

RESISTÊNCIA AO COLAPSO DE SECÇÕES DANIFICADAS DE NAVIOS

J. M. Gordo e C. Guedes Soares

Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa Codex, Portugal

RESUMO

A resistência estrutural à flexão de quatro navios tanques de diversas dimensões é avaliada para as condições de projecto e quatro situações de avaria resultantes de colisão. A previsão de resistência é efectuada através da utilização de um método aproximado para a estimativa do comportamento em compressão dos elementos reforçados que formam o casco.

PALAVRAS CHAVES

Resistência longitudinal intacta; Resistência em avaria; Comportamento não linear.

INTRODUÇÃO

Tradicionalmente o projecto estrutural dos navios é baseado na análise da distribuição de tensões elásticas na estrutura principal que fica sujeita à flexão sob o efeito da distribuição da carga e das ondas. É com base nestas considerações que se estabelece um valor para as tensões admissíveis e se determina o módulo mínimo para a secção mestra, que tem de satisfazer os Regulamentos das Sociedades de Classificação.

Já em diversas ocasiões se demonstrou que a utilização do conceito da distribuição elástica de tensões e do alcançar a tensão de cedência do material no convés ou no fundo não é uma medida correcta da capacidade resistente do casco à flexão longitudinal. O colapso ocorre quando a plastificação alastra a vários elementos, alguns dos quais se encontram sujeitos à tracção e outros à compressão.

Na realidade, na zona do casco que está sujeita à compressão haverá frequentemente a falha de diversos componentes antes de se dar o colapso global. Por isso, o cálculo exacto da capacidade resistente da secção só é possível quando se representar apropriadamente a resistência residual pós-encurvadura de cada elemento.

Uma forma de conseguir calcular com precisão a resistência última consiste em modelar toda a secção com elementos finitos não lineares, o que representa uma tarefa muito trabalhosa e envolve cálculos extremamente longos. Esta é a razão pela qual as

Sociedades de Classificação continuam a manter como critério de dimensionamento o módulo da secção mestra, o qual está associado à formulação elástica.

Num recente projecto europeu, denominado “Reliability Based Methods for Ship Structural Design (SHIPREL)”, o IST, em conjunto com três Sociedades de Classificação (Bureau Veritas, Germanischer Lloyd e Registro Italiano Navale) e com a Universidade Tecnica da Dinamarca, desenvolveram um conjunto de métodos de cálculo que vão permitir a evolução das regras no sentido de considerarem explicitamente a resistência ao colapso, em vez da secção mestra como critério de projecto [1]. Com estas ferramentas de cálculo já é possível ter como critério de dimensionamento o momento do colapso da secção em vez do módulo elástico, o que aliás foi proposto por [1].

Nesse projecto desenvolveram-se diferentes métodos de cálculo que permitem determinar as solicitações produzidas pelas ondas de grande amplitude que ocorrem em tempestades [2], bem como o seu efeito a longo prazo [3] e a resistência do casco a essas solicitações extremas que aqui se descreve.

Uma outra tendência importante na forma como se desenvolve o trabalho de projecto estrutural de navios resulta da observação que muitos acidentes ocorrem não por efeito das ondas associadas ao mau tempo, mas antes por acidentes de colisão e encalhe. O reconhecimento desta necessidade leva a pretender estudar a resistência ao colapso da secção de navios parcialmente danificados, com vista a saber se há capacidade resistente residual ou se os danos conduzem progressivamente à falha total. Estudando estas situações na altura do projecto, é possível adequar o arranjo estrutural para melhor resistir àquele tipo de situações.

Neste trabalho demonstra-se como o modelo de cálculo da resistência última da secção mestra [4] pode ser utilizado para os casos de secções danificadas. Começa-se por apresentar os princípios em que baseia o método, as validações que foram feitas a nível de componentes e de secções, bem como os resultados que já tinham sido obtidos para secções intactas. Apresentam-se exemplos de calculos em secções com diferentes graus de danificação.

COMPORTAMENTO LINEAR

A teoria clássica das vigas à flexão baseia-se na hipótese de Navier de que as secções planas se mantêm planas e conduz a uma fórmula simples para a determinação das tensões longitudinais associadas à flexão, σ , que pode ser expressa por:

$$\sigma = \frac{M \cdot z}{I}$$

sendo M o momento flector, I o momento de inércia da secção em causa e z a distância do ponto onde se quer avaliar as tensões ao eixo neutro (eixo principal de inércia horizontal). Torna-se, pois, unicamente necessário determinar o eixo neutro e o momento de inércia da secção transversal em consideração para estimar a distribuição de tensões numa determinada secção.

As tensões máximas são comparadas posteriormente com a tensão admissível, resultando desta comparação um valor mínimo a satisfazer para o módulo resistente,

$W=I/z_{max}$, já que se estabelecia um valor standard para o momento flector, função das características geométricas do navio sendo expresso normalmente por uma função do tipo:

$$M = f(L, B, C_b, C_w)$$

em que L é o comprimento do navio, B a boca, C_b o coeficiente de finura total e C_w um coeficiente relacionado com a altura de onda e a velocidade do navio.

COMPORTAMENTO NÃO LINEAR

As melhorias introduzidas no processo de cálculo, para além da teoria linear, passam obrigatoriamente pela inclusão do comportamento não linear dos painéis em compressão que constituem a viga navio.

A ausência de linearidade resulta essencialmente da plastificação local da chaparia ou dos reforços, da existencia de imperfeições iniciais que se amplificam em compressão e das tensões residuais resultantes dos processos de fabrico, além dos fenómenos de instabilidade elástica. Estes últimos são os mais importantes pelo que a previsão de resistência dos painéis em compressão uniaxial se baseia normalmente na teoria da encurvatura de colunas com algumas adaptações.

De uma forma geral, o momento resistido pela viga navio, M , é dado pela expressão:

$$M = \sum_i y_i \cdot \sigma(\varepsilon_i) \cdot A_i$$

em que y_i é a distancia vertical do elemento i ao eixo neutro instantâneo, σ é a sua tensão longitudinal, ε é a extensão a que está submetido e A_i a sua área. Uma vez conhecida a tensão a que está sujeito o elemento i é extremamente simples avaliar o momento correspondente.

No entanto, o estado de tensão do elemento depende da sua extensão para a curvatura em consideração e a extensão depende da posição do eixo neutro instantâneo. A situação complica-se porque o eixo neutro instantâneo resulta do equilíbrio das forças longitudinais suportadas por cada elemento e cada uma destas forças apresenta um comportamento não linear com o alongamento em compressão, de que é exemplo a Figura 1 que dá a curva tensão extensão normalizadas para um elemento reforçado do casco.

O processo passa pela avaliação do estado de tensões para cada elemento em função da extensão [5], seguindo-se um processo iterativo para determinação do eixo neutro [6]; só então é possível avaliar o momento correspondente à curvatura em consideração assumindo como hipótese inicial de que as secções planas se mantêm planas. Esta hipótese é essencial para determinar as extensões em cada elemento reforçado.

O método desenvolvido baseia-se no comportamento até ao colapso e no regime pós-colapso de vigas-colunas, ors quais foram satisfatoriamente comparados com resultados de elementos finitos [5]. O comportamento global de uma secção completa foi comparado com resultados de ensaios de colapsos de vigas em caixão e demonstraram boa concordância [7].

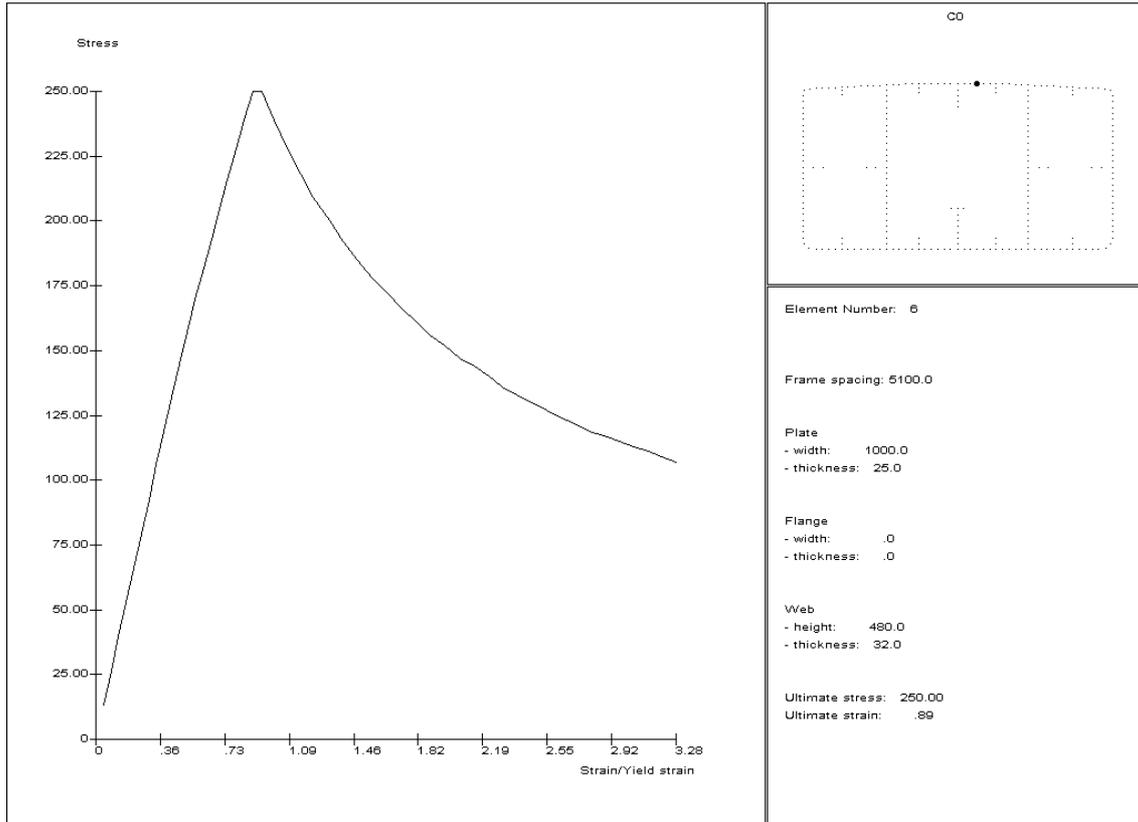


Figura 1 Curva tensão extensão normalizadas de um elemento reforçado do “Energy Concentration” em compressão e suas características geométricas.

Finalmente é de referir que o método foi generalizado para ter em conta a combinação de momentos flectores verticais e horizontais, o que permitiu definir curvas de interacção para o colapso com carregamento combinado [8].

RESISTÊNCIA DE NAVIOS TANQUES EM AVARIA

Pretende-se com este trabalho avaliar o impacto na resistência à flexão de navios tanques resultantes da existencia de grandes avarias estruturais, as quais podem resultar de colisão ou encalhe com perda funcional de partes significativas do fundo ou do costado. Para tal considerou-se as secções mestras de quatro navios tanques (Bornes, Cercal, Energy Concentration e São Mamede), procedendo-se à sua modelação e análise no programa de estudo de colapso de estruturas "Hullcol" que foi desenvolvido pelos autores [5;6].

As quatro situações de acidente foram simuladas através de uma perda de efectividade dos painéis do fundo, costado e encolamento, nas seguintes extensões:

1. 50% do painel do fundo a meio navio;
2. 25% do painel do fundo a $\frac{1}{4}$ de B da linha central em um dos bordos;
3. 100% do costado de um dos bordos;
4. Zona do encolamento, incluindo 25% do costado e 25% do fundo.

Nos casos em que a zona afectada inclui uma união com a antepara longitudinal, considerou-se uma perda de efectividade de 2 metros dos painéis da antepara.

Navio “Bornes”

O navio “Bornes” é um petroleiro de 236m de comprimento e 88900t de porte bruto, construído em 1988. Nas Tabela 1 e 2 estão representadas os valores obtidos nas diferentes situações simuladas e a respectiva variação em percentagem, tendo como referência os valores obtidos para uma situação do navio intacto.

Tabela 1 Características da secção mestra do navio “Bornes”

Condic.	Área (m ²)	%	M. Inércia (m ⁴)	%	M. Elástico (GN.m)	%	M. Plástico (GN.m)	%
Intacta	4,582	100	280,2	100	8,16	100	9,72	100
Caso 1	3,489	76,1	197,9	70,6	5,47	67,1	6,94	71,4
Caso 2	4,110	89,7	246,9	88,1	7,80	95,6	8,77	90,2
Caso 3	4,155	90,7	269,6	96,2	7,76	95,1	9,17	94,4
Caso 4	4,090	89,3	246,0	87,8	7,74	94,9	8,77	90,3

Tabela 2 Momento último do navio “Bornes”

Condição	Sagging (GN.m)	%	Hogging (GN.m)	%
Intacta	7,05	100	8,35	100
Caso 1	6,03	85,6	4,89	58,6
Caso 2	6,80	96,4	6,90	82,6
Caso3	6,64	94,1	8,04	96,3
Caso 4	6,81	96,5	6,73	80,6

O caso mais drástico, em termos de redução de área de material contínuo efectivo, é o Caso 1 com perda de 24% da área inicial e percentagem ligeiramente superior na perda de momento de inércia. Sobressai imediatamente que a redução no momento elástico (33%) é superior a esta redução de área, enquanto a redução no momento plástico acompanha a redução no momento de inércia.

Estes comportamentos resultam do facto da área afectada ter sido retirada do fundo, fazendo subir o eixo neutro da secção e contrabalançando, de alguma forma a influencia da redução do momento de inércia no cálculo do módulo resistente, Z . Por outras palavras, o módulo resistente não se reduziu tanto quanto seria de esperar. Convém notar que a subida do eixo neutro é suficientemente grande para que o módulo resistente mínimo passe do convés para o fundo nos Casos 1, 2 e 4, isto é, sempre que quantidades significativas do fundo são afectadas.

No que respeita aos momentos últimos suportados em alquebramento e contra-alquebramento, *hogging* e *sagging* respectivamente, nota-se que a redução no primeiro caso é muito superior à do segundo. Em alquebramento tem-se uma redução superior a 40% da resistência inicial o que mostra as deficiências da análise linear elástica, de resto bem expressas pelo facto da resistência última, em contra-alquebramento, ser sempre inferior ao momento elástico para este navio.

Estas conclusões são genericamente aplicáveis a todos os outros Casos em análise.

Condição intacta
 Curvature= .13270E-03 /m
 Bending Moment= .70020E+04 MN.m
 Iteration n.22
 Maximum Strain= 1.02 (Compression)
 Minimum Strain= -.74 (Tension)

Stresses
 ● -233
 ● -194
 ● -155
 ● -116
 ● -76
 ● -37
 ● 2
 ● 41
 ● 80
 ● 119
 ● 158
 ● 198
 ● 237
 ● 276
 ● 315

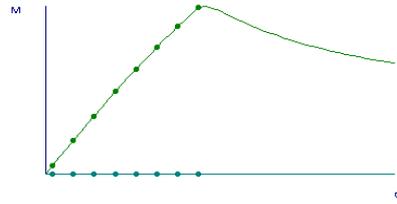


Figura 2 Navio Bornes (Intacto) em contra-alquebramento

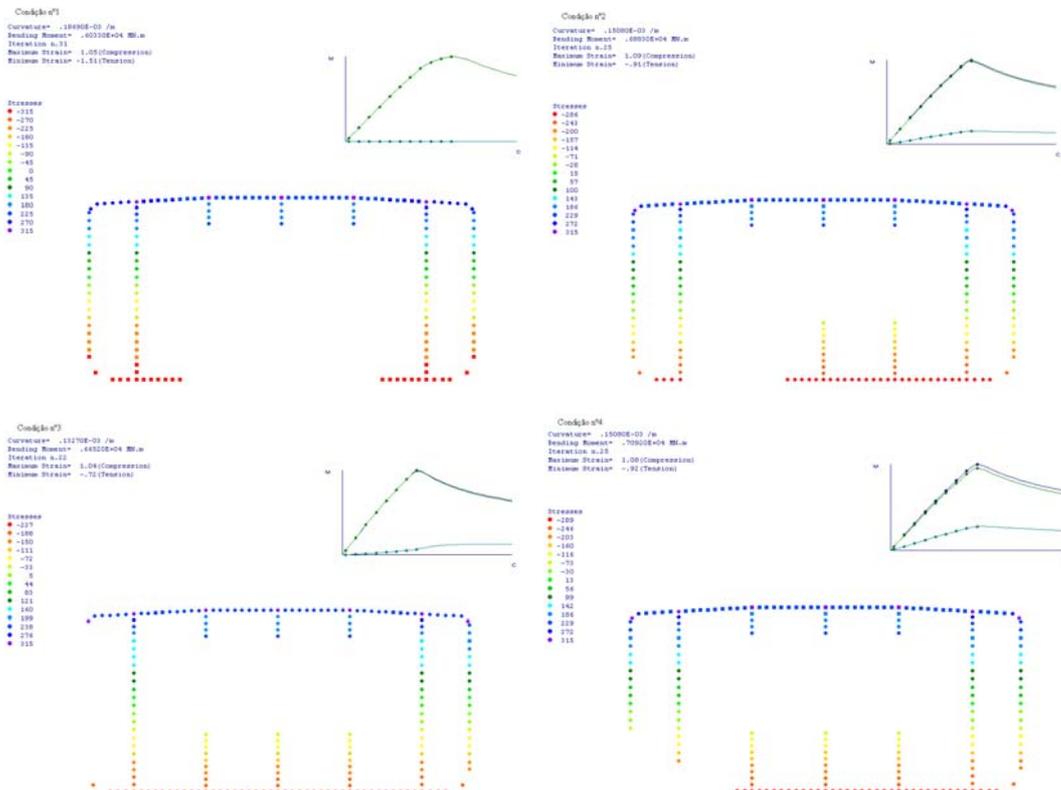


Figura 3 “Bornes” – Casos 1, 2, 3 e 4 em contra-alquebramento

Na Figura 2 mostra-se a saída gráfica do programa de previsão de resistência à flexão, visualizando-se a geometria da secção mestra e o estado de tensão de cada elemento reforçado imediatamente antes do colapso. A Figura 2 mostra a geometria do navio “Bornes” nas diferentes situações de avaria, Casos 1, 2, 3 e 4.

Repare-se no aparecimento de flexão horizontal nos casos em que o costado se encontra afectado ou à assimetria na avaria, curva inferior nos diagramas superiores direitos, a que corresponde uma certa inclinação no eixo neutro. Em contra-alquebramento, o estado de tensões no fundo mantêm-se no regime elástico até e para além do colapso excepto no Caso 1 em que se tem cedência em todo o fundo e encolamento antes do colapso. O colapso em compressão e a cedência em tracção dos elementos reforçados são representados por um quadrado em vez do círculo.

Navio “Cercal”

O navio “Cercal” é um navio tanque de 230m de comprimento e 80000t de porte bruto, de projecto antigo, desprovido de duplo-fundo e construído em 1979. Avaliou-se a sua resistência à flexão, tendo-se resumido os resultados nas Tabela 3 e 4. Os acidentes mais graves para este tipo de secção, Figura 4, são os correspondentes aos Casos 1, 2 e 4 em aquebramento.

Tabela 3 Características da secção mestra do navio “Cercal”

Condic.	Área (m ²)	%	M. Inércia (m ⁴)	%	M. Elástico (GN.m)	%	M. Plástico (GN.m)	%
Intacto	4,292	100	293	100	8,26	100	9,77	100
Caso 1	3,380	78.8	200	68.2	5,30	64,2	8,59	87,9
Caso 2	3,860	89.9	255	86.9	7,66	92,8	9,23	94,5
Caso 3	3,827	89.2	282	96.1	7,87	95,2	9,23	94,5
Caso 4	3,841	89.5	257	87.6	7,74	93,7	8,61	88,2

Tabela 4 Momento último do navio “Cercal”

Condição	Sagging (GN.m)	%	Hogging (GN.m)	%
Intacta	6.48	100	7.11	100
Caso 1	5.52	85.1	3.80	53.5
Caso 2	6.22	96,0	5.55	78.1
Caso3	6.05	93.5	6.82	95.9
Caso 4	6.26	96.6	5.79	81.5

O momento resistente máximo da secção em aquebramento reduz-se quase para metade quando a área afectada é de 20% da área total, Caso 1. Nos casos 2, 3 e 4 tem-se uma redução semelhante de área mas o momento flector máximo correspondente é bastante diferente podendo-se reconhecer alguma proporcionalidade com a variação do momento de inércia para cada Caso. As situações 2 e 4 mostram piores desempenhos o que se justifica pela ausência de parte do fundo.

As tensões que se atingem para a situação de navio intacto em contra-alquebramento, mostram um convés em colapso em compressão enquanto as tensões no fundo não atingem a cedência, sendo de 221MPa para 315MPa da tensão de cedência do material.

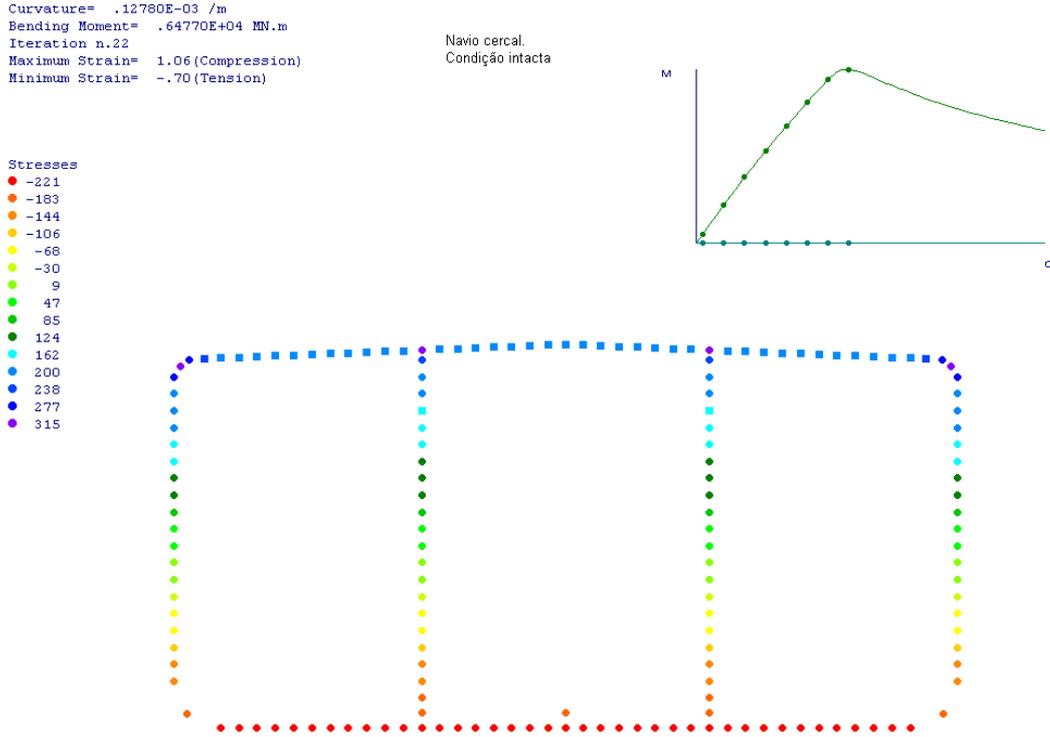


Figura 4 Navio “Cercal” (Intacto) em contra-alquebramento

A Figura 5 mostra a resposta mecânica da viga-navio à flexão para todos os Casos em análise, desde o regime elástico até ao pós-colapso, tanto em alquebramento como em contra-alquebramento. Os aspectos mais importante são a diminuição da rigidez estrutural inicial nas situações de avaria, o aumento da curvatura de colapso em contra-alquebramento e a diminuição de resistencia em alquebramento, como já se tinha referido.

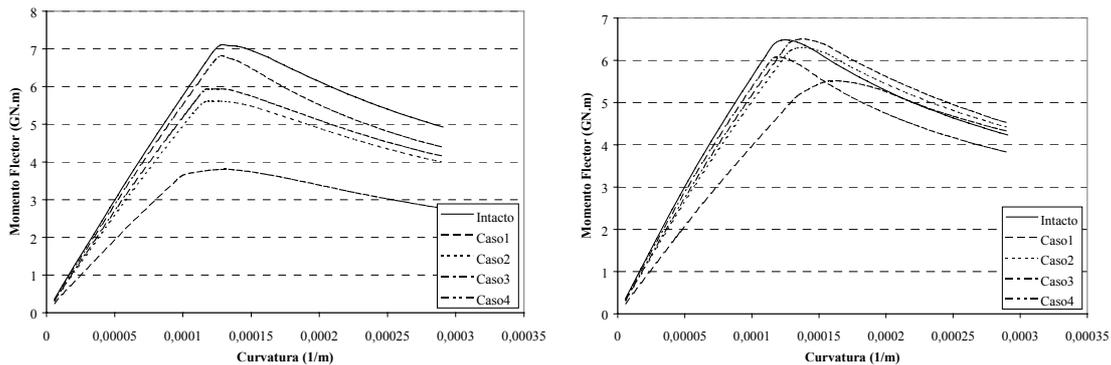


Figura 5 Comparação do momento flector entre os diversos Casos para o navio “Cercal” em alquebramento (esquerda) e contra-alquebramento (direita).

Navio “Energy Concentration”

O “Energy Concentration” foi um navio de 10 anos que sossobrou em alquebramento quando se encontrava em porto em operações de carga e descarga. O navio media 313m de comprimento entre perpendiculares e tinha um porte bruto de 216 mil toneladas enquadrando-se na classe dos VLCC’s. A secção mestra era característica da época, o

navio foi construído no ano de 1970, apresentando duas anteparas longitudinais, uma quilha extremamente alta, longarinas de fundo, escoas e sicórdias de dimensões apreciáveis, Figura 6.

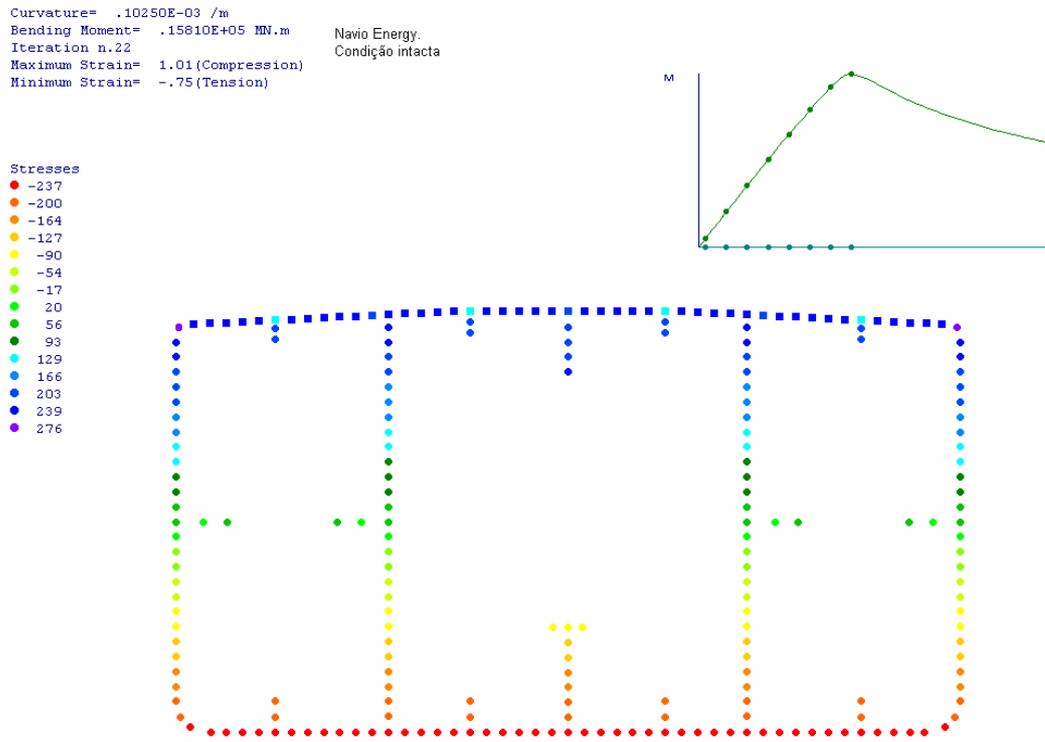


Figura 6 Navio “Energy Concentration” (intacto) em contra-alquebramento

O navio intacto suportava um momento último em contra-alquebramento muito inferior ao momento máximo linear elástico, Tabela 5 e 6, o que mostrava alguma fragilidade na resposta do convés à compressão, resultado da utilização de perfis barra para reforçar a chaparia de convés, Figura 1. Nessa figura é possível ver que a tensão máxima prevista para o elemento é de 250MPa enquanto que a tensão de cedência do material é de 315MPa.

Tabela 5 Características da secção mestra do navio “Energy Concentration”

Condic.	Área (m2)	%	M. Inércia (m4)	%	M. Elástico (GN.m)	%	M. Plástico (GN.m)	%
Intacto	785	100	843	100	19.3	100	22.5	100
Caso 1	636	81.1	616	73.0	13.1	67.9	16.8	74.5
Caso 2	709	90.3	733	86.9	17.2	89.0	19.8	88.0
Caso 3	696	88.7	805	95.5	18.4	95.3	21.1	93.9
Caso 4	710	90.5	741	87.9	17.4	90.4	19.9	88.5

Devido à ausência de duplo-fundo, a resposta do navio em alquebramento e avaria no fundo é bastante deficiente tendo-se valores muito baixos para o momento último. Na situação mais drástica tem-se uma redução de 40% na resistencia para uma diminuição de 19% na área da secção.

Tabela 6 Momento último do navio “Energy Concentration”

Condição	Sagging (GN.m)	%	Hogging (GN.m)	%
Intacta	15.8	100	18.7	100
Caso 1	13.9	88.0	11.4	61.0
Caso 2	15.1	95.8	14.9	79.6
Caso3	14.9	94.4	17.7	94.8
Caso 4	15.2	96.3	15.0	80.3

Navio “S. Mamede”

O “S. Mamede” é o mais pequeno dos navios analisados, tendo sido construído em 1973. Tem 133,40m de comprimento e porte bruto de cerca de 10000t. A sua secção mestra está esquematizada na Figura 7, e inclui duas anteparas longitudinais e é desprovido de duplo fundo. A mesma figura mostra ainda a distribuição de tensões imediatamente antes do colapso, identificando-se elementos já em colapso em algumas zonas do convés; a extensão máxima em compressão no convés para esta curvatura excede a extensão de cedência.

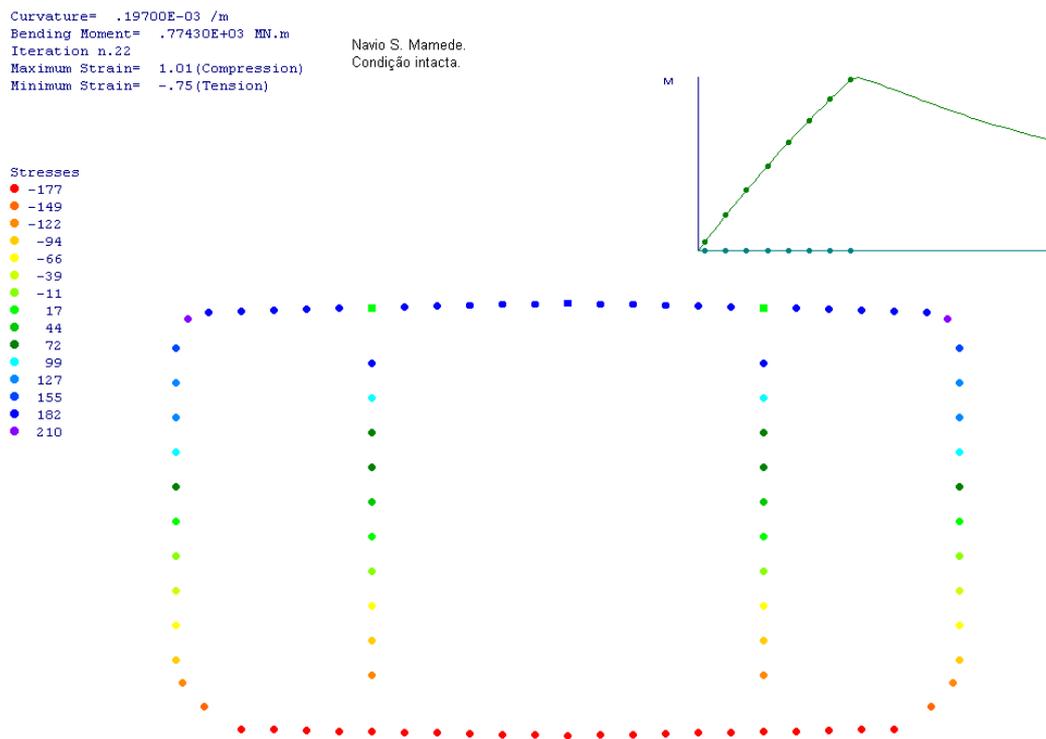


Figura 7 Navio “S. Mamede” (Intacto) em contra-aquebramento

O comportamento é linear até praticamente ao colapso, curva superior direita, o que significa que os elementos reforçados do convés são pouco esbeltos e portanto bastante eficientes. O colapso atinge-se para um momento de 0,784 e 0,822 GN.m em contra-aquebramento e aquebramento, respectivamente, Tabela 8, o que denota um certo equilíbrio no projecto dos elementos reforçados da secção.

A reserva de resistencia clássica, medida pela razão entre o momento plástico e o momento elástico, Tabela 7, é baixa na condição intacta, cerca de 18% e diminui com a redução de área efectiva.

Tabela 7 Características da secção mestra do navio “S. Mamede”

Condic.	Área (m ²)	%	M. Inércia (m ⁴)	%	M. Elástico (GN.m)	%	M. Plástico (GN.m)	%
Intacto	132	100	21.6	100	0.980	100	1.16	100
Caso 1	112	84.4	16.2	74.9	0.680	69.4	0.91	78.2
Caso 2	118	89.1	18.8	86.9	0.832	84.9	1.02	87.5
Caso 3	115	87.0	20.5	95.0	0.929	94.9	1.07	92.4
Caso 4	117	88.4	19.0	88.1	0.843	86.1	1.02	87.5

Tabela 8 Momento último do navio “S. Mamede”

Condição	Sagging (GN.m)	%	Hogging (GN.m)	%
Intacta	0.784	100	0.822	100
Caso 1	0.701	89.5	0.516	62.8
Caso 2	0.757	96.6	0.672	81.7
Caso 3	0.727	92.8	0.765	93.0
Caso 4	0.767	97.9	0.634	77.2

A perda de resistência em alquebramento para o Caso 1 é de 37% superando largamente o redução de área efectiva e confirmando a gravidade desta situação em termos estruturais; por seu lado, desaparece o ponto de colapso nitido que se notava na resistencia intacta, existindo um patamar de curvaturas em que o momento se mantém aproximadamente constante com colapso progressivo dos paineis do fundo e costado em compressão. Em contra-alquebramento a resistência não é grandemente afectada, Figura 8. A redução na rigidez estrutural inicial da secção é proporcional à redução do momento de inércia da secção.

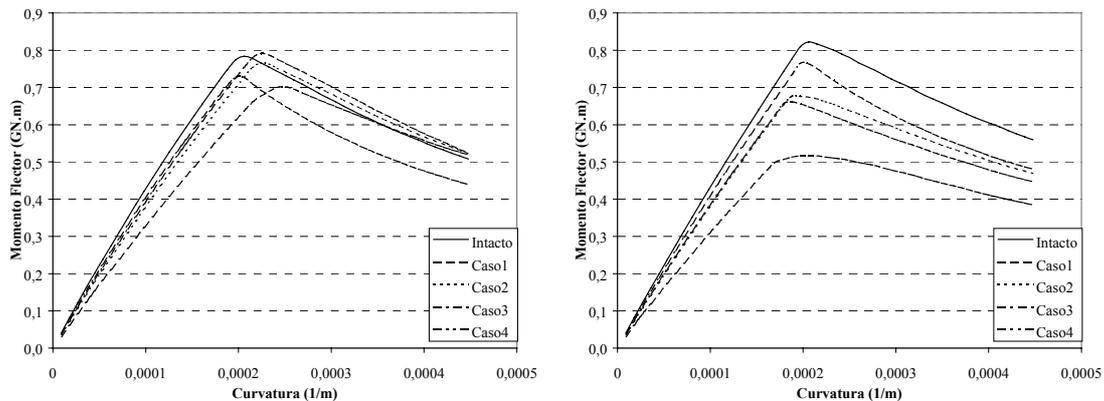


Figura 8 Comparação do momento flector entre os diversos Casos para o navio “S. Mamede” em alquebramento (esquerda) e contra-alquebramento (direita).

CONCLUSÕES

A resistência longitudinal de navios tanques à flexão é bastante afectada pela existência de situações de avaria resultantes de colisão ou encalhe.

Os casos mais graves ocorrem quando o fundo é afectado e a gravidade da situação cresce exponencialmente com a área de fundo danificada. A situação actual nos navios de ramas é menos gravosa do que a dos navios tanques analisados devido à implementação de directrizes que obrigam à existência de duplo fundo, funcionando este como fundo suplementar para efeitos estruturais em caso de avaria, além de limitar eventuais derrames da rama ou dos produtos transportados. Infelizmente não foi possível dispor de secções referentes a esses navios por forma a ter uma comparação quantitativa.

Os métodos de projecto baseados numa análise linear elástica mostram-se bastante ineficazes para navios com as formas geométricas contempladas neste trabalho, tendo-se constatado que o momento último suportado pela viga navio é normalmente inferior ao momento linear elástico, resultando, de facto, reservas de resistência negativas se tomarmos o momento elástico máximo como referência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração de Vitor Pinheiro, na preparação dos cálculos dos Casos em análise.

REFERÊNCIAS

1. GUEDES SOARES, C., DOGLIANI, M., OSTERGAARD, C., PARMENTIER, G., e PEDERSEN, P. T., Reliability based ship structural design. *SNAME meeting*, (16) (1996) .
2. FONSECA, N., ROJAS, L. P., e GUEDES SOARES, C., Estudo teórico e experimental do comportamento no mar de um atuneiro. *Ingenieria Naval*, (733) (1996) 45-55. In Português.
3. GUEDES SOARES, C., On the definition of rule requirements for wave induced vertical bending moments. *Marine Structures*, **9**(3-4) (1996) 409-426.
4. VENTURA, M. F., GORDO, J. M., e GUEDES SOARES, C., Projecto estrutural de navios assistido por computador. *A Engenharia Naval em Portugal*, Guedes Soares (Ed.), vol. X, (1995) pp. 13.1-13.14.
5. GORDO, J. M. e GUEDES SOARES, C., Approximate load shortening curves for stiffened plates under uniaxial compression. *Proc. Integrity of Offshore Structures - 5*, D. Faulkner, M. J. Cowling A. Incecik and P. K. Das (Ed.), Warley, U.K., EMAS, (1993) pp. 189-211.
6. GORDO, J. M., GUEDES SOARES, C., e FAULKNER, D., Approximate assessment of the ultimate longitudinal strength of the hull girder. *Journal of Ship Research*, **40**(1) (1996) 60-69.
7. GORDO, J. M. e GUEDES SOARES, C., Approximate method to evaluate the

hull girder collapse strength. *Marine Structures*, **9**(1) (1996) 449-470.

8. GORDO, J. M. e GUEDES SOARES, C., Interaction equation for the collapse of tankers and containerships under combined bending moments. *Journal of Ship Research*, **41**(3) (1997) 230-340.