

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

CAMILA FERNANDES OAQUIM DE OLIVEIRA

HIDRODINÂMICA NO CASCO DO NAVIO

**RIO DE JANEIRO
2015**

CAMILA FERNANDES OAQUIM DE OLIVEIRA

HIDRODINÂMICA NO 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 Gerck
Engenheiro Químico
Especialista em Mecânica dos Fluidos

**RIO DE JANEIRO
2015**

CAMILA FERNANDES OAQUIM DE OLIVEIRA

HIDRODINÂMICA NO 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 Gerke
Engenheiro Químico e Especialista em Mecânica dos Fluidos

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, pessoa que não só me colocou no mundo, mas que também me criou com dedicação e carinho de maneira exemplar, mesmo com as dificuldades que por vezes a vida lhe ofereceu. Agradeço a minha avó, cujo apoio foi fundamental para que eu chegasse aqui. As minhas amigas, que aguentaram a minha ausência causada pelo grande tempo dedicado aos meus estudos e me ajudaram a conseguir parar um pouco e ter momentos de diversão em meio a tanto estresse. Agradeço ao meu noivo, Torres, que enfrentou comigo esses longos três anos a bordo da Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante e me ajudou em todos os momentos de desânimo e dificuldade, além de pesquisas e estudos.

Agradeço ao mestre Hermann Regazzi Gerk, cuja orientação foi fundamental para a conclusão deste trabalho. O conhecimento transmitido em sala de aula, sempre com total dedicação, e os estudos e pesquisas na biblioteca nos períodos em que, mesmo com tarefas a serem cumpridas, ofereceu estímulo e atualizações de diversos temas foram peças fundamentais para que eu conseguisse chegar até aqui.

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de
você, menos o seu conhecimento.” (Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem por finalidade expor os princípios hidrodinâmicos estudados a fim de fazer com que a estrutura do casco do navio se torne mais eficiente em relação a diversos aspectos tais como o aproveitamento do combustível e, com isso, menor emissão de poluentes devido à necessária preocupação com o fator ambiental, conforto da tripulação e manobrabilidade. Para isso, são citados grandes estudiosos do meio juntamente às suas teorias e, após isso, abordadas as consequências destas na atualidade, trazendo exemplos em diversas embarcações e enfatizando, assim, a real necessidade de obter e colocar em prática o conhecimento na referida área.

Palavra-chave: Número de Reynolds. Número de Froude. Efeito asa. Hidrodinâmica no casco do navio.

ABSTRACT

This final paper has as main objective to show the hydrodynamics principles that have been studied to make the hull's ship more efficient when considering other aspects such as the harnessing of fuel and, therefore, lower emissions because the necessary concern for the environmental factor, crew's comfort and maneuverability. For that, great scientists of the area are mentioned within their theories and, after that, explored their consequences nowadays, bringing examples of many ships and emphasizing, this way, the real need of obtain and put in practice the knowledge of the subject.

Key-words: Reynold's number. Froude's number. Wing effect. Hydrodynamic on the ship's hull.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	<i>S.S. Great Eastern</i>	12
2	Propulsão em parafuso	14
3	Propulsor do <i>SS Great Britain</i>	14
4	<i>SS Great Britain</i>	15
5	<i>SS Conte di Savoia</i>	16
6	Sistema giroscópico do <i>SS Conte di Savoia</i>	16
7	Interação onda de proa versus onda de popa	17
8	Navio Classe <i>Liberty John W. Brown</i>	18
9	Componentes da resistência do casco em águas calmas	21
10	Embarcação AHTS <i>Bourbon Orca</i> , projeto AX104 da Ulstein® com <i>X-BOW</i>	22
11	Teste realizado na Holanda para comparar a performance do <i>X-BOW</i> com o bulbo	23
12	Bulbo de proa do navio <i>Island Escape</i>	25
13	Atuação do Bulbo de Proa	26
14	Coeficiente de resistência de onda versus Número de Froud	27
15	Tubarão martelo a cima versus estabilizador do <i>Queen Mary 2</i> a baixo	29
16	Aplicação dos Estabilizadores Laterais ao Submarino <i>Hunley</i>	30
17	Aplicação dos Estabilizadores Laterais ao Submarino <i>Pennsylvania</i>	31
18	Funcionamento do estabilizador lateral do navio <i>Independence of The Sea</i>	32
19	Camada Limite e Esteira	33
20	Duto Schneekluth®	35
21	Aletas <i>Grothues</i>	36
22	<i>Pre-swirl Stator</i>	37
23	Becker Mewis Duct®	38
24	Becker Twisted Fin®	39
25	<i>Duto Mitsui</i> (Integrado ao casco)	40
26	<i>Boss Cap</i>	41
27	Volante <i>Grimm Vane</i>	42

28	Bulbo de leme (Costa)	43
29	Efeito Asa no Leme	44
30	Perfil NACA	45
31	Leme espada	46
32	Leme Gnomo	47
33	Leme Ativo	48
34	Leme com <i>Flap</i>	49
35	Leme com cilindro rotativo.	50
36	Leme Schilling®	51
37	Propulsor sustentado por um “pé de galinha”	52
38	Propulsor sustentado por um <i>skeg</i>	53
39	Adoção de um casco mais delgado	54
40	Retirada do bulbo de proa	56
41	Redução da absorção de impacto na proa	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	CONTEXTO HISTÓRICO	11
2.1	<i>SS Great Eastern</i>	12
2.2	<i>SS Great Britain</i>	13
2.3	<i>SS Conti di Savoia</i>	15
2.4	<i>Queen Mary</i>	17
2.5	<i>Classe Liberty</i>	18
2.6	A Construção na Atualidade	19
3	ANÁLISE HIDRODINÂMICA	20
3.1	<i>X-Bow</i>	21
3.2	Bulbo de Proa	24
3.3	Estabilizadores Laterais	28
3.4	Dispositivo Equalizador de Esteira	32
3.4.1	Dispositivo Pré-hélice	34
3.4.2	Dispositivo Pós-hélice	40
3.5	Leme	43
3.5.1	Tipos de Leme	45
3.6	Popa Achatada	52
4	O DESENHO DO CASCO	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

Visando o lucro e o conforto, estudos foram aprimorados ao longo dos anos em diferentes áreas e, no meio marítimo, essa premissa não foi diferente. A eficiência em relação ao tempo e ao gasto do combustível e, por consequência, a melhor vivência do homem a bordo das embarcações vem sendo buscada de forma assídua, assim como maneiras de unir estas características a uma menor emissão de poluentes, em prol da grande importância do fator ambiental.

Na primeira metade da década de 1970 a indústria naval foi forçada a procurar novas formas de melhoramento devido a um grande aumento do preço do petróleo. Sendo assim, o resultado encontrado foi aprimorar as embarcações desde a base, ou seja, desde o seu projeto.

Com o decorrer do tempo, o casco do navio passou a ser visto como parte fundamental para a melhoria das embarcações. Seu contato direto com o mar implica em diversas reações hidrodinâmicas que, corretamente analisadas, ultrapassam qualquer tipo de limitação de tamanho ou rendimento.

Nesse contexto, foram criadas teorias por estudiosos fortificadas por bons resultados. As embarcações passaram a ter maiores dimensões e puderam ser melhoradas até mesmo em seus detalhes. Estruturas foram adicionadas e outras modificadas de forma que trouxessem consigo um acréscimo considerável na eficiência.

No cenário atual, a busca por aprimoramentos continua incessante. Estudos aerodinâmicos acrescentaram conhecimentos fundamentais ao meio naval e com os avanços tecnológicos, os estudos na área se tornaram em pouco tempo altamente modernos e eficazes.

2 CONTEXTO HISTÓRICO

As atividades exercidas pelo homem, desde os primórdios da sociedade, sempre foram feitas visando algum modo de benefício ao mesmo. A atividade comercial, então, passou a ter grande papel na vida de todos. O câmbio de mercadorias cada vez mais tomava maiores proporções que, em busca de lucro, não se restringiam unicamente à terra firme.

Deste modo, eram usadas também, entre diferentes povos, embarcações para tal atividade. Até então, havia a necessidade de cooperação da natureza para total sucesso do trajeto. Eram usadas velas e remos, o que fazia com que os tripulantes precisassem de bom tempo e vento pelo fato de essas embarcações não possuírem um meio de propulsão adequado.

Com a Revolução Industrial, no século XIX, o meio marítimo também teve sua ascensão. Houve a incorporação de uma máquina alternativa a vapor às embarcações fazendo com que pudessem, assim, não precisar mais que suas dimensões fossem restringidas e não depender totalmente de condições favoráveis da natureza.

Quando, de fato, a propulsão a vapor deixou de ser uma fonte auxiliar de navegação e passou a tomar o lugar das velas surgiu, então, uma nova percepção dos interessados sobre o assunto, ficando claro que ainda havia como criar e aperfeiçoar recursos para melhorar tanto em relação à agilidade quanto à capacidade.

O carvão passou a tomar grande parte a bordo, cerca de 40% do volume total disponível. Isso ocorreu pelo fato de os motores usados possuírem um rendimento muito baixo, precisando, por isso, de muito combustível. A necessidade de embarcações maiores ficou clara, já que estas não mais levavam somente pessoas e mercadorias.

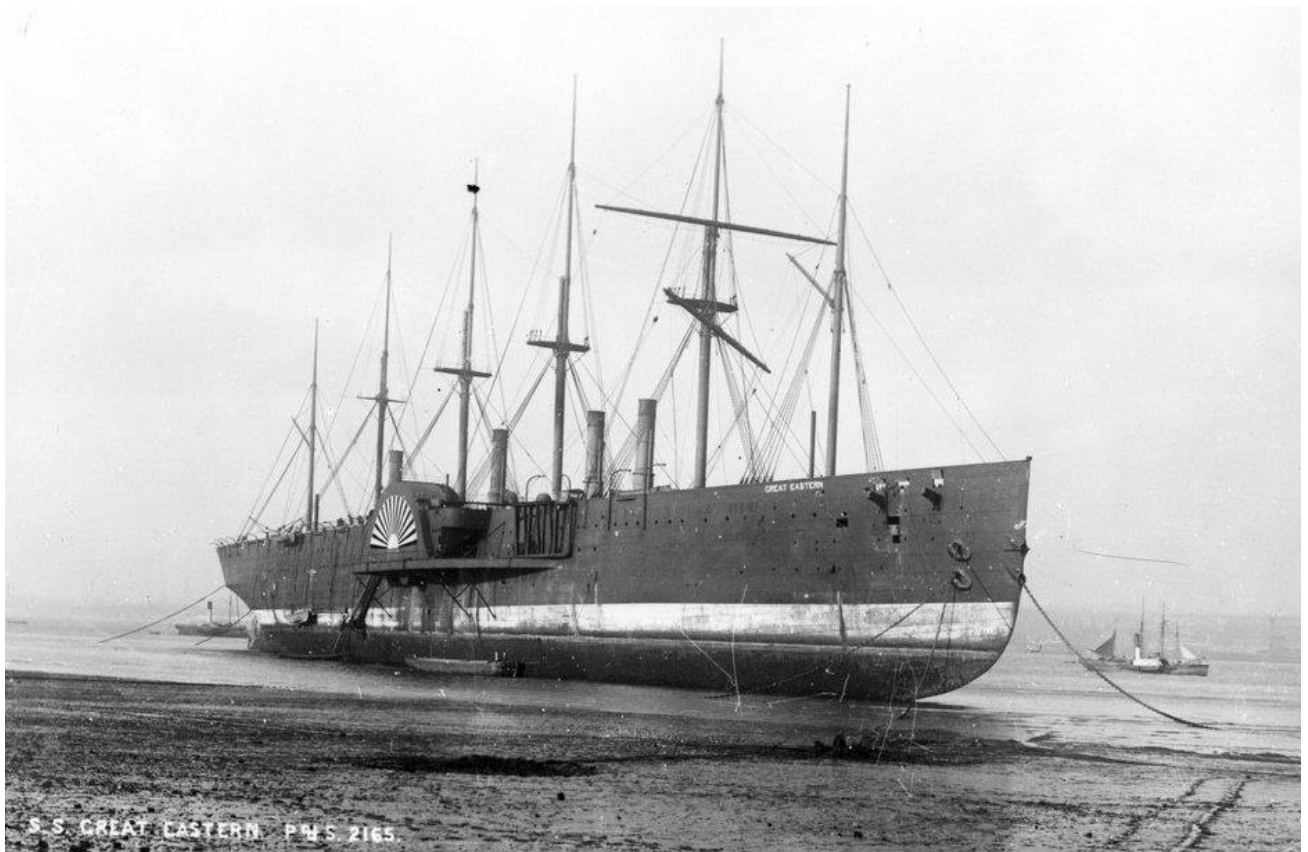
Iniciou-se, a partir deste fato, a busca pelo conhecimento necessário para a construção e eficiência de embarcações maiores. O engenheiro inglês Isambard Brunel, pioneiro neste estudo, projetou, então, o navio *SS Great Easter* que passaria a ligar Bristol à Nova York. Tal navio possuía 207 metros de comprimento, algo até então inimaginável. Ele era duas vezes maior e nove vezes mais pesado que o maior navio já construído até a sua elaboração.

2.1 SS *Great Eastern*

Essa construção só foi possível devido à descoberta, por Brunel, de que a resistência ao movimento na água e, conseqüentemente, 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 o ferro para poder, desta maneira, suportar o peso de seus motores, a grande quantidade de carvão, mantimentos e tripulação. Caso fosse utilizada a madeira, a estrutura do navio não aguentaria os esforços a que seria submetida e acabaria sofrendo avarias e até mesmo partir ao meio.

Figura 1: *S.S. Great Eastern*



Fonte: (<http://www.manualdaengenharia.com/2015/02/isambard-branel.html?m=1>)

A ideia dessa embarcação até certo ponto não teria falhas, porém, por ser uma construção de dimensões até então não vistas, o *SS. Great Eastern* pôde operar em pouquíssimos portos que suportavam a entrada de um navio de tal tamanho, encontrando dificuldades para embarcar cargas e passageiros suficientes para chegar ao lucro previsto. Outro fator que continuava a atrapalhar o rendimento econômico do navio era o tipo de propulsão que ainda exigia uma grande quantidade de carvão, implicando em uma perda considerável de espaço que poderia ser utilizado para outros fins. Das 28000 toneladas de deslocamento em plena carga que o navio possuía, 12000 toneladas eram destinadas ao carvão.

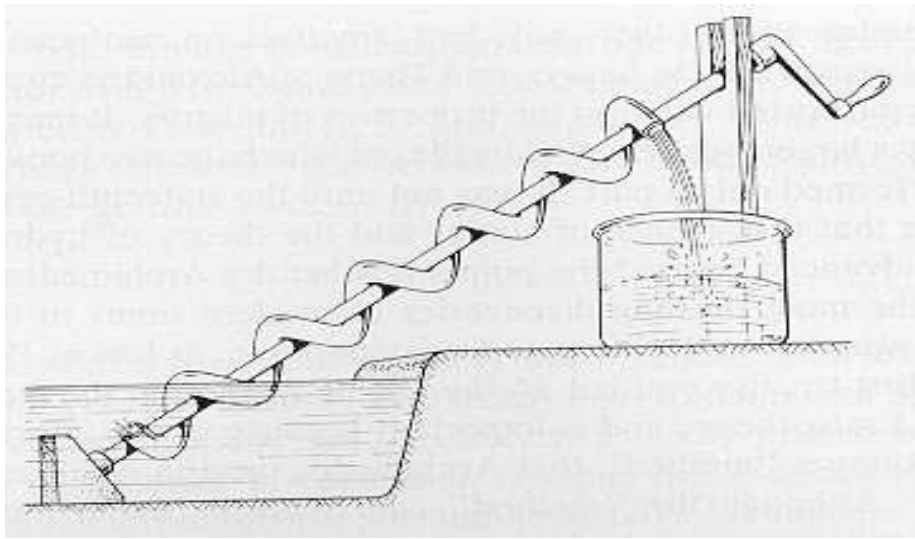
Apesar da teoria de Brunel estar basicamente correta, o navio tornou-se comercialmente fracassado. Com o decorrer dos anos e com a adequação dos portos a grandes dimensões, construir navios valendo-se dessa teoria se tornaria viável, sendo, então, usada nos dias atuais onde já são encontrados portos de maior capacidade.

2.2 *SS Great Britain*

A construção do *SS Great Britain* solucionou os problemas constatados no seu antecessor, *S.S. Great Eastern*. Inicialmente o problema em relação à capacidade foi resolvido com o aumento do tamanho da embarcação, mas durante a travessia foi possível observar outro problema. Devido à força das ondas sobre a embarcação, ela adquiria um movimento lateral chamado de balanço, movimento este que fez com que as rodas de pá não ficassem em condições iguais, tendo por vezes uma totalmente submersa enquanto a outra se encontrava fora da água e vice-versa, fazendo com o que o navio gastasse parte de sua energia com movimentos descontínuos e indesejados.

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

Figura 2: Propulsão em parafuso



Fonte: (<http://www.geocities.ws/>)

Para utilização deste tipo de propulsão foi necessário estudar onde seria o local ideal para a sua fixação. Ao serem realizados testes, notou-se que, devido à interação da descarga do propulsor, não seria possível coloca-lo a vante. Essa interação seria prejudicial ao deslocamento do navio, causando vibrações e descolamento da camada limite. Decidiu-se, então, que o melhor lugar para colocar o propulsor seria na região de menor contato com a estrutura do casco, a popa do navio.

Figura 3: Propulsor do *SS Great Britain*



Fonte: (<http://gitanadeciudad.overblog.com/brunel-s-ss-great-britain>)

Com isso, o *SS Great Britain* foi o primeiro transatlântico a possuir o casco e o propulsor de ferro, fazendo com que obtivesse, desta maneira, maior segurança, maior espaço a bordo e uma redução em seu tempo de viagem entre a Europa e os EUA, levando somente 14 dias de viagem, um dia a menos que o seu antecessor.

Figura 4: *SS Great Britain*

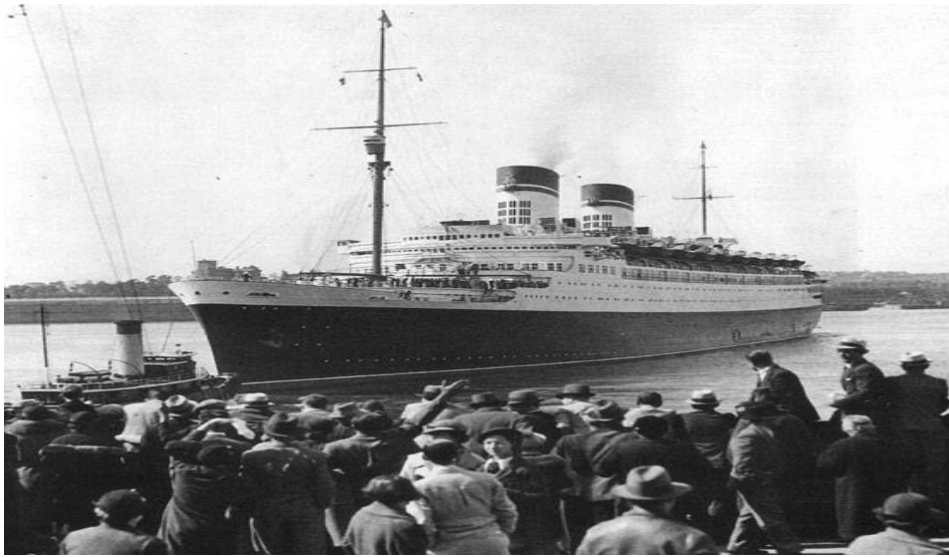


Fonte: (<http://heikoworld.com/tag/ss-great-britain/>)

2.3 *SS Conte di Savoia*

Para concorrer com o *SS Great Britain* e atender às reclamações em relação ao balanço da embarcação, a Companhia Italiana *Società Italiana di Navigazione* criou um navio ainda maior e mais rápido.

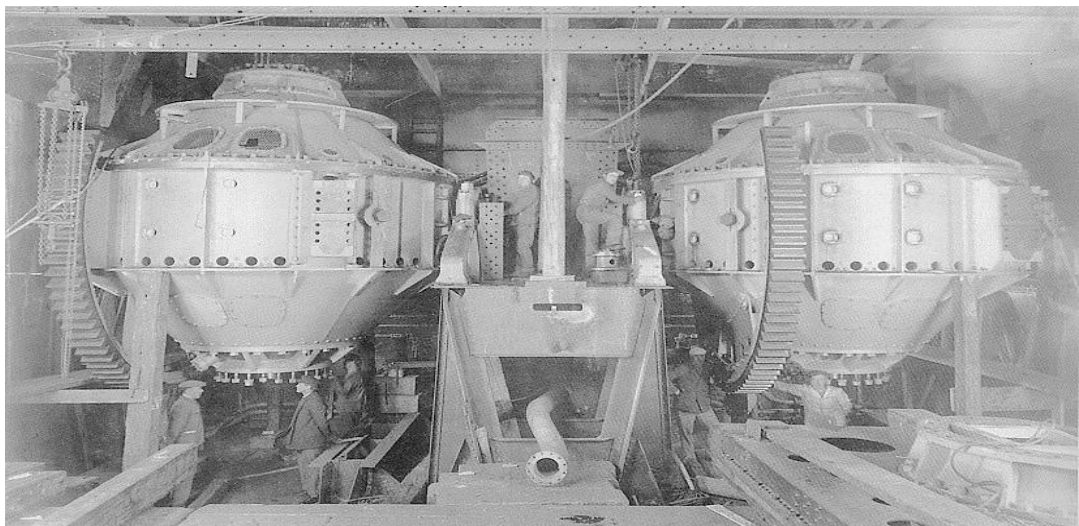
Figura 5: *SS Conte di Savoia*



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

Para solucionar o problema do balanço, o *SS Conte di Savoia* contava com um sistema com três giroscópios a bordo. O conceito físico do giroscópio, onde uma massa em rotação fornece maior oposição a uma força externa que tenta o retirar de sua trajetória, foi levado para a embarcação a fim de minimizar o balanço do navio. Toda vez que uma onda tentava inclinar o navio para um bordo, o sistema com giroscópios fazia uma força contrária, mantendo-o estável.

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



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

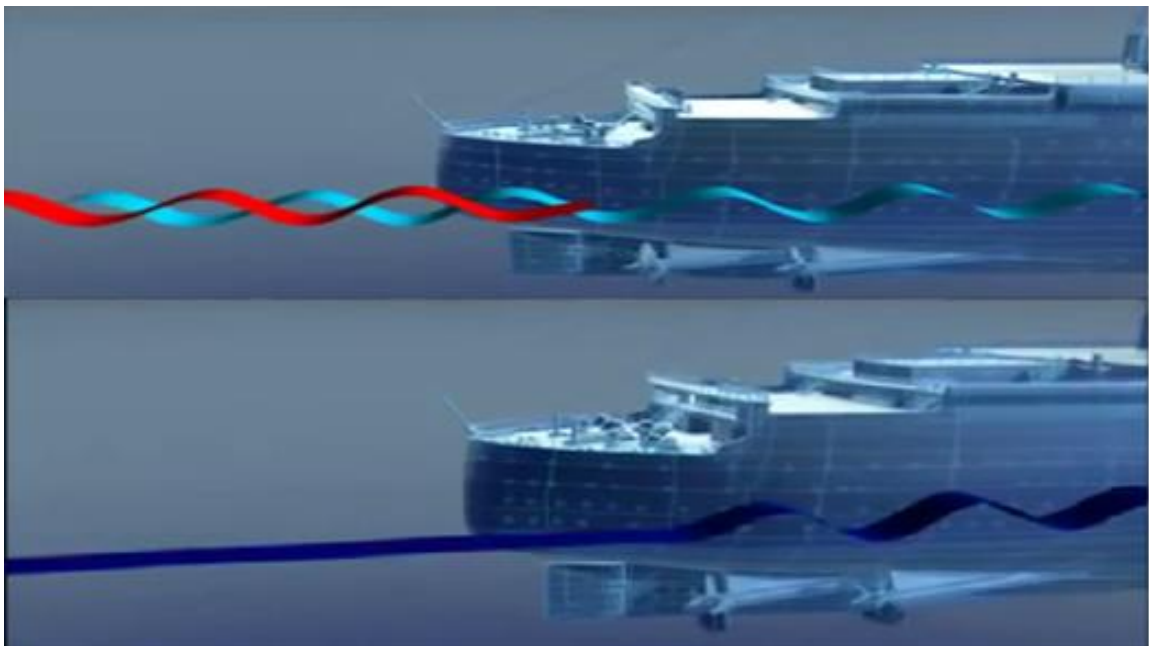
Desta forma, o *Conte di Savoia* ficou conhecido como o navio sem balanço, e assim fez uma viagem mais rápida, conseguindo transportar um número maior de pessoas e aumentando o conforto de seus passageiros.

2.4 *Queen Mary*

O *Queen Mary* começou a ser construído em 1930, e como não tinha tanta sofisticação quanto o maior navio de cruzeiro da época, *SS Normandi*, seus criadores resolveram concorrer fazendo-o mais veloz. Com isso, tentou-se descobrir em tanques de prova uma maneira de reduzir a resistência criada pelas ondas geradas pela própria embarcação.

Os engenheiros descobriram que de acordo com o tamanho da embarcação era possível ser gerada uma onda na proa com um comprimento de onda tal que, quando esta onda chegasse à popa da embarcação, ela estaria defasada da onda gerada na popa de maneira a, com isso, reduzir 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 adequado aos cálculos feitos conseguiria cruzar o atlântico mais rápido, chegando ao seu destino final três horas antes que o navio mais rápido da época fazendo o mesmo trajeto.

2.5 Classe *Liberty*

Os navios da Classe *Liberty*, que eram do tipo cargueiro, foram construídos durante a Segunda Guerra Mundial onde se mostraram peça fundamental na conquista dos aliados na guerra. Os estaleiros norte-americanos construíram em grande quantidade este tipo de embarcação, utilizando-se de um desenho originalmente britânico onde suas plantas foram adaptadas pelo engenheiro norte-americano Willian Francis Gibbs.

Esta classe de navio teve como sua principal característica a introdução de um sistema de propulsão utilizando óleo como combustível principal de suas caldeiras. Desta maneira, este navio se tornou mais leve e rápido e, assim, melhorando sua eficiência levando-se em conta o fato de o óleo proporcionar mais potência ao motor do que os demais combustíveis fósseis anteriormente empregados.

Figura 8: Navio Classe *Liberty* *John W. Brown*



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

2.6 A Construção na Atualidade

Atualmente, ao projetar um navio existe um estudo sobre qual carga que ele irá transportar e quais possíveis portos de escala ele terá, a fim de saber quais poderão ser as suas limitações. Também é preciso levar em consideração que ao aumentar as dimensões do navio, aumentam-se exponencialmente os problemas relativos a esforços estruturais, cavitação e vibração.

A indústria de construção naval está vivenciando um cenário tecnológico excelente. Esse fato se deve, em parte, ao engenheiro inglês William Froude que, em 1867, após os estudos de Brunel, iniciou pesquisas relativas ao movimento do navio. Para isso, Froude uniu-se da ideia de utilizar modelos de escala reduzida em testes onde conseguiria mensurar dados relativos à resistência dos cascos e posteriormente aplicar seus resultados a navios em escala real.

Outro fator de grande ajuda quando se tratou do melhoramento das atividades marítimas foi a correlação com os estudos aerodinâmicos. Conceitos já usados em aviões foram adotados em os navios e, com isso, novas estruturas começaram a ser introduzidas e estudadas nesse meio.

Sendo assim, é de fácil percepção o grande e contínuo crescimento de estudos que fazem com que, cada vez mais, a construção naval torne o lucro do armador maior e a vida a bordo mais agradável.

3 ANÁLISE HIDRODINÂMICA

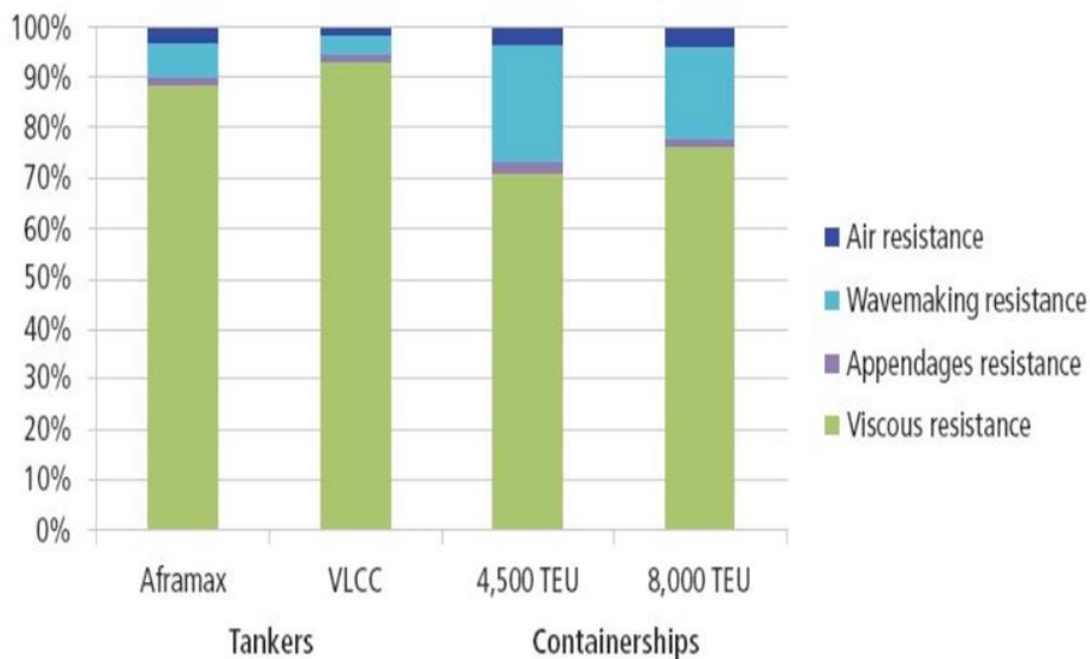
Apesar de planejadas e construídas em terra, as embarcações tem por propósito navegar, ou seja, ficar no mar. Porém, os engenheiros atentam para um fato que por muitos, às vezes, passa despercebido. Tais modais se deslocam não somente em um meio, e sim em dois. É necessário levar em conta os efeitos da água e do ar.

Deve-se, também, ter a noção de até onde a embarcação estar imersa em tais fluidos modifica a sua análise. Para isso, saber que os meios fluidos comportam-se de maneira muito diferente dos sólidos quando submetidos a esforços mecânicos é fundamental.

Enquanto os sólidos possuem uma geometria bem definida, os fluidos podem assumir a forma do recipiente que o contém. No caso da água do mar, que não está contida em um recipiente propriamente dito, existem vários fatores que fazem com que sua forma não seja inerte, afetando, assim, as embarcações que nela navegam.

Além disso, quando no fluido, existem forças que atuam nas embarcações, tais como empuxo, peso, arrasto e reação (*thrust*), fazendo com que seja ainda mais complexa a navegação. As forças de atuação vertical, empuxo e peso, não são tão importantes quando se trata da movimentação destes modais, ao contrário daquelas que são horizontais e se opõem a movimentação, denominadas resistência ao avanço quando somadas.

Essa resistência, por sua vez, é composta por outras, como a resistência friccional, devida ao movimento do casco através da água, resistência de ondas, devida às ondas formadas com a movimentação do navio, resistência de forma, devida à energia gasta na formação de vórtices pelo casco e seus apêndices e a resistência do ar, devida à passagem do mesmo através da superestrutura e da parte do casco acima da água durante sua movimentação.

Figura 9: Componentes da resistência do casco em águas calmas

Fonte: (ABS Advisory).

Para desempenhar eficientemente suas funções, as embarcações passaram, então, a usufruir de características que aumentassem o seu desempenho hidrodinâmico desde a proa, como a alteração de seu formato e acréscimo de estruturas, até a popa, em seu possível achatamento, mudança de propulsores e estruturas relativas a ele. Sendo assim, o formato do casco deixou de se restringir ao tradicionalmente usado, houve uma otimização dos propulsores e a utilização de dispositivos de incremento da propulsão (PID).

3.1 X-Bow

O *X-BOW* ou “proa invertida” foi um design de proa criado pela empresa norueguesa Ulstein® no ano de 2005 que ajuda a reduzir o embarque de água, aumentar o conforto, a segurança dos tripulantes e a capacidade de carga.

Este design caracteriza-se por proas arredondadas, mais altas, contínuas e afiadas. Com este design, grande parte do volume de água deslocada pela proa convencional e com o bulbo de proa é reduzida. As linhas de água são mais longas e o volume da proa é significativamente maior, conferindo a ela uma forma mais esbelta e com menores angulações,

tanto abaixo como acima da linha da água, além de gerar mais espaço, normalmente incorporado por acomodações.

Figura 10: Embarcação AHTS *Bourbon Orca*, projeto AX104 da Ulstein® com X-BOW



Fonte: (<http://korabley.net>).

Com a proa contínua e afiada, a embarcação passou a dividir suavemente as ondas e o mar calmo. O aumento de volume acima e na frente da permitiu uma resposta eficiente a grandes ondas, diferentemente de uma proa convencional, que empurra as ondas para baixo e para frente, retardando o avanço da embarcação.

Além disso, com este design se diminui a culpada, que é o movimento vertical onde a proa do navio se choca com o mar. Obteve-se uma maior velocidade de trânsito e, conseqüentemente, uma maior economia referente ao consumo energético da embarcação, fazendo com que houvesse uma redução nas emissões de gases.

Houve também uma maior segurança para a tripulação devido a movimentos mais suaves e uma maior proteção fornecida pelo casco. Sem a existência da inclinação

convencional da proa, são eliminados os impactos e a batida de proa (*slamming*) e, com isso, há pouca incidência de água no passadiço e menos borrifo, além de níveis sonoros e de vibração reduzidos na parte da frente do navio, o que ajuda no conforto das pessoas que estão a bordo.

De acordo com um teste comparativo realizado em Marin, Holanda, comparando uma embarcação *offshore* com proa *X-BOW* e uma equivalente com proa convencional, com o tamanho da onda de 2.8 metros, um período de 10.5 segundos e uma velocidade de 15 nós, obteve-se o resultado de que o uso do *X-BOW* é mais vantajoso do que o da proa convencional.

Figura 11: Teste realizado na Holanda para comparar a performance do *X-BOW* com o bulbo



Fonte: (<http://www.jornalpelicano.com.br/2015/04/proa-x-bow-grupo-ulstein/>).

Somando-se a todas as vantagens supracitadas, obteve-se, com o teste, o *feedback* de uma redução de consumo de combustível entre 7 e 16%, uma melhoria na perda de velocidade em ondas de 2,5 a 10 metros de 19% e uma melhor performance com o uso de posicionamento dinâmico (DP).

E, segundo relatórios de alguns estaleiros como Zaliv, localizado na Ucrânia, e Maritim Limited, na Polônia, o tempo de produção de partes e seções foi reduzido em 15% em comparação a embarcações de proa bulbosa convencional ou outros projetos e o custos para montagem, soldagem, flexão do aço e aparelhamento que foram reduzidos em mais de

50%, devido ao grande número de modelos flexionados e trabalho de marcação e checagem que não são necessários nesse tipo de construção.

3.1 Bulbo de Proa

O bulbo de proa é uma protuberância na área molhada da proa da embarcação com a função de alterar a forma da onda causada pela sua movimentação. Trata-se de uma aplicação direta do Número de Froude, que é um fator adimensional e proporcional à relação entre a força de inércia e as forças gravitacionais.

Para embarcações, este número define-se pela relação entre a velocidade de escoamento, que é a velocidade de avanço do navio, e a velocidade de propagação de uma onda longa de superfície associada com a profundidade. A natureza das ondas produzidas está diretamente associada a este número, juntamente com o formato que a embarcação possui.

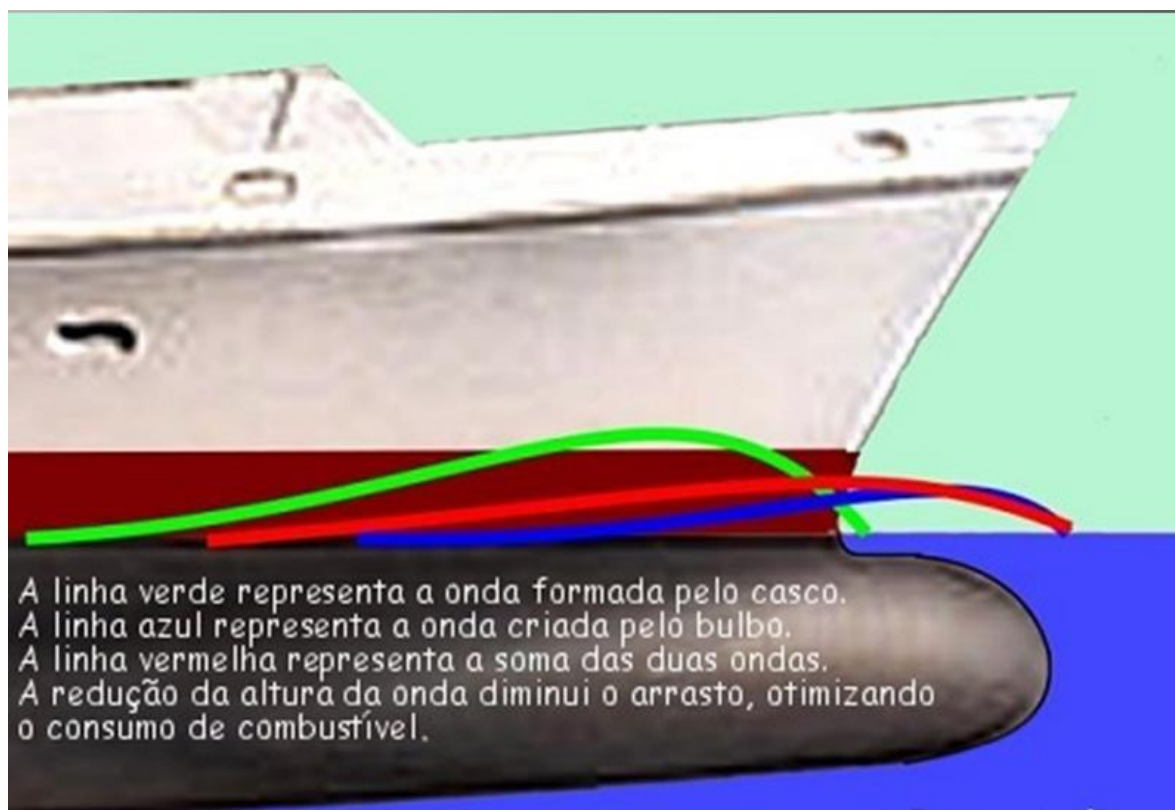
Por esta razão têm-se a tamanha importância do Número de Froude e da criação do bulbo de proa. Um navio deslocando-se sobre a água gera ondas em sua proa, ondas estas que têm como energia de origem o movimento do próprio navio. Conclui-se, então, pelo princípio da conservação de energia, que estas ondas nada mais são do que uma perda de energia do navio e, conseqüentemente, uma resistência ao avanço.

Figura 12: Bulbo de proa do navio *Island Escape*



Fonte: (<http://www.avioesemusicas.com/o-lado-tecnico.html>).

Gerando uma segunda onda, o bulbo faz com que esta interfira na onda gerada pelo deslocamento da embarcação, de forma a reduzi-la ou cancelá-la. Porém, para que isso ocorresse de forma mais proveitosa, seria preciso que esta segunda onda fosse defasada da originada pela proa em um valor o mais próximo possível de meio comprimento de onda. Isso iria requerer um bulbo de proa com cerca de 20 metros para um navio de velocidade regular, e a resistência causada pelo aumento da área sob a água não mais seria compensada pela redução na resistência de ondas.

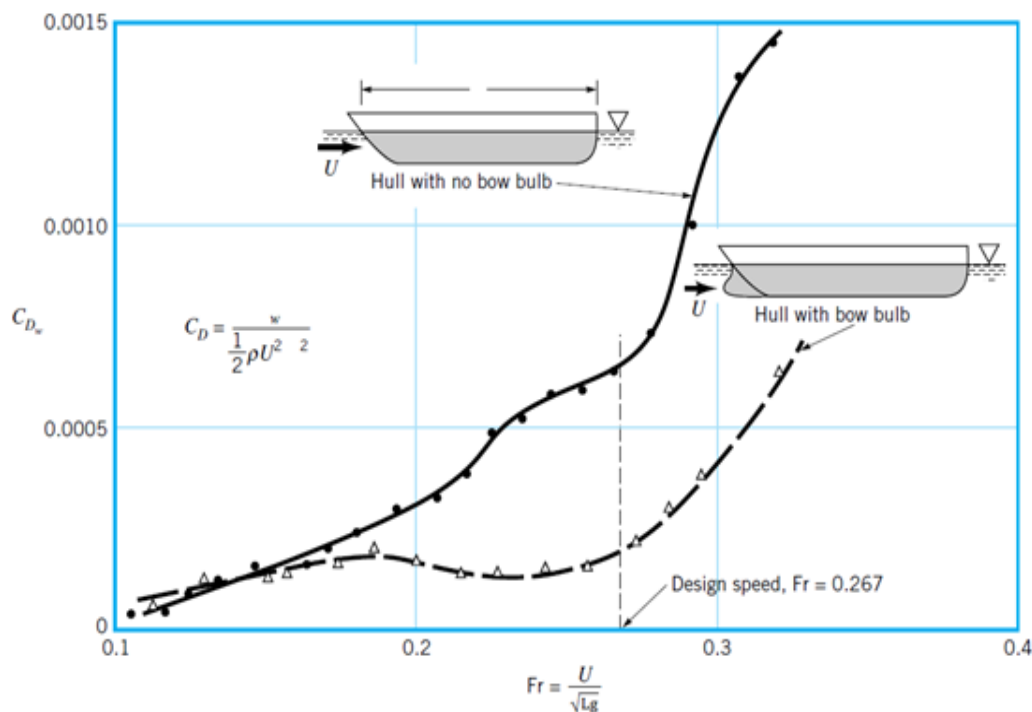
Figura 13: Atuação do Bulbo de Proa

Fonte: (http://www.popa.com.br/_2009/CRONICAS/bulbo-de-proa.htm).

Apesar de não ser viável a construção de um bulbo que de proa de 20 metros, é possível chegar a um equilíbrio entre o aumento da resistência de apêndice, causada pelo acréscimo de área sob a água, e a redução da resistência de ondas, de forma a obter um menor arrasto total. Ou seja, gerando menos ondas e, conseqüentemente, tendo um menor gasto quando se trata de consumo de combustível na geração de movimento.

Para alcançar esse equilíbrio, é necessário o estabelecimento de uma velocidade na qual se teria o melhor aproveitamento do bulbo de proa, velocidade esta chamada de velocidade de cruzeiro do navio. Precisa-se também levar em conta o comprimento do navio. Com isto, é possível estabelecer o Número de Froude do navio analisado e assim concluir se é vantajoso ou não instalar um bulbo de proa nele.

Figura 14: Coeficiente de resistência de onda versus Número de Froude



Fonte: (CLARK, 2005, p.32).

No gráfico a cima está representada a comparação entre os coeficientes de arrasto de um determinado navio com bulbo de proa e de outro sem o bulbo de proa em função do Número de Froude. Observa-se que, para velocidades baixas o bulbo de proa não se torna eficiente ao navio. O que também ocorre para casos em que o navio se encontra com o deslocamento próximo ao valor da sua condição leve, em que o bulbo não está totalmente imerso, não conseguindo, assim, realizar a sua função.

Pode-se perceber também que até um Número de Froude próximo a 0,16, as diferenças entre os coeficientes de arrasto de onda dos navios com e sem o bulbo não são tão significativas, o que não compensaria a instalação desta estrutura pelo fato de existir um aumento da resistência de apêndices da embarcação sem a redução da resistência de onda. Entretanto, a partir desse mesmo valor, observa-se que a diferença se torna bastante expressiva, comprovando assim a eficiência do bulbo de proa na redução do arrasto deste navio.

Diferentes tipos de navio possuem gráficos com valores diferentes dos até então apresentados, porém, a curva encontrada é semelhante. Sendo assim, sempre existirão valores que serão de grande importância para saber a relevância do uso do bulbo para aquele determinado navio.

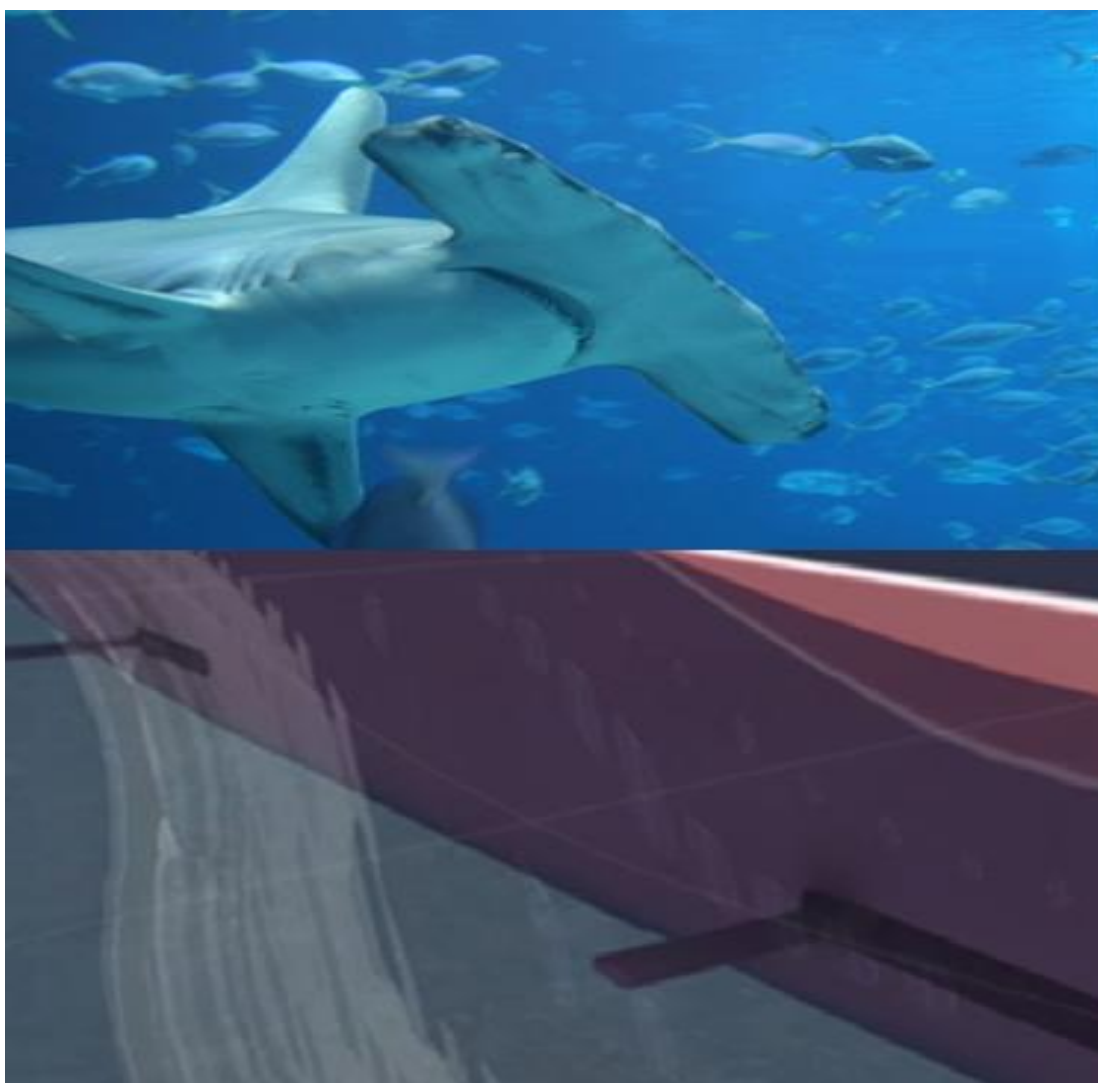
3.3 Estabilizadores Laterais

Atualmente, a maioria dos navios de cruzeiro possui algum tipo de estabilização para melhorar o seu comportamento no mar e, assim, trazer conforto ao passageiro. Acontece que, normalmente, passageiros não conseguem se adaptar ao movimento lateral (balanço) que o navio adquire ao navegar e, por isso, enfrentam desde tonturas a náuseas.

A ideia de trazer um dispositivo que compensasse o balanço para as embarcações veio desde a construção do navio *Conte di Savoia* e seus sistemas de giroscópios para evitar o balanço. Hoje em dia, para evitar esse movimento foram criados estabilizadores laterais, inicialmente usados por submarinos, que nada mais são do que perfis de asa que podem reproduzir movimentos parciais ou em várias direções. Essas asas podem girar cerca de 25° e funcionam de acordo com sinais enviados por sensores.

Essa inovação foi inspirada na própria natureza. Observando-se o tubarão martelo, que possui a cabeça com extensões para fora do corpo, chegou-se a conclusão de que este formato sobressalente poderia ajudar navios quanto à sua estabilidade pelo fato de, no caso dos tubarões, sua cabeça fornecer um formato hidrodinâmico que aumenta a velocidade com a qual consegue atacar sua presa além de oferecer uma maior estabilidade.

Figura 15: Tubarão martelo a cima versus estabilizador do *Queen Mary 2* a baixo



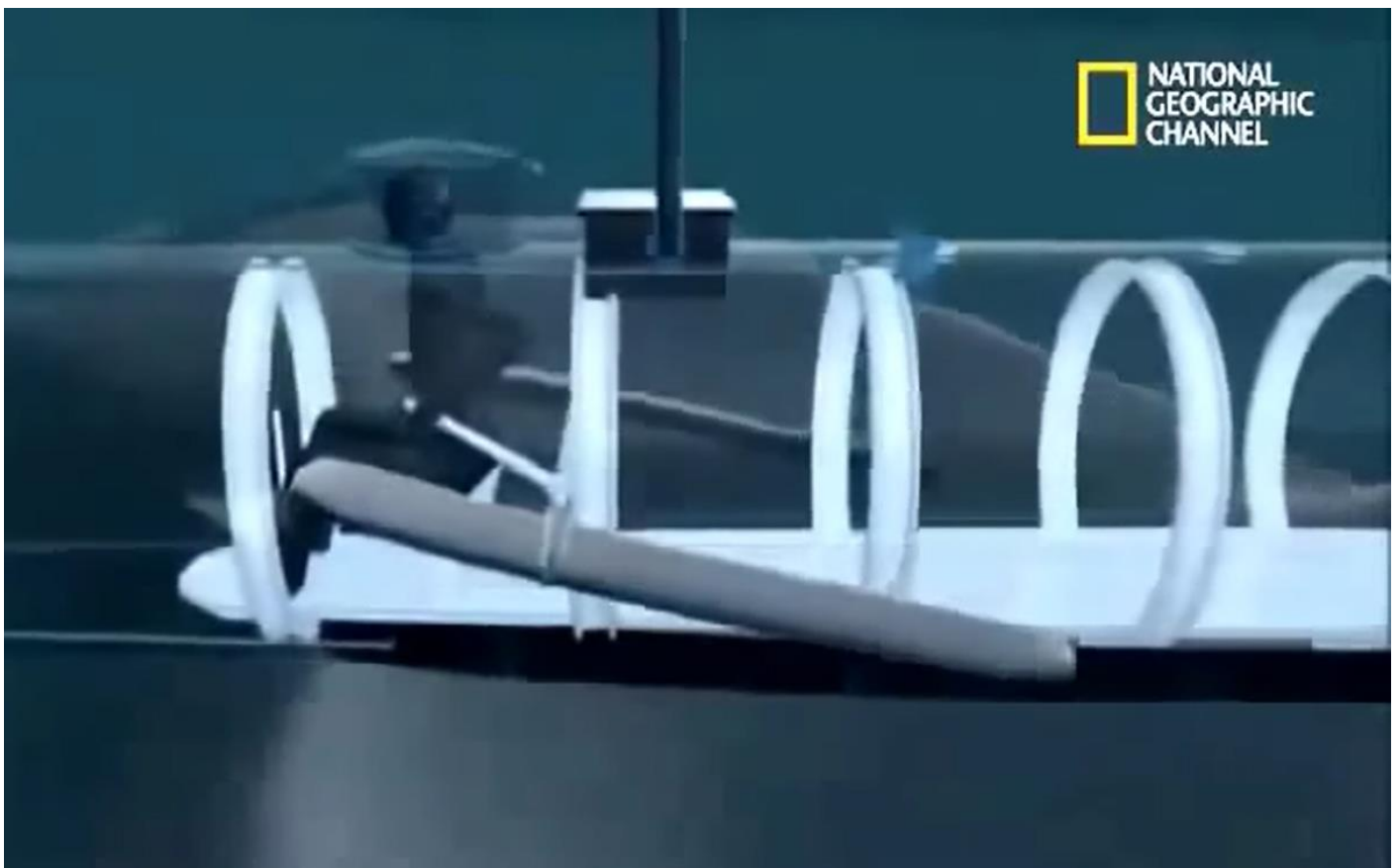
Fonte: (<http://www.google.images.com>)

Nos submarinos, o estabilizador atua como leme de profundidade. Quando imerso, o submarino necessita de alguma estrutura que garanta a sua estabilidade e manobrabilidade. Sendo assim, ao possuir um estabilizador lateral, ele ganha a capacidade, também, de conseguir uma movimentação verticalmente e uma melhor estabilidade ao fazer curvas, coisa que com a utilização somente do leme convencional não seria possível. Assim, pode-se imergir e emergir mais facilmente e sem nenhum tipo de problema referente à estabilidade.

O primeiro a possuir alguma tecnologia em relação a esse assunto foi o submarino *Hunley*, onde seus estabilizadores eram conhecidos como nadadeiras, feitas de metal e inspiradas na observação de peixes. Com a utilização de alavancas, criou-se a capacidade de

mover as nadadeiras deste submarino verticalmente. Quando posicionadas para baixo, a diferença de pressão entre o dorso e o intra-dorso, ou seja, a parte superior e a inferior das nadadeiras, faz com que o nariz do submarino afunde.

Figura 16: Aplicação dos Estabilizadores Laterais ao Submarino *Hunley*



Fonte: (Vídeo National Geographic Channel)

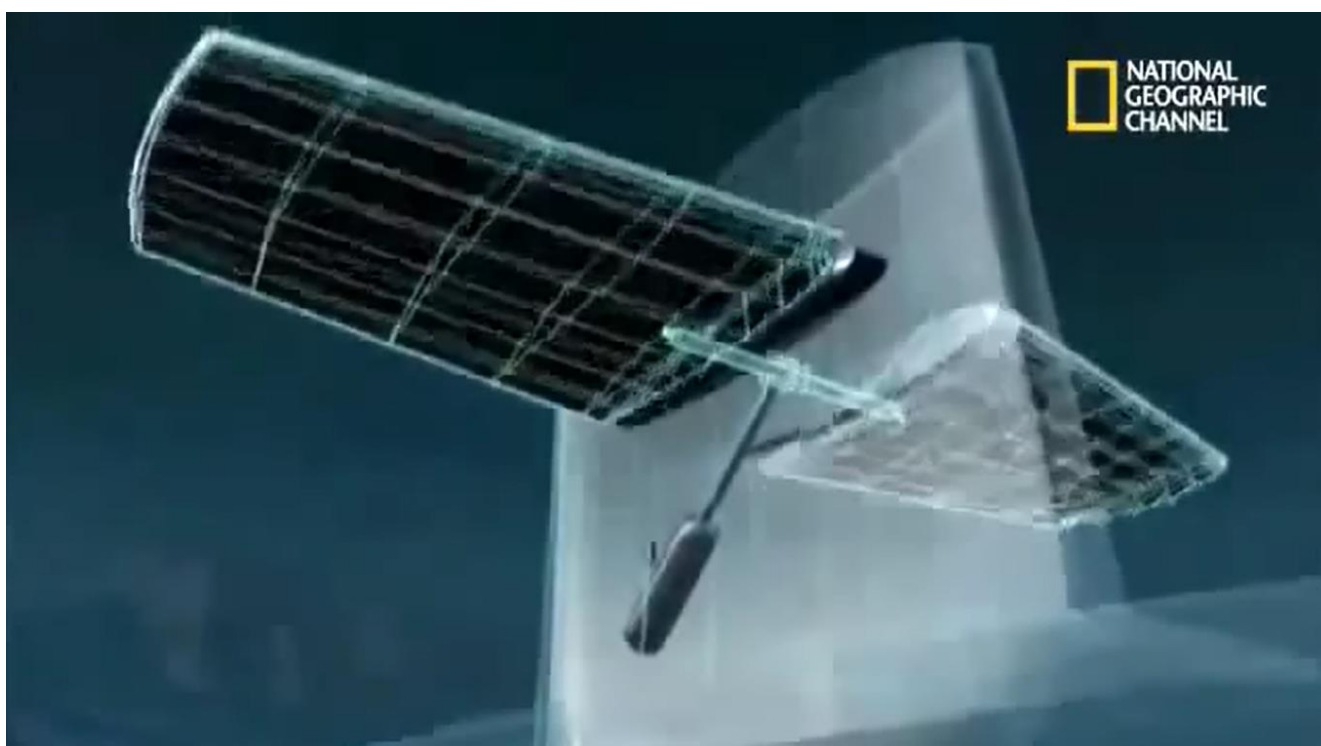
Desta maneira, pode-se calcular a profundidade e o ângulo de ataque com maior precisão. Assim, esta tecnologia capacitou, então, o *Hunley* a ser o primeiro submarino a conseguir afundar um navio com o uso de torpedo.

Atualmente, no submarino *Pennsylvania*, é usado outro tipo de estabilizador lateral, chamado de níveis. O controle destes níveis é feito por transmissão eletrônica, um tipo de controle diferente do utilizado no *Hunley*. Este tipo de controle foi aperfeiçoado do controle mecânico utilizado nas aeronaves, que diminuía o esforço empregado nos dispositivos de controle que atuavam nos lemes, através do princípio de vasos comunicantes com óleo.

Assim, existe a capacidade de ajustar o ângulo e mover o submarino verticalmente sem a necessidade de algum tripulante guarnecendo o local onde o estabilizador se encontra.

O *Pennsylvania* também possui um segundo conjunto de níveis encontrado na popa do submarino e, assim como nos aviões, esses níveis controlam o ângulo de inclinação do submarino.

Figura 17: Aplicação dos Estabilizadores Laterais ao Submarino *Pennsylvania*



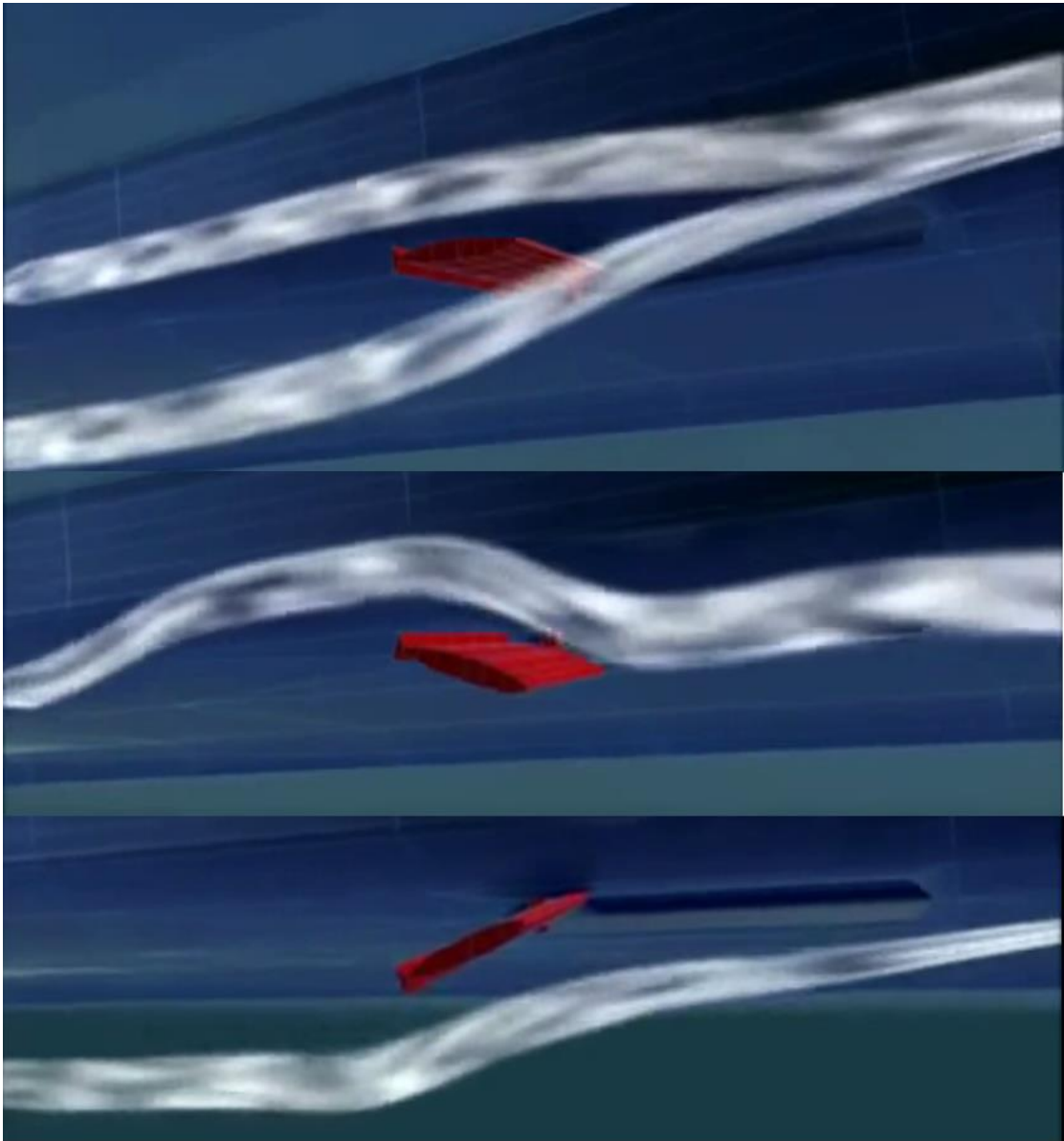
Fonte: (Vídeo National Geographic Channel)

Nos navios, esses equipamentos se dividem basicamente em dois tipos: os estáticos, que funcionam apenas quando a embarcação está em movimento, e os dinâmicos, que agem tanto com ela parada quanto navegando. Todos, porém, tem a capacidade de reduzir consideravelmente o indesejável movimento lateral e, em alguns casos, a eficiência chega a 90%. O único problema é que eles só funcionam em embarcações grandes, acima dos 30 pés.

O funcionamento desse sistema faz com que quando o navio sofra uma inclinação para um dos bordos, o sistema de estabilizadores laterais diga um ângulo de inclinação tal que com uma força determinada para o outro bordo seja possível compensar a inclinação gerada pela

onda, mantendo a embarcação estável e fazendo com que se obtenha uma maior economia de combustível, reduzindo também a emissão de poluentes, com uma viagem em menor tempo e com maior conforto.

Figura18: Funcionamento do estabilizador lateral do navio *Independence of The Sea*



Fonte: (Vídeo Discovery Channel)

3.4 Dispositivo Equalizador de Esteira

O equalizador de esteira é um dispositivo que pode ser tanto pré-hélice, com a função de transformar o fluxo axial da água em rotacional, quanto pós-hélices, onde tem por finalidade transformar o fluxo rotacional em axial.

Porém, para saber como funciona este dispositivo, é necessário saber o que de fato é a esteira. Segundo Ludwig Prandtl, a camada limite de um escoamento é a região do escoamento em que a velocidade do fluido é perturbada por esforços cisalhantes devido à presença de uma superfície sólida.

Ou seja, a água faz uma camada no entorno do casco do navio quando imerso. Porém, quando este adquire velocidade, ocorre um descolamento da camada limite nos locais onde há uma mudança brusca na seção ou quando o casco termina, buscando dessa maneira ocupar regiões de baixas pressões. Assim, são originados vórtices que dissipam sua energia cinética em forma de esteira.

Figura 19: Camada Limite e Esteira



Fonte: (<http://www.maritimos.com.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 acrescentar um dispositivo equalizador pré-hélice, é possível ganhar a capacidade de fazer com que a água chegue homogênea 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.

3.4.1 Dispositivo Pré-hélice

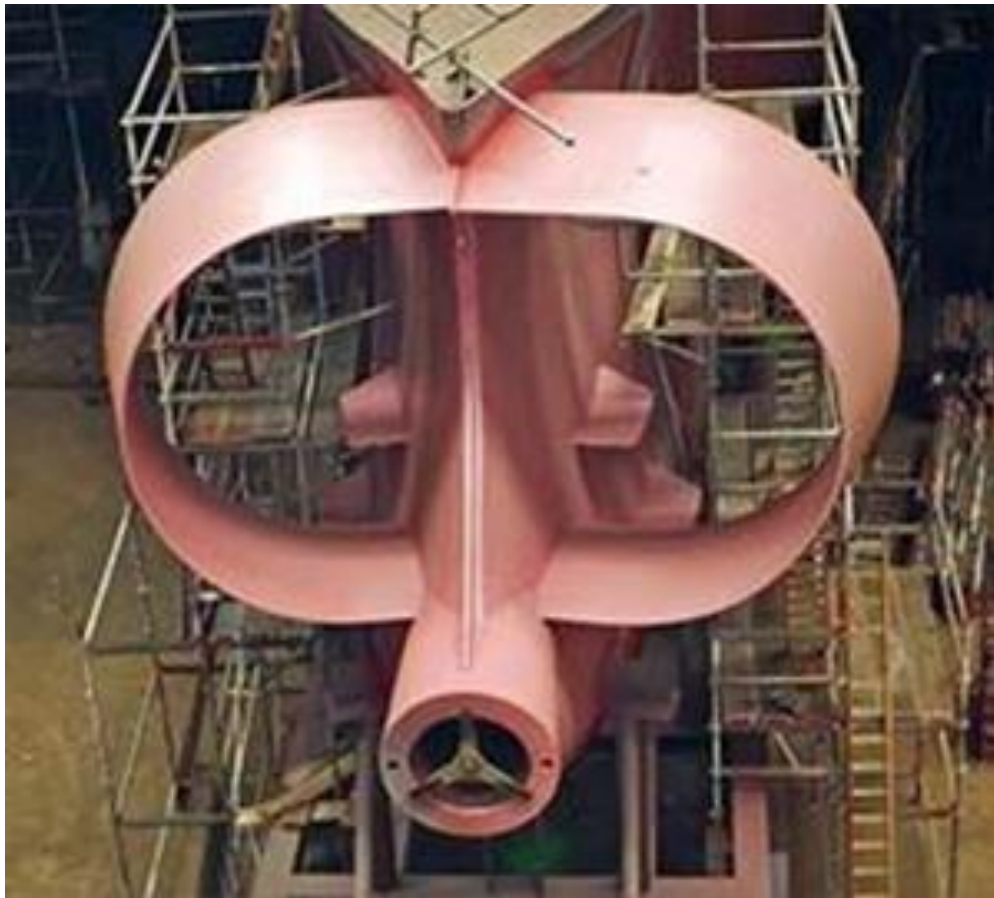
Ao optar pelo dispositivo pré-hélice, há uma gama de escolhas a serem feitas pelo fato de não existir somente um dispositivo com essa função. O uso deste dispositivo e seu ganho energético são influenciados tanto pelas linhas de corrente da água na parte superior do propulsor que apresentam áreas com separação de fluxo de intensidades variadas em função da forma do navio e a redução de *thrust* pela fricção com o casco, quanto 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 instalação deste duto ocasiona um aumento na velocidade de entrada da água no disco do propulsor. Conseqüentemente, o hélice aumenta sua rotação entre 1,5 a 2 rotações por minuto, 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 20: Duto Schneekluth®

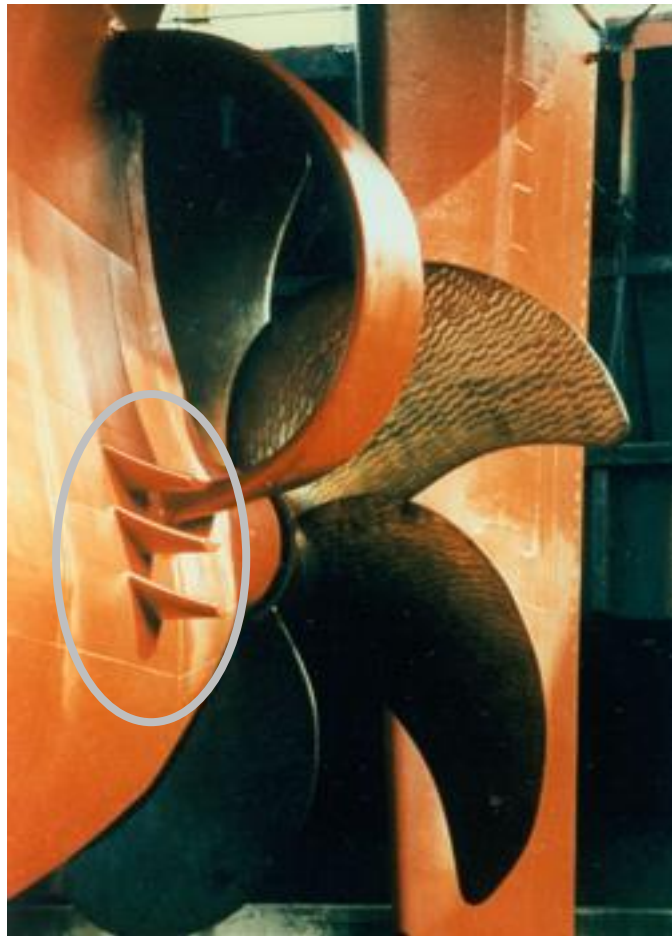


Fonte: (<http://www.technava.gr/>)

II) Aletas *Grothues*

As aletas são uma sequência de hidrofólios, projetados para baixo e para fora nas laterais do casco, posicionados avante e acima do propulsor. Esses hidrofólios criam um fluxo axial mais uniforme no disco do propulsor, acelerando, conseqüentemente, o fluxo lento.

Figura 21: Aletas *Grothues*



Fonte: (<http://forum-naval.star-ac.org/>)

III) Estatores

Um tipo de estator é o *pre-swirl stator*, esse dispositivo possui o formato de um aerofólio e consiste em um conjunto de laminas fixadas na popa e de frente para o propulsor. 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 22: *Pre-swirl Stator*



Fonte: (<http://www.shipbuilding.or.kr/Technical/Ship/DSME0909/DSME0909.html>)

IV) Becker Mewis Duct®

Este duto é utilizado em navios com grandes coeficientes de bloco, tais como graneleiros, navios-tanque e porta-contêineres em que seus propulsores operem em campos de esteiras desfavoráveis. O modelo de teste do Duto Mewis atingiu uma velocidade de 16,45 nós, o que levou a uma economia de potencia de 4,5%. Como resultado, o protótipo teve sua velocidade aumentada para 17 nós, o que correspondeu a uma redução de potência de aproximadamente 6%. Este duto propicia também uma economia de combustível, além de menores índices de emissão de poluentes atmosféricos.

Figura 23: Becker Mewis Duct®



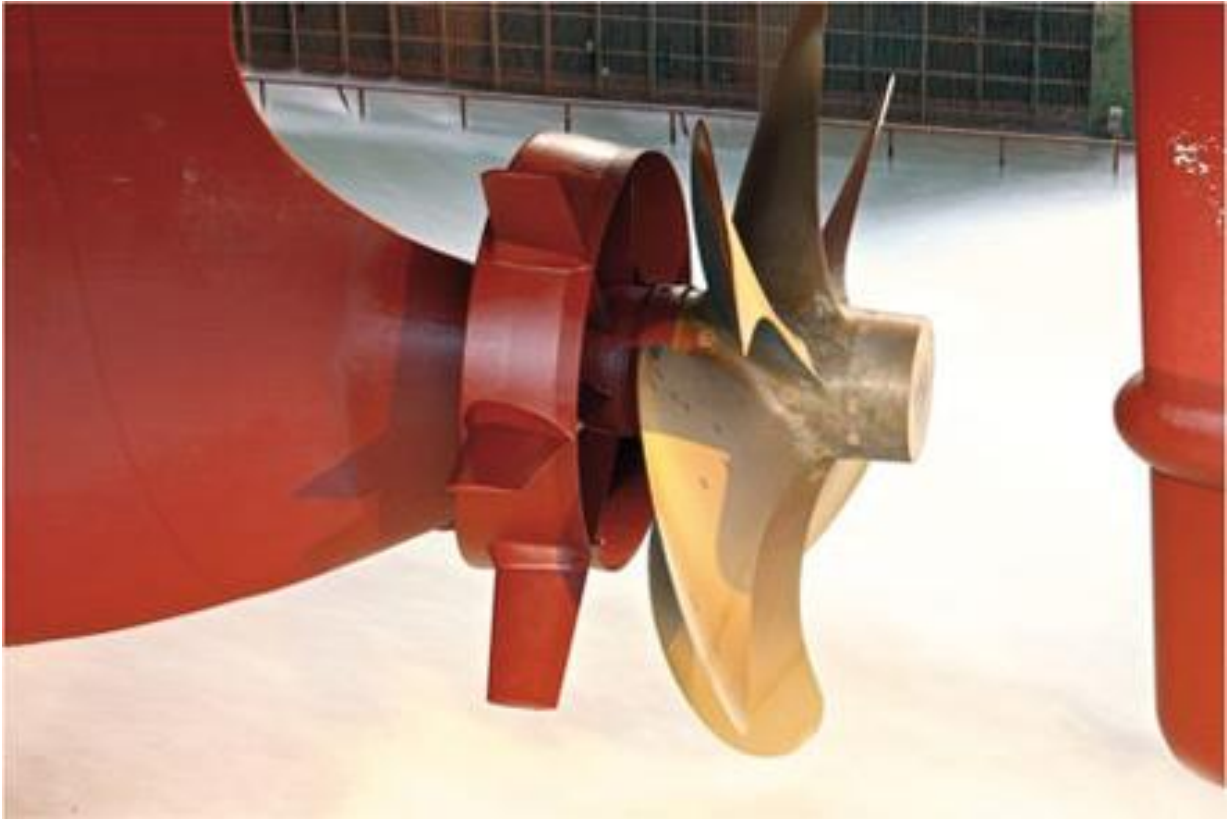
Fonte: (<http://www.becker-marine-systems.com/>)

V) Becker Twisted Fin®

Após dois anos de estudo e com base em três anos de experiência operacional com a Becker Mewis Duct®, esse novo dispositivo de economia de energia para navios porta-contêiner e outros tipos de embarcações com popa bulboso está entrando no mercado.

Este dispositivo oferece uma economia de combustível de até 3%, redução de NOx e emissões de CO2 e a garantia estrutural do equipamento ao longo de muitos anos. Ele é adequado para novas construções e reformas, sem partes móveis, necessária nenhuma manutenção e com instalação rápida.

Figura 24: Becker Twisted Fin®



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

VI) 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 próximas 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 25: Duto *Mitsui* (Integrado ao casco)



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

3.4.2 Dispositivo 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, têm 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.

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:

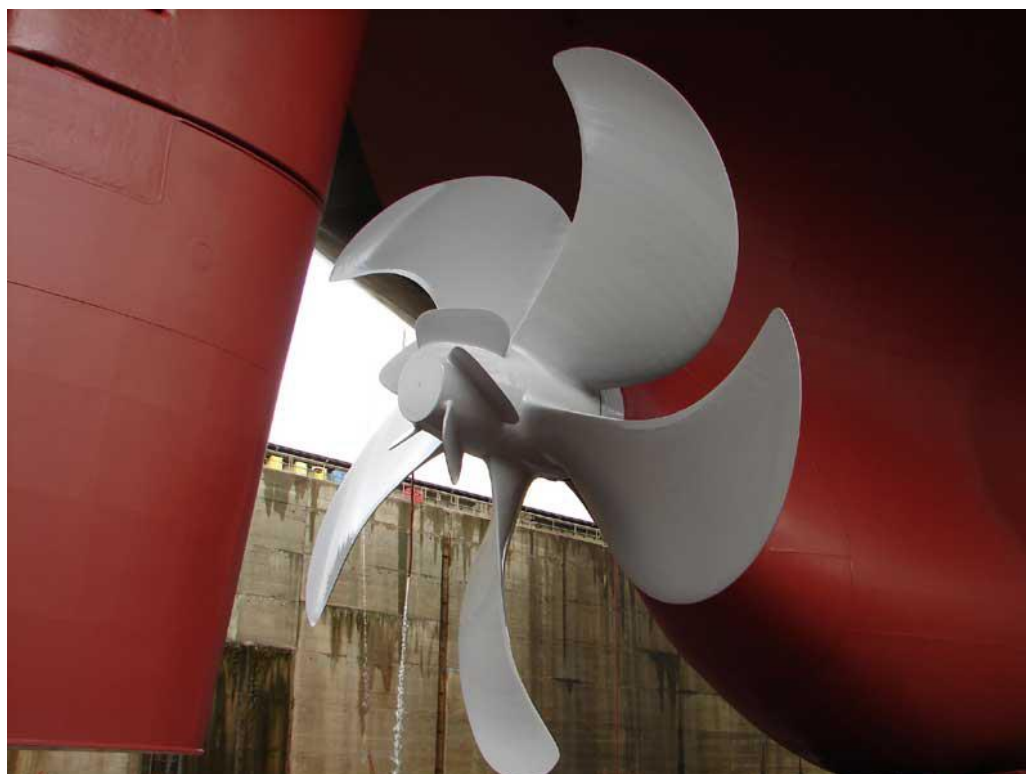
I) *Boss Cap*

O *boss cap* consiste em pequenas aletas anexadas à tampa do hélice, possui um custo relativamente baixo e é uma estrutura de fácil adição ao sistema de propulsão, com sua fixação feita no prazo de dois dias e sem a necessidade de docagem.

Ao utilizar este dispositivo, o forte fluxo para baixo do bordo de fuga da pá do hélice é corrigido pelas aletas, reduzindo o componente rotativo de modo que seja produza uma força de redução do binário do eixo da hélice em cerca de 3%. Além disso, o impulso é aumentado em mais de 1%.

O *boss cap* consegue uma economia de energia de cerca de 5% com a embarcação na mesma velocidade, ou com a mesma potência, aumenta a velocidade do navio cerca de 2%. Também é obtida uma redução de vibrações e ruídos subaquáticos e eliminação da erosão do leme.

Figura 26: *Boss Cap*



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

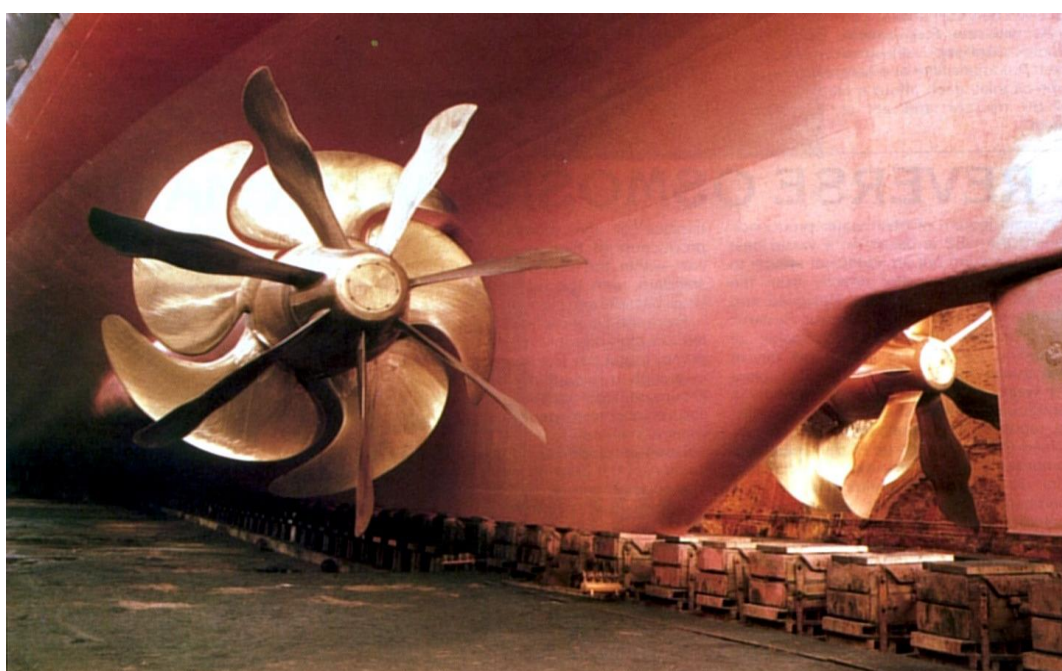
II) Volante *Grim Vane*

O volante de *Grim Vane* é constituído por pequenas pás compondo o hélice. São acopladas à planta motor, livremente rotativas e colocadas a jusante do hélice principal, atuando dessa maneira como uma turbina.

Este sistema de propulsão possui vantagens hidrodinâmicas como a recuperação substancial da energia rotacional, um maior corte transversal possível da água que atinge as pás, uma vez que a taxa de rotações por minuto baixa e um grande número de lâminas verticais permite folgas menores e uma menor resistência do leme atrás do volante, refletindo em maior eficiência rotativa, contando também com uma melhor capacidade de parar o seu movimento, caso necessário.

Além disso, a taxa de rotação mais elevada associada com o menor diâmetro do hélice acionado pelo motor aumenta o peso e custo da unidade de propulsão, a roda de palhetas deve ser cerca de 20% maior do que o diâmetro do hélice acionado mecanicamente. Esse sistema é apropriado para uma vasta gama de navios de carga convencionais, mas apenas algumas instalações reais têm sido relatadas.

Figura 27: Volante *Grimm Vane*

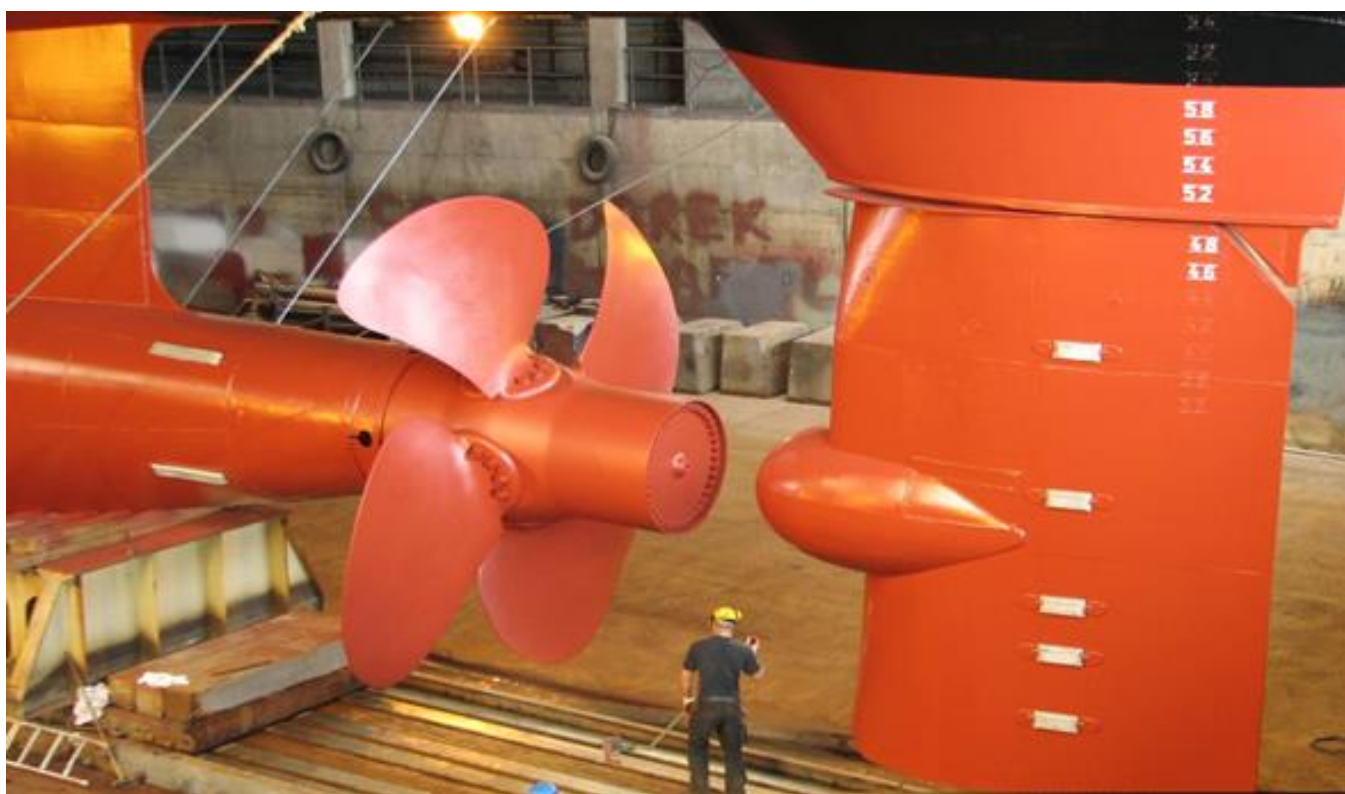


Fonte: (<http://www.reddit.com>)

III) Leme assimétrico

Os perfis das partes do leme situadas 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. 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 28: Bulbo de leme (Costa)



Fonte: (<https://commons.wikimedia.org/>)

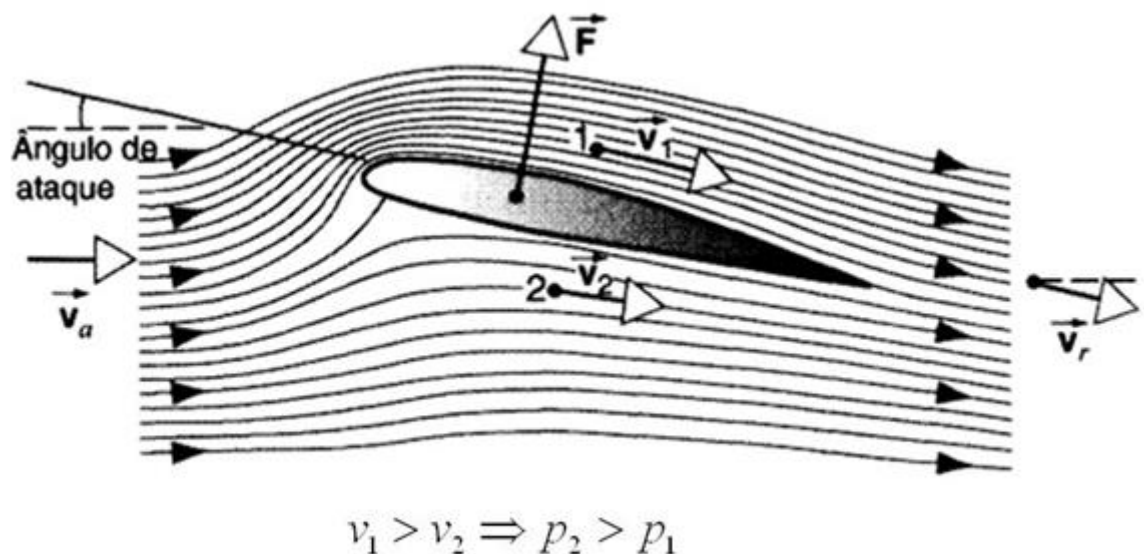
3.5 Leme

O leme é uma superfície geradora de *lift*, que é uma força que surge por conta da diferença de pressão entre os dois bordos de ataque. Sendo assim, verifica-se nele o “efeito asa” quando é guinado.

O “efeito asa”, por sua vez, ocorre pelo fato do fluido se dividir e, por conta da angulação sofrida pelo leme, não mais ter que percorrer uma mesma distância nos dois bordos, fazendo com que no bordo de maior distância o fluido acelere, gerando um aumento na pressão dinâmica e diminuição na pressão estática.

Com isso, existe uma força estática resultante que é responsável por guinar o navio. Quando se quer que o navio tenha seu movimento para boreste, por exemplo, o leme deve sofrer uma angulação para o mesmo bordo. Isso acontece pelo fato de o bordo para qual o leme é guinado ser correspondente ao menor percurso, portanto a região de maiores pressões. Deste modo, a força do leme se orienta da região de altas pressões para a de baixas pressões.

Figura 29: Efeito Asa no Leme



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

Anteriormente a tragédia com o navio *Titanic*, que transportava passageiros, o leme possuía o formato de uma chapa. Acontece que, um dos muitos motivos pelo qual não se obteve sucesso na tentativa de evitar a colisão com o *ice Berg*, gerando turbilhonamento do fluido e uma guinada ineficiente, foi o fato de ele ser muito pequeno para o tamanho do navio e por não possuir um raio de curvatura nos bordos.

Após isso, então, surgiu o perfil NACA que possui uma protuberância no bordo de ataque, possibilitando maiores diferenças de pressão em decorrência de um acréscimo na velocidade do fluido. Com esse perfil, chegou-se a conclusão de que as manobras melhoraram devido à força de guinada aumentar sensivelmente.

Figura 30: Perfil NACA



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

A comprovação de eficiência veio com o auxílio do programa de simulação da NASA chamado “*Folsim*”, onde é possível utilizar um sensor de velocidade. Nele, pode-se observar que o perfil NACA possibilita grandes diferenças de velocidade no bordo de ataque do leme, com isso, tendo uma atuação da força de guinada significativamente maior.

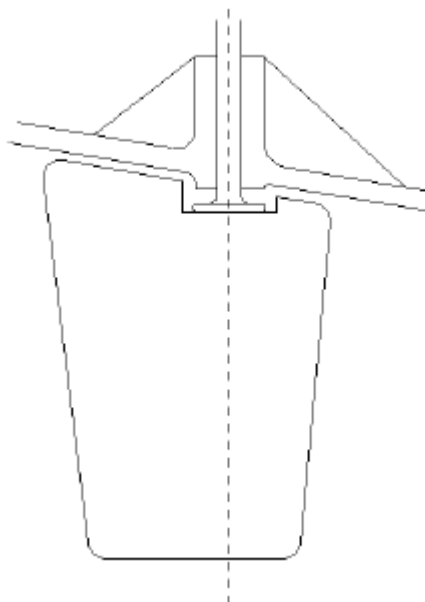
3.5.1 Tipos de Leme

A escolha do tipo de leme depende de fatores como a forma da popa, o tamanho do leme necessário e a capacidade da máquina do leme disponível. Alguns dos tipos de leme bastante utilizados são:

I) Leme Espada

O leme espada é basicamente uma placa de leme que está fixo à madre do leme, na parte superior dele. É adotado quando o navio tem o cadaste com longo facetamento. A madre do leme (ou o eixo do leme) não é executada para baixo ao longo da extensão do leme. Este leme não necessita de grandes dimensões a ponto de sobrecarregar a madre do leme, na realidade, costuma-se mantê-la tão compacta quanto o possível.

Figura 31: Leme espada

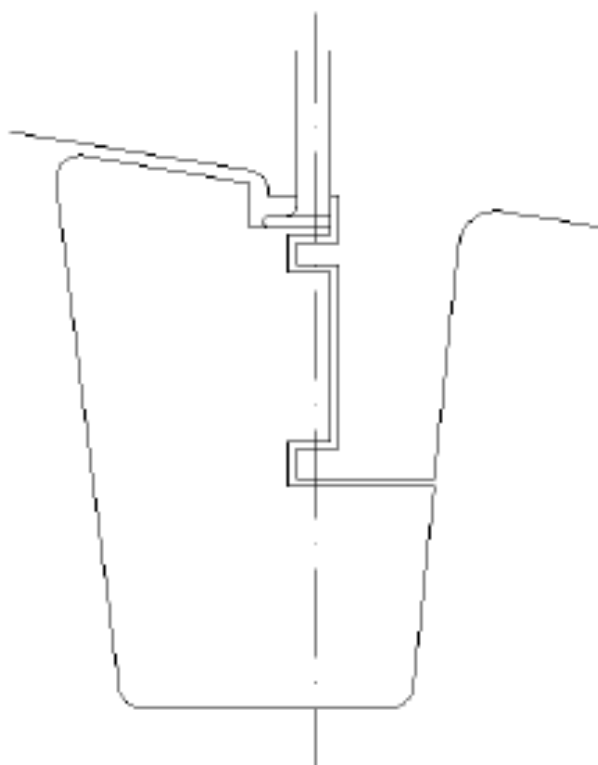


Fonte: (<http://www.itcwiki.org>)

II) Leme Gnomo (*Mariner*)

Este tipo de leme é utilizado quando seu tamanho faz com que seja necessário suporte em mais de um ponto, mas ainda é desejado balanceá-lo para reduzir a dimensão da máquina do leme. O seu sistema de fixação é montado firmemente dentro do bloco da popa, com a possibilidade de livre rotação.

Ele é utilizado em navios grandes como porta-contêineres, navios-tanque e de passageiros. Tem como desvantagem o alto custo para a sua construção e apresentar risco de cavitação em seus pontos de sustentação.

Figura 32: Leme Gnomo

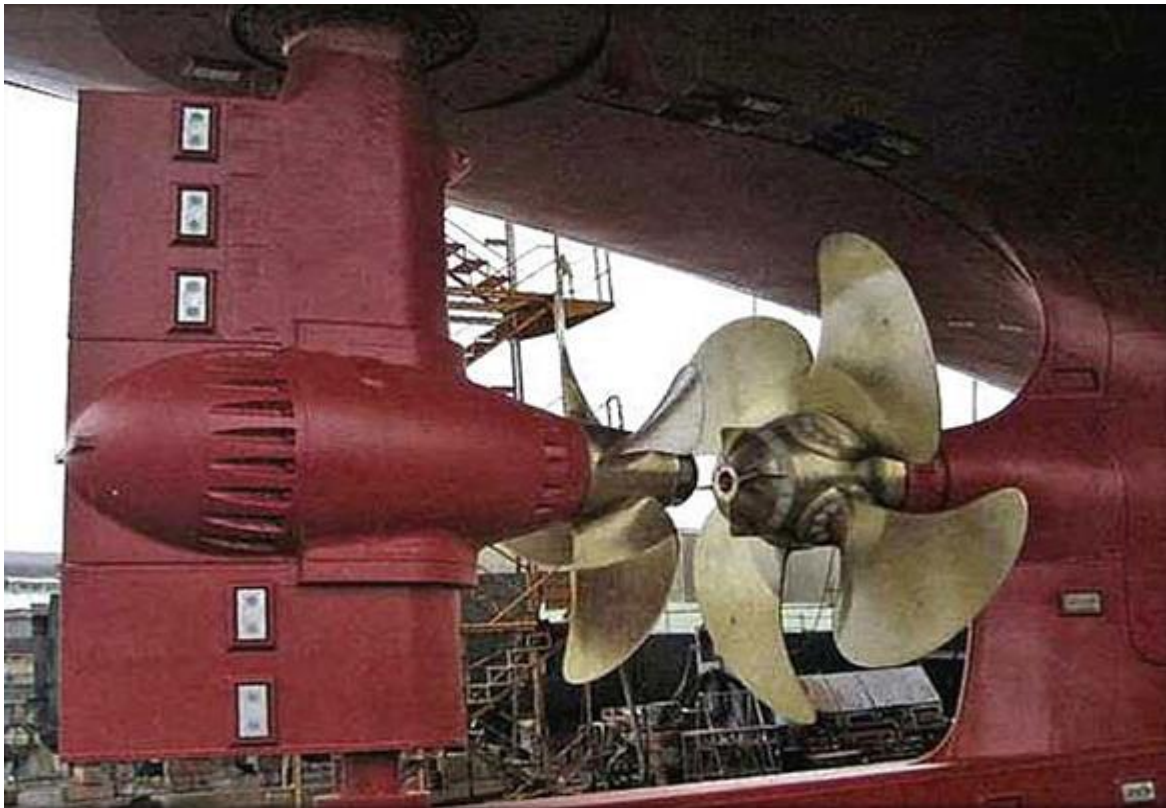
Fonte: (<http://www.itcwiki.org>)

III) Leme Ativo

O leme ativo é um tipo de leme dotado de um pequeno hélice adicional localizado na extremidade mais a ré do leme. Em altas velocidades o leme tem um funcionamento normal, ou seja, o hélice adicional não funciona.

A utilização do pequeno hélice ocorre em baixas velocidades, quando a pouca intensidade da corrente de escoamento já não é mais suficiente para gerar a diferença de pressão necessária para fazer a embarcação atender ao leme.

A atuação deste hélice auxiliar é determinada por um corte elétrico que impede que ele opere nas velocidades acima de 5 nós. A deflexão deste tipo de leme atinge os 35° sem que haja o risco de que ocorra *stall*.

Figura 33: Leme Ativo

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

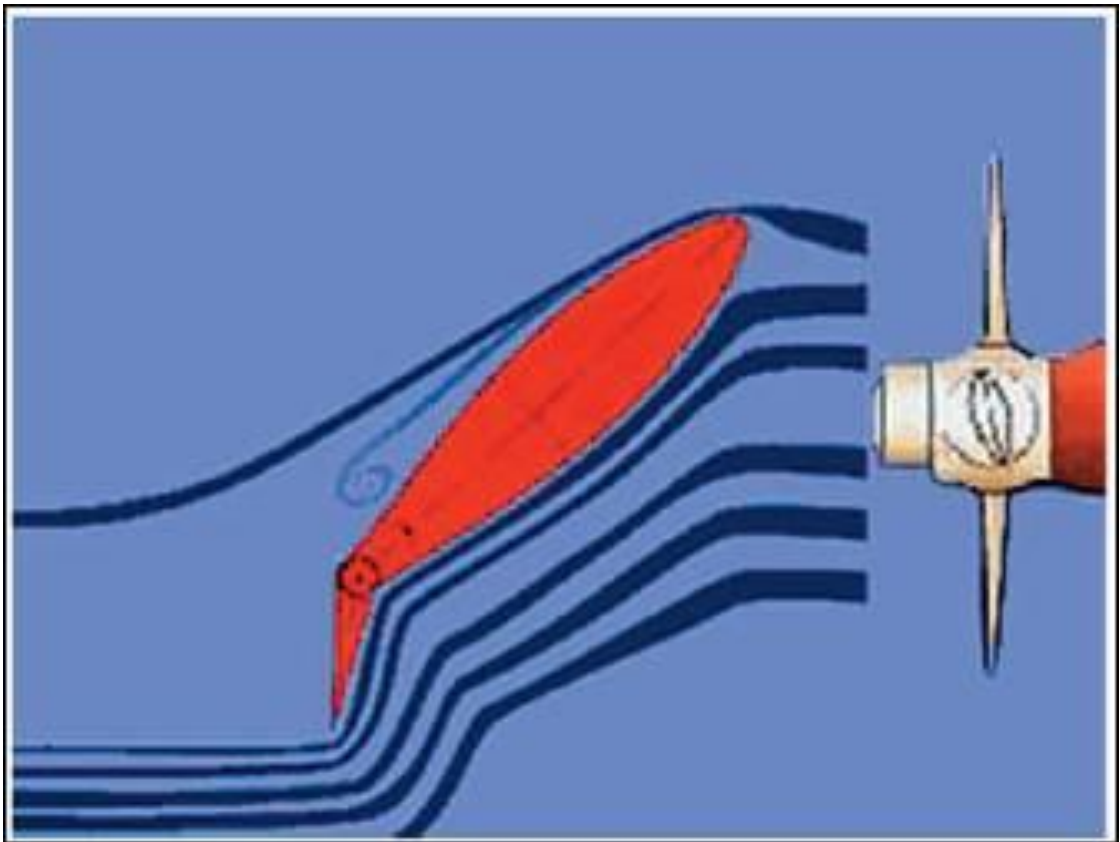
IV) Leme com *flap*

O leme com *flap* é um leme com alta performance, que garante a melhor manobrabilidade com o menor consumo de combustível. Ele possui um perfil hidrodinâmico que é confiável para navios que operam em média e alta velocidade, necessitando de alta manobrabilidade e baixo arrasto.

A parte posterior dele se move, atingindo assim um ângulo duas vezes maior do que o leme atingiria sem a sua existência. Tipicamente, um terço da área do leme é usado como *flap* e dessa maneira são obtidas melhores características de sustentação sem que ocorra *stall*.

Fabricado pela *Rolls Royce Marine*, este leme tem por características a mínima resistência adicional induzida durante a manobra, a máxima segurança na ocorrência de pequenas avarias, máquina do leme em menor tamanho, segurança elevada na ocorrência de tensões cíclicas, melhores valores de vibração natural, durabilidade no gelo e fácil manutenção.

Figura 34: Leme com *flap*



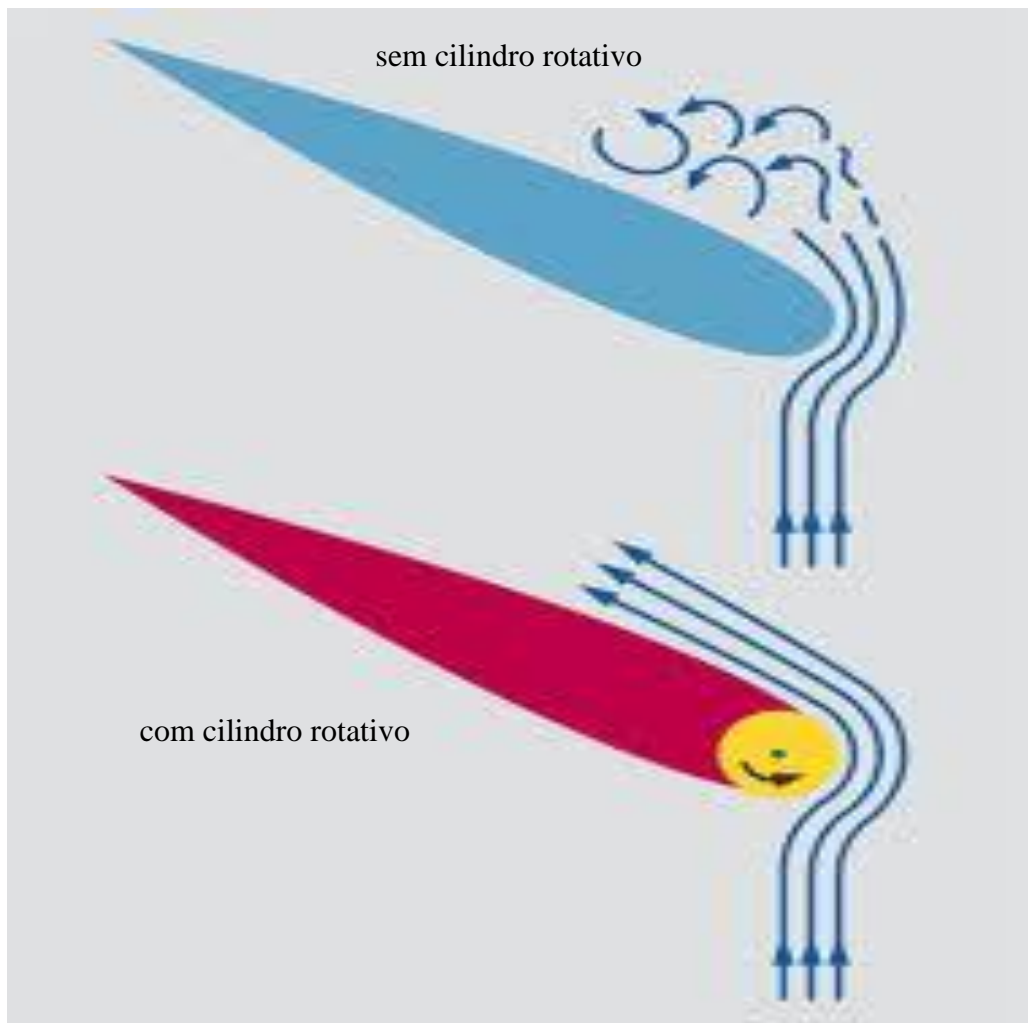
Fonte: (<http://www.oceanica.ufrj.br/>)

V) Leme com cilindro rotativo

Esse tipo de leme possui em sua protuberância um cilindro rotativo. Este cilindro, ao energizar a camada limite, ajudando assim a não serem gerados vórtices, proporcionando um aumento da força de sustentação em cerca de 20%.

Seu cilindro rotativo necessita de pouca energia para alcançar seu pleno funcionamento e pode ser acionado tanto hidráulicamente quanto pela utilização de motor elétrico.

Figura 35: Leme com cilindro rotativo



Fonte: (apostila hidrodinâmica para navegantes)

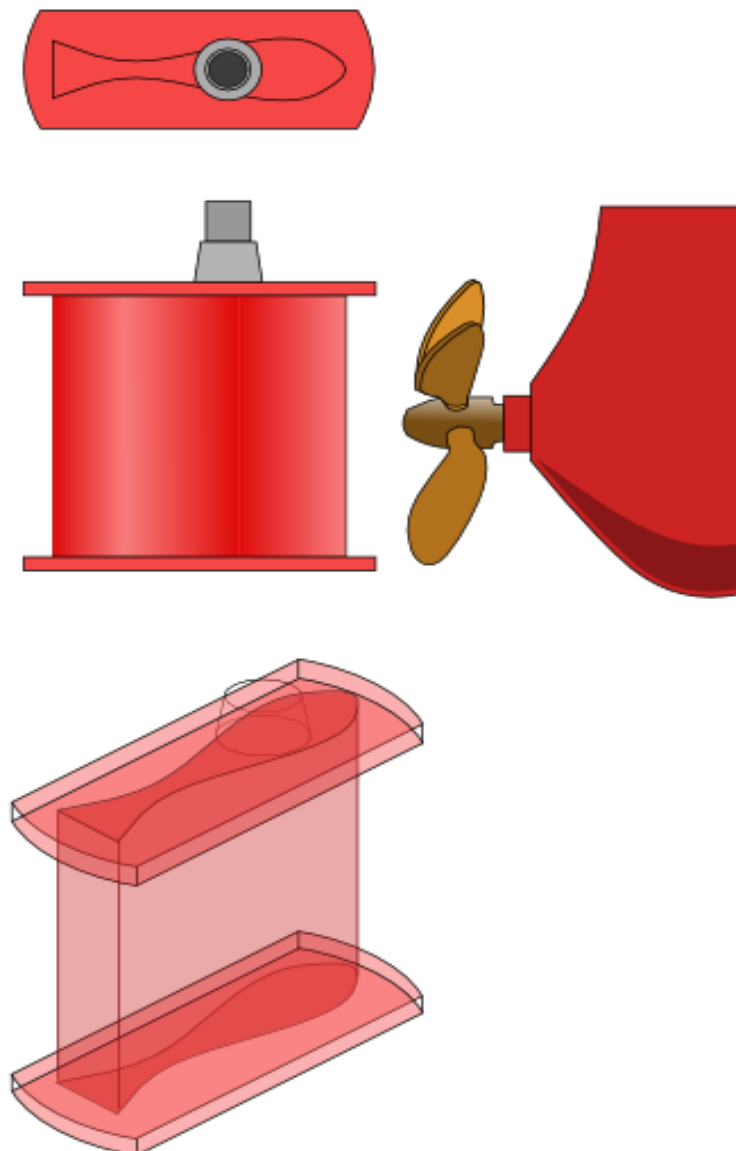
VI) Leme Schilling® (*Fishtail*)

O leme Schilling® possui um grande poder de geração de *lift*, é projetado para embarcações de qualquer tamanho e fornecido em configurações únicas ou múltiplas. Possui forma otimizada e é equipado com duas alhetas horizontais, inferior e superior, sem partes móveis.

Ele melhora consideravelmente as características do custo de manutenção e manobrabilidade. Pode operar com ângulos de até 70° de bombordo a bombordo e com a sua utilização é possível controlar a força de propulsão para alcançar um *thrust* lateral eficiente.

O perfil do leme Schilling® incorpora os bordos de ataque arredondados, promoção de boas propriedades de fluxo em todos os ângulos de leme, bordo de fuga *fishtail*, construção em aço totalmente soldada da pá do leme, suporte único ou múltiplo, rolamento sem partes móveis e flange de acoplamento.

Figura 36: Leme Schilling®



Fonte: (<https://commons.wikimedia.org/>)

3.6 Popa Achatada

A popa achatada é uma consequência direta do tipo propulsão da embarcação. A princípio usava-se um único propulsor que ficava localizado no eixo central do navio. Este propulsor era sustentado por estruturas chamadas “pés de galinha”, que nada mais eram que fixadores de aço que em nada influenciavam no fluxo da água.

Porém, após estudos, os engenheiros chegaram à conclusão de que o uso de dois propulsores, um a bombordo e um a boreste do eixo central na popa do navio, acarretaria a uma redução da possibilidade de trepidação, redução da curva de giro através da inversão do sentido dos propulsores, capacidade de mover a popa lateralmente, além de sobrecarregar menos o propulsor.

As embarcações, então, passaram a possuir dois propulsores, o que trouxe uma nova e significativa alteração no casco que, para abrigar estes propulsores, ganhou uma popa com formato achatado. Porém, constatou-se que ao usar dois propulsores sustentados por “pés de galinha”, obtinha-se um fluxo lateral de corrente que fazia com que fosse adquirido um movimento não desejado.

Figura 37: Propulsor sustentado por um “pé de galinha”



Fonte: (<http://qe2-prideoftheclyde.blogspot.com.br/>)

Por este motivo uma nova estrutura foi adicionada ao conjunto. Chamada de *skeg*, a extensão com perfil em forma de V estreito através do qual o eixo do propulsor pode atravessar homogeneizou e direcionou favoravelmente o fluxo para o propulsor e ainda, aumentou a resistência lateral na popa.

Figura 38: Propulsor sustentado por um *skeg*



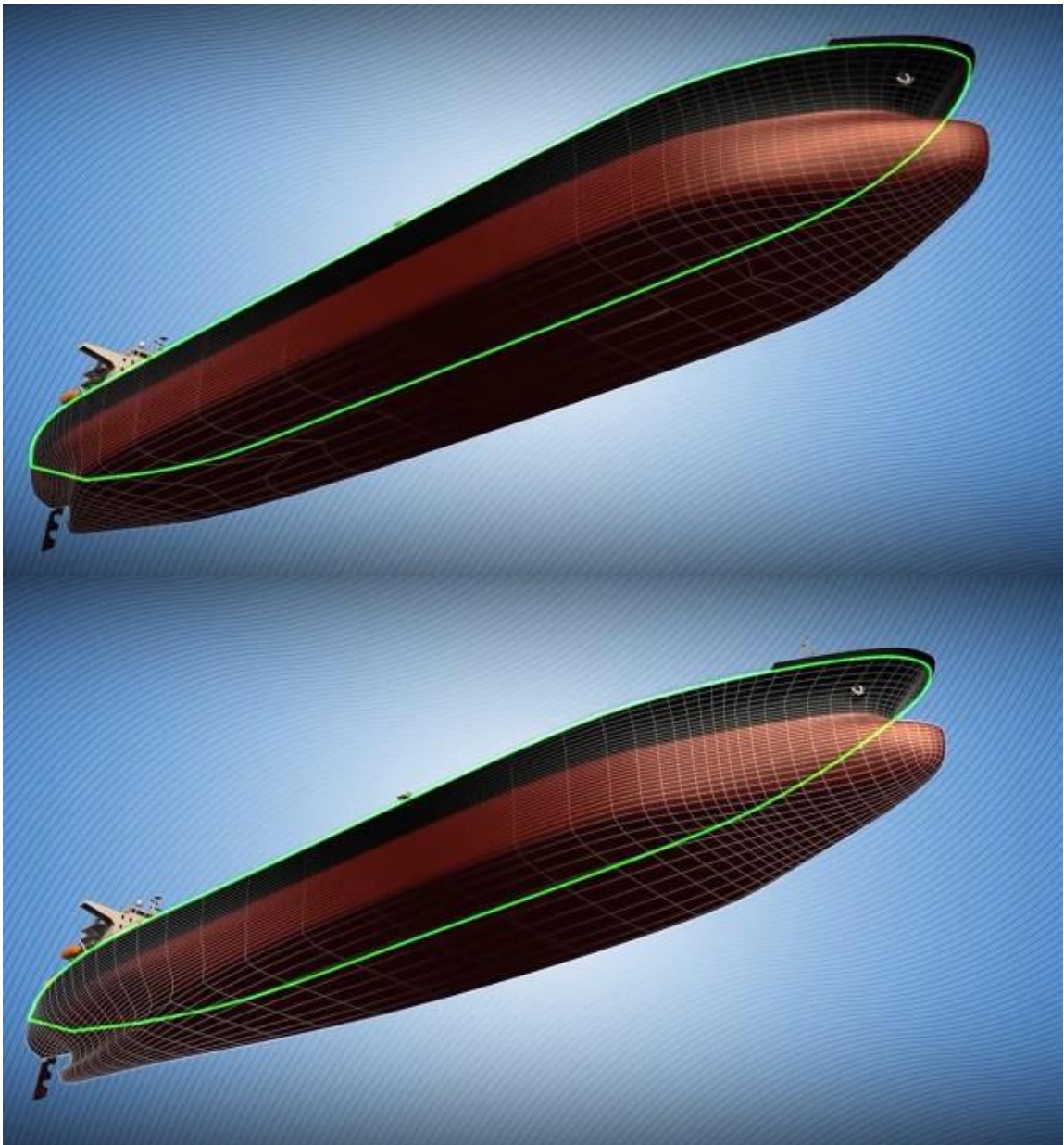
Fonte: (<http://www.japanham.com/en/service/mariner/>)

O *skeg* influenciou também o desempenho direcional da embarcação, deslocando o ponto de aplicação da força hidrodinâmica do casco no sentido da proa, aumentando dessa forma a estabilidade direcional da embarcação.

4 O DESENHO DO CASCO

Inúmeros desenhos de casco foram testados até que se fosse capaz de encontrar um design tido como capaz de reduzir a resistência ao avanço. Esses testes ocorreram porque, segundo a empresa *Teekay*, o preço dos combustíveis entre dois anos, 1999 e 2011, cresceu mais de 600%, saltando de 100 dólares por tonelada para 750 dólares por tonelada.

Figura 39: Adoção de um casco mais delgado



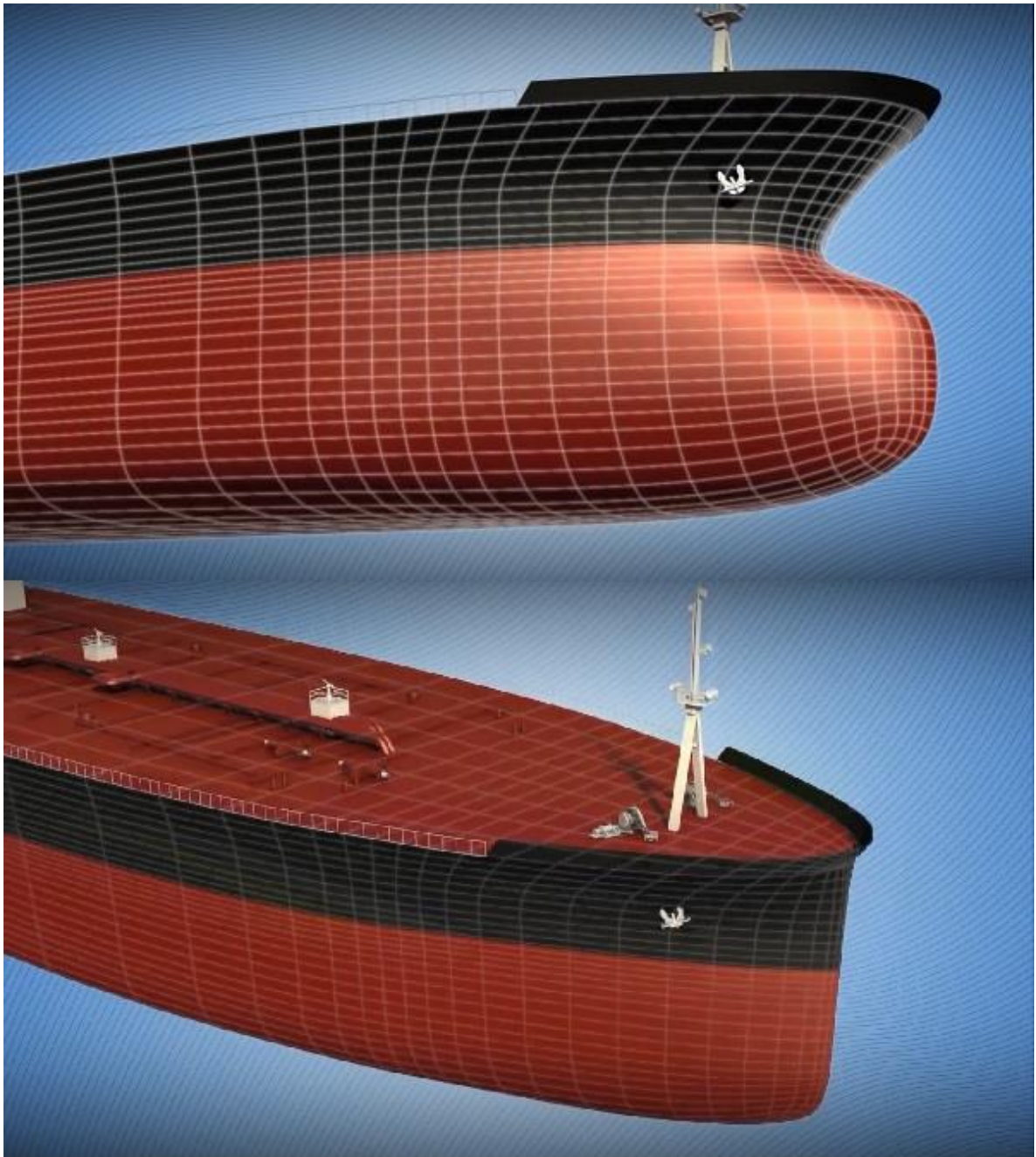
Fonte: (<http://www.teekaytankers.com/>)

Sendo assim, construir modelos que capacitassem um menor gasto de combustível transformou-se fundamental para a diminuição da maior fonte de despesas das embarcações. Primeiro, alterou-se o tamanho da boca da embarcação que passou a ser mais estreita e de extremidades delgadas. Desta maneira, obteve-se a redução da resistência de forma da embarcação, evitando, também, um deslocamento precoce da camada limite, o que contribuiu para a redução do arrasto.

Acontece que, apesar de melhorar a economia quando se trata de combustíveis, esta mudança acarretou uma perda na capacidade de carga. Com isso, então, surgiu uma segunda modificação, que foi o aumento do comprimento do navio e de seu pontal, permitindo um calado máximo maior e conseguindo uma redução do consumo de 11%.

Entretanto, ao aumentar o comprimento de um navio, o seu Número de Froude fica menor, levando-se em consideração que esse valor é inversamente proporcional ao comprimento. Analisando o valor obtido, foi fácil chegar à conclusão de que o bulbo de proa já não seria mais eficaz por conta de um Número de Froude fora da faixa que indica a eficiência do uso de tal apêndice. O próximo passo, então, foi tirá-lo do projeto.

Figura 40: Retirada do bulbo de proa



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

Dessa maneira, ganhou-se uma proa mais fina e uniforme, além de ser capaz de absorver muito menos impacto e de ser muito mais eficiente ao cortar a água. Assim, desta vez, obteve-se um resultado de uma redução no consumo de 6%.

Figura 41: Redução da absorção de impacto na proa



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

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso visou esclarecer o papel fundamental que a hidrodinâmica exerce sobre a construção naval, tentando tornar o assunto mais simples e de fácil entendimento inclusive para aqueles que não fazem parte do meio marítimo.

A hidrodinâmica veio trazendo consigo diversas evoluções nas construções navais que individualmente passaram a trazer avanços quando se o assunto é eficiência, conforto e lucro, mas o que é mais importante é saber que cada uma dessas evoluções só foi pensada e mais proveitosa por se somar às demais anteriormente descobertas.

Ter em mente que este tema abrange estruturas grandiosas também é um fator fundamental para a visualização de melhorias. Quando, por exemplo, é citada uma melhoria de 6%, por mais que a primeira impressão não seja positiva pelo fato de ainda restarem 94% a se melhorar, no universo de uma embarcação, cujos gastos com combustíveis, construções e reparos são enormes, essa melhoria pode se tornar infinitamente grande.

Por outro lado é importante saber que uma embarcação não passa a ser mais eficiente se forem introduzidos nela todos os dispositivos supracitados, é preciso estudar quais deles juntos funcionam de forma sinérgica e quais farão a embarcação desempenhar a função que lhe é atribuída da melhor maneira possível.

Dessa forma, houve e há um progresso contínuo de maneira a serem construídas embarcações mais rápidas, econômicas e com estruturas que se somam quando se leva em conta a eficiência da embarcação como um todo, sem esquecer também do bem estar daqueles que trabalham neste meio e da preocupação com o meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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