

**MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE**

KELYTON LYNDENBERG TORRES DA SILVA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO CASCO DO NAVIO

**RIO DE JANEIRO
2015**

KELYTON LYNDENBERG TORRES DA SILVA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO CASCO DO NAVIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador: Prof. Hermann Regazzi Gerk

Engenheiro Químico
Especialista em Hidrodinâmica

**RIO DE JANEIRO
2015**

KELYTON LYNDENBERG TORRES DA SILVA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO CASCO DO NAVIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: Prof. Hermann Regazzi Gerk
Engenheiro Químico
Especialista em Hidrodinâmica

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família, cuja dedicação em seus ensinamentos e carinho me ensinou responsabilidade, amor e comprometimento em todas as etapas da minha vida.

Agradeço a minha noiva Camila Oaquim, que em todos os três anos na Escola de formação da Marinha Mercante me ajudou a superar os desafios impostos pelos estudos, confinamento e sentimental, sempre fornecendo uma palavra amiga, um gesto de carinho ou apenas um ombro confortável em momentos difíceis.

Agradeço ao professor e orientador deste trabalho Hermann Regazzi Gerk, que com paciência e muita dedicação me fez gostar sobre o assunto, tendo como base em sua disciplina este trabalho, e pela ajuda durante a pesquisa elaborada, sempre fornecendo fontes de pesquisa e conhecimentos novos.

“A mente que se abre a uma ideia, jamais voltará ao seu tamanho original.” (Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem por finalidade analisar as novas tecnologias relacionadas à evolução ao longo do tempo do formato do casco do navio e equipamentos adjacentes que atuando na prática trazem benefícios a eficiência energética, tais como: economia de combustível e sua influência na redução da emissão de gases poluentes na atmosfera, diminuição de tempo de viagem e custos relacionados a isso e etc. Para isso, são citados grandes estudiosos e suas publicações sobre o assunto, além de trabalhos de pesquisa em campo onde se pode ver na prática esses princípios sendo utilizados em modelos em escala nos tanques de prova e até mesmo em navios, mostrando assim a real necessidade do estudo contínuo nessa área.

Palavras-chave: Hidrodinâmica do casco do navio. Eficiência energética. Número de Reynolds. Número de Froude. Tanque de Prova.

ABSTRACT

This course conclusion work aims to analyze new technologies related to the evolution along the ship's hull form and adjacent equipment working in practice bring benefits to energy efficiency, such as fuel economy and its influence on reduction of greenhouse gas emissions in the atmosphere, reducing travel time and costs related to it, etc. For this, they are cited great scholars and publications on the subject, as well as research work in the field where you can see in practice these principles being used in scale models in test tanks and even ships, thus showing the real need the ongoing study in this area.

Keywords: Hydrodynamics of the ship's hull . Energy efficiency. Reynolds number . Froude number . Proof tank.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	<i>S.S. Great Eastern</i>	12
2	Propulsão em parafuso	13
3	Propulsor do <i>SS Great Britain</i>	14
4	Selo Real com imagem do <i>SS Great Britain</i>	14
5	Cartaz do navio <i>SS Conte di Savoia</i>	15
6	Sistema estabilizador do <i>SS Conte di Savoia</i>	16
7	Interação onda de proa versus onda de popa	17
8	Navio Classe <i>Liberty</i>	18
9	Cálculo da Potência Efetiva	22
10	Componentes da resistência do casco em águas calmas	23
11	Dimensões de um navio	24
12	Tecnologia de geração de bolhas de ar em embarcações	25
13	Navio com casco incrustado	26
14	Bulbo de proa do navio Oscar Niemeyer	28
15	Relação embarcação com bulbo versus sem bulbo	29
16	Interação do bulbo de proa em um teste em tanque de prova HSVA	30
17	Interação das ondas	30
18	Relação entre coeficiente de resistência de onda e Número de Froude	31
19	Proa <i>X-Bow</i> do navio <i>Oceanic Vega</i>	32
20	Comparação tubarão martelo versus Submarino <i>Hunley</i>	34
21	Funcionamento do estabilizador lateral do navio <i>Independence of The Sea</i>	35
22	Otimização da boca da embarcação	36
23	Retirada do bulbo de proa da embarcação	37
24	Redução de 6% do consumo de combustível	38
25	Escoamento do fluido antes da otimização das linhas de popa	39
26	Escoamento do fluido depois da otimização das linhas de popa	39
27	Camada limite e esteira de uma embarcação	40
28	Duto Schneekluth®	42
29	Comparação da utilização do duto	43

30	Duto Becker Mewis®	44
31	Gráfico de ganho de potência versus coeficiente de impulso	44
32	<i>SHI Safer Fin</i>	45
33	<i>Namura Flow Control Fin</i>	46
34	<i>Low Viscous Fin</i>	46
35	<i>Grothues Spoilers</i>	47
36	<i>Pre-swirl stator</i>	48
37	Becker Twisted Fin®	49
38	Gráfico de ganho de potência versus coeficiente de impulso	50
39	Duto <i>Mitsui</i>	51
40	Bulbo costa	52
41	Efeito Asa	53
42	Perfil NACA	54
43	“Pé de galinha”	55
44	<i>Skeg</i> simples e duplo	56
45	Gráfico comparativo do uso do <i>skeg</i>	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	CONTEXTO HISTÓRICO	11
2.1	<i>SS Great Eastern</i>	11
2.2	<i>SS Great Britain</i>	13
2.3	<i>SS Conte di Savoia</i>	15
2.4	<i>Queen Mary</i>	16
2.5	Navio Classe <i>Liberty</i>	18
3	TANQUES DE PROVA	20
4	RESISTÊNCIA	22
4.1	Tipos de resistência	22
5	OTIMIZAÇÃO DO CASCO DO NAVIO	24
5.1	Principais dimensões	24
5.2	Redução da resistência friccional	25
6	DISPOSITIVOS ADICIONAIS	27
6.1	Bulbo de proa	27
6.2	<i>X-Bow</i>	32
6.3	Estabilizadores Laterais	33
6.4	Otimização da proa	35
6.5	Otimização das linhas de popa	38
6.6	Dispositivo Equalizador de Esteira	40
6.6.1	Dispositivo pré-hélice	41
6.6.2	Dispositivo pós-hélice	51
6.7	Leme	52
6.8	Dispositivo de fixação do propulsor	54
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

Buscando aprimorar o comércio, a indústria naval vem ao longo do tempo evoluindo em prol da melhoria em quesitos tais como: eficiência de combustível e consequentemente reduzindo a emissão de gases poluentes na atmosfera, conforto, rapidez e segurança. A indústria naval brasileira não fugiu da tendência mundial, e devido à característica da economia brasileira ser de em grande parte exportadora e ao advento da exploração de petróleo e gás, os investimentos cada vez mais vem aumentando.

O Brasil teve seu maior investimento no setor no Governo do Juscelino Kubistchek, que com seu plano de metas fez com que surgissem mega estaleiros no Brasil e, com a necessidade de cada vez escoar mais carga a maiores distâncias, estudos voltados às partes estruturais e melhorias foram surgindo ao longo do tempo.

Após a Indústria da Construção Naval chegar a ser a segunda que mais construía embarcações no mundo, houve um grande impacto negativo devido à crise do petróleo que afetou o mundo no final da década de 70 e, juntamente com o fim da conferência de frete, fez com que a indústria brasileira entrasse em recessão e diminuísse drasticamente sua produção.

No cenário atual, o maior investimento está vindo da área do petróleo e gás, que com a superprodução atual está gerando investimentos na parte de pesquisa, extração, remoção, tratamento e refinamento.

2 CONTEXTO HISTÓRICO

Desde os primórdios da humanidade o homem passou a depender de embarcações para sua sobrevivência. Mesmo que sem nenhum tipo de aperfeiçoamento, a simples observação de toras de madeiras flutuando em rios ajudou o homem a sair da África e ir para o crescente fértil. Logo que o homem se viu em sociedade, a necessidade do comércio se tornou primordial onde as embarcações eram o principal meio de escoamento de produtos.

Então o ser humano aperfeiçoou as embarcações feitas de madeira, deixando-as maiores e mais resistentes. No começo, o principal meio de propulsão era dado pela força humana, enormes e pesados remos eram empunhados nesta aventura, logo após o homem se jogou ao sabor do vento, utilizando como propulsão enormes velas içadas nos mastros dos navios, dando assim autonomia para maiores travessias e alcance de lugares longínquos.

Na chegada do século XIX, a Revolução Industrial adicionou às embarcações a máquina movida a vapor e o metal nas construções das embarcações, substituindo por completo a força física e as velas, que dependiam das condições climáticas para uma boa navegação.

O ser humano começou a se empenhar na construção de embarcações cada vez maiores, pelo fato de o carvão, que era utilizado para propulsionar o navio e ocupava cerca de 40% do volume total disponível, deixar pouco espaço para o pessoal, maquinário e carga.

Começou, então, um estudo para saber até quanto um navio poderia ter suas dimensões alteradas. O engenheiro inglês Isambard Brunel, pioneiro neste campo de pesquisa, projetou e construiu o navio *SS Great Eastern*, que passaria a ligar Bristol à Nova York, e possuía 207 metros de comprimento, fazendo-o ser duas vezes maior e nove vezes mais pesado que o maior navio já construído na época.

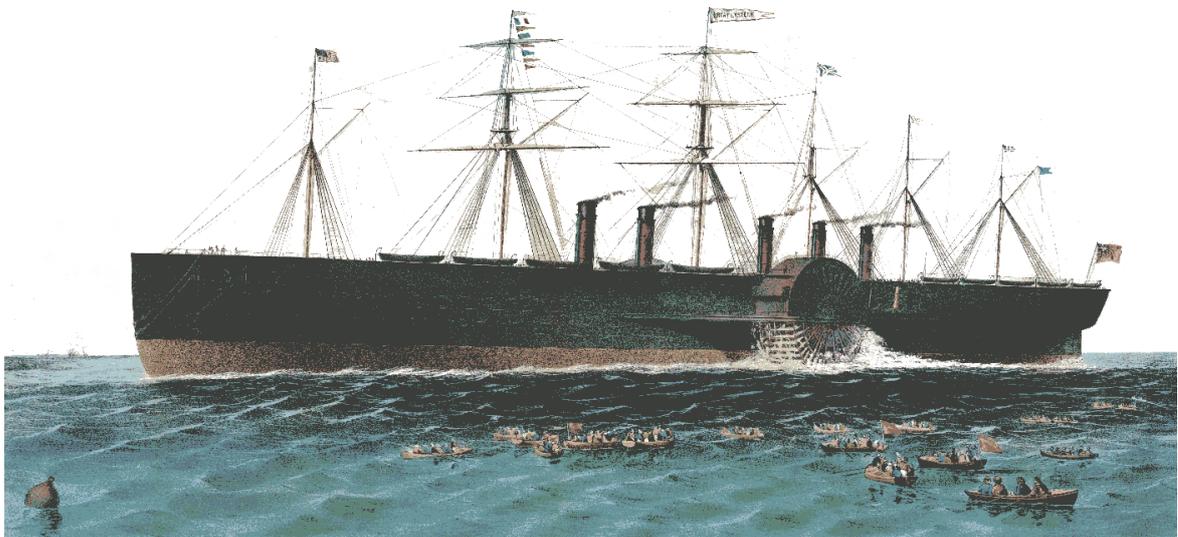
2.1 *SS Great Eastern*

Essa construção só foi possível devido à descoberta, por Brunel, de que a resistência ao movimento na água e a energia necessária para mover uma embarcação a uma determinada velocidade era diretamente proporcional ao quadrado de suas dimensões. Logo, chegou-se à conclusão de que um navio de grande porte, como o *SS Great Eastern*, gastaria uma menor quantidade de combustível, elevando assim ao lucro não somente pelo fato de suportar mais

mercadorias por viagem.

Para realizar a travessia no oceano atlântico, Brunel utilizou de um material que estava sendo empregado em larga escala nas ferrovias, o ferro, tendo em vista que para suportar o peso de seus motores, a grande quantidade de carvão, mantimentos e tripulação, a madeira não aguentaria enfrentar o furioso oceano atlântico e acabaria sofrendo avarias devido aos esforços estruturais de alquebramento e contra-alquebramento.

Figura 1: *S.S. Great Eastern*



Fonte: (<http://www.ikbrunel.org.uk/timeline>)

A ideia do *SS Great Eastern* era muito boa, porém não foi um sucesso devido a suas grandes proporções e sua roda de pás nos bordos. Ele não conseguia acessar todos os portos, encontrando, assim, dificuldade para receber e descarregar cargas e embarcar passageiros e, com isso, prejudicando o lucro que era necessário para manter o navio operando. Além desses fatores, o carvão que deveria ser levado a bordo continuava a afetar o lucro da embarcação, de suas 28000 toneladas de deslocamento bruto, cerca de 12000 toneladas eram utilizadas para armazenar o carvão necessário durante a viagem.

Apesar da análise física das dimensões do navio de Brunel estarem corretas, o navio foi um fracasso comercial, tendo suas ideias inovadoras aproveitadas em construções futuras. Porém ao longo dos anos, pela necessidade de maior escoamento de seus produtos, as cidades foram se adequando e construindo portos e hidrovias com capacidade para receber cada vez mais navios de grandes dimensões, e os construtores passaram a utilizar cada vez mais a descoberta de Brunel.

2.2 SS *Great Britain*

A construção do *SS Great Britain* se deu para solucionar os problemas constatados no seu antecessor. A princípio o problema de sua capacidade de transporte foi resolvido aumentando o tamanho do navio e durante a travessia foi possível se observar outro problema, como o navio era utilizado para fazer a travessia do Oceano Atlântico, as ondas faziam com que ele fizesse o movimento conhecido como balanço, e quando nesse movimento o navio teria uma de suas rodas de pá fora da água e a outra completamente submersa, fazendo com que o navio gastasse parte de sua energia fazendo movimentos descontínuos.

Para resolver o problema da roda de pá foi utilizada uma invenção da época que ficou conhecida como propulsão em parafuso, que fazia com que rotacionando esse parafuso em fluido o mesmo seria capaz de transportar ou empurrar um fluido, fazendo com que o navio que estaria utilizando este tipo de propulsão fosse empurrado no sentido oposto.

Figura 2: Propulsão em parafuso



Fonte: (<http://decioadams.netspa.com.br/tag/ciencia-natural>)

Para utilização deste tipo de propulsão também foi necessário um estudo a fim de saber onde ela deveria ser fixada na embarcação. Ao serem realizados testes, foi notado que, devido a interação da descarga do propulsor, não seria possível colocá-lo a vante. Por essa interação ser prejudicial ao deslocamento do navio, causando vibrações e descolamento da camada limite, o propulsor foi colocado em uma região com o menor contato com a estrutura do casco na popa do navio

Figura 3: Propulsor do *SS Great Britain*



Fonte: (<http://purbeckociety.co.uk/gallery/ss-great-britain>)

Com isso, o *SS Great Britain* foi o primeiro navio transatlântico a ter um casco e um propulsor de ferro, fazendo com que o navio obtivesse maior segurança, maior espaço a bordo e uma redução no tempo de viagem entre a Europa e o EUA, levando apenas 14 dias de viagem, onde o seu antecessor fazia em 15 dias.

Figura 4: Selo Real com imagem do *SS Great Britain*



Fonte: (<http://wooliebackcollectables.com>)

2.3 SS Conte di Savoia

Para concorrer com o *SS Great Britain* a Companhia Italiana *Società Italiana di Navigazione* teve que criar um navio ainda maior e mais rápido e desta vez atender aos pedidos dos tripulantes que reclamavam do desconforto da viagem de travessia do Oceano Atlântico que fazia com o que o navio sofresse com o balanço.

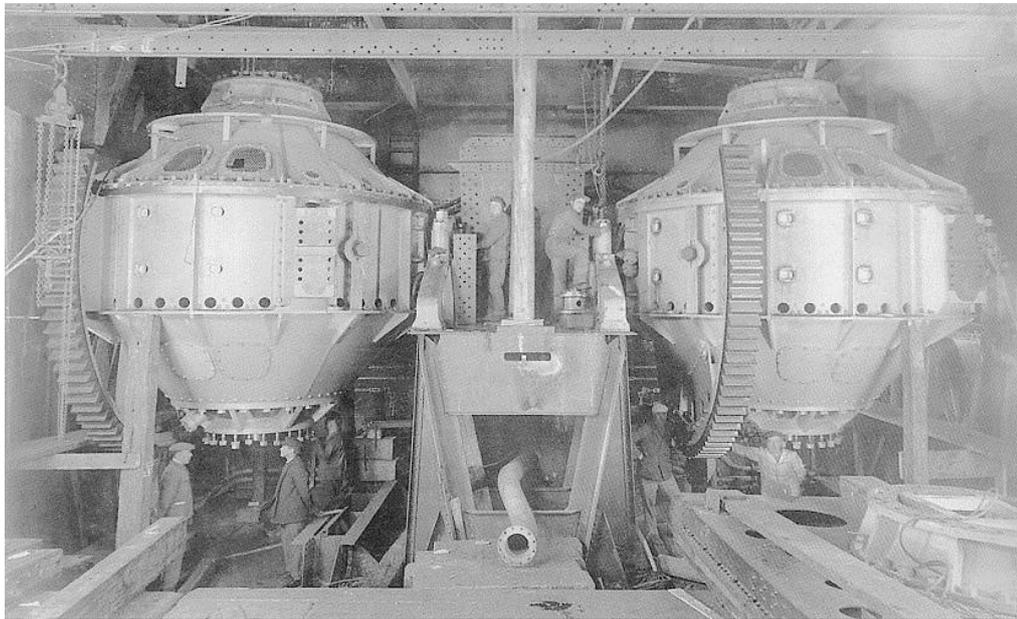
Figura 5: Cartaz do navio *SS Conte di Savoia*



Fonte: (<http://cruiselinehistory.com>)

Para solucionar o problema do balanço o *SS Conte di Savoia* possuía a bordo um sistema estabilizador, com três giroscópios, que obedecia o conceito físico do giroscópio, no qual relata que uma massa em rotação fornece maior oposição a uma força externa que tenta o retirar de sua trajetória, logo toda vez que uma onda tentar inclinar o navio para um bordo o sistema estabilizador fará uma força contrária para o outro bordo mantendo o navio estável.

Figura 6: Sistema estabilizador do *SS Conte di Savoia*



Fonte: (<http://gigantesnavais.blogspot.com.br>)

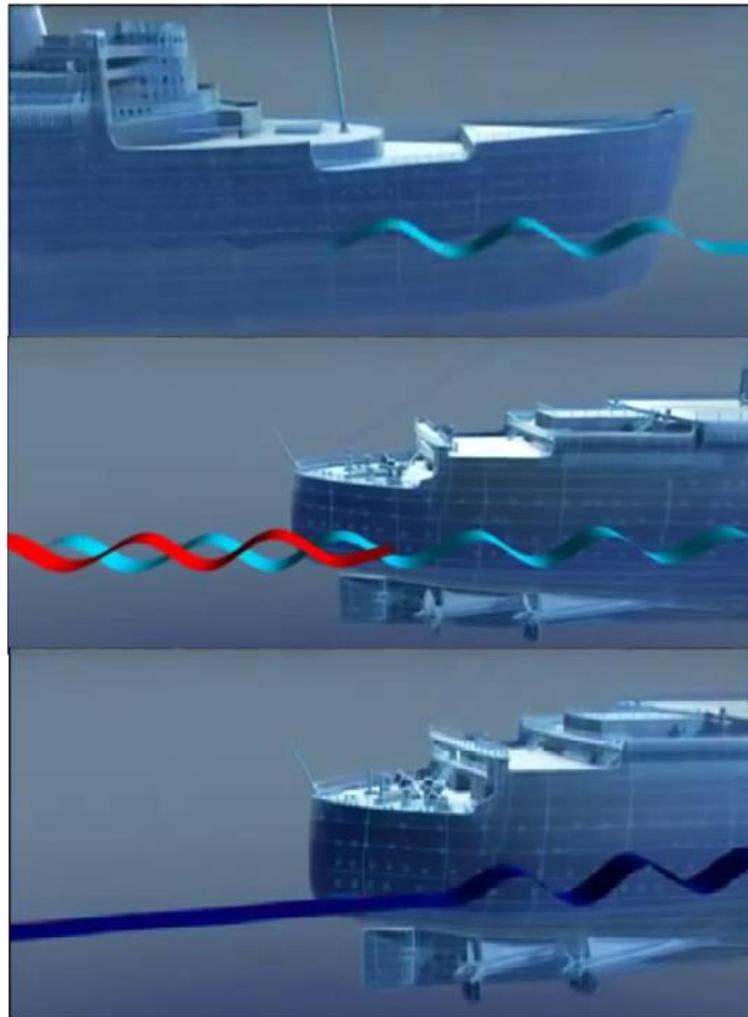
Com isso o *SS Conte di Savoia* ficou conhecido como o navio de cruzeiro sem balanço, e assim fez uma viagem mais rápida, conseguindo transportar um número maior de pessoas e aumentando o seu conforto eliminando o balanço da embarcação.

2.4 *Queen Mary*

O *Queen Mary* começou a ser construído em 1930, e como não tinha muita classe igual ao maior navio de cruzeiro da época, o francês *SS Normandi*, os criadores resolveram ganhar essa disputa construindo um navio mais veloz. Foi dessa ideia que se tentou descobrir nos tanques de prova uma maneira de reduzir a resistência criada pelas ondas geradas pela própria embarcação.

Os engenheiros descobriram que dependendo do tamanho da embarcação poderia se gerar uma onda na proa com um comprimento de onda tal que quando esta onda chegasse na popa da embarcação ela estaria defasada da onda gerada na popa e com isso reduzindo a resistência de onda.

Figura 7: Interação onda de proa versus onda de popa



Fonte: (Vídeo Discovery Channel)

Com isso, o *Queen Mary* provou que com seu maior comprimento ele conseguiria cruzar o atlântico mais rápido e chegou ao seu destino final nos EUA três horas a menos que o navio mais rápido da época.

Atualmente o projeto de um navio se dá sob encomenda e adequando o navio ao tipo de carga que deseja transportar, levando em conta também os lugares por onde irá navegar, afim de saber suas possíveis adversidades, melhorando com isso seu desempenho e eficiência.

Deve-se atentar sempre para o fato de que com o aumento das dimensões de uma embarcação, também são aumentados exponencialmente os problemas de esforços estruturais, vibração e cavitação, que são bastante prejudiciais quando se trata em eficiência energética de uma embarcação, levando em consideração que essa energia é desperdiçada.

2.5 Classe *Liberty*

Os navios da Classe *Liberty*, do tipo cargueiro, foram construídos durante a Segunda Guerra Mundial e se mostraram essenciais na vitória dos aliados na guerra. Os estaleiros norte-americanos construíram em massa este tipo de embarcação, utilizando um desenho original britânico e com suas plantas adaptadas pelo engenheiro norte-americano Willian Francis Gibbs.

Esta classe de navio tem como principal característica a introdução do seu sistema de propulsão utilizando óleo como combustível principal de suas caldeiras, deixando assim o navio mais leve e mais rápido, e melhorando sua eficiência tendo em vista que o óleo proporciona mais potência ao motor que os demais combustíveis fósseis anteriormente empregados.

Figura 8: Navio Classe *Liberty*



Fonte: (<http://wikipedia.com/>)

Hoje em dia, muitos outros fatores além das dimensões das embarcações são relacionados com a eficiência dela, e muitos estudos na área são feitos anualmente para reduzir as deficiências. Por isso são elaborados estudos em protótipos de navios em tanques de provas, onde as dimensões da embarcação real são mantidas proporcionais para que o estudo com o fluido não sofra nenhuma alteração. Esses estudos se devem às pesquisas de Froude, que fez testes em escalas reduzidas em embarcações e chegou a conclusão de que é

possível mensurar dados relativos e similares a embarcações em tamanhos naturais.

A parte mais moderna relacionada ao escoamento de fluídos se deve às pesquisas na parte da aviação, que conseguiram trazer os estudos de efeito asa, conceito utilizado na construção de aviões, e aplicar seus resultados também na água, melhorando a eficiência e manobrabilidade dos navios.

Sendo assim, é fácil perceber que estudos vêm sendo feitos para, cada vez mais, aprimorar a vida a bordo, mas, têm como principal objetivo, otimizar a eficiência das embarcações, assim aumentando cada vez o lucro do armador e diminuindo o custo das operações.

3 TANQUES DE PROVA

Um tanque de prova pode ser definido como um tanque físico ou um canal, onde se desenvolvem testes hidrodinâmicos em modelos de embarcações geometricamente semelhantes e reduzidos em escala, com o propósito de determinar diversos parâmetros para serem utilizados nas construções em escala real.

Com o intuito de oferecer uma melhor categorização, os tanques de prova são divididos em diferentes tipos:

- Tanques Oceânicos;
- Túneis de vento e água circulantes;
- Tanques de Reboque e
- Túneis de cavitação

Em geral, os Tanques de Reboque são utilizados para testes com modelos afim de avaliar a resistência ao avanço, com modelos propulsionados ou não, e, então, obter seus coeficientes de resistência correspondentes. Esses modelos são testados em diferentes velocidades para poder atender a todos os diversos tipos de parâmetros.

A ITTC (*International Towing Tank Conference*) é uma organização voluntária, a nível mundial, que foi originada em 1932, na cidade de Hamburgo – Alemanha, durante a *International Hydro-Mechanical Congress*, que tem como principal finalidade a predição do desempenho hidrodinâmico de navios e instalações marítimas baseado nos resultados de testes em modelos.

Existem vários tipos de tanques de reboque de diversas dimensões. Suas dimensões estão atreladas à funcionalidade e tipos de ensaios que podem realizar. Estes diferentes tipos de ensaios podem ser:

- Ensaios de resistência ao avanço;
- Ensaios de comportamento em onda;
- Ensaios de reboque em superfícies de gelo;
- Ensaios de autopropulsão e
- Ensaios de águas rasas ou pouca profundidade.

Os fatores econômicos são limitações que impõem a caracterização física do tanque. O ideal é que se possua um tanque com suas dimensões maiores possíveis para evitar, assim, restrições geométricas dos modelos de prova. Porém, quanto maior o tanque, também será

maior seu custo operacional.

Existem inúmeros tanques de provas, alguns em universidades, para estudos, e outros de empresas de navegação. Entre os mais importantes, destacam-se:

- Tanque de reboque *David Taylor*: criado em 1939 e sediado na cidade de Maryland, em Washington, EUA;

- Tanque de reboque *Hamburg Ship Model Basin (HSVA)*: criado em 1913 e sediado em Hamburgo, Alemanha;

- Tanque de reboque *Norwegian Marine Technology Research Institute (MARINTEK)*: criado em 1939 e sediado na cidade de Trondheim, Noruega;

- Tanque de reboque *Maritime Research Institute Netherlands (MARIN)*: criado em 1929 e sediado na Holanda.

- Tanque de reboque *Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR)*: criado em 1920 e sediado no Estado de Iowa, EUA;

- Tanque de reboque *National Maritime Research Institute (NMRI)*: criado em 1916 e sediado em Tóquio, Japão.

- Tanque de reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT): criado em 1956 e sediado na cidade de São Paulo, Brasil;

4 RESISTÊNCIA

Um navio, diferentemente de outras estruturas largas, é designado para se movimentar com eficiência na água com o mínimo de assistência externa possível. O problema de movimentar um navio envolve suas proporções e formas (formato do casco), tamanho e tipo de propulsão. A tarefa da arquitetura naval consiste em mensurar os limites de design requeridos, a forma do casco e a propulsão fazendo com que a construção seja o mais eficiente no quesito hidrodinâmica.

4.1 Tipos de resistência

A Resistência de um navio a uma velocidade dada é a força necessária para rebocar o navio nessa velocidade em águas tranquilas, assumindo que não haja interferência da propulsão do navio. A força necessária para sobrepor essa resistência é chamada de *tow-rope* ou potência efetiva e é obtida por:

Figura 9: Cálculo da Potência Efetiva

$$P_E = R_T \times V, \text{ onde:}$$

- P_E = Potência Efetiva em kW;
- R_T = Resistência Total em kN e
- V = Velocidade em m/s.

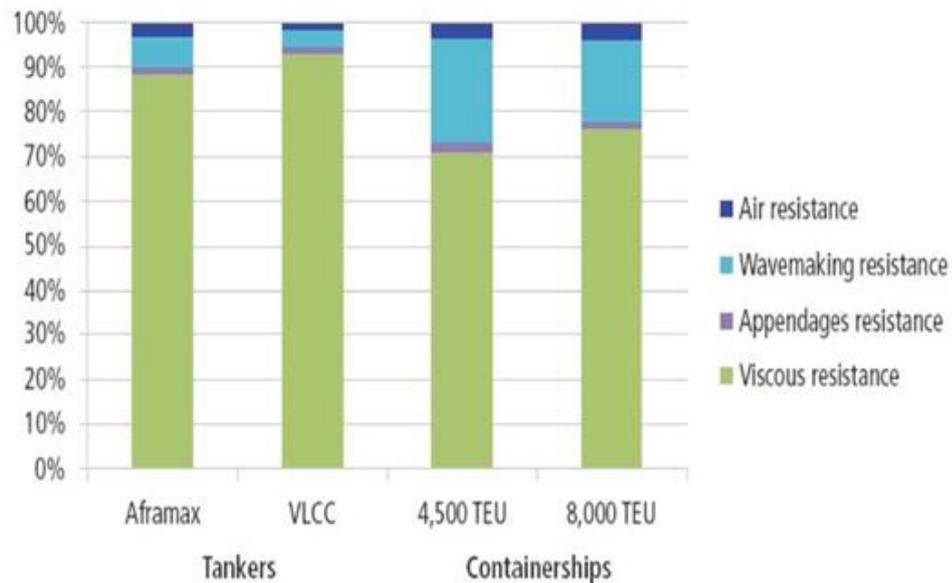
Fonte: (PNA, Volume II, 1998, p. 2)

Esta Resistência Total é formada por um número diferente de componentes, que são causados pela variação de fatores e que interagem um com o outro de uma maneira extremamente complicada. Estas resistências são:

- Resistência Friccional: causada pelo deslocamento do casco em um fluido viscoso, que no caso das embarcações pode se considerar o ar e a água;
- Resistência de Formação de Onda: causada pela onda gerada pelo próprio navio na superfície da água;

- *Eddy Resistance*: Resistência causada pelos apêndices do navio que ao se deslocarem na água criam regiões de vórtices, ou seja, criam turbilhonamentos na água que desprendem energia contra o avanço da embarcação;
- Resistência do Ar: essa resistência afeta as obras mortas da embarcação, causando uma resistência ao movimento da embarcação ao se deslocar neste fluido;
- Resistência de Apêndice: resistência causada pelos apêndices ou protuberâncias que não pertencem ao casco;
- Resistência de Spray: é provocada pela formação de pequenas gotículas de água e o aumento da superfície molhada da embarcação em deslocamento, e
- Resistência Viscosa: criada em função da viscosidade do fluido em que a embarcação se desloca e está diretamente relacionada a geometria do objeto submerso no fluido.

Figura 10: Componentes da resistência do casco em águas calmas



Fonte: (ABS Advisory)

Pode-se observar da figura que a resistência viscosa é a principal componente na resistência total que dificulta o avanço da embarcação, como não se pode modificar o fluido em que a embarcação se encontra, os estudos nesta área são voltados a interação da superfície da embarcação com o fluido em que esta submerso.

5 OTIMIZAÇÃO DO CASCO DO NAVIO

Para tornar cada vez mais eficiente a jornada marítima, em relação ao consumo de combustível, tempo de viagem e conforto dos tripulantes, estudos foram primeiramente direcionados a mudança dos tamanhos das dimensões da embarcação. Por conseguinte, vieram os estudos relacionados a dispositivos acoplados aos cascos das embarcações permitiam melhor interação do fluido e a mesma.

5.1 Principais dimensões

Figura 11: Dimensões de um navio



Fonte: (<http://cvcsaoroque.com>)

- LOA: Comprimento Total
- B: Boca
- D: Calado
- Razões: LOA/B (aumentar) e B/D (diminuir)
- Coeficiente de Bloco (C_b): $V_{deslocado} / LOA \times B \times D$

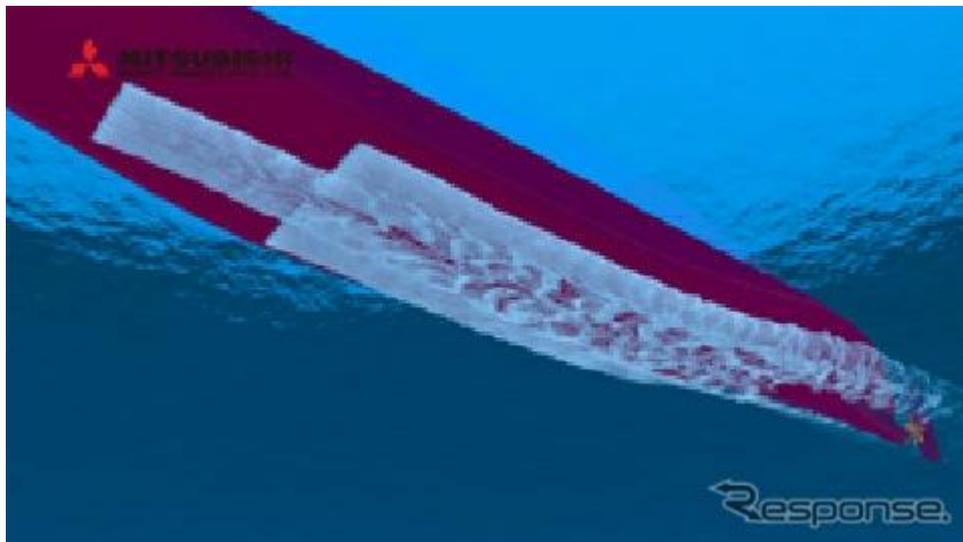
Com isso, aumentando a razão LOA/B, ou somente a LOA e consequentemente reduzindo o coeficiente de bloco, pode se proporcionar uma eficiência no consumo de combustível de 3 a 5%.

5.2 Redução da resistência friccional

Para reduzir esta resistência, temos que alterar a consistência do material que entra em contato com a água e melhorar a interação entre as duas espécies, para que o fluido em deslocamento tenha menos perdas de energia possível. Para isso, pode se fazer:

- Lubrificação por ar: este tipo de tecnologia insere um tapete de ar por baixo da embarcação com o objetivo de reduzir o contato da embarcação com a água, tendo em vista que o ar é um fluido menos viscoso que a água.

Figura 12: Tecnologia de geração de bolhas de ar em embarcações



Fonte: (<http://jpx.responsejp.com>)

- Pintura do casco: a pintura do casco pode reduzir a fricção da água no casco devido a sua superfície rugosa. A pintura pode ser feita com polímeros antiincrustantes e revestimentos antiaderentes.

Figura 13: Navio com casco incrustado



Fonte: (<http://www.sailbrasil.com.br>)

6 DISPOSITIVOS ADICIONAIS

Serão abordados neste tópico, dispositivos hidrodinâmicos que, instalados ao casco do navio, melhoram o seu desempenho e conseqüentemente aumentam a eficiências das embarcações.

6.1 Bulbo de proa

A ideia do bulbo de proa surgiu acidentalmente durante a Segunda Guerra Mundial quando os navios de guerra antissubmarina colocaram na parte de vante da embarcação o sistema sonar, com o intuito de melhorar o seu desempenho e conseguir localizar com precisão os submarinos inimigos. Com o passar do tempo foi percebido que os navios que fizeram este tipo de modificação passaram a atingir maiores velocidades e por consequência obteve economia de combustível comparado com os outros navios da mesma classe, e essa economia foi atribuída a essa adaptação.

O Bulbo de proa se apresenta como uma protuberância na parte da frente das embarcações, fazendo um prolongamento da quilha e se encontra na área molhada. É uma aplicação prática do número de Froude, coeficiente adimensional que relaciona as forças de inércia e forças gravitacionais.

No caso prático das embarcações, o número de Froude é a relação entre a velocidade de deslocamento da embarcação e a velocidade de propagação das ondas geradas na proa da embarcação quando a mesma se desloca no fluido.

Essas ondas geradas pela embarcação nada mais são do que o desperdício de energia que não está sendo utilizada para sua propulsão, o desprendimento dessa energia gera ondas e forma uma resistência ao avanço da embarcação, por isso, é muito importante o conhecimento do número de Froude para a eficiência em relação a este tipo de resistência.

Figura 14: Bulbo de proa do navio Oscar Niemeyer

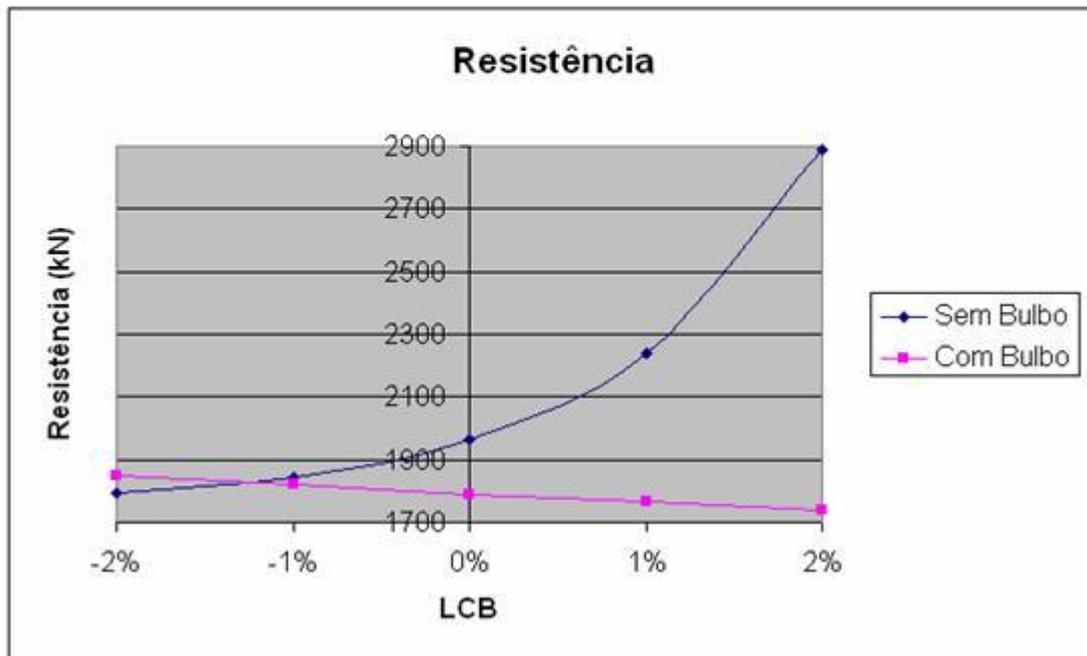


Fonte: (<http://fatosedados.blogspot.com.br/>)

O bulbo de proa atua na embarcação gerando uma segunda onda diferente da gerada pela proa da embarcação, a diferença é que essa segunda onda é gerada em fase oposta à outra onda. Assim, esta reduz de tamanho, gerando no final uma onda menor e, conseqüentemente, uma menor resistência ao avanço da embarcação. Para que isso ocorresse de uma forma mais proveitosa, a onda gerada pelo bulbo deveria ser proporcional a meio comprimento de onda da gerada pela proa, mas para isso o bulbo deveria ter um comprimento de aproximadamente 20 metros, inviabilizando assim sua construção.

Figura 15: Relação embarcação com bulbo versus sem bulbo

	Sem Bulbo		Com Bulbo	
	Resistência(kN)	Potência(kW)	Resistência(kN)	Potência(kW)
-2%	1793,46	13378,2	1849	13792,49
-1%	1840,48	13728,96	1820,46	13579,64
0	1966,37	14668,05	1789,84	13351,21
1%	2241	16716,61	1764,86	13164,9
2%	2887,19	21536,84	1739,94	12978,96



Fonte: (<http://www.oceanica.ufrj.br>)

Para se determinar o tamanho ideal do bulbo de proa é feito uma experiência em tanques de prova, nesta experiência pode se verificar que o tamanho mais eficiente para o bulbo seria de aproximadamente 2% do tamanho da LOA.

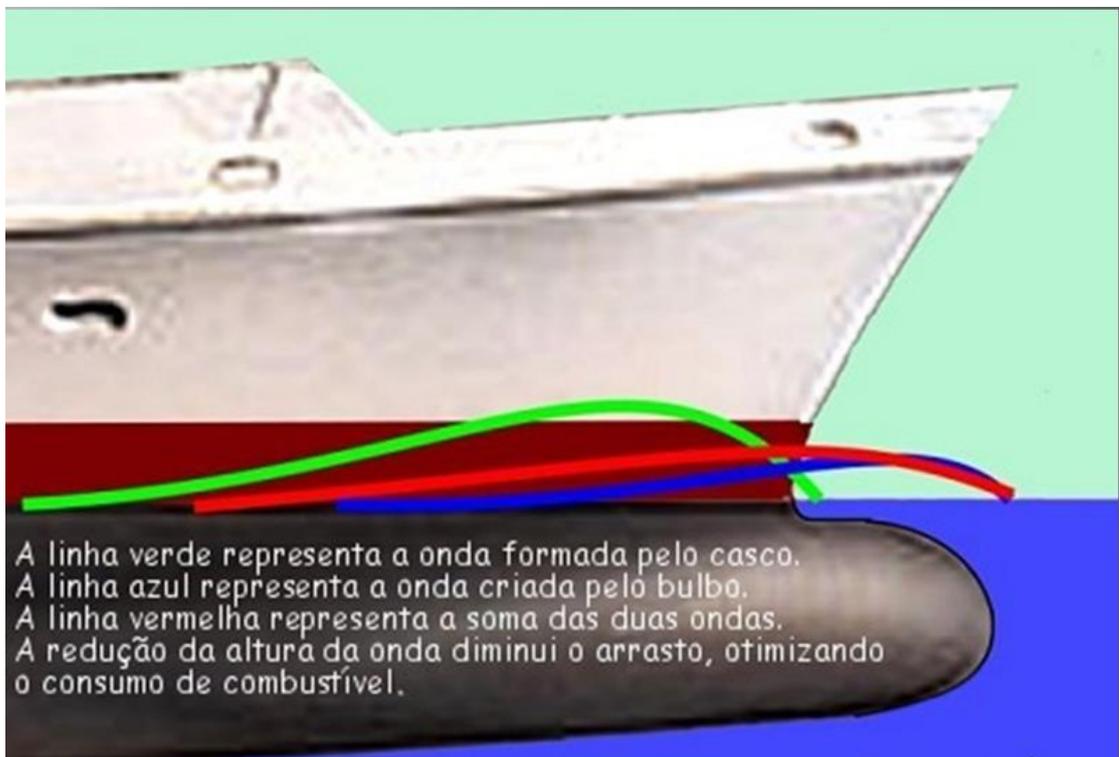
Como exemplo prático da correta utilização do tamanho certo do bulbo de proa em uma embarcação podemos citar o navio de passageiros *Queen Mary II*, onde o engenheiro Henk Valkhof aumentou o tamanho do bulbo de proa em 2 metros, obtendo assim um bulbo de proa de 12 metros e com isso reduzindo a viagem entre a Europa e os EUA em 6 dias.

Figura 16: Interação do bulbo de proa em um teste em tanque de prova HSVA



Fonte: (<http://www.hsva.de/>)

Figura 17: Interação das ondas

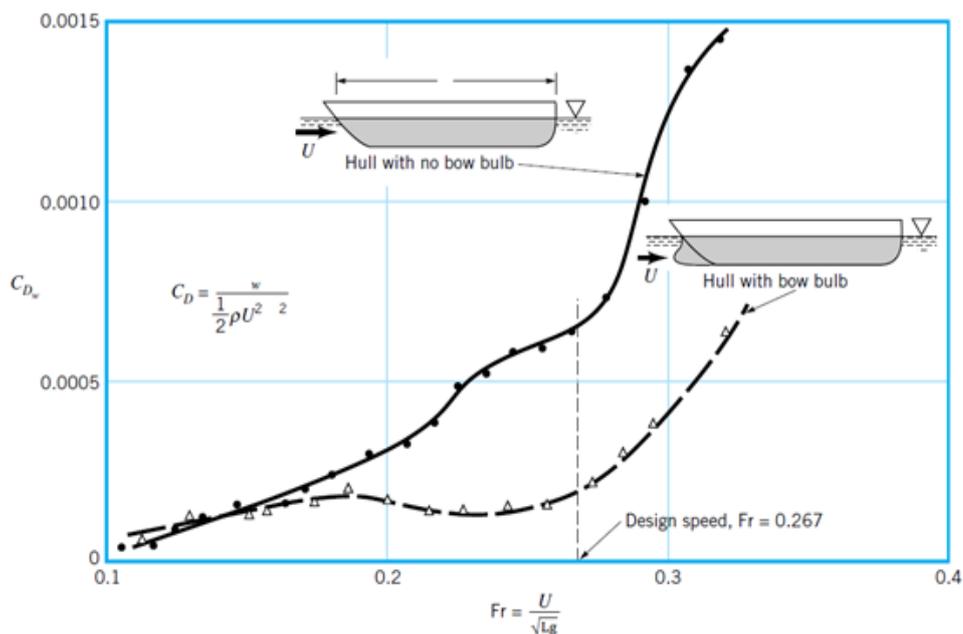


Fonte: (<http://www.popa.com.br>)

Além de se achar um tamanho ideal para o bulbo de proa, é necessário que se encontre uma velocidade onde o mesmo estará com sua maior eficiência, esta é conhecida como velocidade de cruzeiro. Outro fator a ser mensurado é o comprimento entre a perpendicular de vante e de ré da embarcação. Utilizando esses aspectos como base é possível determinar o Número de Froude da embarcação e, assim, saber quando o bulbo de proa terá sua maior eficiência.

O projetista da embarcação deverá analisar muito bem a relação de eficiência do bulbo de proa, pois, o mesmo aumenta a área molhada da embarcação aumentando, assim, a resistência viscosa. Para que o bulbo de proa seja eficiente, o ganho com a resistência de ondas deverá ser maior que a perda com a resistência viscosa.

Figura 18: Relação entre coeficiente de resistência de onda e Número de Froude



Fonte: (CLARK, 2005, p.32)

Neste gráfico observamos que para baixas velocidades o bulbo de proa se torna ineficaz, gerando maior resistência ao avanço. A mesma ineficácia se aplica a navios que navegam com deslocamento leve, onde o bulbo de proa está parcialmente imerso, fazendo com que o mesmo não consiga cumprir seus objetivos. Para um Número de Froude de aproximadamente 0,16, o ganho gerado pelo bulbo é muito pouco em relação a embarcação

sem o bulbo, deixando a instalação do mesmo ineficiente. A partir de 0,16 os ganhos em eficiência na utilização do bulbo de proa começam a aumentar, chegando ao seu valor máximo de velocidade de cruzeiro e comprovando a eficiência da utilização do bulbo de proa.

Este tipo de gráfico não é o mesmo para todas as embarcações, porém é bastante semelhante na maioria das embarcações e com valores diferentes, gerando isso quase que um padrão na eficácia da utilização do bulbo de proa.

6.2 *X-Bow*

A proa no formato *X-Bow* ou “proa invertida” foi criada pela empresa norueguesa *Ulstein* em 2005 com a intenção de melhorar o desempenho das embarcações quando o mesmo está sofrendo uma resistência de ondas, mas dessa vez não são as ondas geradas pela própria embarcação, mas são originadas através de eventos climatológicos, ou seja, a proa *X-Bow* aumenta a eficiência da embarcação quando a mesma está atuando como receptora de ondas.

A proa *X-Bow*, que tem como característica ser contínua e afiada, permite que a embarcação “corte” a onda, fazendo com que o fluido escorra de uma maneira homogênea através de sua proa e que a água não acumule no convés da embarcação, fazendo com a embarcação opere com maior desempenho em mar calmo ou severo.

Figura 19: Proa *X-Bow* do navio Oceanic Vega



Fonte: (<http://www.motorship.com/>)

A eficiência deste tipo de embarcação já começa antes mesmo da navegação, por causa do formato de sua proa foi constatado que sua estabilidade inicial seria melhor comparado com as embarcações com mesmas especificações e sem este formato de proa, esta embarcação consegue transportar uma maior tonelagem no convés, resultando em uma diferença de aproximadamente 800 toneladas.

Com esta embarcação na água, pode-se observar durante um teste feito em um tanque de provas em Marin, Holanda, comparando com uma embarcação offshore normal e sendo submetidos a ondas de 2,8 metros com períodos de 10,5 segundos e uma velocidade de 15 nós, foram obtidos os seguintes dados:

- Redução do consumo de combustível entre 7 e 16%;
- Melhoria de “perda de velocidade” em estado do mar com ondas de 2,5 a 10 metros de 19% e
- Opera melhor em DP (*Dynamic Position*).

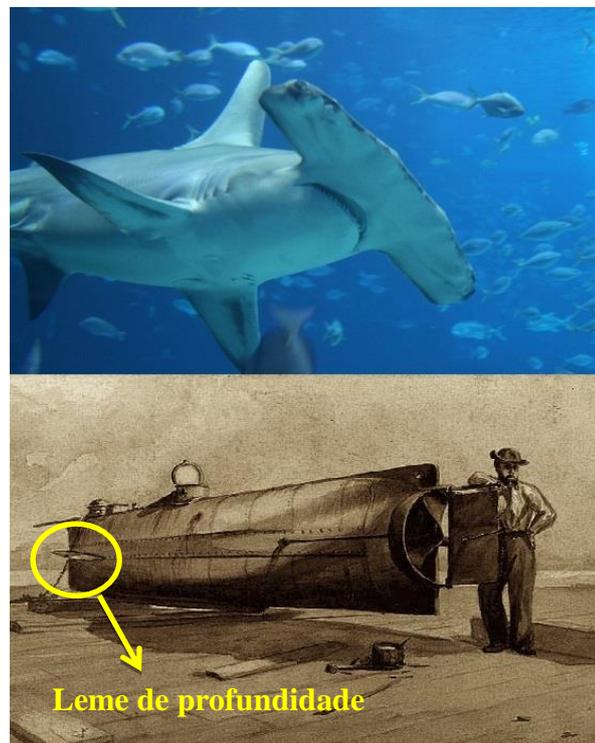
6.3 Estabilizadores Laterais

A ideia de manter o navio estável veio do surgimento do sistema estabilizador do navio *Conte di Savoia* e com o advento da tecnologia hoje em dia pode-se contar com dispositivos mais eficazes e que ocupam menos espaços a bordo, esses são os estabilizadores laterais, que comumente utilizados em navios de passageiros para gerarem mais conforto durante as viagens de turismo.

A partir da observação da natureza, pode-se perceber que o tubarão martelo possuía mais velocidade e uma capacidade de mudar de direção ao atacar suas presas em comparação com os outros tubarões, com isso primeiramente essa ideia foi utilizada em submarinos, que atuariam para melhor sua capacidade de manobra e proporcionando uma melhor capacidade de imersão e emersão, onde esses estabilizadores atuariam como um *flap* de avião.

O primeiro submarino construído com o sistema de estabilizadores laterais, que neste caso é conhecido como leme de profundidade, foi o submarino *Hunley*, construído em 1861 e utilizado na guerra civil americana pelos confederados, e é considerado como o primeiro submarino a conseguir afundar um navio durante um ataque.

Figura 20: Comparação tubarão martelo versus Submarino Hunley

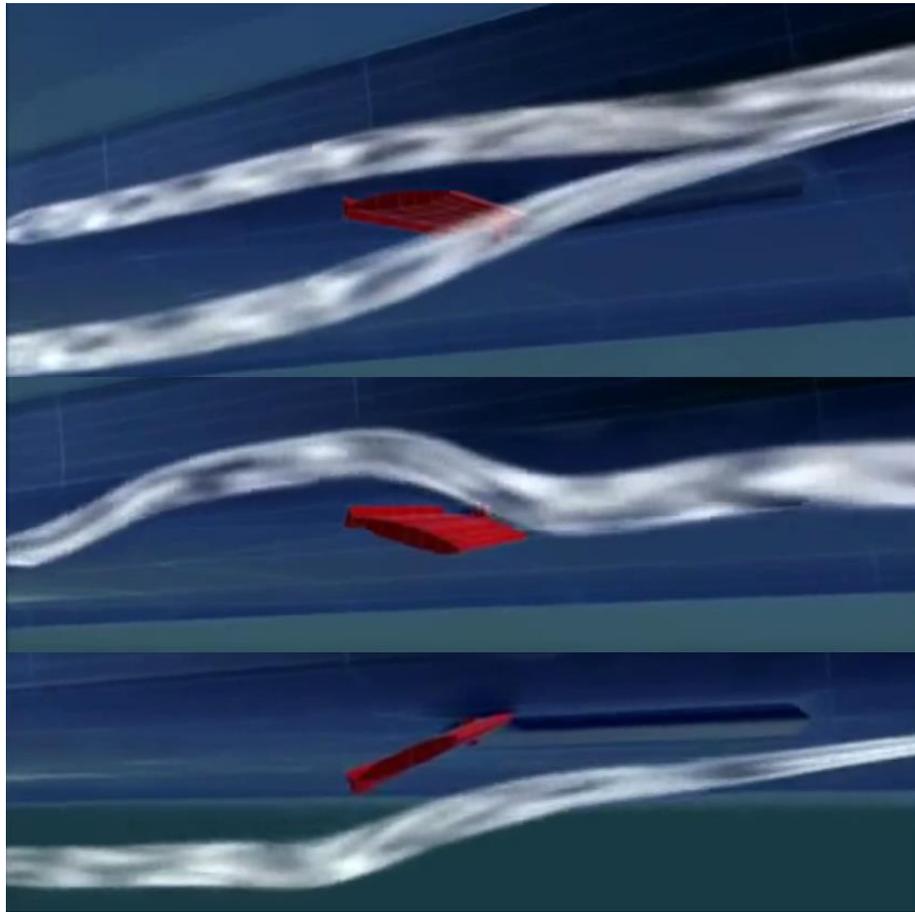


Fonte: (<http://google.images.com>)

A partir desta ideia foi utilizado em navios de passageiros como estabilizadores laterais, com o objetivo de reduzir, e até mesmo eliminar os efeitos adversos que o navio sofre com o balanço. Esses estabilizadores podem ser divididos em estáticos e dinâmicos. Os estáticos atuam apenas quando a embarcação está em movimento e os dinâmicos atuam tanto com a embarcação parada ou em movimento. Hoje em dia todos os grandes navios de cruzeiro possuem esse sistema, e a eficiência desse sistema em alguns casos chega a 90%. O único inconveniente desse sistema é o fato dele gerar grandes eficiências apenas em embarcações de grande porte, maiores que 30 ft.

Basicamente o funcionamento desse sistema faz com que em caso do navio estar inclinando para um dos bordos o sistema de estabilizadores laterais diz um ângulo de inclinação tal que fará uma força tal para o outro bordo que compensará a força de inclinação gerada pela onda e manterá o navio estável.

Figura 21: Funcionamento do estabilizador lateral do navio *Independence of The Sea*



Fonte: (Vídeo Discovery Channel)

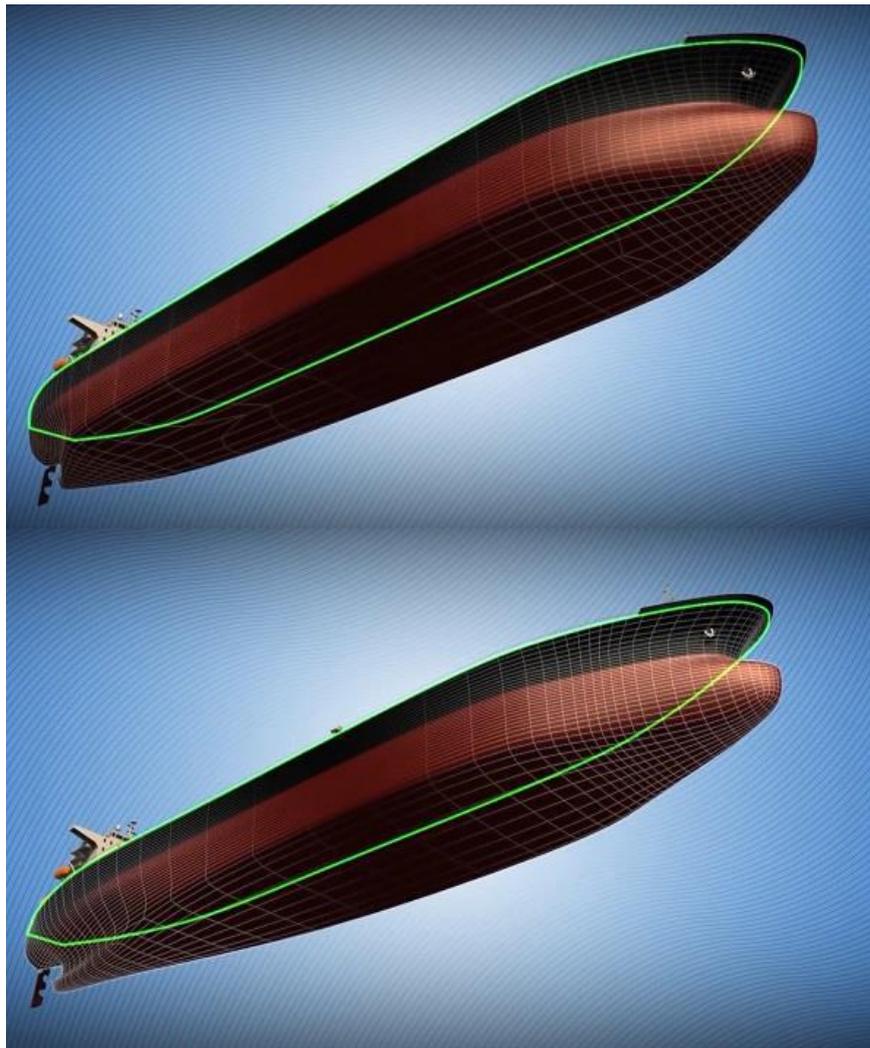
Com isso, o sistema de estabilizadores laterais faz com que a embarcação navegue sem que sofra com os efeitos do balanço proporcionados pelas ondas, e assim faz com que o propulsor opere sempre em sua zona de conforto convertendo sua energia sempre para propulsionar o navio de uma maneira estável e assim com maior eficiência de combustível reduzindo também a emissão de poluentes, menor tempo e maior conforto.

6.4 Otimização da proa

Ao longo do tempo inúmeros formatos de casco foram testados afim de se encontrar o que conseguiria uma maior redução de resistência ao avanço. Foi necessário investimentos nesta área, pois segunda a empresa *Teekay*, o preço do combustível utilizado na navegação cresceu 650% entre 1999 e 2011, saltando de 100 dólares por tonelada para 750 dólares por tonelada.

Sendo assim a construção de uma embarcação que consumisse menos combustível se tornou essencial neste tipo de mercado. Primeiramente foi modificada o tamanho da boca das embarcações, fazendo com que o casco ficasse mais fino e delgado e reduzindo a resistência de forma e evitando um descolamento precoce da camada limite e assim reduzindo o arrasto.

Figura22: Otimização da boca da embarcação

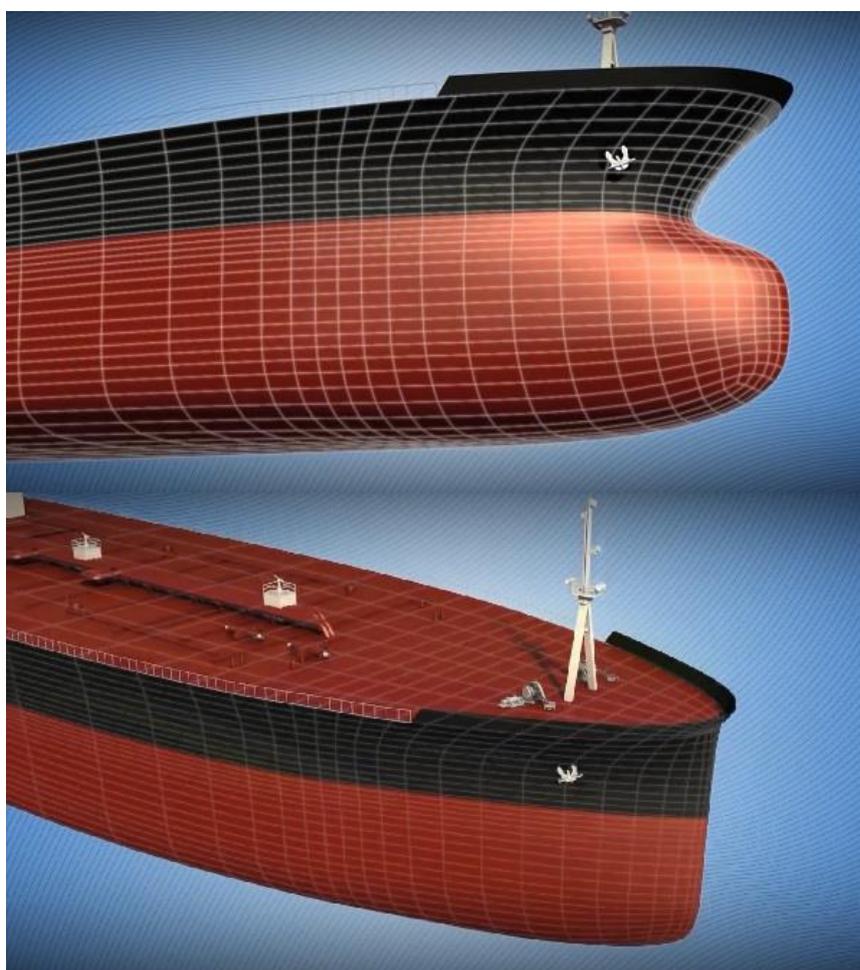


Fonte: (<http://www.teekaytankers.com/>)

Apesar da redução com o consumo de combustível, a diminuição do tamanho da boca da embarcação acarreta diretamente na capacidade de carregamento de cargas. Com isso foi necessário um aumento no tamanho e no pontal da embarcação, acarretando em um maior calado e uma economia de combustível de até 11%, e proporcionando uma redução na emissão de gases poluentes.

Por consequência do aumento do comprimento da embarcação o número de Froude ficou menor, tendo em vista que o mesmo é inversamente proporcional ao tamanho da embarcação. Com isso o uso do bulbo de proa se tornou dispensável, tendo em vista que com um número de Froude pequeno a embarcação passou a atuar na zona em que o bulbo não faria nenhum efeito desejado. O próximo passo do projeto foi retirar o bulbo de proa da embarcação.

Figura 23: Retirada do bulbo de proa da embarcação



Fonte: (<http://www.teekaytankers.com/>)

Com isso se obteve um formato de casco capaz de absorver menos impacto e ser muito mais capaz de cortar a água durante a navegação. Com isso se obteve redução de combustível de até 6% dependendo do tamanho da embarcação e como consequência redução na emissão de poluentes.

Figura 24: Redução de 6% do consumo de combustível



Fonte: (<http://www.teekaytankers.com/>)

6.5 Otimização das linhas de popa

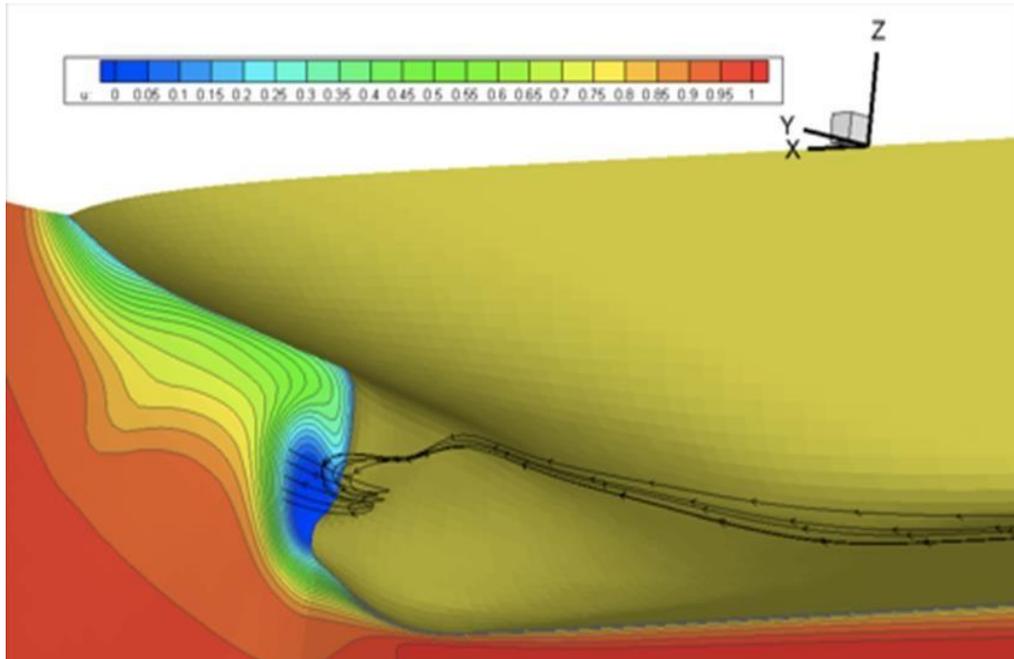
As linhas de popa da embarcação são otimizadas a fim de se obter uma melhor região de escoamento do fluido originário do propulsor com a finalidade de se obter uma uniformidade na velocidade do fluido (campo de esteira).

Essa otimização é relativamente pequena se comparada com os outros dispositivos de casco, é feita com alterações geométricas mudando os formatos de contorno do casco que resultam em uma melhor distribuição do fluido aumentando o efeito coanda, proporcionando assim uma melhor eficiência propulsiva, reduzir as vibrações no casco e a erosão devido a cavitação.

Uma melhor uniformização do escoamento também proporciona uma melhor interação ente o propulsor e o leme, otimizando assim o efeito do leme quando o mesmo é acionado fazendo com que o navio tenha uma melhor manobrabilidade.

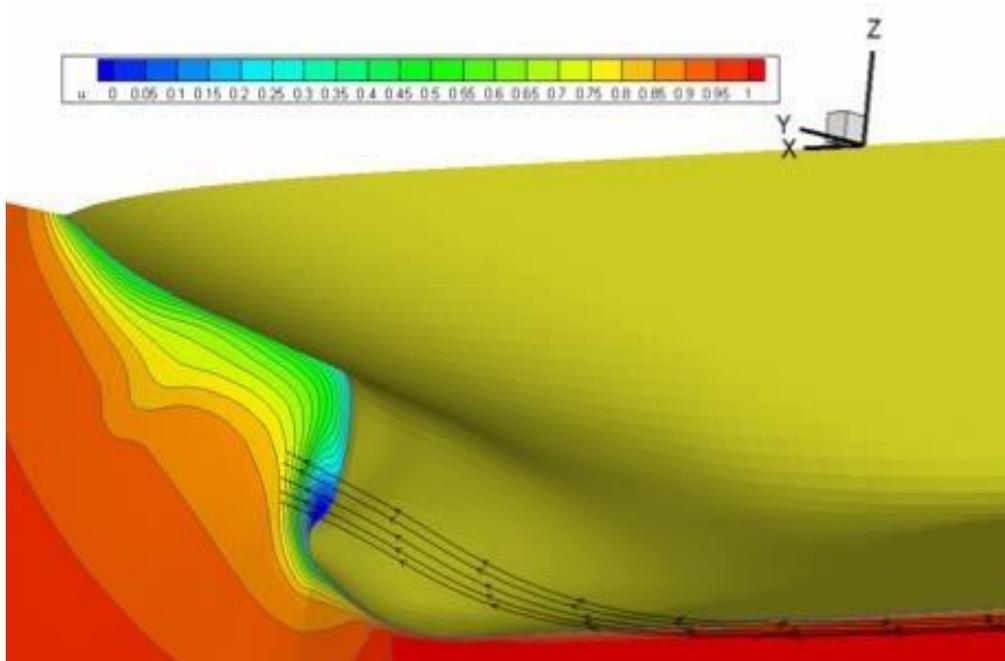
As ondas geradas na popa também sofrem uma redução com a otimização das linhas de popa, fazendo com que a resistência de ondas diminua e o navio atinja maiores velocidades tornando-o mais eficiente em relação ao consumo de combustíveis e emissão de gases poluentes e diminui o tempo de viagem.

Figura 25: Escoamento do fluido antes da otimização das linhas de popa



Fonte: (GERK, HERMANN REGAZZI. Slides do Curso de Hidrodinâmica do Navio)

Figura 26: Escoamento do fluido depois da otimização das linhas de popa



Fonte: (GERK, HERMANN REGAZZI. Slides do Curso de Hidrodinâmica do Navio)

6.6 Dispositivo equalizador de esteira

O dispositivo equalizador de esteira tem como função atuar no fluido que passa pelo propulsor da embarcação fazendo com que o mesmo gere menos esteira, ou seja, fazendo com que a energia da embarcação não seja gasta na forma de geração de ondas.

Os dispositivos podem ser pré-hélice, que tem como finalidade transformar o fluido que escoar de uma forma axial e fornecer a ele um pré-giro fazendo que o propulsor gaste menos energia para rotacionar esse fluido, e pós-hélice, que tem como finalidade transformar o fluido rotacionado em axial fazendo que o mesmo obtenha um melhor rendimento em contato com o leme e acabe gerando menos ondas.

O funcionamento deste dispositivo está diretamente relacionado com a esteira, segundo Ludwig Prandtl a camada limite de um fluido é a região onde o fluido está sujeito a esforços cisalhantes, ou seja, no caso de um navio se deslocando na água, pelo princípio da aderência, a camada de água junto ao costado do navio terá a mesma velocidade do navio e quando a seção do sólido, ou o casco do navio, acaba este fluido tende a ocupar as zonas de menor pressão, provocando assim o turbilhonamento do fluido e gerando a esteira.

Figura 27: Camada limite e esteira de uma embarcação



Fonte: (<http://www.oceanica.ufrj.br/>)

O projeto de um navio leva em conta a melhor maneira de somar estruturas a fim de fazer dele o mais eficiente possível. Ao optar pelo acréscimo de um dispositivo equalizador pré-hélice, é possível ganhar a capacidade de fazer com que a água chegue homogeneizada ao hélice, de forma que as pás recebam quantidades iguais de água, diminuindo, assim, o esforço que o propulsor deverá fazer para obter a resposta esperada.

6.6.1 Dispositivos pré-hélice

Utilizando o dispositivo pré-hélice, há uma gama de escolhas a ser feita pelo fato não existir somente um dispositivo com essa função. O uso deste dispositivo e seu ganho energético é influenciado tanto pelas linhas de corrente da água na parte superior do propulsor apresentarem áreas com separação de fluxo de intensidades variadas em função da forma do navio e a redução de *thrust* pela fricção com o casco, tanto pela homogeneização do fluxo de água que atravessa o propulsor, diminuindo, assim, a incidência e a intensidade de cavitação nas pontas das pás e reduzindo, então, os pulsos de pressão gerados pelo propulsor.

Nesta linhagem de equalizador, podemos citar alguns tais como:

I. Duto Schneekluth

A princípio os dutos pré-hélice foram criados tentando solucionar o problema de vibração das embarcações, principalmente na popa onde existem regiões de grande turbilhamento no fluido sendo impulsionados na carena da embarcação, e logo se percebeu que esses dutos não só apenas diminuam as vibrações, mas também causaram um aumento de velocidade e economia no consumo de combustível.

A instalação deste duto ocasiona um aumento na velocidade de entrada da água no disco do propulsor. Consequentemente, o hélice aumenta sua rotação entre 1,5 a 2 rpm, sem que seja necessária qualquer alteração nele que, por operar sob condições mais suaves, facilita a operação dos motores a diesel, sem alterar os limites de tolerância estabelecidos no projeto do hélice.

Figura 28: Duto Schneekluth®

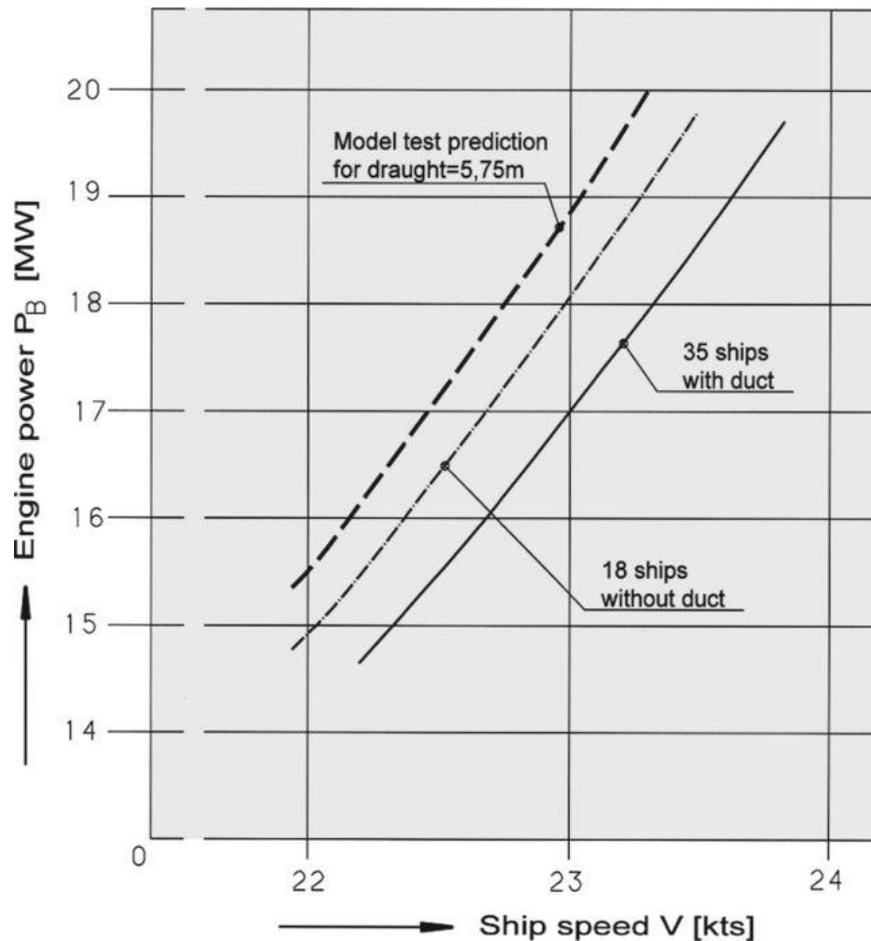


Fonte: (<http://www.schneekluth.com/>)

De acordo com o fabricante do dispositivo, as reduções nas vibrações podem chegar até 50%, protegendo assim componentes eletrônicos, proporciona uma melhor controlabilidade da embarcação, entre outros benefícios e proporciona também uma economia no consumo de combustível de até 12%, diminuindo os custos em uma viagem e reduzindo a emissão de poluentes.

Mais de 1.500 navios, conteneiros, graneleiros, transportadores de GNL (Gás Natural Liquefeito), bem como embarcações de navegação interior já estão se beneficiando deste dispositivo. A Shell AG, que adaptou 14 petroleiros, obteve uma economia de combustível calculada entre 1 a 7 t / dia. Em um preço de óleo pesado de 450 \$ / dia, um tempo de viagem de 200 dias / ano e uma média de redução de 4 t / dia, resultando em uma economia nos custos operacionais por navio por ano de \$ 360.000.

Figura 29: Comparação da utilização do duto



Fonte: (<http://www.schneekluth.com/>)

II. Duto Becker Mewis®

O Becker Mewis Duct® é um dispositivo de economia de energia desenvolvido para navios mais lentos que fornece tanto significativas economias de combustível a uma determinada velocidade ou, alternativamente, permite que o navio viaje mais rápido em um determinado nível de potência.

O Becker Mewis Duct® consiste em dois elementos fixos fortes montados na embarcação: uma conduta posicionada à frente da hélice em conjunto com um sistema de aleta integrada dentro. A conduta homogeneiza e acelera a esteira proveniente do casco em direção ao propulsor e também produz um impulso à frente. O sistema de aleta proporciona um pré-redemoinho no fluxo de água em direção ao propulsor, proporcionando uma redução na esteira.

Figura 30: Duto Becker Mewis®

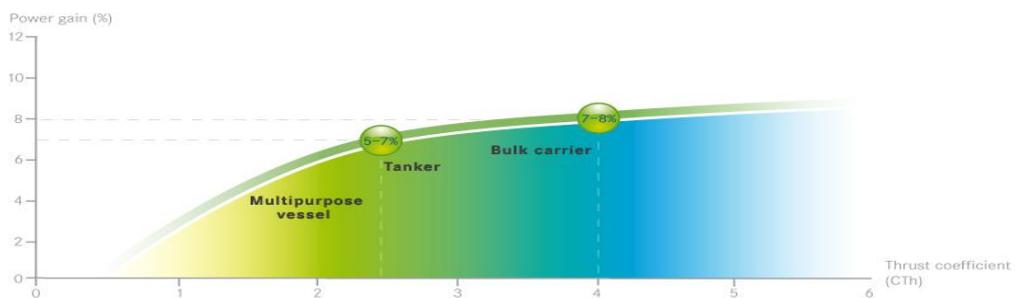


Fonte: (<http://www.becker-marine-systems.com/>)

As economias de energia realizáveis da Becker Mewis Duct® são fortemente dependentes da potência do propulsor da embarcação, de 3% para os navios polivalentes até 8% para os petroleiros e graneleiros. A economia de energia é praticamente independente do projeto de navio e velocidade.

O Becker Mewis Duct® é ideal para aplicações tanto novas construções e reformas (por exemplo, petroleiros, graneleiros e PPM).

Figura 31: Gráfico de ganho de potência versus coeficiente de impulso



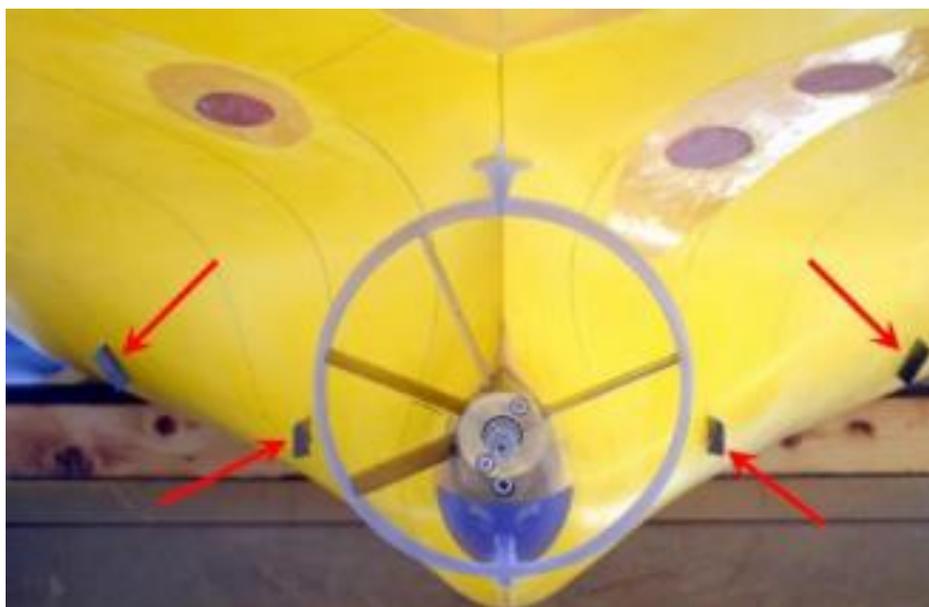
Fonte: (<http://www.becker-marine-systems.com/>)

III. SHI Safer Fin

Esses dispositivos tem a capacidade de gerar vórtices e assim, modificar a esteira a ponto de reduzir em até 50% dos pulsos de pressão e vibração, com a penalidade de aumentar em torno de 2% a resistência, eles são fixados no casco das embarcações no sentido transversal ao escoamento do fluido

Este modelo desenvolvido pela *Samsung Heavy Industries*, a qual tem estudos que mostram um aumento de até 3,2% na eficiência propulsiva, mantendo os efeitos de redução de pressão e vibração.

Figura 32: SHI Safer Fin



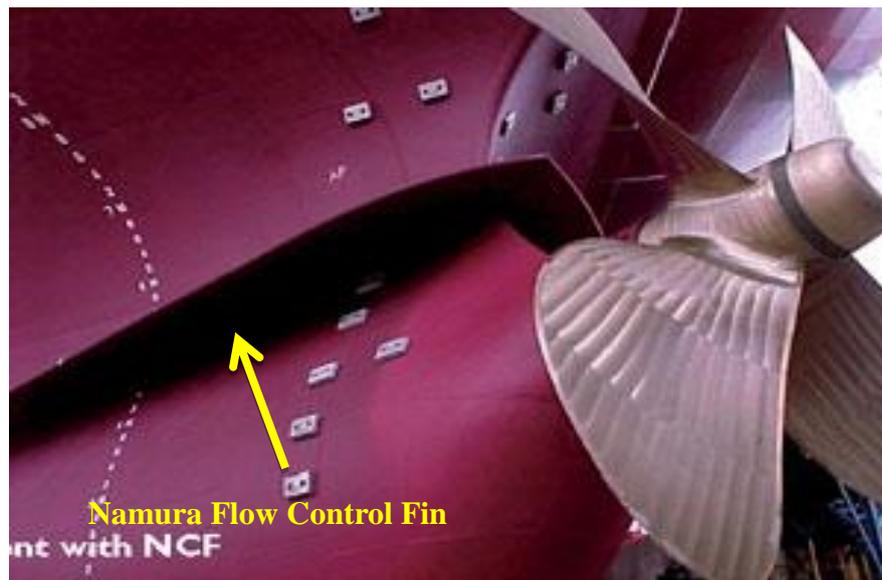
Fonte: (<http://www.shi.samsung.co.kr/>)

IV. Dispositivos alinhados a linha de fluxo

Esses dispositivos podem ser longos ou curtos, e oferecem uma menor resistência se comparados com os defletores transversais, em torno de 1%, porém, proporciona bons resultados na eficiência propulsiva ao melhorar a esteira. Alguns desses dispositivos podem ser destacados como o *SUP Fin*, *Namura Flow Control Fin*, *Low Viscous Fin* e o *Grothues Spoilers*. O ganho em eficiência propulsiva, estudada nesses casos, chegam a 2 a 5% para *Namura*, 2% para *Low Viscous* e 3 a 9% para o *Grothues*. Esse último possui um diferencial

de ter defletores curvados, com bordo de ataque a vante alinhado com o fluxo e o bordo de fuga alinhado com o eixo propulsor, esperando que se tenha uma redução da resistência ao avanço, ao mesmo tempo em que um aumento da eficiência propulsiva. Todos os resultados podem ser obtidos ou não com a combinação do duto.

Figura 33: *Namura Flow Control Fin*



Fonte: (<https://nippon.zaidan.info>)

Figura 34: *Low Viscous Fin*



Fonte: (<http://www.jmuc.co.jp/>)

Figura 35: *Grothues Spoilers*



Fonte: (<http://www.marin.nl>)

V. Estatores

Um tipo de estator é o *pre-swirl stator*, esse dispositivo possui o formato de um aerofólio, consiste em um conjunto de lâminas fixadas na popa e de frente para o propulsor e tem o objetivo de induzir uma assimetria do fluxo ao propulsor. Dessa maneira, ele provoca uma esteira mais uniforme e, conseqüentemente, aumenta a eficiência do casco, podendo diminuir a eficiência propulsiva e a rotação. O seu projeto é complexo devido a cada aerofólio possuir uma angulação baseada no campo da esteira nominal, deve ser integrado com o desenho do casco para sua otimização, podendo ter um tamanho menor ou maior que o diâmetro do hélice e acompanhados ou não de um túnel. O estaleiro de Daewoo desenvolveu um *pre-swirl stator* que pode oferecer um aumento da eficiência propulsiva entre 1% e 6,3%.

Figura 36: *Pre-swirl stator*



Fonte: (<http://gcaptain.com/>)

VI. Becker Twisted Fin®

Becker Marine Systems reagiu à forte demanda de companhias de navegação por um dispositivo de economia de energia para navios mais rápidos. Depois de dois anos de pesquisa e com base em três anos de experiência operacional com a Becker Mewis Duct® um novo dispositivo de economia de energia para navios contêineres e outros tipos de embarcações rápidas com popa bulboso está entrando no mercado, o Becker Twisted Fin®.

Figura 37: Becker Twisted Fin®

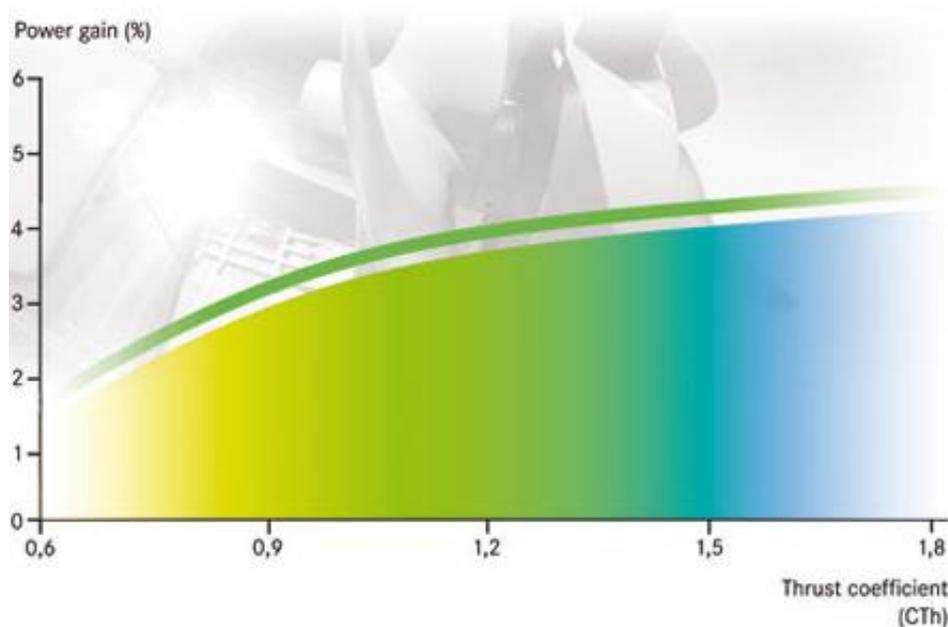
Fonte: (<http://www.becker-marine-systems.com/>)

Becker Marine Systems tem focado sobre a economia de energia e fornece um dos dispositivos de economia de energia mais eficientes para o mercado marítimo com a Becker Mewis Duct®. Em média, a economia de energia de mais de 6% pode ser alcançada para as embarcações grandes e lentas, como petroleiros e graneleiros.

As economias da Becker Mewis Duct® são reduzidas em velocidades acima de aproximadamente 20 nós. *Becker Marine Systems* introduziu o Becker Twisted Fin® para os navios mais rápidos com velocidades superiores a 18 nós. Como o Becker Mewis Duct®, o Becker Twisted Fin® não tem partes móveis e também é instalado na frente da hélice e gera uma pré-redemoinho. O sistema proporciona, assim, navios rápidos economia de energia tangíveis. O anel do bocal é significativamente menor do que a do Becker Mewis Duct® e tem um perfil especial, plana, com muito menor resistência. As aletas conhecidos da Becker Mewis Duct® no interior do anel de bocal se prolongam para fora para além do bocal. Para evitar a formação de um redemoinho com cavitação nas extremidades das aletas Becker desenvolveu tampas especiais para as aletas. O pequeno anel do bocal gera empuxo, proporciona estabilidade às aletas e reduz as vibrações.

Testes com CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional), utilizando modelos e operações de grande escala, mostraram economia de combustível média de 3% para os navios conteneiros.

Figura 38: Gráfico de ganho de potência versus coeficiente de impulso



Fonte: (<http://www.becker-marine-systems.com/>)

VII. *Duto Mitsui* (Integrado ao casco)

O *Duto Mitsui* é um equalizador de esteira muito eficiente. É completamente circular e posicionado a vante do propulsor. Também é assimétrico, para capturar a aceleração dos fluidos nas áreas do disco do propulsor próximos ao casco, suas bordas são alinhadas com as pontas das pás para que a água não passe para vante do propulsor, onde ficaria vulnerável a danos causados por bolhas de cavitação formadas nas pontas das pás, que implodiriam no duto, submetendo-o a ondas de choque

Figura 39: *Duto Mitsui*



Fonte: (<http://www.ship-efficiency.org/>)

6.6.2 Dispositos pós-hélice

O equalizador pós-hélice, por sua vez, tem como principal finalidade condicionar o fluxo após o propulsor e, por interferir somente depois de passar pelos hélices, esse dispositivo tem seus projetos associados ao projeto do leme. Também tem por fim eliminar ou reduzir as características prejudiciais do fluxo, principalmente os vórtices gerados no centro do propulsor, ou então desviá-las. Por interferirem no fluxo após o propulsor, esses dispositivos têm os seus projetos associados ao projeto do leme e, por isso, os desempenhos dos dispositivos pós-hélice e dos lemes estão interligados, sendo importante, então, que seja verificada a efetividade de ambas as partes.

É preciso, também, que seja verificada a inexistência de efeitos prejudiciais para o leme e o propulsor, ou seja, a inexistência de esforços mecânicos excessivos e fadiga de material em contato com água do mar.

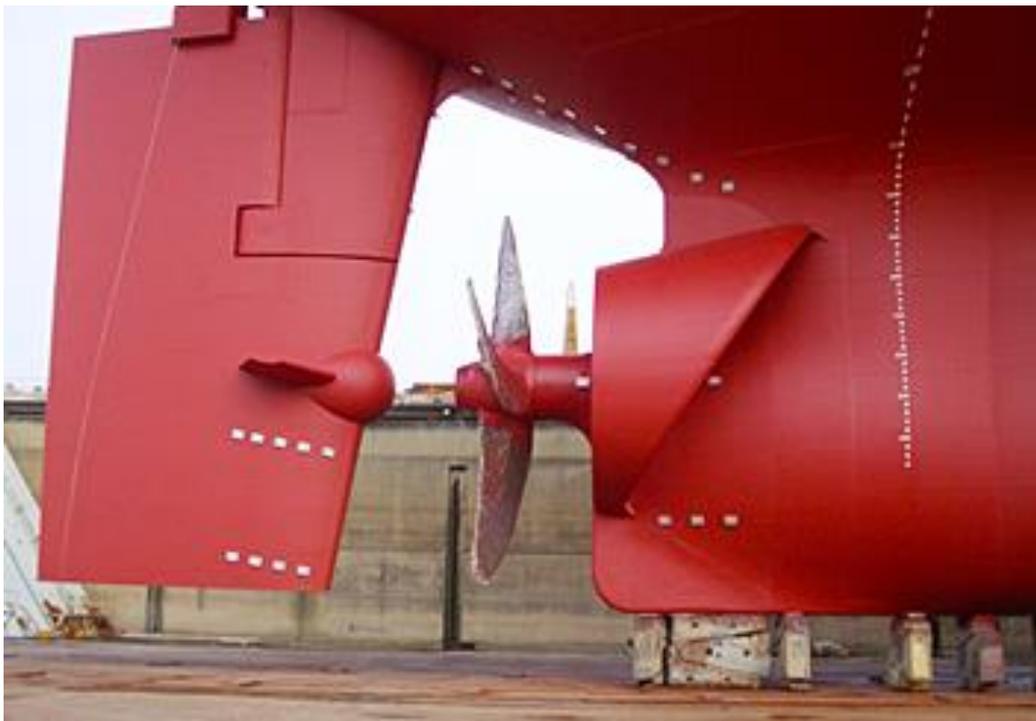
O pós-hélice também conta com uma variedade de equalizadores, sendo eles:

- I) Aleta de Impulso no cadaste
- II) *Boss cap*

- III) Bulbo de leme (Costa)
- IV) Volante *Grim Vane*
- V) Leme assimétrico

Os perfis das partes do leme situados superior e inferiormente ao eixo propulsor, com este tipo de leme, são otimizados para poder operar com eficiência na esteira do propulsor. Geralmente possuindo uma curvatura no bordo de ataque e, algumas vezes, podendo estar combinado com o Bulbo Costa (*surf-bulb*). Esse tipo de leme também tem vantagens por aproveitar o fluxo rotacional após o propulsor para melhorar a eficiência do leme, sem criar, com isso, um *Thrust* adicional.

Figura 40: Bulbo costa



Fonte: (<http://www.jmuc.co.jp/>)

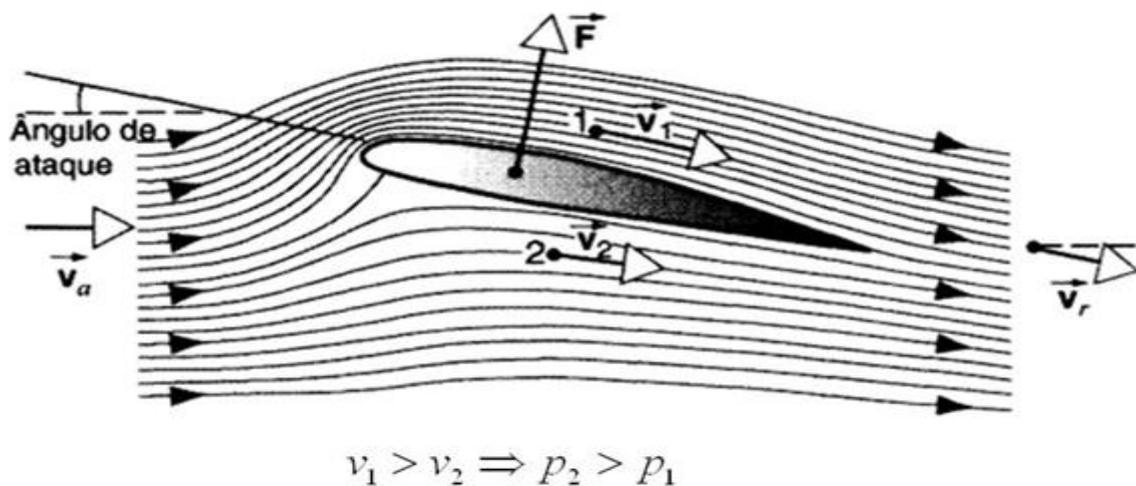
6.7 Leme

O leme é uma superfície geradora de *lift*, que é uma força que surge pela diferença de pressão entre os bordos da superfície que ocorre devido ao efeito asa, quando o mesmo é submetido a uma certa angulação.

O efeito asa ocorre pela divisão do fluido que ocorre no bordo de ataque do leme, fazendo com que parte do fluido passe pela extradorso e a outra parte passe pelo intradorso, como o leme é submetido a um ângulo de ataque, parte do fluido tem um caminho menor a percorrer até chegar ao bordo de fuga fazendo com que a parcela do fluido que tem o caminho maior a percorrer tenha uma maior velocidade, fazendo assim com que o fluido de maior velocidade exerça uma maior pressão dinâmica e por consequente uma menor pressão estática, gerando assim uma força de pressão resultante.

Com isso, existe uma força responsável por guinar o navio, e assim quando o leme é posicionado para boreste a proa da embarcação fará o mesmo movimento para boreste enquanto a popa faz o movimento contrário.

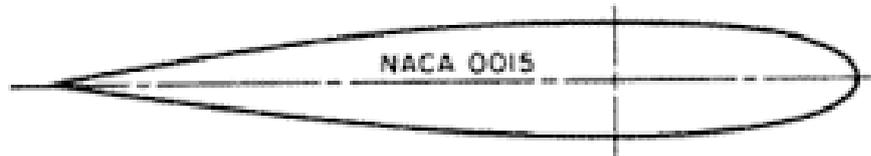
Figura 41: Efeito asa



Fonte: (<http://slideplayer.com.br/slide/1601687/>)

O perfil de leme foi atualizado após o acidente com o navio Titanic, que teve seu casco rasgado por um *iceberg*, após uma tentativa de guinada ineficiente. Acontece que o perfil do leme do Titanic tinha um formato de chapa, fazendo com que o fluido turbilhonasse com pequenos ângulos de guinada e não obtivesse o resultado esperado.

Após o acidente foi criado um padrão para o leme conhecido como perfil NACA. Que possui uma protuberância no bordo de ataque do leme, propiciando assim maiores diferenças de pressão entre os dorsos do leme.

Figura 42: Perfil NACA

Fonte: (<http://www.oceanica.ufrj.br>)

Após isso a NASA criou o programa *Folsim*, que permite verificar a eficiência desses perfis NACA onde nele pode-se simular os formatos dos perfis e a velocidade do fluido a que ele é submetido.

Atualmente existem vários tipos de leme, e basicamente a diferença entre eles é a eficiência na manobrabilidade. Entre os tipos de leme se destacam:

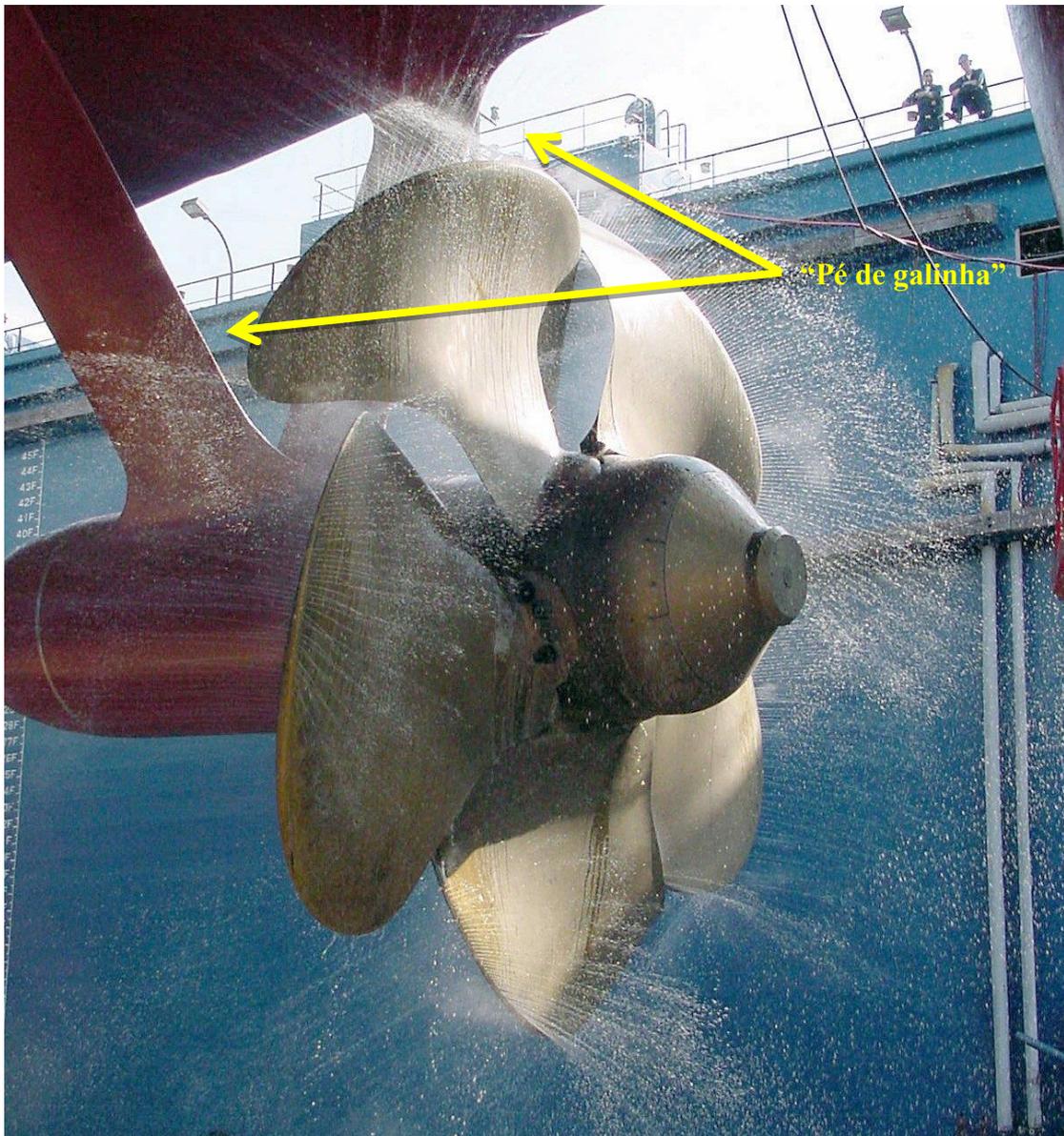
- I) Leme com Flap
- II) Leme “Schilling” (Fishtail)
- III) Leme com cilindro rotativo

6.8 Dispositivos de fixação do propulsor

A princípio o propulsor da embarcação era fixado diretamente no casco da embarcação, e o primeiro navio a fazer isso foi o *SS Great Britain*. Quando os navios começaram a ter suas dimensões aumentadas, foi necessário aumentar o número de propulsores e por consequência a maneira de se fixar no casco.

O primeiro dispositivo de fixação do propulsor no casco da embarcação ficou conhecido como “pé de galinha”, que consistia em varetas de aço que prendiam ao costado da embarcação. Porém o mesmo não era muito eficiente pois permitia que o fluido tivesse um movimento de um bordo a outro da embarcação, prejudicando assim a eficiência do propulsor, que tinha parte de sua energia desperdiçada em movimento lateral.

Figura 43: “Pé de galinha”



Fonte: (<https://pt.wikipedia.org>)

Para solucionar o problema do “pé de galinha”, surgiu o formato de casco com *skeg*, que é um prolongamento do casco em direção ao propulsor que impede o movimento lateral do fluido. O *skeg* pode ser simples, que seria um prolongamento da quilha da embarcação, ou duplo, que seria um prolongamento do casco em cada propulsor.

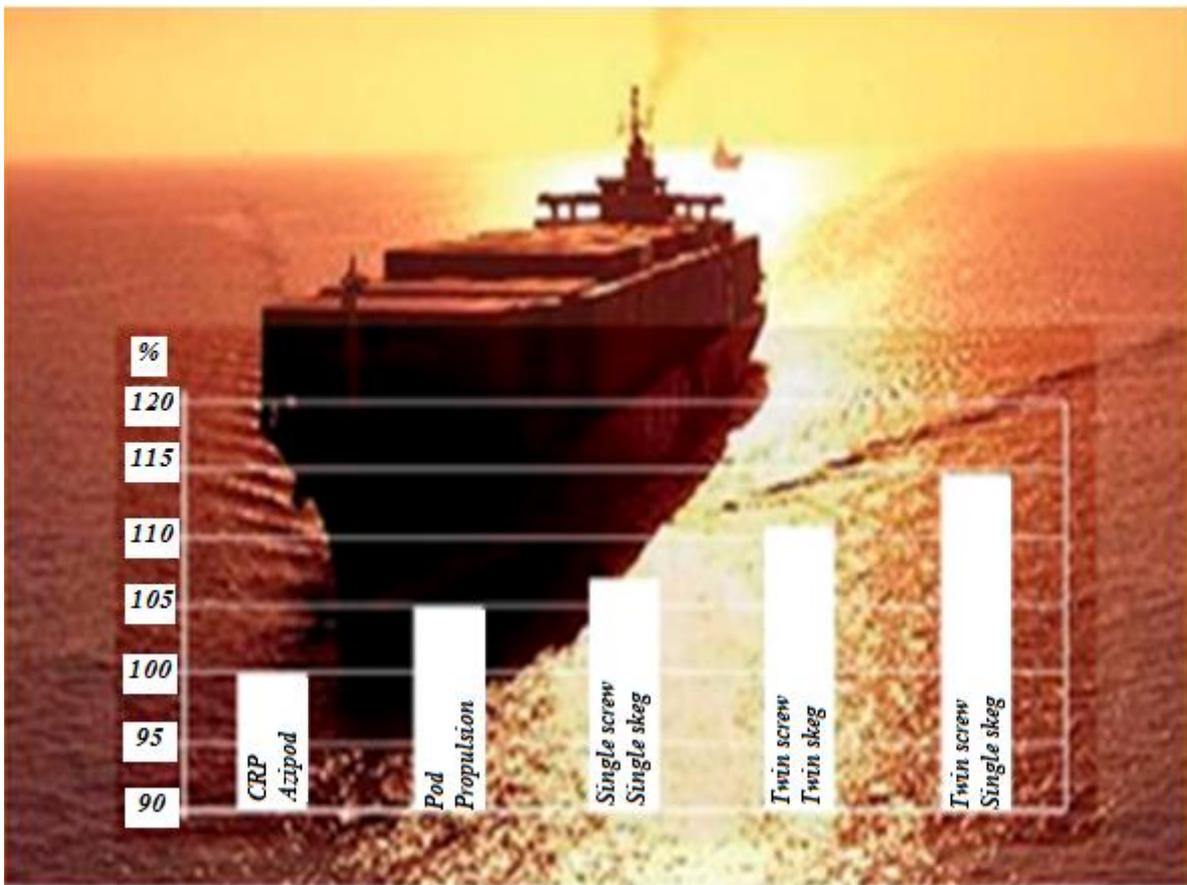
Figura 44: *Skeg* simples e duplo



Fonte: (<http://worldmaritimenews.com>)

A combinação da utilização do *skeg* com diferentes tipos de propulsão proporciona uma potência verdadeira maior no motor, fazendo com que a embarcação adquira maiores velocidades e economize com o gasto de combustível durante a viagem. Tal fato pode ser observado na **Figura 45**, onde pelo gráfico podemos perceber a melhor utilização do *skeg* aumentando em 15% a potência da embarcação.

Figura 45: Gráfico comparativo do uso do *skeg*



Fonte: (GERK, HERMANN REGAZZI. Slides do Curso de Hidrodinâmica do Navio)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo esclarecer a importância da hidrodinâmica na construção e emprego de embarcações, mostrando sua relevância quando o assunto tratado é a eficiência energética e abordando de maneira simples cada tópico para que seja de fácil compreensão por todos, mesmo para quem não trabalhe no meio marítimo.

Ao longo do tempo o ser humano vem buscando aperfeiçoar a navegação, e o estudo da hidrodinâmica facilitou ainda mais tais melhorias. A cada nova descoberta somou-se uma nova componente no casco do navio, fazendo assim com que cada ano que se passasse podemos obter embarcações ainda mais eficientes e velozes. Lembrando que nem sempre utilizando todos os tipos de tecnologia combinados irá garantir maior eficiência.

Tratando-se de construção naval se pode levar em considerações pequenos percentuais de eficiência, tendo em vista que com exemplos citados no decorrer deste trabalho o proprietário da embarcação pode economizar milhares de dólares a partir de um percentual pequeno, mas de valores muito significativos.

Com isso, pode-se notar que este estudo prossegue ao longo do tempo, e ainda procurando tornar as embarcações mais eficientes estudos modernos vem garantindo que este campo de pesquisa nunca pare, e novas descobertas sempre estarão prontas para facilitar a vida do homem.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Becker Marine Systems. Disponível em: < http://www.becker-marine-systems.com/03_products/products_schilling> Acesso em: 23 jul. 2015

BERTRAM, Volker; SCHNEEKLUTH, H.. **Ship Design for Efficiency and Economy.** 2. ed. Woburn: Bh, 1998. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Uq07g98n0TAC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 25 jul. 2015.

BERBERT, Yuri Magnani. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ENERGY SAVING DEVICES EM CASCO TWIN-SKEG OTIMIZADO DE NAVIO GASEIRO.** 2015. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10013906.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2015.

Boatshow. Disponível em: < <http://www.boatshow.com.br/noticias/>> Acesso em: 19 jul. 2015

Civil Engineering Handbook. Disponível em: <<http://www.civilengineeringhandbook.tk/cargo-ships/>> Acesso em: 16 JUL. 2015

CLARK, I. C. **Ship Dynamics For Mariners.** First Edition. ed. London: The Nautical Institute, 2005. 300p.

Discovery Channel. Disponível em: <<http://www.discovery.com/>> Acesso em: 17 jul. 2015

G Captain. Disponível em: < <http://gcaptain.com/propeller-technology-ship-efficient/>> Acesso em: 23 jul. 2015

GERK, Hermann Regazzi. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EMBARCAÇÕES.** Rio de Janeiro: Hermann Regazzi Gerk, 2015. 169 slides, color.

Hidrodinâmica de navios. Disponível em: <http://www.ipt.br/solucoes/4-hidrodinamica_de_navios.htm>. Acessado em: 05/08/2014

Instituto Superior Técnico. Disponível em: < <http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/PT/PN1.5.6-Leme%20e%20Apendices-Carena>> Acesso em 23 jul. 2015

PADOVEZI, CARLOS DAHER. **A importância do projeto hidrodinâmico de cascos e de sistemas de propulsão de navios.** Disponível em: <<http://www.ipen.org.br/downloads/articulos/a-importancia-do-projeto-hidrodinamico.pdf>>. Acessado em: 15 jul. 2015

SLADE, STUART. **Skeg Design.** Disponível em: <http://www.navweaps.com/index_tech/tech-014.htm>. Acessado em: 05 de agosto de 2014

Teekay Tankers. Disponível em: <<http://www.teekaytankers.com/>> Acesso em: 20 jun. 2015

Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2009/> Acesso em: 19 jul. 2015

Wärtsilä. Disponível em: <<http://www.wartsila.com/en/>> Acesso em: 25 jul. 2015

Wikipédia. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/SS_Great_Eastern> Acesso em: 16 jul. 2015

Wuxi Xishan Anda. Disponível em: <<http://wxanda.portuguese.globalmarket.com/products/details/fishtail-rudder>> Acesso em: 22 jul. 2015