

PROJECTO ESTRUTURAL DE NAVIOS ASSISTIDO POR COMPUTADOR

M. F. VENTURA¹, J. M. GORDO², C. GUEDES SOARES³

RESUMO

O dimensionamento dos elementos estruturais da secção mestra, é uma etapa muito importante do projecto preliminar do navio. Neste trabalho são apresentados dois módulos de um sistema de projecto de secções estruturais assistido por computador. O primeiro, é orientado para a produção dos desenhos de classificação, e permite a execução simultânea dos cálculos das características da secção e cálculo de pesos, sem introdução de dados adicionais e sem sair do ambiente de desenho, permitindo maior rapidez nesta fase do projecto preliminar. O segundo, apresenta um método mais elaborado para o cálculo da resistência longitudinal do navio sujeito à flexão, o qual permite considerar a perda de resistência dos elementos estruturais em compressão, devido à instabilidade elástica e fenómenos plásticos associados.

1. INTRODUÇÃO

O peso da estrutura dos navios é fortemente condicionada pelo peso do material longitudinal o qual por sua vez fica em grande parte definido pela secção mestra. Os navios de comércio têm uma zona central relativamente extensa com propriedades sensivelmente constantes.

Por isso o projecto preliminar da estrutura está muito focado no dimensionamento da secção mestra. Este dimensionamento tem de respeitar as regras das Sociedades de Classificação, embora o cálculo possa ser executado de diferentes formas.

Dado que várias Sociedades de Classificação já têm programas de cálculo que

¹ Engenheiro Naval, Assistente da Secção Autónoma de Engenharia Naval, Instituto Superior Técnico

² Mestre em Engenharia Naval, Assistente da Secção Autónoma de Engenharia Naval, Instituto Superior Técnico

³ Doutor Agregado em Engenharia Naval, Professor da Secção Autónoma de Engenharia Naval, Instituto Superior Técnico, Presidente do Colégio de Eng. Naval da Ordem de Engenheiros

ermitem de uma forma automatizada verificar a conformidade das peças estruturais com os requisitos das Sociedades de Classificação, a automatização que se torna necessária nesta fase do projecto está mais relacionada com a produção dos desenhos de classificação. É exactamente esta tarefa que foi considerada neste trabalho e que se descreve na secção 2.

O dimensionamento da secção mestra pode ser melhorado recorrendo a métodos de cálculo que sejam mais realistas a prever a capacidade resistente do casco do que os que se baseiam em tensões elásticas e no módulo elástico da secção.

Embora ainda não tenha sido incorporado nas regras das Sociedades de Classificação, têm sido desenvolvidos vários métodos que contabilizam a contribuição de cada elemento longitudinal para a resistência do casco ao colapso. Neste trabalho descreve-se um destes métodos, o qual se baseia num modelo de comportamento de um sistema de placa e reforço 1, o qual é utilizado para determinar a carga de colapso do casco 2. Este método já foi comparado com os resultados experimentais, tendo-se mostrado bastante bom 3.

A utilização deste modulo de cálculo em complemento ao dimensionamento pelas regras das Sociedades de Classificação permite um dimensionamento mais realista.

2. PROJECTO PRELIMINAR DA SECÇÃO MESTRA

2.1 Dimensionamento preliminar

Sendo os escantilhões mínimos da secção mestra constantes ao longo de aproximadamente 40% do comprimento do navio, de acordo com os requisitos das Sociedades Classificadoras, a sua definição é decisiva, quer para a estimativa do peso do casco, quer para um levantamento preliminar da especificação de materiais (chapas e perfilados), razão pela qual todos os contributos para a automatização do seu projecto são importantes.

A automatização da definição dos escantilhões da secção mestra reduz o tempo de resposta do projectista, e contribui para a qualidade do projecto pelo maior número de alternativas técnicas geradas e comparadas.

A primeira aproximação ao dimensionamento dos elementos estruturais é feito geralmente com base nos requisitos das Sociedades Classificadoras. Existindo já aplicações desenvolvidas por algumas das Classificadoras (Bureau Veritas,

Lloyd's Register, ABS, etc.) para o dimensionamento, optou-se, como objectivo para este trabalho, partir desse ponto e tentar automatizar a execução dos desenhos de classificação.

A geometria da secção em estudo (linhas de traçado) é obtida directamente da base de dados da geometria do navio. Na ausência de plano geométrico detalhado, a secção pode ser gerada pelo sistema a partir de uma série de parametros característicos tais como o pé-de-caverna, raio de encolamento, raio do truncanil, flecha do convés, localização de quinados no fundo e no convés, etc.

Em seguida, o utilizador define sobre as linhas de traçado da secção as chapas do costado, pavimentos e convés, indicando o comprimento, espessura e tipo de material (ver figura 1).

Definidas as chapas (Fig. 2), são definidos os reforços utilizados, indicando o espaçamento, quantidade, direcção, orientação, o tipo e as dimensões dos perfilados utilizados, seleccionados a partir de um catálogo. O catálogo permite o acesso a uma base de dados com as características principais (área da secção, inércias, módulos e localização do eixo neutro) dos perfilados existentes no mercado.

Definidas as chapas e os perfilados (fig. 3) relevantes para a resistência longitudinal do navio, o utilizador pode calcular, as características globais da secção (área, inércias, localização do centro de gravidade, módulos da secção no fundo, no convés e em qualquer ponto definido pelo utilizador). Caso não se verifiquem os módulos mínimos, chapas e reforços podem ser alterados de forma interactiva, seleccionando no monitor com recurso ao rato e indicando as novas dimensões.

2.2 Produção Automática de Desenhos de Estruturas

Após ter definido o material longitudinal contribuinte para a resistência longitudinal do navio, o projectista tem ainda que definir o material transversal. Ao desenhar a caverna, baliza simples ou reforçada (Fig. 4) e a antepara típica, está a gerar simultaneamente informação para obter o peso desses elementos estruturais.

No campo da automatização do desenho de elementos estruturais, foram desenvolvidas rotinas para gerar automaticamente séries de aberturas para



Figura 1 - Geometria da secção

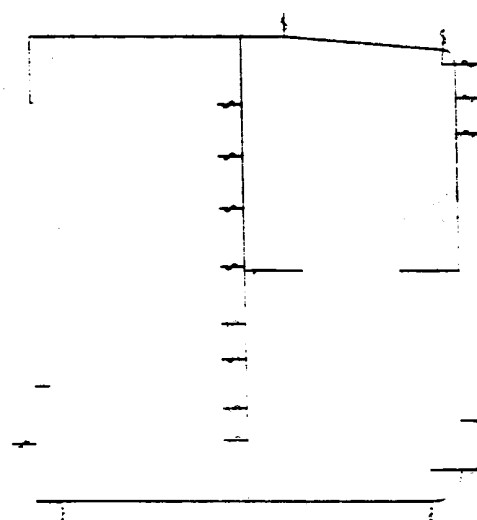


Figura 2 - Definição das Chapas

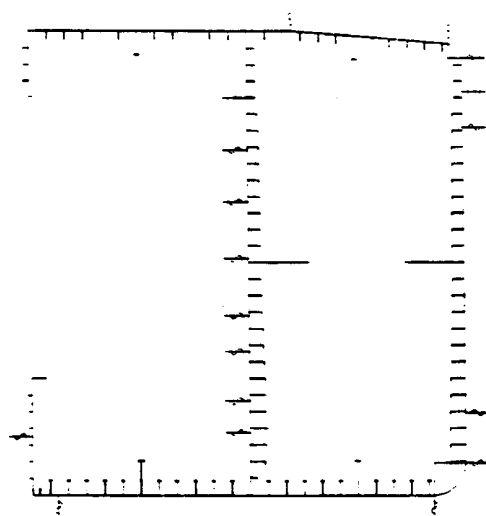


Figura 3 - definição dos reforços



Figura 4 - Desenho de bloco de baliza

passagem de perfis, aberturas de passagem ou de aligeiramento.

Os reforços locais podem também ser definidos indicando o espaçamento, disposição, tipo e dimensões dos perfilados utilizados (Fig. 5). Os comprimentos são ajustados automaticamente ao contorno exterior da chapa. O tipo, dimensões e comprimento de cada reforço ficam associados como atributo da representação gráfica de cada reforço, o que permite posteriormente extracção de informação do desenho para efeitos de listas de peças, especificação de materiais e estimativas de pesos.

Bibliotecas de esquadros normalizados de forma paramétrica estão disponíveis (Fig. 6).

As peças geradas podem ser posicionados interactivamente sobre chapas normalizadas de modo a reduzir o material desperdiçado, operação vulgarmente designada por "nesting" (Fig. 7).

A distância entre lados de peças adjacentes podem ser ajustadas pelo sistema para valores.

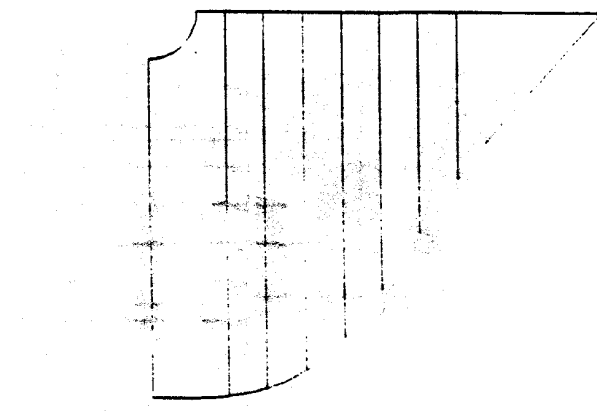


Figura 5 - Reforços locais em caverna

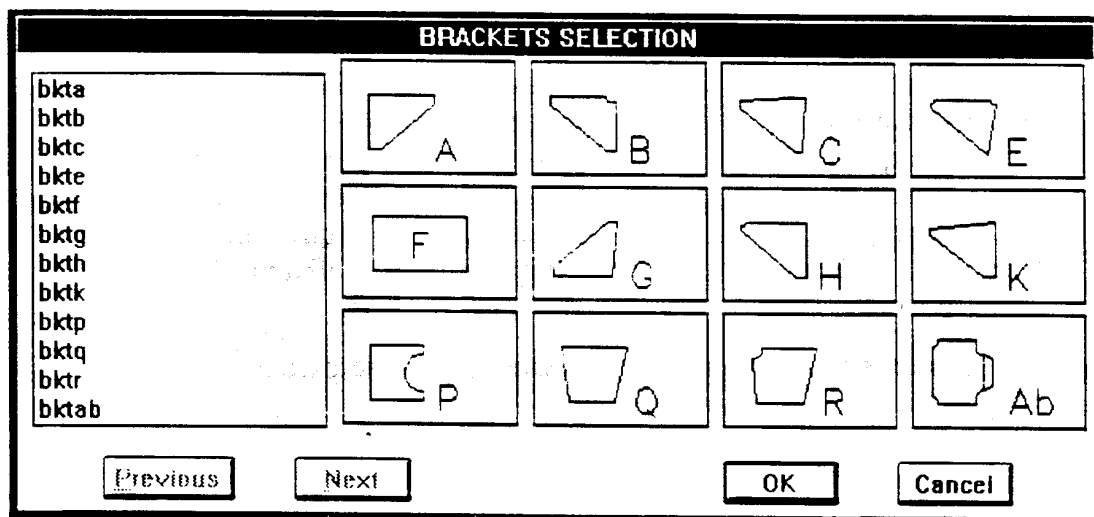


Figura 6 - Biblioteca de esquadros

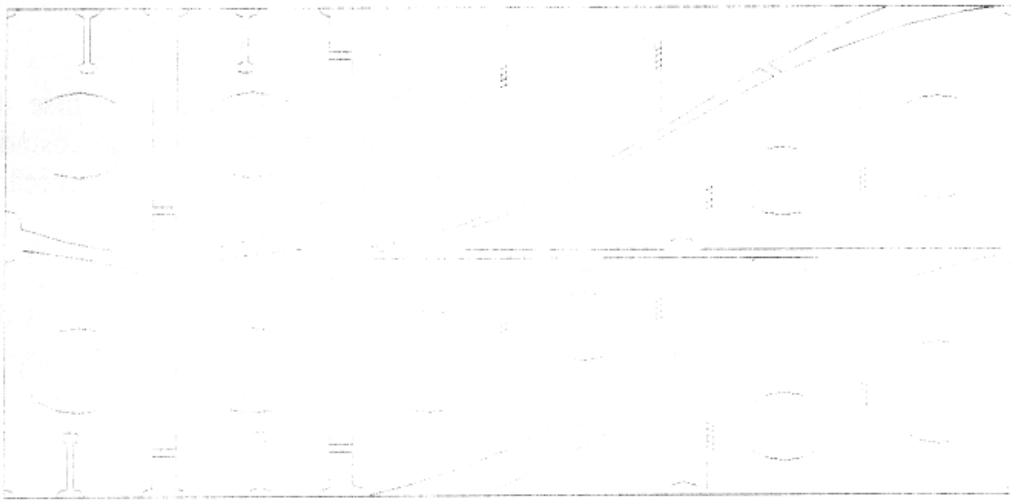


Figura 7 - Nesting de peças numa chapa

Quando o posicionamento na chapa está concluído, os contornos de todas as peças tem que ser ligados por pares de segmentos designados por "pontos", de forma a definir linhas de corte com pontos de início e sequências definidas. As pontes têm larguras definidas pelo utilizador e são geradas seleccionando pares de peças adjacentes.

3. PREVISÃO DA RESISTÊNCIA LONGITUDINAL DO CASCO

O método especificado pelas Sociedades Classificadoras até meados dos anos 80 baseava-se no cálculo do módulo resistente da secção mestra por análise elástica, ao qual se aplicava algumas reduções, e o valor assim obtido deveria exceder um valor de referência normalmente conhecido por módulo mínimo da secção.

Mais tarde, especialmente devido aos trabalhos de Caldwell 4, Faulkner 5 e outros, foi introduzido no cálculo do módulo resistente o conceito de largura efectiva da chapa associada aos perfis em compressão, o que constituía, só por si, uma redução significativa na estimativa do módulo resistente e cobria de alguma maneira a redução de resistência dos painéis em compressão.

No entanto, o grau de incerteza associado a este valor ainda é bastante elevado devido, principalmente, a duas questões fundamentais e que afectam a

resistência em sentido diverso:

1. a largura efectiva da placa associada é calculada para a fase de colapso da placa pelo que o valor utilizado para as placas do costado é normalmente inferior ao valor efectivo na fase de colapso da secção, tornando o método tendencialmente conservativo;
2. nada garante que o colapso da secção se dê com o colapso do painel mais carregado. Nos casos em que a falha da secção ocorre depois de alguns painéis já terem cedido com a consequente perda de resistência, está a utilizar-se demasiado material para o cálculo do módulo da secção, pelo que a estimativa tende a ser optimista.

Existem ainda outras questões relacionadas ou não com as anteriores e que podem afectar de sobremaneira a estimativa da resistência longitudinal última do navio, tais como a incerteza introduzida pelas questões anteriores na determinação do eixo neutro ou o facto do colapso dos painéis se dar por instabilidade torsional do reforço a tensões inferiores às previstas utilizando o conceito de largura efectiva.

Tornou-se pois necessário encontrar métodos que solucionassem estes problemas, o que foi conseguido com o advento do método de elementos finitos, o qual permite calcular a curva momento-curvatura do casco. No entanto, este método apresenta uma grande limitação no que respeita à utilização dos recursos humanos e informáticos. Os modelos demoram bastante tempo a serem construídos, a simulação das condições fronteira e dos carregamentos é uma operação muito delicada e nem sempre com resultados satisfatórios, e o tempo de CPU pode-se tornar inoportuno dependendo da extensão e da minúcia dos modelos. Assim, tornou-se evidente a necessidade de encontrar métodos simplificados que fossem simultaneamente fiáveis e expeditos.

O método que aqui se apresenta tenta contornar todas as questões colocadas previamente e baseia-se na utilização de elementos de placa reforçados como unidades representativas do comportamento dos painéis.

As principais fases do método são:

1. divisão da secção mestra em elementos de placa reforçada;
2. determinação das curvas carga-elongamento dos elementos reforçados;

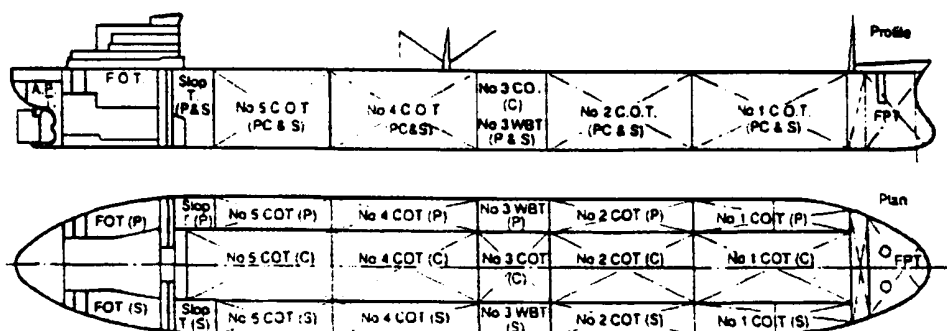


Figura 8 - Perfil do VLCC "Energy Concentration"

3. imposição de uma curvatura ao casco com a consequente determinação da posição instantânea do eixo neutro e do estado de extensão média associado a cada elemento, pressupondo que as secções planas permanecem planas (hipótese de Navier);
4. determinação da carga suportada por cada elemento com base no seu estado de extensão.
5. cálculo do momento flector associado à curvatura imposta.

O exemplo escolhido refere-se a um petroleiro VLCC que se partiu durante as operações de descarga em águas paradas devido ao colapso dos painéis de fundo numa situação de contra-alquebramento [6]. A figura 8 mostra o perfil do navio de 313,00 m de comprimento entre perpendiculares e 216.269 t de porte bruto.

A figura 9 mostra o processo de discretização da secção em elementos representativos do comportamento do painel. Neste caso particular o número de elementos é de 241 e as informações necessárias resumem-se às dimensões geométricas e posicionamento dos elementos perfilados assim como às características mecânicas dos materiais, que neste caso particular são de dois tipos: aço normal e aço de alta resistência, respectivamente com 235 e 315 MPa de tensão de cedência.

Como se pode verificar pela figura os perfis do convés são barras enquanto os do fundo são T's. Esta diferença associado às dimensões de cada um implica

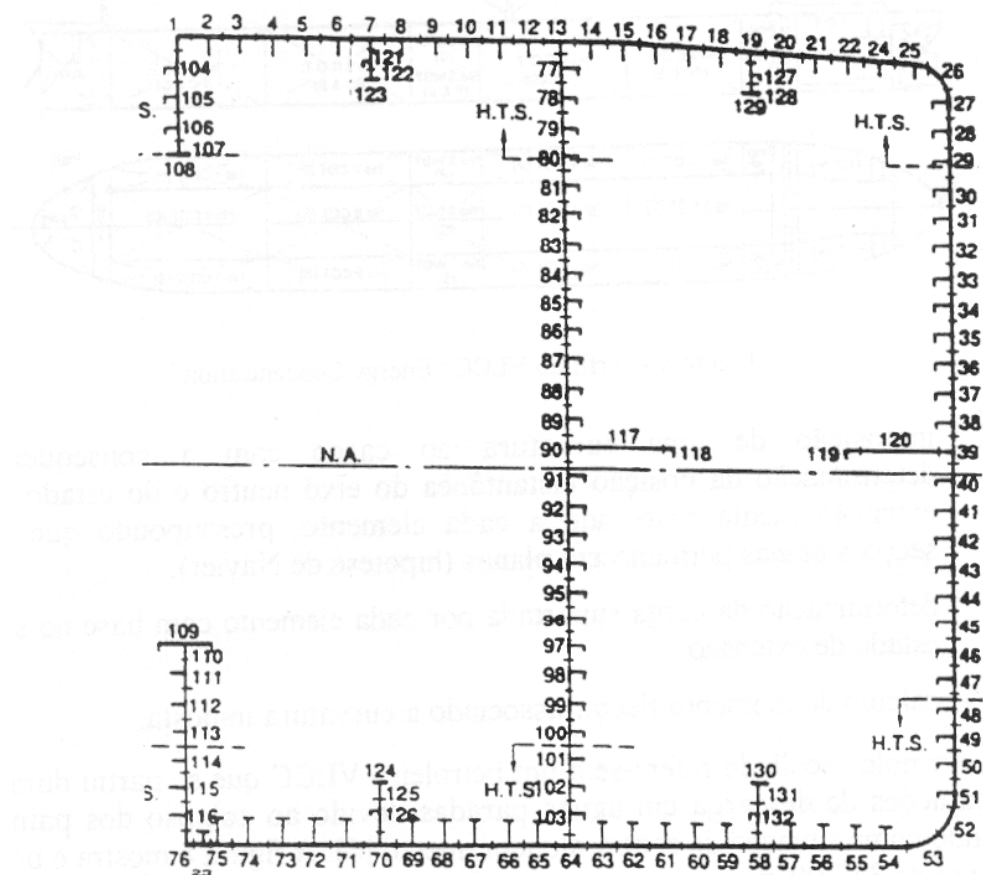


Figura 9 - Subdivisão em elementos da secção mestra.

grandes diferenças nas curvas de carga-elongamento de cada um deles. A figura 10 mostra esse comportamento: os elementos do fundo são pouco esbeltos, não apresentando problemas de instabilidade torsional o que associado à baixa esbeltez das chapas do fundo faz com que a resistência máxima seja muito próxima da tensão de cedência do material e o comportamento pós-colapso não apresente quebras de resistência acentuadas; pelo contrário os elementos do convés apresentam uma rigidez torsional baixa sendo possível detectar que a sua resistência máxima é condicionada pelo modo de colapso associado à flexão e torção conjunta do reforço, sendo, portanto, muito mais baixa do que a do fundo e com uma acentuada queda de resistência no regime pós-colapso.

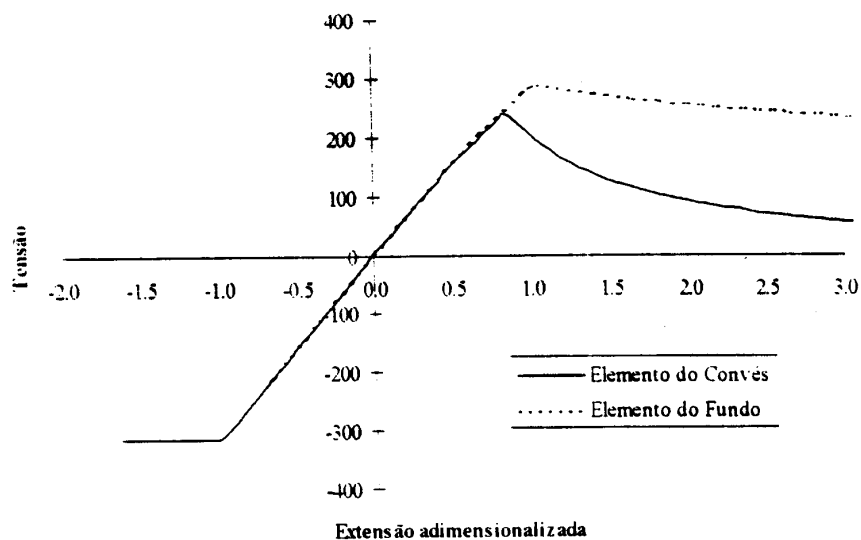


Figura 10 - Curvas de resistência dos elementos de placa reforçados

O quinto passo permite calcular a curva momento-curvatura da secção mestra. Neste caso particular, e devido à diferença de comportamento à compressão entre os elementos do fundo e do convés, as curvas e os respectivos valores máximos são bastante diferentes quando se considera a condição de aquebramento ou contra-aquebramento. A resistência no primeiro caso é muito inferior à do segundo e inclusivamente menor do que a calculada por uma análise linear elástica.

A figura 11 mostra esta diferença de comportamento para as duas situações. Como se pode constatar, o colapso em aquebramento é muito mais violento do que em aquebramento, apesar de na fase de pré-colapso o andamento das curvas ser semelhante.

O estado de tensão de cada um dos elementos está representado nas figuras 12 e 13 para cada caso de curvatura do casco. No caso de contra-aquebramento, figura 12, é possível detectar o colapso de alguns elementos junto ao fundo, imediatamente antes do colapso da secção. Os elementos reforçados do fundo encontram-se a tensões de compressão elevadas, cerca de 300 Mpa. O eixo neutro, por seu turno, ainda se encontra posicionado a meio pontal, correspondendo aos elementos mais escuros junto às escoas.

	Momento (MN.m)	Percentagem (%)
Elástico	19323	100
Plástico	22618	117
Máx. em contra-alquebram.	20248	105
Máx. em aquebramento	15104	78

A tabela 1 - Resume as características estruturais da secção para os diferentes processos

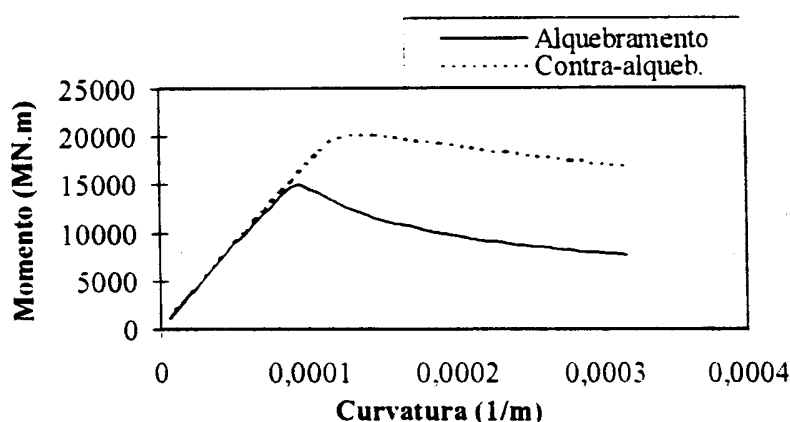


Figura 11 - Resistência longitudinal do navio em aquebramento e contra-alquebramento.5

Quanto à situação de aquebramento, o momento máximo é atingido com o colapso dos painéis de convés entre sicórdias, figura 13. Outra das grandes diferenças entre as duas situações, reside no facto de a cedência do fundo por tracção não se chegar a dar, devido à grande queda da resistência dos painéis do convés depois do colapso, o que provoca a queda do eixo neutro para cotas próximas do fundo ficando os painéis deste sujeitos a baixas extensões.

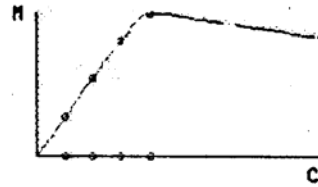
4. CONCLUSÕES

Apresentaram-se dois modulos de apoio ao projecto preliminar da estrutura de navios, os quais contemplam a produção de desenhos de classificação e o cálculo mais preciso da resistência última do casco.

Ambos permitem o aumento da rapidez e da precisão do projecto preliminar da estrutura de navios.

Projecto Estrutural de Navios Assistido por Computador

Curvature= .12668E-03 m
 Bending Moment= .28280E+05 N.m
 Iteration n.28
 Maximum Strain= 1.04(Compression)
 Minimum Strain= -1.14(Tension)



Stresses

• -315
 • -270
 • -225
 • -180
 • -135
 • -90
 • -45
 • 0
 • 45
 • 90
 • 135
 • 180
 • 225
 • 270
 • 315

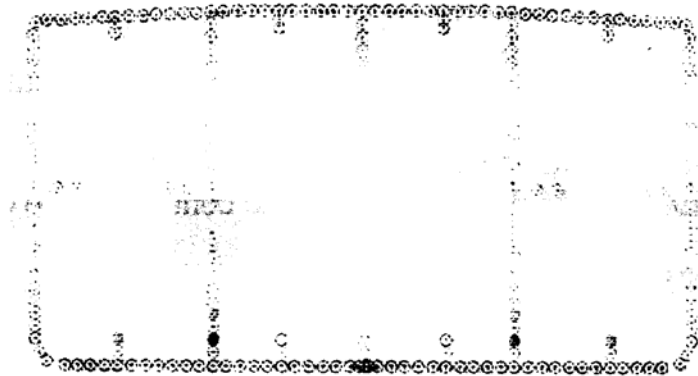
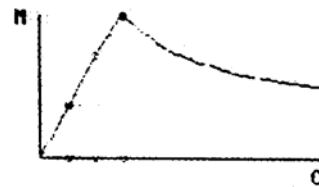


Figura 12 - Tensões nos elementos com o navio em contra-alquebramento.

Curvature= .94940E-04 m
 Bending Moment= .15000E+05 N.m
 Iteration n.15
 Maximum Strain= .93(Compression)
 Minimum Strain= -.70(Tension)



Stresses

• -221
 • -187
 • -153
 • -118
 • -84
 • -50
 • -16
 • 19
 • 53
 • 87
 • 121
 • 155
 • 190
 • 224
 • 258

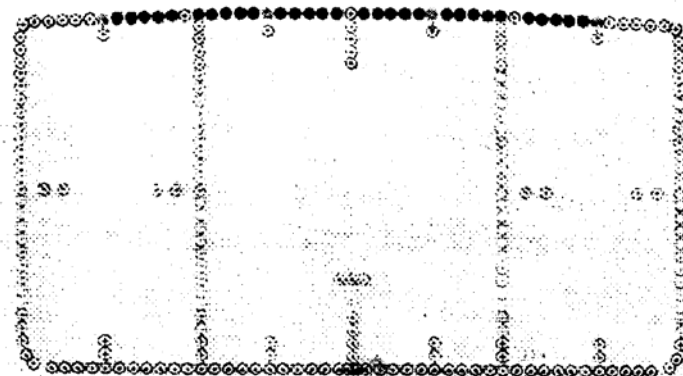


Figura 13 - Tensões nos elementos com o navio em alquebramento.

5. RECONHECIMENTOS

O primeiro módulo foi desenvolvido no âmbito do projecto de Desenvolvimento de um Sistema de Projecto Assistido por Computador, que também envolve os Estaleiros Navais de Viana do Castelo e que foi financiado pelo PEDIP.

O segundo modulo foi parcialmente desenvolvido no âmbito do projecto "Reliability Methods for Structural Design" que também envolve o Bureau Veritas, Germanischer Lloyd, Registro Italiano Navale e Universidade Técnica da Dinamarca, tendo sido parcialmente financiado pelo programa BRITE/EURAM da CCE, através do contrato CT910501.

6. REFERÊNCIAS

1. M. GORDO and C. GUEDES SOARES "Approximate Load Shortening Curves for Stiffened Plates Under Uniaxial Compression", *Integrity of Offshore Structures-5*, D. Faulkner, M.J. Cowling, A. Incecik, P.K. Das (Eds). EMAS, Arly, 1993, pp.
2. M. GORDO, C. GUEDES SOARES, D. FAULKNER, "Aproximate Assessment of the Ultimate Longitudinal Strength of the Hull Girder", *Journal of Ship Research*, Vol. 1995.
3. M. GORDO, C. GUEDES SOARES, "Approximate Method to Evaluate the Hull Girder Collapse, *Marine Structures*, Vol. 9, 1995.
4. J.B. Caldwell, "Ultimate Longitudinal Strength", *Trans. Royal Institution of Naval Architects (RINA)*, Vol. 107, pp. 411-430, 1965.
5. D. Faulkner: contribution to the discussion of ref. [1], 1965.
6. S.E. Rutherford and J.B. Caldwell, "Ultimate Longitudinal Strength of Ships: A Case Study", *Transactions SNAME*, Vol. 98, pp. 441-471, 1990.