

26º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore

Rio de Janeiro, 10 a 12 de Novembro de 2014

Projeto Conceitual de uma Embarcação *Crewboat* do tipo Trimaran

Richard D. Schachter, Liliane A. de Souza, Rafael T. Fachini, Vinícius V. Melo
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo:

O presente trabalho visa analisar a viabilidade técnica do projeto conceitual de uma embarcação de alumínio de aproximadamente 50 metros de comprimento, do tipo trimaran, para realizar o transporte de 120 passageiros para a Bacia de Campos. O objetivo principal do mesmo é o estudo conceitual de uma concepção de embarcação viável e de bom desempenho, se comparado com *crewboats* usuais e que possua um bom compromisso entre resistência ao avanço e comportamento em ondas.

Projetada a partir de casco de semi-planeio (ou de deslocamento de alta velocidade, como vem sendo chamado atualmente), a embarcação tem como objetivo atingir uma velocidade de serviço de 30 nós e possui um sistema de posicionamento dinâmico que auxilia em sua operação e manobrabilidade. O projeto foi realizado variando-se sistematicamente a forma e a posição de seus cascos laterais para que o trimaran possuísse a menor resistência ao avanço possível. Para a resistência ao avanço utilizou-se o método de Michell (1898) e comparado com CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Nos cálculos de comportamento em ondas foi aplicada a Teoria dos Painéis.

O sistema propulsivo projetado utiliza turbina a gás. Sua estrutura foi dimensionada pela regra do ABS – *High Speed Craft*, além de calculados a compartimentação, o peso leve e estabilidade.

1 - Introdução

O *crewboat* é uma embarcação especializada no transporte em ambiente offshore de pessoas e cargas para operações offshore, manutenção dos tripulantes de plataformas e das diversas embarcações de apoio em operação.

As descobertas de novos campos de exploração/produção de petróleo e a necessidade pela melhora na logística relacionada ao transporte de pessoas no ambiente *offshore* serviram de inspiração para elaboração de um projeto conceitual de uma embarcação do tipo **Trimaran Crewboat** com financiamento da ANP que conseguisse suprir unicamente a demanda pelo transporte de pessoas para as plataformas de petróleo, abrangendo a Bacia de Campos.

Atualmente, os *crewboats* mais comuns em operação são monocascos que possuem dimensões que podem variar de 30 a 90 m de comprimento e 5 a 12 m de boca.

Pelo fato de não haver no mercado nenhuma embarcação *crewboat* do tipo trimaran que servisse de referência para o presente trabalho, o mesmo contém um mapeamento da variação do comprimento e posicionamento dos cascos central e lateral, bem como algumas discussões sobre os resultados das análises de resistência ao avanço executadas em torno destas variações.

Entre as principais características do trimaran *crewboat* estão:

- 1) Capacidade de manter o posicionamento dinâmico.
- 2) Operar a uma velocidade de 30 nós.

- 3) Autonomia de combustível de aproximadamente 9 horas.
- 4) Possuir comportamento em ondas satisfatório para os mares da Bacia de Campos e Santos.
- 5) Um arranjo geral dentro das normas que possui conforto e segurança adequados para o transporte em ambiente *offshore* da força de trabalho.
- 6) Possuir uma área livre de convés de acordo com o escopo de operação da embarcação.
- 7) O *crewboat* deve fornecer a estrutura necessária para o embarque e desembarque dos passageiros por meio das cestas.
- 8) Capacidade para o transporte de 120 passageiros.

2 - Nomenclatura

Loa: Comprimento total da embarcação;

Lpp: Comprimento de linha d'água;

B: Boca total de cada casco;

Bwl: Boca na linha d'água, de cada casco;

BTotal: Boca total do trimaran;

d: Distância entre cascos (linha de centro);

T: Calado de projeto da embarcação;

T_p : Período de pico da onda;

H_s : Altura significativa de onda;

$S(\omega)$: valor do espectro de mar para a frequência ω .

β : valor do ângulo de incidência da onda regular, considerando 0 mar de proa;

∇ : Volume deslocado do monocasco;

C_p : Coeficiente prismático do monocasco;

C_b : Coeficiente de bloco da embarcação;

%LCBSM: Centro de carena em relação à meia nau e ao comprimento;

PE: Potência efetiva da embarcação fornecida pela Série (HP);

V: Velocidade da embarcação (Kt);

V_s : Velocidade de serviço (Kt);

$\rho_{\text{água}} = 1,025 \text{ ton/m}^3$ (Massa específica da água do mar)

$\rho_{\text{ar}} = 1.222 \text{ kg/m}^3$ (Massa específica do ar);

RT: resistência total do Trimaran (kN);

F_n : número de Froude.

3 - Obtenção da Forma do Casco Principal

Para determinar as dimensões do casco principal foram realizadas algumas interações. Em primeiro lugar foi realizada uma regressão linear de semelhantes *crewboats* presentes no mercado, utilizando-se como parâmetro de regressão a quantidade de pessoas que a embarcação em projeto deve transportar. Porém, como tais semelhantes eram monocascos, algumas restrições precisaram ser adotadas. Assim, com base em artigos de pesquisadores, como David Andrews (1995) e J. Zhang (1997), ambos especialistas no estudo do projeto conceitual e detalhado de trimarans, encontrou-se as dimensões do casco principal.

Tabela 1 - Dimensões do casco principal

Dimensões do Casco Principal			
LOA (m)	BOCA (m)	L/B	Calado (m)
52,1	4,5	11,0	2,4

A base inicial para a forma do casco principal da embarcação foi um casco característico de semi-planeio (ou de deslocamento de alta velocidade) genérico, mas de amplo uso em pesquisas no Departamento, que comprovadamente atinge a faixa de velocidades para $F_n \leq 0,65$.

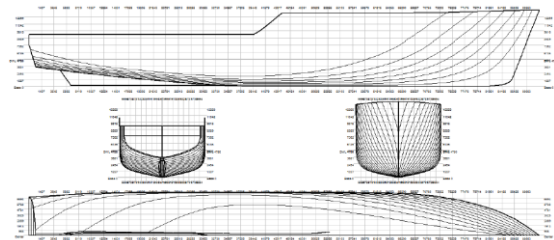


Figura 1-Forma e dimensões do casco central de semi-planeio (deslocamento de alta velocidade) utilizado como base.

Com os valores das dimensões principais da embarcação definidos, variou-se a forma base por meio do *software* FREE!ship de modo a garantir a alta velocidade e a área de convés estimada com base também em semelhantes, obtendo então a forma final para o casco central da embarcação.

Também foram feitas variações da forma na geometria da popa e da proa. Foram testadas inclinações e imersões da popa assim

como, bulbos e posições longitudinais do centro de carena. A forma final encontrada, representada na figura abaixo, é do tipo *wave piercing*, sem bulbo e a posição longitudinal do centro de carena está deslocado 1,5% para vante do casco básico inicial.

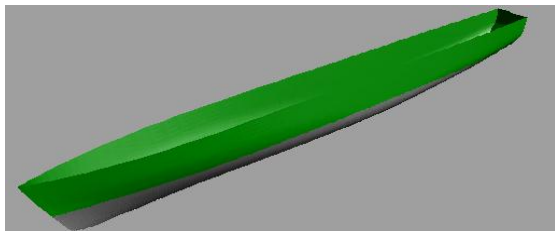


Figura 2 - Forma do casco central do Trimaran

4 - Cascos Laterais: Dimensões e Forma

A presença dos cascos laterais menores que o central é necessária de modo a proporcionar uma área de flutuação adicional do navio para satisfazer os requisitos de estabilidade transversal e, pelos estudos de Andrews (1995), ao contrário dos catamarans em geral, resultar numa melhora do comportamento em ondas da embarcação, se comparada a um monocasco de mesmo deslocamento.

De acordo com David Andrews (1995), o deslocamento mínimo destes cascos laterais deve ficar entre 3 e 5% do deslocamento do casco central.

Para a obtenção das dimensões principais dos cascos laterais foi inicialmente feita com base em uma regressão dos semelhantes de Andrews usando como parâmetro o comprimento do casco central definido anteriormente.

Deste modo as dimensões obtidas de LOA, Boca e calado foram, respectivamente, 20,08 m, 0,36 m e 0,87 m, o que resultou em um LOA/B de 50,20. De acordo com os trimarans estudados por Andrews, que possuem valores de LOA/B que variam de 12 a 37, foi fixado um valor de LOA/B=21 e variou-se assim LOA e B de modo que o deslocamento do casco lateral atingisse 3% do deslocamento do Central.

Tabela 2-Dimensões dos cascos laterais

	CASCO LATERAL	
	REGRESSÃO	DIMENSÕES FINAIS
LOA (m)	20,1	15
B (m)	0,4	0,7
DESLOCAMENTO (ton)	17,2	6,8
L/B	50,2	21
T (m)	0,9	0,9

A forma final dos cascos laterais, assim como a do casco central, foi modelada utilizando-se o *software* FREE!ship e apresenta grande semelhança com o casco central modelado.

5 - Posição Ideal dos Cascos Laterais

Existem vários arranjos diferentes de posições dos cascos laterais, tanto na posição longitudinal quanto na transversal. Foram estudadas uma gama de posições de cascos laterais e suas respectivas resistências ao avanço, de forma a ser definida a posição ideal dos flutuadores.

Posicionaram-se os cascos laterais em três posições longitudinais diferentes: com os espelhos de popas alinhados (Figura 3) e nas posições de 25% (Figura 4) e 45% (Figura 5) do comprimento do casco central. Para cada posição longitudinal diferente foram analisadas posições transversais de 4 a 10,5 metros, como representado nas figuras abaixo.

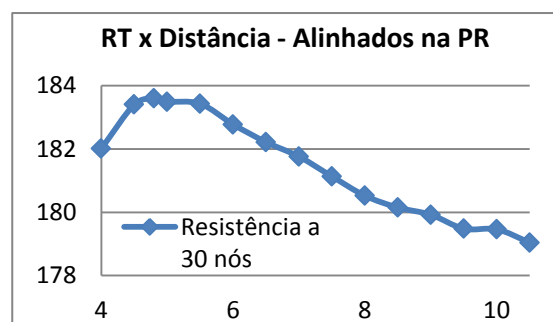


Figura 3—Resistência Total ao Avanço (kN) x Distância Transversal entre os cascos (m) com os Espelhos de Popa Alinhados

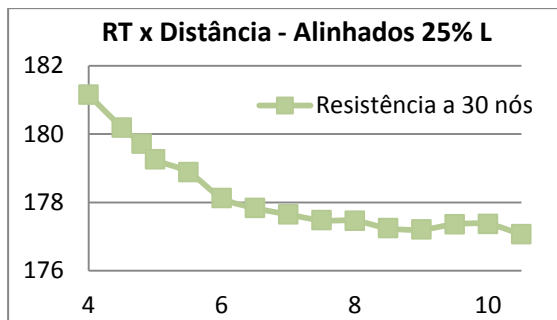


Figura 4–Resistência Total ao Avanço (kN) x Distância Transversal entre os cascos (m) Alinhados em 25% do Comprimento do Casco Central

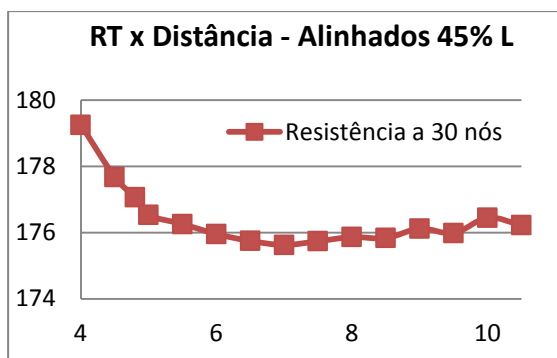


Figura 5–Resistência Total ao Avanço (kN) x Distância Transversal entre os cascos (m) Alinhados em 45% do Comprimento do Casco Central

A posição do casco lateral final é a 45% do comprimento do casco central, com uma distância entre os cascos de 7 metros.

6 - Forma Final do Casco e Resistência Total ao Avanço

A forma final do Trimaran *Crewboat* pode ser vista na figura abaixo:

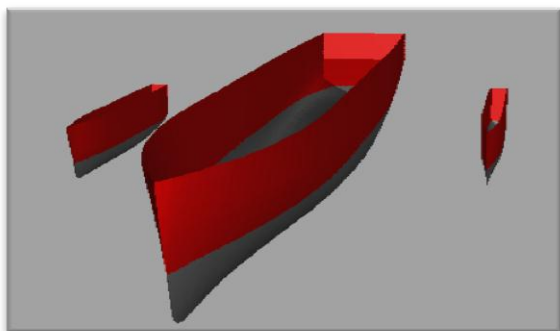


Figura 6–Forma Final do Trimaran *Crewboat*

No projeto do Trimaran *Crewboat* foram utilizados dois métodos numéricos para estimativa da resistência ao avanço:

- 1-Resistência ao avanço pelo Michlet;
- 2-CFD (*Computation Fluid Dynamics*)

Ambos os métodos podem ser divididos em análises que se baseiam na teoria potencial, associadas às estimativas de resistência viscosa de placa plana de Froude (ITTC) ou à resolução das equações de RANS para determinação da resistência viscosa na camada limite. Um modelo numérico (escala real ou modelo) é dividido em malhas ou em painéis de modo que as equações a serem utilizadas pelo método possam ser aplicadas em cada extremidade da malha, ou em cada painel a fim de obter uma convergência final do resultado da análise quando o modelo numérico for submetido a diversas iterações.

As análises numéricas foram realizadas através do *software* livre Michlet (1898), desenvolvido por Lazaukas e Tuck (2005) e do *software* de CFD da empresa ANSYS, o último trabalhando no domínio do tempo.

No presente trabalho fez-se uma análise variando-se as posições longitudinais e transversais entre os cascos laterais de modo a encontrar uma estimativa da menor resistência ao avanço possível. Em seguida analisou-se pelo método numérico de CFD a forma vencedora (de menor resistência), comparando os resultados para que houvesse maior confiabilidade na análise.

6.1 - Michlet

O Michlet é uma das ferramentas que tempor finalidade estimar com maior precisão a resistência ao avanço do Trimaran *Crewboat*, uma vez que este *software* consegue estimar a interferência causada pelas ondas na resistência ao avanço da embarcação. O *software* é baseado no modelo de Michell realiza uma estimativa da resistência ao avanço conjugando dois métodos de análise.

O primeiro consiste na estimativa da resistência viscosa através do método do ITTC1957 (que se baseia na estimativa de resistência de placas planas estudada por Froude) associado a um fator de forma da embarcação; já o segundo método consiste na análise potencial (utilizando o método de painéis – fonte-sumidouro) como forma de estimativa da resistência de ondas, utilizando o campo de pressões distante do casco (análise *far field*). A utilização deste *software* necessita que o operador entre com dados importantes

para a análise, como: fator de forma de resistência viscosa, fator de forma de resistência de ondas, evolução do trim dinâmico da embarcação e evolução da elevação do calado conforme a velocidade da embarcação.

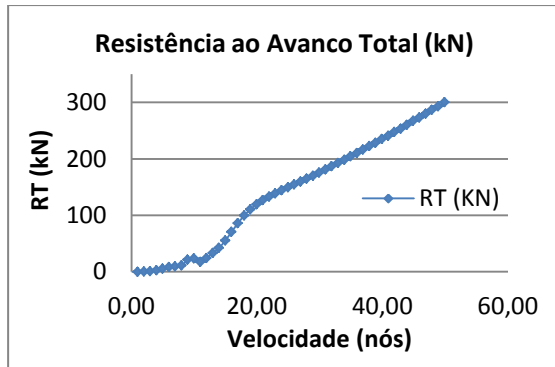


Figura 7–Resistência Total ao Avanço pelo software Michlet

Tendo em vista os estudos de Schachter e Seabra (2012) a cerca do software Michlet, seria interessante que a resistência final fosse calibrada com os fatores de forma de resistência viscosa e de ondas. Tendo em vista que tanto a forma do casco central quanto a dos flutuadores são derivadas de formas-base (genérica) de embarcações de semi-planeio (deslocamento de alta velocidade) do FREE!ship, não será possível quantificar o fator de forma de resistência de ondas da mesma, visto que seria necessário o uso de uma serie sistemática de casco. Mesmo assim, a correção do valor do fator de forma de resistência viscosa já dá uma boa aproximação com a resistência total real do navio, ainda de acordo com a referência citada.

Usaram-se as equações de Holtrop para realizar uma estimativa do fator de forma de resistência viscosa. Através dos estudos de Holtrop, sabe-se que:

$$1 + k = \gamma \left(\frac{B}{L}\right)^{1,06806} \left(\frac{T}{L}\right)^{0,46106} \left(\frac{L}{L_R}\right)^{0,121563} \left(\frac{L^3}{\nabla}\right)^{0,36486} \quad (1)$$

Onde:

$$\gamma = 0,93 + 0,487118c_{14}(1 - C_p)^{-0,60425}$$

$$L_R = L \left(1 - C_p + \frac{0,06C_pL_{CB}}{4C_p - 1}\right) = 16,96$$

$$C_{14} = 1 + 0,011C_{stern}$$

$$C_{stern} = 10(\text{para popa em formato "U"})$$

Assim, encontrou-se um fator de forma de resistência viscosa: $1 + k = 0,13$. E entrando com esse valor no arquivo de *input* do Michlet, tem-se a nova resistência total ao avanço.

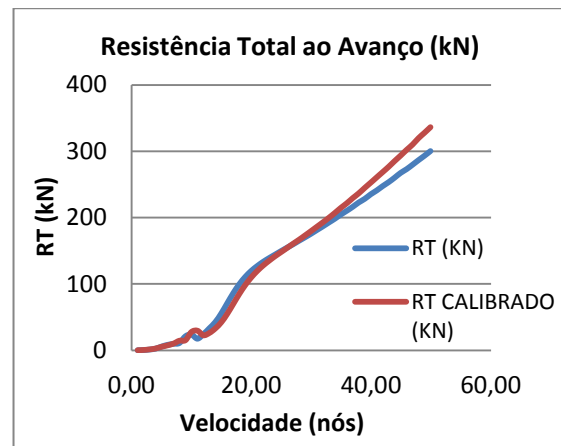


Figura 8–Resistência Total ao Avanço pelo software Michlet corrigida pelo Holtrop

Com a correção a resistência total ao avanço final é igual a 179,6 kN.

6.2 - CFD (Computation Fluid Dynamics)

Como forma de validar o software Michlet onde foi gerado um grande número de dados que serviram de base para a escolha da forma, utilizou-se o método de elementos finitos para fazer uma análise de dinâmica dos fluidos computacional, através do software ANSYS CFX 14.0.

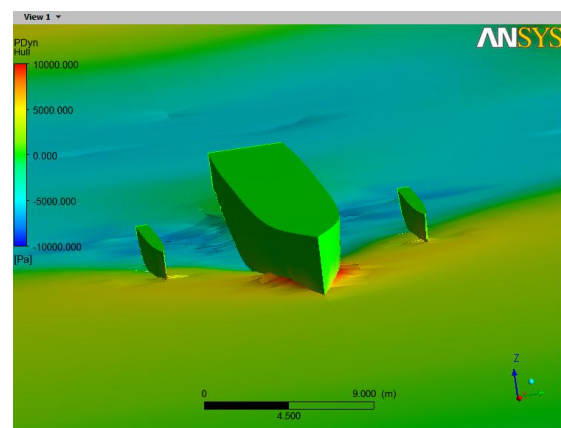


Figura 9–Comportamento das ondas geradas pelo casco na popa.

Os resultados encontrados na velocidade de 30 nós apresentaram-se bastante próximos, com uma diferença de apenas cerca de 5%.

Tabela 3 - Resultados CFD x Michlet

Método	RT (kN)
Michlet	175,6
Michlet Calibrado	179,6
CFD	171,3

7 – Sistema Propulsivo

7.1 – Seleção do Propulsor - Supercavitante

A embarcação irá operar a uma velocidade de serviço de 30 nós e propulsores do tipo Série B não seriam úteis, pois sofreriam com o processo de cavitação, processo este que danifica o propulsor além de diminuir sua eficiência. Por este motivo, optou-se pelo propulsor do tipo supercavitante. A embarcação contará com apenas um propulsor deste tipo.

Adotando-se a Série de Newton-Rader (1961), o propulsor supercavitante ideal selecionado de seus diagramas para a embarcação possui as seguintes características:

Tabela 4–Características do Propulsor

Características do propulsor A3/48/167		
η	n (rpm)	T (kN)
0,76	953,2	193,29

7.2 –Seleção do Motor - Turbina

Considerando as margens de mar (20%), do motor (10%) e de rotação (5%) adotadas, obteve-se uma potência de 15150 kW e uma rotação de 1100 rpm.

Para atingir tais requisitos de rotação e potência, utilizou-se a Turbina á gás da General Eletric LM 1600 (2013), Figura 10, que possui uma rotação de 7000 RPM e 14920 kW de potência.

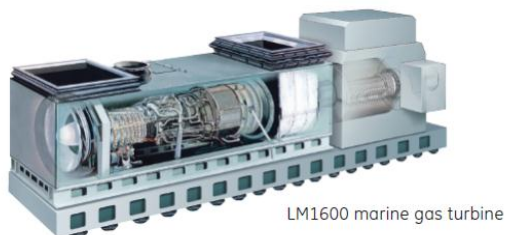


Figura 10 – Turbina a Gás General Eletric LM 1600

7.3 – Seleção da Caixa Redutora

Como a rotação do motor é mais alta do que a rotação necessária para conseguir uma velocidade de 30 nós para nossa embarcação foi necessária a escolha de uma Caixa Redutora entre o motor e o eixo. Esta deve ser capaz de reduzir a rotação do eixo na razão de redução de 7:1 uma vez que:

$$\frac{\text{Rotação do Motor}}{\text{Rotação do Eixo}} = \frac{7000}{1097,88} = 6,375 \cong 7 \quad (2)$$

Optou-se então pela Caixa Redutora do tipo Coaxial, por ser a de melhor compatibilidade com a embarcação. Deste modo a redutora da WARTSILA SCV 110, respeitando a faixa da razão de redução da potência a ser transmitida entre os eixos e a potência fornecida pelo motor, foi selecionada. Ver Figura 18, Arranjo Geral.

7.4 -Seleção do Sistema de Posicionamento Dinâmico

O Sistema de Posicionamento Dinâmico conta com um *bow thruster tunnel* de passo controlável e dois *stern thrusters* azimutais, para evitar possíveis problemas com a manobrabilidade.

Os azimutais são retráteis para que, durante a operação do navio eles não sejam danificados e também, para não aumentarem a resistência ao avanço da embarcação.

A força ambiental total, calculada através da Força do Vento, Força de Correnteza e Força de Ondas, é igual a 81 kN, ou seja, 8,26 ton. Utilizando algumas considerações como, limite de utilização da potência de 90%; correlação entre potência e empuxo *thruster* azimutal retrátil = 70 kW/ton e correlação entre potência e empuxo *thruster* túnel = 80 kW/ton; utilizou-se dois *stern azimuth* retráteis (ZF AT 2000 RT-FP), ambos de até 200kW, e um *bow thruster tunnel* (ZF TT 400 FP) com uma potência máxima de até 440kW.

Tabela 5–Seleção dos Thrusters

Thruster	Correlação Potência (kW/ton)	Força Total dos Thrusters (ton)	Força Total dos Stern Thrusters (ton)
Stern Azzimutal Retrátil	70	2,6	2,6
Stern Azzimutal Retrátil	70	2,6	2,6
Bow Tunnel	80	5,0	
		12,5	5,1

8 – Perfil Operacional

A embarcação opera cerca de 90% do tempo em navegação e, apenas em 10% do tempo, em regime de posicionamento dinâmico.

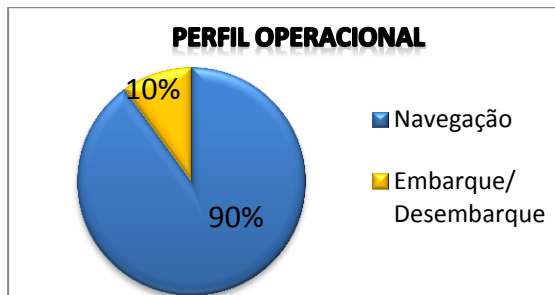


Figura 11–Perfil Operacional

Como a turbina opera com maior eficiência na sua potência máxima, justifica-se assim, a utilização e eficiência excelentes da mesma.

Porém, devido a este mesmo motivo, ou seja, a turbina operar com eficiência apenas na sua máxima potência, os *thrusters* devem além de garantir que o posicionamento dinâmico seja atendido, que exista algum tipo de propulsão caso, eventualmente, seja necessária.

Numa eventual propulsão, em uma velocidade de 10 nós, os *thrusters* se comportam da seguinte forma: (Tabela 6):

Tabela 6–Propulsão a 10 nós pelos Thrusters

DP a 10 nós	
Rt (kN)	27,7
t	0,1
Treq (N)	29446,8
m (kg)	3004,8
F (ton)	3,0

Resumindo a operação do Sistema Propulsivo, durante o traslado até as plataformas, apenas as turbinas e o gerador da superestrutura estarão sendo utilizados, na pior das hipóteses em potência máxima. No momento de embarque e desembarque dos passageiros a turbina será desacoplada da caixa redutora e fará parte do Turbo Gerador, responsável por alimentar os *thrusters*. Estes começarão a funcionar para manter a embarcação em posicionamento dinâmico, no pior cenário de forma simultânea e em

potência máxima. E caso seja necessária uma eventual propulsão sem a turbina, os *stern thrusters* cumprem este papel satisfatoriamente.

9 – Principais Equipamentos da Praça de Máquinas

9.1 – Seleção da Caldeira de Recuperação e do Turbo Gerador

O objetivo de utilizar a caldeira de recuperação é aproveitar a grande quantidade de calor dos gases de descarga da turbina para aquecer água e utilizar o vapor d'água gerado para produzir energia elétrica.

Para converter a energia termodinâmica acumulada no vapor d'água superaquecido gerado nas caldeiras de recuperação em energia elétrica, será utilizado um turbo gerador. Este é um equipamento essencial à embarcação, pois será quem alimentará o sistema de posicionamento dinâmico.

A Caldeira de Recuperação selecionada foi a Alfa Laval *Aalborg WHR-GT* especialmente desenvolvida para turbinas a gás. Tal caldeira foi avaliada segundo um estudo do Balanço Térmico da embarcação, e foi considerada satisfatória.

O modelo de turbo gerador capaz de operar com a quantidade de potência que a caldeira fornece, é o *Turbo Gerador Steam Turbine SST-060 da Siemens* (2013).

9.2 – Seleção do Grupo Diesel Gerador

O grupo diesel gerador alimentará todos os consumidores de energia elétrica da embarcação, exceto o sistema de posicionamento dinâmico.

Através do Balanço Elétrico, a demanda elétrica dos equipamentos da embarcação foi levantada e a seleção dos diesel-geradores pode ser feita. Estes precisam assegurar a realização das atividades do navio e atestam a eficiência energética do projeto.

Com uma demanda de energia elétrica no pior cenário (em manobra) de 710 kW, o *Generator Set 3512C – Caterpillar* com uma potência máxima de 1550 kW foi o grupo diesel-gerador selecionado.



RATINGS AND FUEL CONSUMPTION

Generator Set						
ekW @ .8pf	kVA	rpm	U.S. g/h	g/bkW-hr	EPA - IMO - EU	
60 Hertz ¹	1550	1937	1800	102.2	199.0	NC - II - NC

Figura 12 – Grupo Diesel Gerador selecionado

10 – Topologia Estrutural

A embarcação Trimaran *Crewboat* teve sua estrutura projetada através da regra *High-Speed Craft* (2011), da classificadora ABS, para ser constituída de alumínio naval 5059-H116. A embarcação utiliza estrutura longitudinal e transversal.

A embarcação foi então definida com as seguintes características:

Tabela 7– Características Estruturais

Reforçador	Espaçamento
Longitudinais de convés	25 cm
Longitudinais de fundo	25 cm
Longitudinais de costado	25 cm
Reforços Transversais	40 cm
Cavernas	160 cm
Longarinas	100 cm

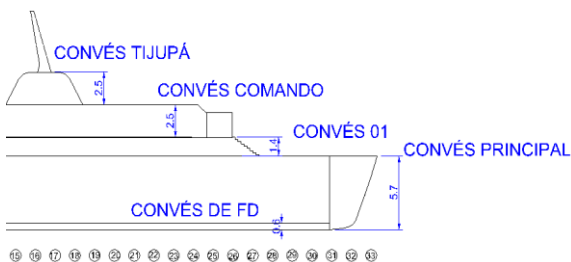


Figura 13- Divisão dos Convéses

A embarcação conta ainda com cinco anteparas estanques, definidas pela mesma regra. Há ainda os compartimentos dos *thrusters*. E os *cofferdams*, dois separando os tanques de água doce, e um separando os

tanques de óleo combustível da praça de máquinas, todos com espaçamento de uma caverna gigante, 1,6 metros. Foi projetada também, uma região de *Cross Deck* acima do convés principal, que não abrigará passageiros. Esta opção se torna válida, pois neste projeto não são levados em consideração estudo de vibração, ruído, e também aplicação de elementos finitos em estruturas.

	Calculado (cm2-m2)	Requerido (cm2-m2)
Módulo de seção convés	3103,86	1057,29
Módulo de seção do fundo	1077,90	1057,29
Momento de inércia	4560,32	3318,98

Figura 14- Cálculos Mínimos de regra

11 - Determinação do peso estrutural

Através do *software Rhinoceros* (2012) foram obtidos os valores das áreas e centros de gravidade de cada chapeamento interno, externo, anteparas, conveses e reforçadores longitudinais e transversais. Este *software* representa de maneira fiel as propriedades definidas para cada elemento geométrico definido.

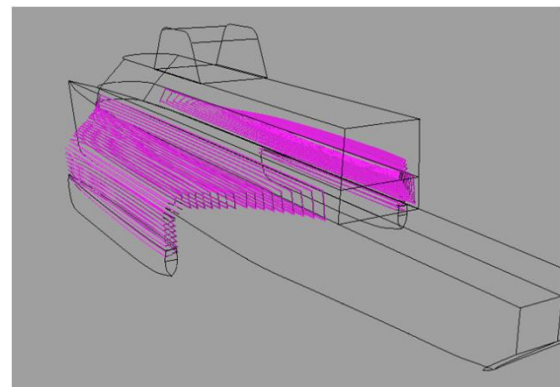


Figura 15 - reforçadores longitudinais na estrutura cruzada (*Cross Deck*).

Deste modo foi possível o cálculo do peso estrutural da embarcação, considerando a densidade do alumínio Naval igual a 2,8 tn/m³.

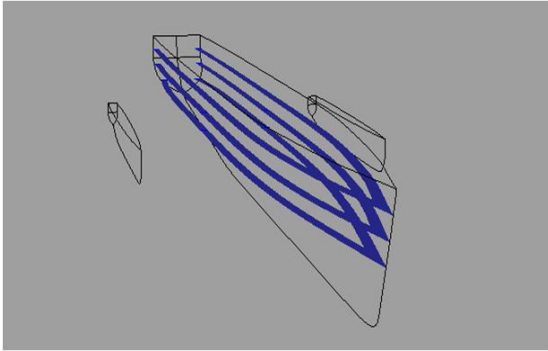


Figura 16- Longitudinais do costado.

Tabela 8-Peso estrutural final do trimaran.

Peso aço (tn)	XG(m)	YG(m)	ZG(m)
78,403	25,191	-0,039	4,706

11-Cálculo de Consumíveis

11.1 - Combustível (Diesel)

O trimaran *crewboat* está sendo projetado para operar na bacia de Campos, mais precisamente para o Complexo de Marlin (160 Km da costa), deste modo, a 30 nós (velocidade de projeto), o tempo que a embarcação levará para entrar na região do Complexo de Marlin à partir da costa deve ser de 3,5 horas. Deste modo, considerando que o tempo de desembarque/embarque de passageiros seja de 2 horas a autonomia do navio deve ser de aproximadamente 9 horas. O que significa que a embarcação deverá ter um tanque de armazenamento de óleo Diesel igual a 32,9 m³ e de serviço igual a 32,65 m³.

11.2 - Água doce Potável e sanitária

De acordo com a Agencia Nacional da Saúde o consumo diário per capita dos tripulantes e passageiros é de 60 litros/dia, deste modo o volume dos tanques de água doce potável e sanitária foram definidos, respectivamente, iguais a 0,71 m³ e 3,95 m³.

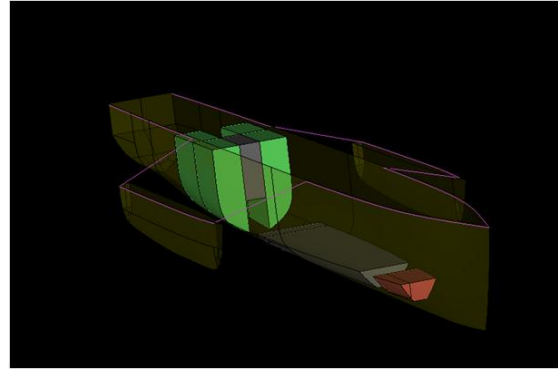


Figura 17- Disposição dos tanques na embarcação.

11.3 - Óleo lubrificante

Na embarcação há três tanques relacionados ao óleo lubrificante, o tanque de serviço de óleo lubrificante do sistema, o de armazenamento para os MCAs (motores de combustão auxiliares) e tanque de borra, cujos volumes calculados foram, respectivamente, iguais a 13,89 m³, 3,12 m³ e 3,26 m³.

Tabela 9-Volume dos tanques de consumíveis.

Tanque de Consumíveis	Volume (m3)
Tanque de Armazenamento de Óleo Diesel	32,93
Tanque de Serviço de Óleo Diesel	32,65
Serviço de Óleo Lubrificante do Sistema	13,89
Armazenamento de Óleo Lubrificante dos MCA's	3,12
Borra de Óleo Lubrificante	3,26
Tanque de Água Doce Potável	0,71
Tanque de Água Doce Sanitária	3,95

12 - Arranjo geral

O arranjo geral do trimaran foi projetado de modo que possibilitasse a realização do embarque e desembarque dos passageiros de maneira segura e rápida pela cesta (ou gaiola) assegurando um caminho tranquilo até os assentos. Há uma escada a ré no convés do passadiço, que desce ao convés dos passageiros, ver Figura 18. A embarcação deve comportar um total de 8 tripulantes, de acordo com as regras da NORMAN e 120 passageiros.

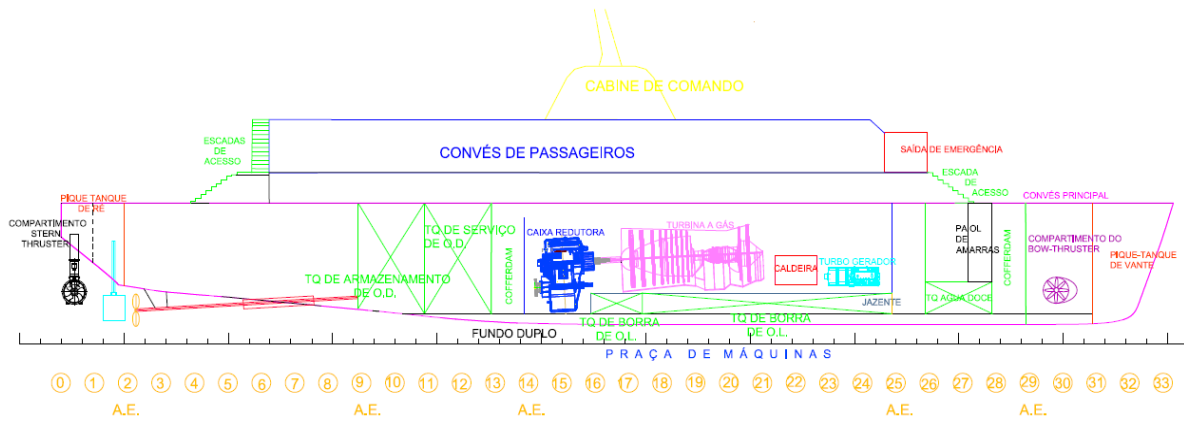


Figura 18 – Arranjo Geral da Embarcação

da praça de máquinas, de convés, das acomodações, etc.

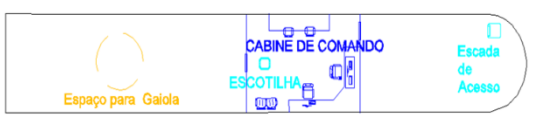


Figura 18- Arranjo da cabine de comando

13.1 - Peso leve estrutural

O peso leve estrutural do trimaran foi calculado através do software *Rhinoceros*. Para isso, os reforçadores transversais, longitudinais, chapeamento externo e interno foram modelados, de modo a discretizar toda a estrutura do navio. Todo o modelo foi constituído de elementos de malha, onde o programa é capaz de calcular a área e o centroide de área dos elementos. Assim considerou-se, como a espessura em geral é muito pequena tanto de chapas quanto de reforços, que o centro de massa do elemento é coincidente com o centroide de área do mesmo.



Figura 20- Arranjo do deck de passageiros.

Para definição do peso total multiplicou-se a área de cada elemento pela sua espessura e pela massa específica do alumínio Naval utilizado, de 2,8 t/m³.

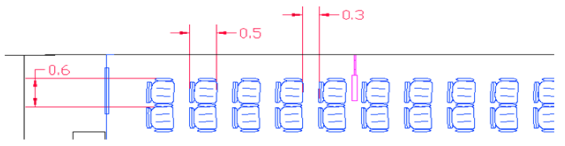


Figura 19-Espaçamento entre poltronas e fileiras.

Tabela 10-Peso e CG Estrutural.

Estruturas	PESO (ton)	XG (m)	YG (m)	ZG (m)
Chapeamento Externo	25,86	25,63	0,00	4,24
Chapeamento Interno (Conveses)	8,31	25,05	0,00	5,96
Chapeamento Interno (Anteparas)	4,07	23,20	0,00	3,90
Reforçadores das Anteparas	1,66	22,07	0,01	3,88
Reforçadores Transversais	13,60	25,17	-0,23	3,91
Reforçadores Longitudinais	24,91	25,33	0,00	5,39
TOTAL	78,403	25,191	-0,039	4,706

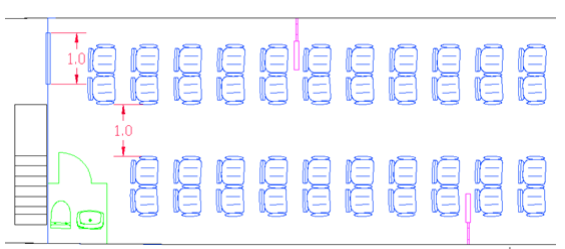


Figura 20- Arranjo e dimensionamento das poltronas.

13 - Peso, CG e equilíbrio

Além da distribuição de aço estrutural, o peso da embarcação foi obtido conhecendo-se os pesos e localizações dos equipamentos

13.2 - Peso e CG da Praça de Máquinas

Através do arranjo geral e do dimensionamento da praça de máquinas, foi possível achar o peso e o centro de gravidade das máquinas do sistema propulsivo e praça de máquinas.

Tabela 11- Peso e CG dos elementos de propulsão

Propulsão/ Praça de Máquinas	PESO (ton)	QTDE	PESO TOTAL (ton)	Xg (m)	Yg (m)	Zg (m)
Turbina	3,69	1,00	3,69	28,10	0,00	3,00
Hélice (*)	0,30	1,00	0,30	0,90	0,00	0,74
Eixo Propulsor	2,11	1,00	2,11	6,62	0,00	1,00
Eixo Intermediário	0,20	1,00	0,20	24,20	0,00	3,02
Caixa Redutora	2,10	1,00	2,10	21,50	0,00	2,56
Bow Thruster	1,30	1,00	1,30	45,50	0,00	1,77
Stern Thruster	0,34	2,00	0,68	1,48	0,00	1,86
Leme (*)	0,60	1,00	0,60	0,00	0,00	0,64
Madre do leme(*)	0,30	1,00	0,30	0,00	0,00	2,40
Purificadora	0,12	3,00	0,36	33,10	0,57	2,40
Turbo-Gerador	2,80	1,00	2,80	35,90	0,00	3,24
Gerador	7,00	1,00	7,00	0,93	0,00	3,10
Caldeira de Recuperação	1,39	1,00	1,39	33,10	0,00	2,55
Total =			22,83	17,21	0,01	2,59

13.3 - Peso total das máquinas

O Peso total das Máquinas foi estimado através dos artigos de Junwu Zhang (1997) e de Watson & Gilfillan (1976) onde ele é subdividido numa composição de três pesos: motor principal (W_{eng}), sistema propulsivo (W_{prop}), e máquinas auxiliares (W_{aux}):

$$W_m = W_{eng} + W_{prop} + W_{aux} \quad (3)$$

Considerando que o trimaran a ser projetado não possui propulsão nos cascos laterais, as fórmulas desenvolvidas por Watson & Gilfillan foram utilizadas para estimar o peso de cada componente acima do trimaran, da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} W_{eng} &= K_{eng} P_s^{0.84} \\ W_{prop} &= K_{prop} P_s^{0.84} \\ W_{aux} &= K_{aux} P_s^{0.7} \end{aligned} \quad (4)$$

Onde K_{eng} = coeficiente de peso do motor principal; K_{prop} = coeficiente de peso do sistema propulsivo; K_{aux} = coeficiente de peso das máquinas auxiliares; P_s = potência entregue ao eixo, de 13294,95 Mw.

O artigo de Junwu Zhang estima os coeficientes K_{eng} e K_{prop} .

Tabela 12 - Coeficientes K_{eng} e K_{prop} .

Engine Type	K_{eng}
High speed diesel	8.50
Medium speed diesel	9.25
Gas turbines	3.31

Propulsion Type	K_{prop}
Fixed pitch propeller	1.50
Controlled pitch propeller	2.25
Water jet	3.91

Para o coeficiente K_{aux} admitiu-se um valor de 5,54. Dessa forma obteve-se o peso total das máquinas (Tabela 13, a seguir).

Tabela 13 - Peso das máquinas

W_{eng}	9632,185 Kg
W_{prop}	4365,039 Kg
W_{aux}	16121,54 Kg
W_{total}	30118,77 Kg

13.4 - Peso dos equipamentos de convés

De modo análogo ao peso da praça de máquinas foi determinado o peso e o cg dos equipamentos de convés.

Tabela 14 - Peso e CG dos equipamentos de convés.

Equipamentos de Convés	PESO (ton)	QTDE	PESO TOTAL (ton)	Xg (m)	Yg (m)	Zg (m)
Baleeira	2,8	1	2,8	1,6	-0,62	6,25
Balsas Infláveis	0,18	6	1,10	41,2	0	5,9
Total=			3,904	12,79	-0,44	6,15

13.5 - Peso do outfit

Para obter o peso do outfit do trimaran mais uma vez fez-se uso de Junwu Zhang, que apresenta uma formulação empírica para a estimativa de *outfitting* em um navio do tipo trimaran *ferry*. Levando em consideração que não há equipamentos alocados nos cascos laterais, o peso do equipamento de um trimaran *ferry* pode ser estimado como uma função da área de convés de carros (inexistente neste projeto), área de convés de

passageiros (A_p), e comprimento (L_c) e boca (B_c) do casco central:

$$W_o = 0,02 (A_c + A_p) + 0,1 L_c * B_c \quad (5)$$

Onde $A_c = 0$, $A_p = 110,68 \text{ m}^2$, $L_c = 50 \text{ m}$ e $B_c = 4,45 \text{ m}$. Deste modo o peso de outfit foi de: Peso do Outfit = $W_o = 18,46 \text{ ton}$.

13.6 - Peso e CG de amarração e fundeio

Os pesos de amarração e fundeio foram devidamente calculados de acordo com a regra da ABS-HSC Parte 3, Capítulo 5, Seção 1 e a posição de cada CG foi definida no arranjo geral.

Tabela 15-Peso e CG da amarração e fundeio

Equipamentos de Amarração e Fundeio	PESO (ton)	QTDE	PESO TOTAL (ton)	Xg (m)	Yg(m)	Zg (m)
Amarras	4,53		4,53	43,3	0	2,4
Âncora	1,29	3	3,87	52,67	0	3,7
Cabo de Amarras e Espias	-	-	-	-	-	-
Escovém	0,12	3	0,36			
Molinete	1,5	3	4,5			
Galteira	-	-	-	-	-	-
Subtotal=			13,26	48,57	0	2,9

13.7 - Peso leve

Após mapear e definir o peso e CG de todos os elementos do navio o peso leve e CG puderam ser obtidos.

Tabela 16-Peso e CG do trimaran.

	PESO _o (ton)	Xg (m)	Yg(m)	Zg (m)
Estruturas	78,40	25,19	-0,04	4,71
Propulsão/Praça de Máquinas	30,12	33,10	0,00	2,55
Equipamentos de Convés	3,90	12,80	-0,44	6,15
Outfit	18,30	27,12	0,00	4,26
Equipamentos de Amarração e Fundeio	13,26	43,30	0,00	2,40
TOTAL	143,98	26,40	-0,03	3,68

14. Estabilidade intacta

Foram estudadas quatro condições de carregamento (partida e chegada) variando-se quatro parâmetros, nível de óleo diesel, lubrificante, água doce e número de passageiros. Partida e Chegada sem passageiros (Condições 1 e 2) e Partida e Chegada Carregada (Condições 3 e 4). As Partidas são com 100% dos consumíveis e as Chegadas com 10%. As Condições sem passageiros contém tripulação mínima e a Carregada, todas as pessoas a bordo.

Em todas as condições a embarcação atendeu os pré requisitos da IMO A.748 (18)

Ch 3 (1993). O software utilizado foi o Hydromax, do pacote Maxsurf (2013), uma vez que o mesmo apresenta embutida em sua rotina as regras IMO para a análise imediata de todas as condições requeridas pela regra. Ver Figuras 23 e 24 para a Condição 4.

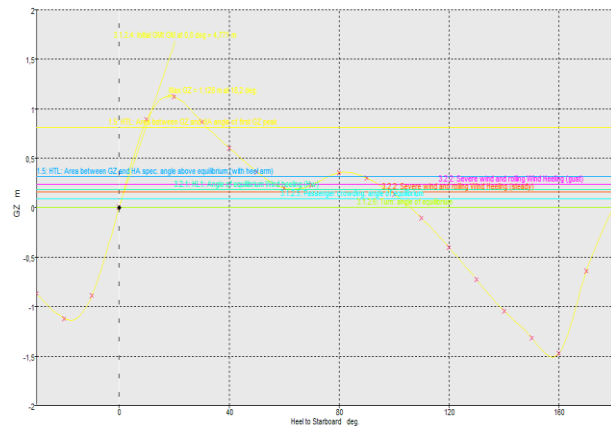


Figura 21-Curva de Estabilidade e emborcamentos para a Condição 4 – Chegada Carregada - Estabilidade Intacta

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin
SOLAS, II-1/8	8.2.3.2:Area under residual GZ curve				Pass	
HSC multi.Damage	2.1.1: HL4: Area between GZ and HA				Pass	
HSC multi.Damage	shall not be less than (\geq)	0,859	m.deg	25,0714	Pass	2818,67
HSC multi.Damage	2.1.1: HL4: Area between GZ and HA				Pass	
HSC multi.Damage	Hpc + Hw	1,604	m.deg	15,2314	Pass	849,59
HSC multi.Damage	3.2.2: HL3: Angle of equilibrium				Pass	
HSC multi.Damage	Wind heeling (Hw)	20	m.deg	0,2	Pass	98,95

Figura 22- Critérios da Condição Intacta 4

15. Estabilidade em avaria (Determinística)

Por meio da regra da MARPOL Anexo I ("Regulation for the prevention for the pollution of oil"), Cap.3, regra 22-(1) (2002), pode ser definido o comprimento hipotético de uma avaria de costado e no fundo, definindo assim as condições mais críticas de avaria a serem estudadas. No total, foram definidas 4 condições de avaria (até o convés principal), todas com a embarcação com 100% dos consumíveis (pior caso para avarias).

Vale ressaltar que todas as avarias ocorrem até o convés principal do trimaran crewboat.

A **condição 1** de avaria é caracterizada pela inundação do compartimento da praça de máquinas, do *cofferdam* a ré da mesma, e dos tanques de óleo diesel.

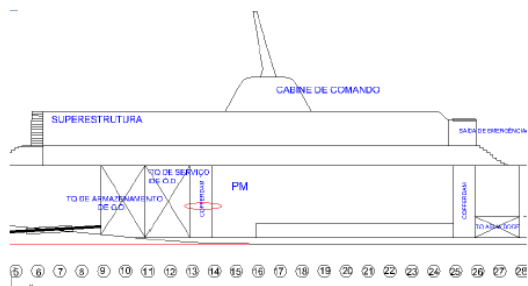


Figura 23 - Condição 01 de avaria.

A **condição 2** é caracterizada pela inundação do compartimento da praça de máquinas, do *cofferdam* a vante da mesma, e do compartimento imediatamente à vante ao *cofferdam*.

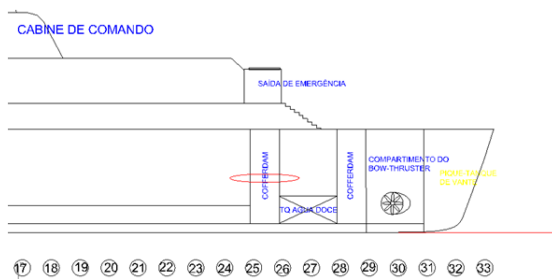


Figura 24 - Condição 02 de avaria.

A **condição 3** é caracterizada pela inundação do compartimento da praça de máquinas, do *cofferdam* a vante da mesma, e dos tanques de água doce e potável subsequentes.

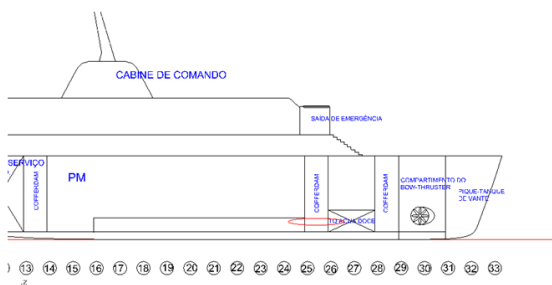


Figura 25- Condição 03 de avaria.

A **condição 4** de avaria é de avaria caracterizada pela inundação da praça de máquinas e do fundo duplo.

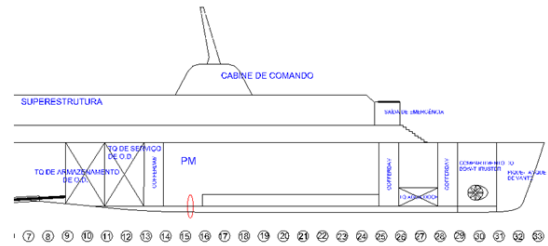


Figura 26 - Caso 4 de avaria

Mais uma vez o *software* utilizado foi o Hydromax do pacote Maxsurf. Para todas as condições estudadas a embarcação ficou dentro dos requisitos estabelecidos pela regra da MARPOL (2002), passando com uma grande margem por todos os requisitos.

16. Seakeeping

O estudo do *seakeeping* (comportamento em ondas) do trimaran *crewboat* foi feito considerando o espectro de mar do complexo de Marlin, que possui uma altura significativa de onda igual a 3.0 m e período de pico igual a 9,21 s. O espectro de mar utilizado foi o de JONSWAP com as devidas correções para a Baía de Campos.

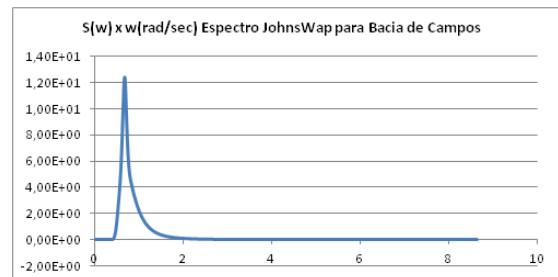


Figura 27 - Espectro de mar JONSWAP para a Baía de Campos.

O cruzamento entre os espectros de mar com os espectros de RAO da embarcação foram realizados considerando a velocidade de serviço da embarcação (30 nós) e o RAO (*Response Amplitude Operator*) da mesma foi obtido utilizando-se do *software* WAMIT(2000), que é o *software* mais indicado para o cálculo da resposta em ondas para um “multi-casco”, pois utiliza a teoria da difração.

$$S_R(\omega_e) = |RAO|^2 S(\omega) \left(1 - \frac{2\omega}{g} U \cos \beta\right)^{-1} \quad (6)$$

Os valores para os ângulos de incidência de onda β adotados foram 0°, 45° e 90°.

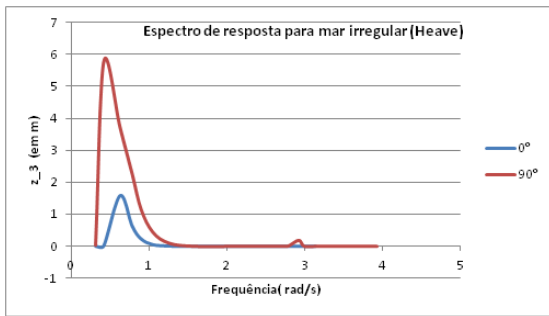


Figura 280 - Espectro de resposta para Heave.

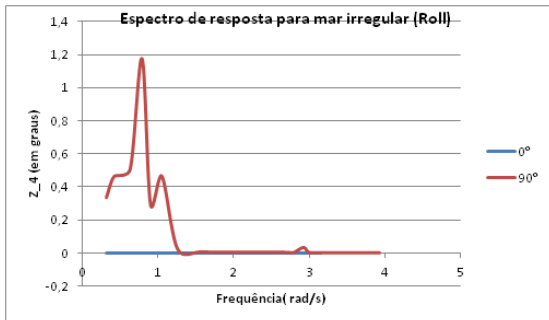


Figura 291- Espectro de resposta para Roll.

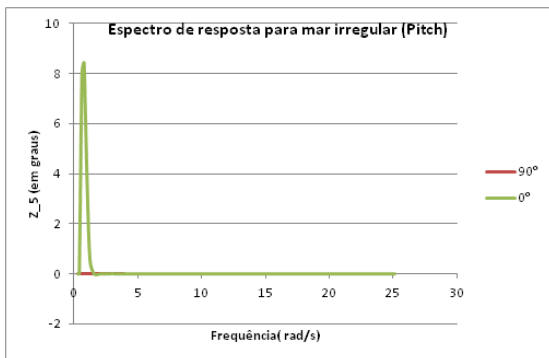


Figura 302 - Espectro de resposta para Pitch.

Para o cálculo das acelerações verticais foi utilizada a publicação “*Dynamics of Marine Vehicles (Ocean engineering)*”, de Rameswar Bhattacharyya. Através deste livro foi possível acoplar os movimentos de *Heave*, *Roll* e *Pitch* para avaliar a aceleração vertical no plano paralelo a linha d’água, variando a distância longitudinal e transversal em relação á linha de centro do trimaran *crewboat*.

Tendo calculado as acelerações verticais para 3 ângulos de incidência utilizou-se da ISO 2631 que apresenta os limites de tolerância à exposição a acelerações verticais em função da frequência de encontro. São apresentadas curvas para trinta minutos, duas horas e oito horas.

Foram calculadas também as acelerações verticais para diferentes pontos longitudinais

do navio e a Figura 34 representa (para um β igual á 0° , mar de proa, *headseas*) e para dois pontos longitudinais, um no CG da embarcação e outro localizado na proa.

Como pode se perceber houve uma enorme aceleração vertical para o ponto na região da proa para as frequências entre 0,1 e 0,2 Hz, fato que já era esperado, pois se observarmos no gráfico da Resposta em *Pitch* (Figura 32) percebe-se que nessa faixa encontra-se próxima a uma frequência de oscilação natural da embarcação. Mesmo assim, em mares de proa (*headseas*), o comportamento é muito razoável para 30 kt longe do bico de proa, que geralmente é inabitável. Para pequenos ângulos de aproamento, sempre se poderá diminuir um pouco a velocidade após 30 minutos, a 30 kt, quando nesta frequência de encontro.

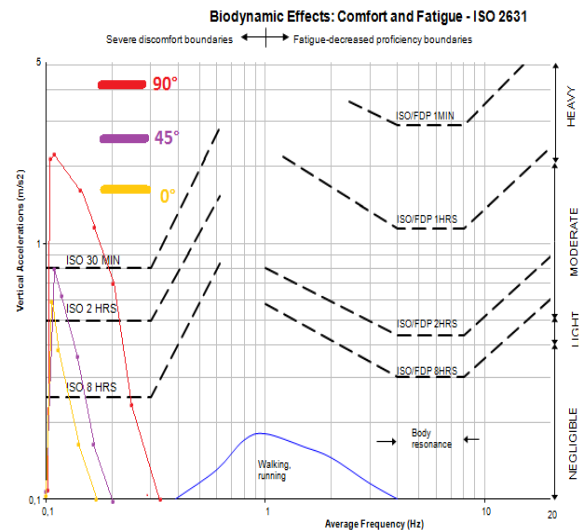


Figura 31- Acelerações verticais no CG e a bombordo da embarcação.

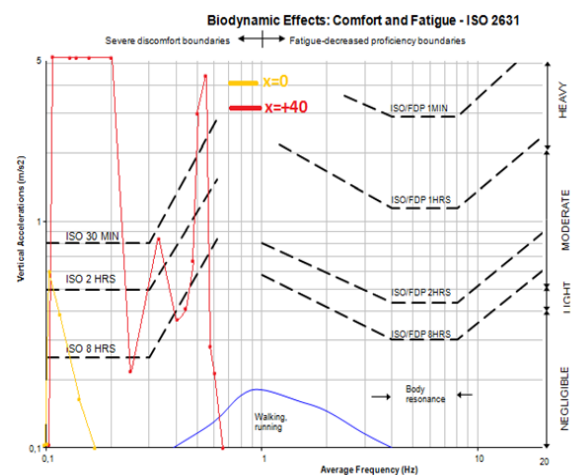


Figura 32 - Acelerações verticais no CG e na proa.

17. Conclusões

Pode-se concluir que o objetivo principal deste projeto, o projeto conceitual de um *crewboat* do tipo trimaran, foi executada a contento, sendo a embarcação viável.

Além disso, o projeto obteve boas indicações de que o software Michlet, em conjunto com uma análise numérica no domínio do tempo, como o CFD, pode se caracterizar como uma ótima estimativa inicial da resistência ao avanço de uma embarcação deste tipo, uma vez que permite ao projetista estudar com precisão a mudança de alguns parâmetros de projeto.

Vale ressaltar que o projeto, por conter uma aplicação inovadora para a área de operação escolhida, pode ter omitido algumas considerações não percebidas em sua concepção. Entretanto, um passo inicial foi dado para que trabalhos futuros possam corrigir e talvez evoluir o projeto de embarcações multicascos de deslocamento de alta velocidade e de planeio. É importante notar que em mares de proa (e quase de proa) o comportamento em ondas desta concepção a 30 kt e em Mar 3 é aceitável na sua área habitada, o que representa uma vantagem sobre muitas outras concepções.

18. Agradecimento

Os autores desejam agradecer à **ANP** pelo patrocínio que tornou possível o desenvolvimento deste projeto.

19. Referências Bibliográficas

[1] ANDREWS, D.J., ZHANG, J.W., "Trimaran Ship – The Configuration for the Frigate of the Future", Naval Engineers Journal, Volume 107, pp 77-94, 1995.

[2] BHATTACHARYYA, R., "Dynamics of Marine Vehicles (Ocean engineering)", John Willey & Sons, New York, 1978;

[3] High Speed Naval Craft. Guide for Building and Classing, American Bureau of Shipping, 2007;

[4] HOLTROP, J., "A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data". International

Shipbuilding Progress, Vol. 31, No. 363, November 1984;

[5] Regulation IMO A.748 (18) Ch.3, IMO (International Maritime Organization), London, 1993;

[6] Marpol 73/78, Regulations for the Prevention of Pollution by Oil. IMO (International Maritime Organization), London, 2002;

[7] NEWTON, R.N., RADER, H.P., "Performance Data of Propellers for High Speed Craft" – Quarterly Transactions of The Royal Institute Of Naval Architects, Vol. 103, No. 2, 1961;

[8] SCHACHTER, R.D., SEABRA, P.A., "Obtenção da resistência ao avanço de catamarans através do método de Michell no software Michlet", 24^o CNTACNO, SOBENA 2012, pp. 1-15, Rio de Janeiro, 2012;

[9] Software Wamit, Versão 6.0 disponível em: <http://www.wamit.com/>. Acesso em: 02, abr. 2014, 15:39:30;

[10] TUCK, E. and LAZAUSKAS, L.: Software Michlet, 2005. Disponível em: <http://www.cyberiad.net/michlet.htm>. Acesso em: 20, jan. 2014, 19:30:30;

[11] WATSON, D.G.M., GILFILLAN, A. W., "Some ships design methods", Transactions of The Royal Institution of Naval Architects, London, 1977.

[12] Zhang, J., "Design and hydrodynamic performance of trimaran displacement ships" Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University College of London, London, 1997.