshore structures congress*, Nagasaki, Japan; pp. 321–391.