

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL E À FADIGA DE ANTEPARAS DE LANCHAS RÁPIDAS EM ALUMÍNIO

^{1, a} Pedro Catarino, ^{1, b, 3} Rui F. Martins, ^{2, c} Paulo Silva

¹Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa
UNIDEMI, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, *Campus* de Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal
Email: ^a pmmcatarino@hotmail.com, ^b rfspm@fct.unl.pt

²Marinha Portuguesa, Direcção de Navios, Departamento de Estudos
Base Naval de Lisboa, 2800-001 Alfeite, Portugal
Email: ^c pires.silva@marinha.pt

³ICEMS/IST, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisbon - Portugal

RESUMO

O presente artigo tem como principal objectivo apresentar a análise realizada ao comportamento estrutural e à fadiga de painéis reforçados unidireccionalmente em ligas de alumínio das séries 5000 e 6000 (anteparas), quando submetidos ao efeito de *slamming* e de alagamento de compartimentos estanques adjacentes. O estudo do comportamento estrutural das anteparas foi realizado utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), tendo sido modeladas as estruturas como projectada e como fabricada, de modo a verificar-se a contribuição das imperfeições resultantes do fabrico das anteparas nas tensões estruturais induzidas pelos carregamentos impostos. Para a realização da análise à fadiga, a antepara foi instrumentada com um extensómetro e o espectro de extensões foi obtido em navegação, por intermédio de uma ponte extensométrica da HBM, durante 25 minutos. A matriz de *rainflow* do espectro de tensões recolhido foi construída e, com base numa Curva S-N de ligas de alumínio, foi feita a previsão de vida à fadiga da antepara em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Anteparas, *Slamming*, Extensometria, Previsão de Vida à Fadiga, MEF.

ABSTRACT

The main purpose of this article is to present the analysis of structural behaviour and fatigue of unidirectional reinforced panels in aluminium alloys 5000 and 6000 (bulkheads), when subjected to the effect of slamming and flooding of watertight adjacent compartments. The study of the structural behaviour of the bulkhead was performed using the Finite Element Method (FEM) and have been modelled the structures as designed and as constructed, in order to assess the contribution of imperfections resulting from the manufacture of the bulkhead in the stresses induced by structural loads. To perform the fatigue analysis, the bulkhead was instrumented with a strain gage and the strain range was obtained during a 25 minute navigation through a HBM extensometer bridge. The rainflow matrix of the strain spectrum acquired has been made and, based on a SN curve, the fatigue life prediction of the bulkhead under study was made.

KEY WORDS: Bulkheads, Slamming, Fatigue Life Prediction, Finite Element Analysis (FEA).

1. INTRODUÇÃO

As embarcações em estudo podem-se considerar lanchas rápidas em alumínio com 14,5 metros de comprimento total, deslocamento máximo de 18 toneladas, 4,3 metros de boca (largura máxima do navio), com capacidade para atingirem uma velocidade máxima de 25 nós [1].

A sua estrutura, em liga de alumínio, foi dimensionada de forma a possibilitar a operação em mar de força 8 (altura significativa de onda de 9 a 14 m) e ventos de força 10 (48 a 55 nós).



Figura 1. Embarcação em Estudo

As anteparas em estudo (Figura 2) são painéis verticais reforçados unidireccionalmente, construídos em ligas de alumínio de construção naval, que dividem em compartimentos o espaço interno do casco da

embarcação, conferindo-lhe estanquicidade, protecção contra incêndio e contribuindo para manter a forma e aumentar a resistência do casco de toda a embarcação.

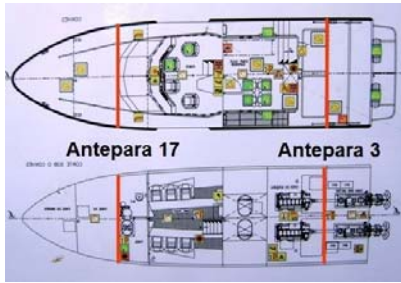


Figura 2. Posicionamento das Anteparas em Estudo na Embarcação Estudada

A chapa das anteparas têm 5 mm de espessura e os reforços (perfis em L), possuem 3 mm de espessura, tendo sido soldados perpendicularmente ao plano da chapa da Antepara com um espaçamento de 250 mm. A liga de alumínio utilizada no fabrico das chapas das Antepara é a liga 5083-H111 (Al-Mg) (uma liga não tratável termicamente), enquanto que os reforços são construídos na liga 6086-T6 (Al-Mg-Si), que é tratável termicamente. Ambas as ligas são conhecidas pelo seu bom desempenho em ambientes marítimos. Na Tabela 1 e 2 estão as principais propriedades mecânicas das ligas 5083-H111 e 6082-T6, respectivamente.

Tabela 1. Propriedades Mecânicas da liga 5083-H111 utilizada na chapa das Anteparas [2]

Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Ruptura [%]
190	300	16

Tabela 2. Propriedades Mecânicas da liga 6082-T6 utilizada nos reforços das Anteparas [2]

Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Rotura [MPa]	Extensão de Ruptura [%]
260	310	10

As anteparas foram projectadas para suportar principalmente a pressão hidrostática resultante do hipotético alagamento dos compartimentos estanques adjacentes, assim como as solicitações de compressão, devidas ao efeito de *Slamming* (carregamento no plano), que é o resultado vibratório da estrutura no primeiro modo de vibração natural causado pelo impacto hidrodinâmico da proa aquando da reentrada na água, induzindo forças elevadas, de alta frequência, semelhantes a impulsos [3]. O valor de carregamento devido ao efeito de *Slammin*, utilizado no estudo do comportamento estrutural das Anteparas teve por base um estudo [4] onde se considerou um navio com deslocamento de 90 toneladas, 22 nós de velocidade máxima e altura significativa de onda igual a 10 m, tendo sido calculada uma pressão máxima de impacto igual a 150 kPa. As embarcações em estudo têm um deslocamento de 18 toneladas, uma velocidade superior a 25 nós, e o cálculo de [4] foi revisto no trabalho [5],

de acordo com a formulação incluída em [6], tendo-se chegado a valores próximos de 150 kPa.

No que diz respeito ao valor de pressão hidrostática a que Anteparas poderão estar sujeitas, este vem na forma:

$$P_{h,m\acute{a}x} = \rho gh [Pa] \quad (1)$$

Onde ρ é a massa volúmica da água salgada a 25°C (1025 kg/m^3), g corresponde à aceleração da gravidade e h à altura da coluna de água aplicada à antepara.

Foi considerada também uma outra formulação, de acordo com as regras da Lloyds [6], que dá um valor de pressão constante superior em cerca de 20% do valor médio da formulação (1), na seguinte forma:

$$P_K = 7.2 \times h [kN / m^2] \quad (2)$$

2. MODELAÇÃO 3D DAS ANTEPARAS COMO PROJECTADAS E COMO FABRICADAS E ANÁLISE PELO MEF

O estudo do comportamento mecânico e estrutural das Anteparas pode-se aproximar ao estudo de placas finas reforçadas, uma vez que são elementos estruturais planos, em que a espessura tem uma dimensão muito pequena quando comparada com as outras dimensões (Modelo de Placa de Kirchhoff).

Optou-se por iniciar o estudo das Anteparas analisando o comportamento de placas sujeitas a diferentes condições de carregamento e condições de fronteira, validando os resultados obtidos por via numérica, (CosmosWorks®, Ansys®) por comparação com os resultados obtidos através de expressões analíticas (Soluções de Navier e Levy), validando o uso do *software* para o estudo do comportamento estrutural das Anteparas em estudo.

O processo de fabrico das Anteparas, principalmente a soldadura dos reforços à chapa, induz deformações quer na chapa, quer nos reforços, que têm de ser atenuadas *à posteriori* através de processos térmicos e físicos como a “martelagem” ou “traccionamento”. De modo a obter-se a contribuição e influência das deformações induzidas pelo processo de fabrico das Anteparas reforçadas, assim como dos reforços estruturais, na distribuição de tensões e no comportamento mecânico das estruturas analisadas, optou-se por fazer a modelação de várias configurações de anteparas (Figura 3). Os valores das deformadas permanentes existentes nas anteparas após a aplicação dos processos de atenuamento foram retirados de [5], tendo sido obtidos por medição, *in situ*, de 45 pontos, correspondentes a 4 cotas analisadas por antepara. Na Figura 3 estão representadas as várias configurações de Anteparas que foram modeladas.

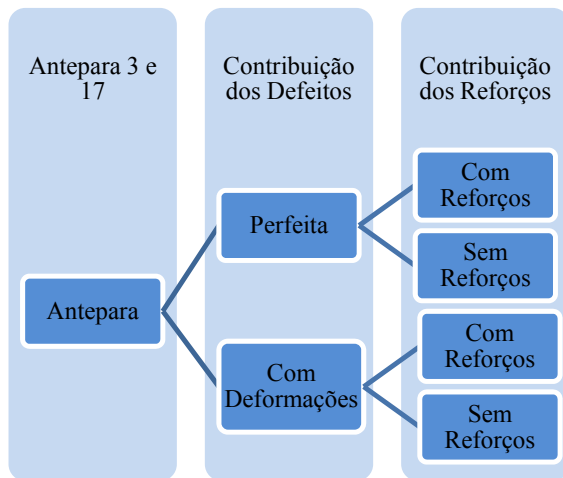


Figura 3. Configurações das Anteparas modeladas

Como exemplo, na Figura 4 está representado o alçado principal e a planta da Antepara 3 com deformações, onde se pode verificar a posição dos reforços e as deformações modeladas.

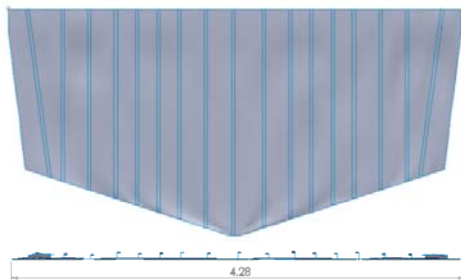
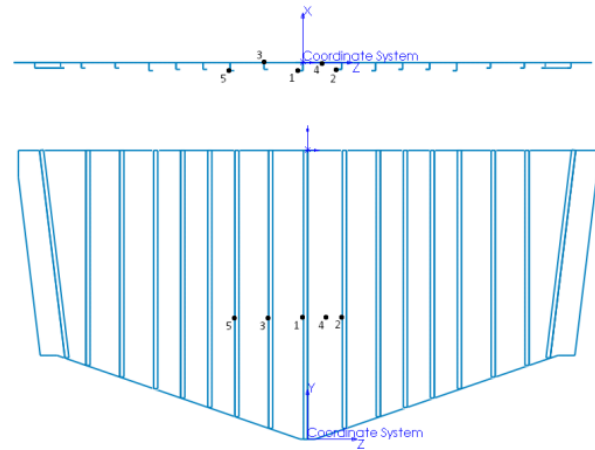


Figura 4. Modelação da Antepara 3 como fabricada.
Dimensão em metros

As condições de fronteira que foram aplicadas a ambas as Anteparas e que melhor representam o cenário real, ainda que com diferenças evidentes em relação às condições de serviço, são o encastramento no topo da Antepara, correspondendo à ligação da Antepara ao convés do navio e a condição de simplesmente apoiada nas restantes faces, correspondendo à ligação da Antepara com o casco do navio. O tipo de elemento finito utilizado em todas as análises realizadas foi o elemento bidimensional xy (placa/casca) SHELL93.

Foram simuladas duas situações distintas em termos de carregamentos: o carregamento de compressão no plano devido ao efeito de *Slamming*, a que correspondeu a aplicação de uma pressão de 150 kPa; combinado com a aplicação de pressão lateral hidrostática, devida ao hipotético alagamento total de um compartimento estanque adjacente.

Foram escolhidos cinco pontos considerados representativos do comportamento estrutural de cada configuração de Antepara (Figura 5), onde foram determinados os valores de tensão de *Von Mises* induzidos pelos carregamentos actuates.



Pontos Representativos:

1. Ponto de valor de tensão máxima (no reforço);
2. Ponto no reforço adjacente ao reforço central;
3. Ponto no reforço adjacente ao central na união com a placa;
4. Ponto da placa entre reforços;
5. Ponto num reforço, não central, não adjacente ao reforço central.

Figura 5. Antepara 3: Alçado Principal e em planta, contendo a posição dos pontos representativos

Como exemplo, na Figura 6 está representado o gráfico de tensões obtido em Ansys para a Antepara 3, real, com carregamento combinado (no plano e pressão lateral hidrostática).

Da análise dos resultados obtidos para os diferentes casos de estudo (Tabela 3 e 4), conclui-se que, para a situação de carregamento exclusivamente no plano, os reforços sofrem pouca solicitação, pelo que a tensão máxima é induzida na chapa da Antepara. Verifica-se que a existência de defeitos iniciais tem pouca influência nos valores de tensão induzidos e que o efeito dos defeitos é anulado com a introdução dos reforços. Para a situação de pressão lateral hidrostática, verifica-se que o valor de tensão máxima, não considerando as tensões induzidas junto à fronteira encastrada, é obtido no reforço principal/central devido à condição de vão máximo, à maior altura do perfil em questão e, consequentemente à maior distância ao eixo neutro da Antepara à fibra externa, sendo, em geral, muito próximas das tensões de cedência da liga de alumínio utilizada (200 MPa), enquanto que as tensões na chapa da Antepara não excedem os 35 MPa.

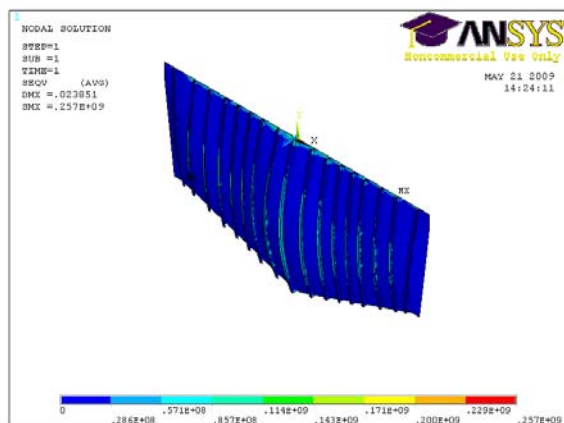


Figura 6. Antepara 3 real com carregamento combinado no plano e pressão lateral hidrostática

Tabela 3. Antepara 3. Valores de Tensão de V.Mises

	Antepara 3 como fabricada	
	Carregamento no Plano	Carregamento Combinado
Tensão a meio vão (ponto 4, Fig.5) [MPa]	0,177	24
Tensão máxima no reforço principal (ponto 1, Fig.5) [MPa]	0,078	199

Tabela 4. Antepara 17. Valores de Tensão de V.Mises

	Antepara 17 como fabricada	
	Carregamento no Plano	Carregamento Combinado
Tensão a meio vão (ponto 4, Fig.5) [MPa]	0,128	12
Tensão máxima no reforço principal (ponto 1, Fig.5) [MPa]	0,1	143

3. RECOLHA E ANÁLISE DE ESPECTROS DE EXTENSÃO

Tendo sido obtidos os valores de tensões induzidos nas anteparas perfeitas e imperfeitas em estudo (Tabelas 3 e 4), para os carregamentos estáticos anteriormente referidos, recorreu-se à aplicação de extensómetros na chapa da Antepara 17, com o objectivo de se obterem os valores de extensão reais, de natureza dinâmica, existentes na Antepara.

Realizaram-se primeiramente ensaios de natureza estática e dinâmica, que tiveram lugar na Divisão de Laboratórios e Qualidade (DLQ) do Arsenal do Alfeite (AA), de modo a possibilitar um primeiro contacto com o uso dos instrumentos de medição (ponte extensométrica), com as técnicas de colagem, etc., e de modo a se validarem as técnicas de extensometria utilizadas. Em todos os ensaios realizados utilizou-se o

esquema de $\frac{1}{4}$ de ponte, com um extensómetro activo, e três resistências de 120Ω , que veio também a ser o esquema utilizado durante a recolha do espectro de extensões induzido na Antepara. Durante o ensaio dinâmico de validação em laboratório foi estudada a resposta dos extensómetros colados sobre uma viga encastrada de alumínio em função da variação da velocidade imposta (10 aos 80 mm/s) e da frequência de oscilação (dos 10 aos 20 Hz) (Figura 7), tendo sido verificado que a frequência máxima de leitura exacta e precisa pelo equipamento utilizado era de 5 Hz.



Figura 7. Montagem experimental do ensaio dinâmico

Com o objectivo de se obterem as tensões induzidas em navegação, foi colado um extensómetro uniaxial na chapa da Antepara 17, num local escolhido tanto pela observação (MEF) da distribuição de tensões máximas derivadas do carregamento no plano (*Slamming*), como pela disponibilidade de espaço a bordo da embarcação. O local escolhido para a colagem do extensómetro foi a meio da Antepara, num ponto próximo do reforço principal com altura máxima e próximo da base desta. Efectuaram-se os processos típicos referentes a tratamentos de superfície e colagem do extensómetro e foi instalado a bordo todo o equipamento necessário às medições (Fig.8).



Figura 8. Extensómetro colado na Antepara e equipamento instalado a bordo

As provas de mar realizaram-se no Mar da Palha (Estuário do Tejo). A velocidade da embarcação durante

a prova foi de 24 nós, podendo-se considerar constante, e a altura significativa das ondas foi de aproximadamente 30 cm. A prova teve uma duração de aproximadamente 25 minutos e uma frequência de aquisição de dados de 5Hz. Com os dados obtidos foi efectuado um gráfico Extensão vs. Tempo, como ilustrado na Figura 9.

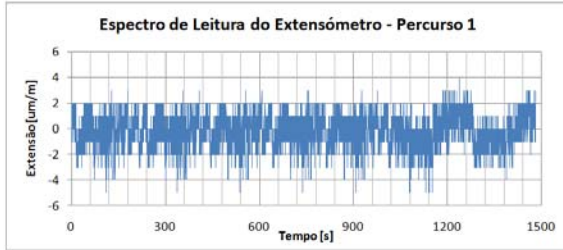


Figura 9. Espectro de leitura

O valor de extensão mínima registada foi de $-5\mu\text{m/m}$ a que corresponde uma tensão de compressão induzida na Antepara 17 de aproximadamente 0.35 MPa (3).

$$\sigma = \varepsilon \times E = 5 \cdot 10^{-6} \times 71 \cdot 10^9 = 0.355 \text{ MPa} \quad (3)$$

O valor de tensão de *Von Mises* que se obteve através do MEF, para a Antepara 17 e na zona de localização do extensómetro, quando simulado o efeito de *Slamming* foi de 0.15 MPa, isto é, um valor 57% inferior ao valor obtido experimentalmente. As possíveis causas para a diferença registada poderão ser:

- A velocidade de aplicação da carga real, por implusos, é diferente da carga estática simulada pelo MEF;
- As condições de fronteira consideradas no modelo numérico não correspondem exactamente às existentes no navio;
- A geometria da antepara real não é exactamente igual à modelada, uma vez que, próximo da zona onde foi colocado o extensómetro existe agora uma porta de passagem entre compartimentos adjacentes;
- Poderão ainda existir erros associados à colagem e leitura dos valores provenientes do extensómetro aplicado, uma vez que os valores de extensão medidos são de muito pequeno valor, quase no início da escala de medição da ponte extensométrica, podendo facilmente incorporar ruído no sinal eléctrico.

4. ANÁLISE À FADIGA

Tendo em consideração o espectro de carga real obtido (Fig.9), fez-se a estimativa de vida à fadiga da Antepara 17 com o auxílio do *software* de MEF SolidWorks/CosmosWorks.

Com base no espectro de extensões, ou bloco de carregamento, adquirido, obteve-se a matriz de *rainflow* correspondente, com a gama de tensão, tensão média e número de ciclos por cada evento, como ilustrado no histograma apresentado na Figura 10.

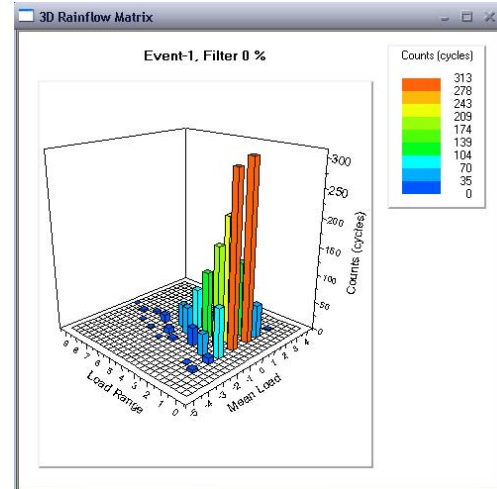


Figura 10. Histograma da matriz de Rainflow obtida

O alumínio utilizado nas chapas das Anteparas (5083-H111) e o alumínio utilizado nos reforços (6082-T6) têm uma tensão de rotura de 300 e 310 MPa, respectivamente, motivo pelo qual se utilizou na análise de vida à fadiga a curva S-N correspondente a aluminios com tensão de rotura superior a 260 MPa, como ilustrado na Figura 11, a qual foi retirada da referência bibliográfica [7].

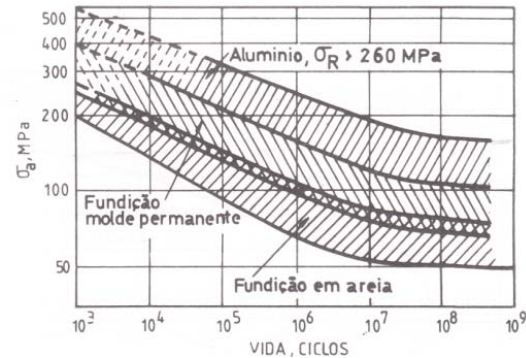


Figura 10. Curvas S-N [8]

Uma vez que a tensão média correspondente ao espectro de carga real é, em alguns ciclos, diferente de zero (Fig.10), foi utilizado o critério de dimensionamento de Soderberg para fazer a correcção da tensão limite de fadiga (4):

$$\sigma_a = \sigma_{f0} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right) \quad (4)$$

onde:

- σ_{f0} - Tensão limite de fadiga para uma tensão média igual a zero;

- σ_c - Tensão de cedência;
- σ_R - Tensão de rotura.

Os factores de redução para a tensão admissível de fadiga, σ_{fadm} (5), considerados foram:

- $k_1 = 0.72$ (coeficiente representativo do efeito de acabamento superficial laminado[7]);
- $k_2 = 1$ - coeficiente representativo do factor dimensão;
- $k_3 = 0.868$ - coeficiente representativo de uma fiabilidade de 95%;
- $k_4 = 1$ - coeficiente representativo para tipo de solicitação;
- $k_5 = 1$ - coeficiente representativo do efeito da temperatura;

ficando:

$$\sigma_{fadm} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot \sigma_f \quad (5)$$

$$= 0.72 \cdot 1 \cdot 0.868 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \sigma_f = 0.625 \cdot \sigma_f$$

Os resultados em termos de vida à fadiga em número de blocos de carregamento e dano por bloco foram:

- Dano para o espectro introduzido = $1,8E-6$
- Vida à fadiga = $5,362E5$ blocos

Conclui-se que, para uma utilização típica da embarcação em estudo, de aproximadamente 400 horas de navegação por ano, e para o espectro de carga introduzido, a vida à fadiga da Antepara corresponde a 220000 horas de navegação, o que se pode considerar vida infinita para o tipo de utilização referida.

5. CONCLUSÕES

Verificou-se através da modelação 3D das Anteparas 3 e 17 das embarcações que para o caso de carregamento devido ao *Slamming*, carregamento exclusivamente no plano, os reforços sofrem pouca solicitação. A tensão máxima é induzida na chapa da Antepara e equivalente à pressão de carregamento. A distribuição de tensões é equivalente na Antepara com reforços e na Antepara sem reforços. Porém o deslocamento máximo diminui substancialmente com a introdução dos reforços (até 95%).

Para a situação de hipotético alagamento de compartimentos estanques, a tensão máxima é induzida no reforço central principal com aproximadamente 200 MPa. Isto deve-se à condição de vão máximo e maior altura dos reforços principais e consequente de maior distância relativa ao eixo neutro da Antepara. As tensões induzidas na chapa das Anteparas não excedem os 35MPa.

Os defeitos iniciais têm pouca influência para qualquer das situações de carregamento no plano e pressão

lateral. O efeito dos defeitos é anulado com a introdução dos reforços.

A comparação de tensões induzidas entre as Anteparas perfeitas e com defeitos iniciais levou à conclusão que as tensões induzidas nas Anteparas com defeitos iniciais são em geral, e para alguns pontos, inferiores às tensões induzidas nas Anteparas perfeitas (até 15%), possivelmente devido aos efeitos de membrana e de inércia induzida pela chapa com geometria semelhante à de chapa corrugada.

Realizaram-se provas de mar com a intenção de adquirir o espectro de extensões em serviço e fazer uma estimativa de vida à fadiga da Antepara 17. As provas tiveram lugar com condições de mar favoráveis à navegação e, para as extensões recolhidas, a vida à fadiga da Antepara 17 obtida através do *Software* SolidWorks/CosmosWorks foi de aproximadamente 220000 horas de navegação, que se pode considerar vida infinita para um espectro de utilização média da embarcação de 400 horas por ano.

REFERÊNCIAS

- [1] *Revista da Armada*, Janeiro de 2008
- [2] Matias, C., Silva, P.P., Martins, R.F. (2008), "On the analysis of structural details in lightweight aluminium crafts. Ways of improving structural reliability by applying "safe life" vs. "fail safe" principles." PCF 2008, 11th Portuguese Conference on Fracture, pp. 431-443, Monte de Caparica, Portugal
- [3] The Naval Architect, Feature 7, Setembro 2008
- [4] Silva, P.P. Mateus, A., Witz, J., Pereira, C., (2004), "Performance Enhancement of Structural Details in Aluminum Crafts", PRADS2004 9th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, pp. 790-797, Lübeck-Travemünde, Germany
- [5] Matos, J., Silva, Paulo, Martins, R.F., Mateus, A.R.. "Influence of Production Defects in the Structural Resistance of Reinforced Panels in Aluminium Crafts", IRF'2009-3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Oporto, 2009
- [6] Rules and Regulations for Classification of Special ServiceCraft, Lloyd's Register of Shipping, 1999, London
- [7] Branco, C. Moura; Fernandes, A. Augusto; Castro, Paulo, *Fadiga de Estruturas Soldadas*, 2^a Edição, 1999