

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

MARCO THÚLIO SAVIATTO DUARTE

SEMELHANÇA FÍSICA E MODELO EM ESCALA REDUZIDA

RIO DE JANEIRO
2014

MARCO THÚLIO SAVIATTO DUARTE

SEMELHANÇA FÍSICA E MODELO EM ESCALA REDUZIDA

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

RIO DE JANEIRO

2014

MARCO THÚLIO SAVIATTO DUARTE

SEMELHANÇA FÍSICA E MODELO EM ESCALA REDUZIDA

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

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me permitido chegar até aqui. Aos meus familiares, agradeço pelo apoio e amor incondicional e, aos mestres Hermann, Kopezynski e Adilson Coelho, por todo o conhecimento transmitido não somente na sala de aula como também nas várias conversas informais pelos corredores da instituição e por estimularem sempre os alunos a pesquisarem e se atualizarem, sendo também exemplos disto.

"Não sabendo que era impossível, foi lá e fez" (Jean Cocteau).

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem por finalidade expor os princípios básicos de semelhança física envolvidos na análise hidrodinâmica de embarcações feita por meio de testes com modelos em escala reduzida, mostrando toda a evolução de seu estudo e os métodos usados em seu desenvolvimento. Além disso, o trabalho cita os componentes principais que um laboratório para esse tipo de teste deve possuir, abrangendo desde a construção do modelo até a realização do experimento em si. Será apresentada também a aplicação prática dos fatores analisados nos testes e a contribuição deles para uma melhor operação do navio e um menor consumo de combustível dessas embarcações. Essa apresentação será feita explicando as alterações realizadas em um dos mais modernos projetos de navios-tanque da Teekay, o OneSpirit. Alterações essas que, a uma primeira vista, parecem ser simples, mas que o garantiram uma economia de 30% na queima de combustível nesses navios.

Palavra-chave: Modelo em escala reduzida. Semelhança física. Número de Reynolds. Número de Froude. Tanque de provas.

ABSTRACT

This final paper has as main objective to show the basics principles of physical similarity involved in the hydrodynamic analysis of a vessel made through model tests, showing the whole evolution of its study and of the methods applied on its development. Furthermore, the work mentions the main components which a lab for this type of test must have, covering since the construction of the model to the execution of the experiment itself. It will be also shown the practical use of the factors analyzed on the tests and their contribution to a better operation of the vessel and a reduced consumption of fuel in these vessels. This presentation will be made explaining the modifications performed in one of the most modern project of tankers, the Teekay's OneSpirit. Changes that in first saw seem to be very simple, but ensured an economy of 30% in the fuel burn of these ships.

Keywords: Reduced scale model tests. Physical similarity. Reynolds number. Froude number. Towing tank.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	<i>S.S. Great Eastern</i>	14
2	<i>Swan</i> e <i>Raven</i> , os primeiros modelos em escala reduzida	15
3	Modelo em escala de propulsor utilizado em testes	18
4	Análise por CFD do comportamento da água ao longo de um casco	19
5	Semelhança Geométrica	20
6	Semelhança Cinemática	21
7	Fatores de proporção entre velocidades e acelerações	21
8	Semelhança Dinâmica	22
9	Primeiro Tanque de Provas desenvolvido por Froude em Torquay, Reino Unido	23
10	Padrão de ondas estudado por Froude	25
11	Equação do Número de Froude	26
12	Bulbo de proa do primeiro navio da classe Triple-E construído, o Maersk Mc-Kinney Møller	27
13	Resultado da interferência de ondas no bulbo de proa	28
14	Coeficiente de resistência de onda versus Número de Froude	29
15	Extrato da tabela de grupos adimensionais	31
16	Diferença entre fluxo laminar e turbulento	32
17	Adoção de um casco mais delgado	35
18	Retirada do bulbo de proa	37
19	Redução da absorção de impacto na proa	38
20	<i>Mewis Duct</i> e <i>Propeller Boss Cap Fin</i> (PBCF)	39
21	Arranjo geral de um tanque de provas	40
22	Tanque de provas da Universidade de Gante, na Bélgica	41
23	<i>Planar Motion Mechanism</i> , ou PMM utilizado na Universidade de Gante, na Bélgica	42
24	<i>Computerized Planar Motion Carriage</i> (CPMC) sendo aplicado em testes no modelo do Titanic II	43
25	<i>Particle Image Velocimetry</i> (PIV) sendo utilizado em testes hidrodinâmicos	45
26	Sonda LDA em que é possível observar todo o arranjo estrutural do equipamento	46
27	Gerador de ondas em um tanque de provas	47
28	Praia artificial regulável construída em um tanque de provas	48

29	Esquema de aplicação do <i>wind carriage</i> em testes	49
30	Tanque de provas de gelo (<i>ice tank</i>) do <i>Institute for Ocean Technology</i>	50
31	Modelo de casco em CAD	51
32	Máquina fresadora	52
33	Barras de metal sendo utilizadas como lastro em modelo	53
34	Teste em modo free-running na Universidade de IOWA	55
35	Teste em modo <i>captive</i> do casco do Triple E	56
36	Mecanismos de propulsão e de governo instalados em modelo	57
37	Acompanhamento do comportamento dinâmico	58
38	Teste em águas abertas	59
39	Análise por CFD da proa de um navio	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CONTEXTO HISTÓRICO	12
3	ANÁLISE HIDRODINÂMICA	17
3.1	A Semelhança Física	19
3.2	O Número de Froude	22
3.2.1	O bulbo de proa	27
3.3	O Número de Reynolds	30
3.4	Aplicação direta dos números de Reynolds e Froude	34
4	TESTES EM ESCALA	40
4.1	Tanque de Provas	40
4.2	Oficina	50
4.3	Tipos de testes	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral que o lucro sempre foi o principal objetivo de qualquer atividade comercial. No ramo da navegação, isso também não seria diferente. Desde o seu surgimento, o homem logo percebeu que, aprimorando os equipamentos e instrumentos dessa atividade, ele poderia aumentar sua eficiência e segurança de forma a reduzir os seus custos.

Embora essa ideia sempre existisse, foi na primeira metade da década de 1970 que o elevado preço do petróleo forçou a indústria naval a procurar novas formas de melhorar ao máximo o aproveitamento das embarcações. A saída encontrada foi o desenvolvimento de um importante setor seu: o de projeto.

Nesse contexto, as teorias e técnicas de modelagem concernentes à análise da mecânica dos fluidos na construção marítima ganharam força. Porém, com o advento da eletrônica, essas duas bases receberam a computação fluido dinâmica como mais uma ferramenta de trabalho, formando-se então as três vertentes de estudo por trás dos modernos projetos navais.

Dessa forma, as embarcações puderam ser aperfeiçoadas em seus vários detalhes. Cada uma das novas melhorias aplicadas trazia consigo uma determinada porcentagem de aumento da eficiência que, quando analisado o resultado como um todo, apresentava um avanço maior que a soma de todas essas taxas, ou seja, obtinha-se o efeito da sinergia.

Em face do exposto, os projetos de construção naval evoluíram de uma forma consciente, trazendo consigo não somente resultados referentes ao campo econômico, como também respeitando a normas ambientais, a exemplo da Convenção MARPOL.

2 CONTEXTO HISTÓRICO

Desde as primeiras sociedades, a navegação sempre foi uma forte ferramenta para o câmbio de mercadorias. À medida que as civilizações se desenvolveram, cresceram mais as que foram capazes de expandir o seu domínio sobre os mares. Torna-se claro o caráter comercial que a impulsiona ao analisar-se, por exemplo, o período das Grandes Navegações, em que o grande interesse econômico e político na atividade possibilitou o seu desenvolvimento e o acúmulo de capitais na Europa.

Embora houvesse grandes avanços na área náutica até início do século XIX, foi a Revolução Industrial que possibilitou o grande crescimento do ramo com a incorporação da máquina alternativa a vapor nos navios. Com isso, as rotas marítimas não mais dependiam exclusivamente das condições de vento, o que, de fato, permitiu uma considerável redução no tempo das viagens e o aumento progressivo das dimensões dos navios e das quantidades transportadas.

Até esse período, engenheiros navais e marítimos haviam desenvolvido inúmeras teorias a respeito das formas de casco que fariam um navio mais fácil de navegar. Entretanto, ainda não existia uma forma sistemática de avaliar os desenhos de projeto a fim de desenvolvê-los. Era muito difícil de obter dados significativos, levando em conta que a maior parte das embarcações ainda contava com o imprevisível e variável vento como principal fonte motora, sendo o motor a vapor, apenas uma fonte auxiliar a ser usada em manobras ou na ausência deste.

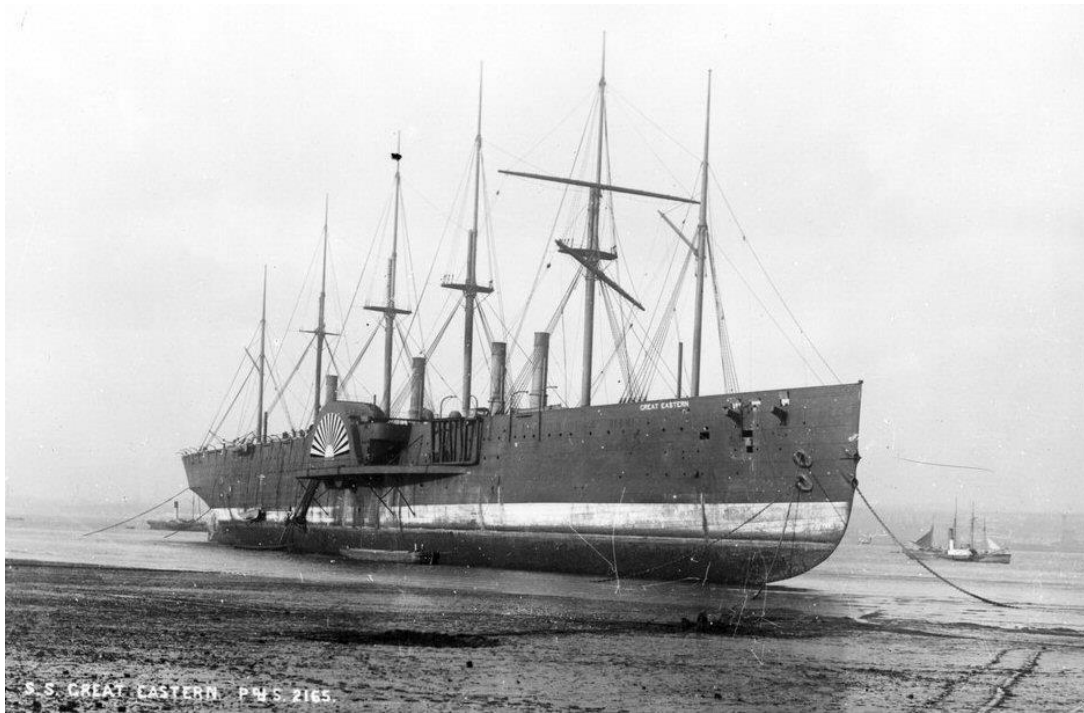
Somente com o advento da propulsão a vapor como principal propulsão é que se foi possível encontrar meios precisos e racionais de se medir o desempenho de um navio sobre as águas. Por outro lado, esses navios agora precisavam de espaço para carregar não só pessoas e mercadorias, como também o combustível para supri-los durante toda a travessia. Vale ressaltar que, nesse período, o carvão destinado à combustão ocupava cerca de 40% de todo o volume disponível a bordo devido aos rendimentos extremamente baixos dos primeiros motores empregados nessa função.

A partir de então, com o desejo de ampliar os espaços de cargas e combustível a bordo, acreditava-se que seria necessário simplesmente aumentar as dimensões das embarcações de forma proporcional à quantidade desejada.

Um dos pioneiros nesse ideal foi o engenheiro inglês Isambard Brunel. Em seus estudos, ele comprovou que a resistência ao movimento na água e, conseqüentemente, a energia necessária para mover uma embarcação a uma dada velocidade era diretamente proporcional ao quadrado de suas dimensões. Seguindo esse mesmo raciocínio, tem-se que o volume deslocado e, assim, a capacidade de carga aumentariam também, porém com o cubo das dimensões. Desta forma, bastava-se aumentar o tamanho do navio para se ter espaço tanto para o carvão quanto para as mercadorias e ainda assim, obter-se a redução do consumo de combustível por tonelada carregada por milha.

Com base nessa premissa, foi construído em 1857 o navio *S. S. Great Eastern*. Lançado com a finalidade de ligar o comércio europeu com o oriental, o projeto do engenheiro inglês era algo nunca antes visto em se tratando de dimensões de um navio. Este possuía 207 metros de comprimento, sendo duas vezes maior e nove vezes mais pesado que o maior navio já construído até a sua construção.

Figura 1: *S.S. Great Eastern*



Fonte: (http://en.wikipedia.org/wiki/SS_Great_Eastern)

Infelizmente, devido ao seu tamanho excepcional, havia poucos portos em que ele podia operar e, por esse motivo, seus armadores encontravam bastantes dificuldades para angariar carga e embarcar passageiros suficientes para obterem lucro. Além disso, das 28000 toneladas de deslocamento em plena carga, 12000 toneladas eram destinadas ao carvão usado a bordo, o que também contribuía para seu baixo rendimento econômico.

Por mais que o *S.S. Great Eastern* tenha sido um enorme fracasso quanto ao caráter comercial, a teoria de Brunel a respeito da ligação existente entre a resistência ao avanço, a capacidade de carga e as dimensões de uma embarcação estava basicamente correta e ainda é usada até hoje, a exemplo dos superpetroleiros.

Contudo, o lado negativo em analisar somente essa premissa nos projetos atuais é que, com o aumento das dimensões de um navio, os problemas relativos a esforços estruturais, cavitação, vibração, consumo de combustível e a poluição

também crescem exponencialmente. Isso sem se mencionar a análise de mercado que deve ser feita ao se realizar uma encomenda de um navio. Deve-se ter em mente não só o tipo de carga a ser transportada, mas também as limitações que os possíveis portos de escala possuem a fim de se garantir que a embarcação seja, de fato, uma fonte de lucros para o armador. Por esse motivo, não só o tamanho dos componentes como também a sua forma se tornaram alvo de pesquisas e testes com o desenvolvimento dos projetos de construção marítima.

Em 1867, poucos anos após a construção do S.S. *Great Eastern*, outro engenheiro inglês, desta vez William Froude, avançou no estudo das formas de uma embarcação. Froude conseguiu convencer o Almirantado Inglês a patrocinar as suas pesquisas relativas ao movimento dos navios. O seu trabalho consistia em uma série de modelos em escala reduzida para testes a fim de se mensurar dados relativos à resistência dos cascos que seriam, então, aplicados nos navios de verdade. Tratava-se de um importante passo no desenvolvimento de projetos navais, visto que, até então, teorias científicas sustentadas por dados reais ainda eram bastante escassas no campo da arquitetura naval.

Figura 2: *Swan* e *Raven*, os primeiros modelos em escala reduzida



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

Porém, foi no início da década de 1970 que, com a Crise do Petróleo, a indústria da construção naval como um todo foi fortemente impulsionada a buscar alternativas para a redução de custos frente aos estratosféricos preços dos barris de petróleo. Diante desse desafio, surgiram novas tecnologias em termos de construção de embarcações e o campo da análise de seu comportamento hidrodinâmico cresceu em ritmo acelerado.

É importante citar também a grande influência dos estudos da aerodinâmica no meio náutico. Graças ao intercâmbio de informações entre essas duas áreas, a construção naval pode se aprimorar bastante ao aproveitar conceitos que já eram adotados nos aviões e adaptá-los às suas necessidades.

Além do mais, quase todo esse último acelerado desenvolvimento se deu no mesmo período do advento da informática. Isso possibilitou, então, a introdução da Computação Fluidodinâmica (CFD) como mais uma ferramenta de trabalho e pesquisa dos arquitetos navais.

Dessa forma, a indústria da construção naval pode se aprimorar nos detalhes, alcançando o seu atual cenário tecnológico.

3 ANÁLISE HIDRODINÂMICA

Todo e qualquer conhecimento é construído com base em alguma observação. Com relação aos experimentos realizados com navios não seria diferente. Esses experimentos proporcionam informações que, quando estudadas, permitem o contínuo aprimoramento dos projetos navais. Como forma de interpretá-los, por sua vez, têm-se os seguintes métodos: o Empírico ou Estatístico, o Experimental e o Numérico.

Engenheiros, muitas vezes, necessitam de estimativas razoavelmente precisas e simples como, por exemplo, uma maneira de estimar os requisitos de potência de um navio. Para isso, eles utilizam aproximações gerais sobre modelos físicos bastante simples que, somadas a uma análise regressiva, ou seja, feita a partir do resultado; são capazes de fornecer os dados desejados. Esses dados são, na verdade, coeficientes obtidos por meio do método Empírico, através da tentativa e erro, e podem se apresentar na forma de constantes, fórmulas e curvas. O método empírico, portanto, se baseia na coleção de uma grande quantidade de dados de um fenômeno estudado - o que justifica o nome de Estatístico - e visa, a partir da análise destes, chegar a uma determinada conclusão. Esses dados podem ser obtidos por meio da observação sistemática de um fenômeno ou através de um experimento controlado, o que o faz interagir com o método experimental.

Um bom exemplo de aplicação desse método é a forma clássica de um casco de uma embarcação. Ao desenvolvê-lo, parte-se de um modelo de casco, normalmente, utilizado há muito tempo e, portanto, já consagrado para então se fazer as modificações particulares daquele projeto. Esse modelo possui parâmetros já definidos, como, por exemplo, o coeficiente de bloco, e é usado como base, pois, durante os vários anos de sua aplicação, percebeu-se que aquela seria a melhor estrutura base para o tipo de navio que se deseja construir. Essa alteração em modelos básicos ocorre também com o propulsor dessa mesma embarcação. Embora ele possa sim trazer melhorias, o seu esquema geral é, basicamente, o mesmo do de outros navios.

Diferentemente do método empírico, que coleta suas informações de uma forma ampla; o método experimental tem o seu foco sobre a coleta de dados em uma situação específica desejada. Sua ideia básica é realizar um experimento de

forma a extrair informações que serão aplicadas à escala natural daquele determinado projeto.

A exemplo do propulsor da embarcação citada, temos que o seu modelo base provém de um estoque largo de propulsores que já foram utilizados com aquele tipo de navio e, portanto, se aproximaria do desenho considerado ideal para ele. Dessa forma, é através do método experimental que suas características nessa aplicação, como *thrust*, torque e RPM, são coletadas, possibilitando o seu ajuste e a obtenção de uma maior eficiência.

Figura 3: Modelo em escala de propulsor utilizado em testes



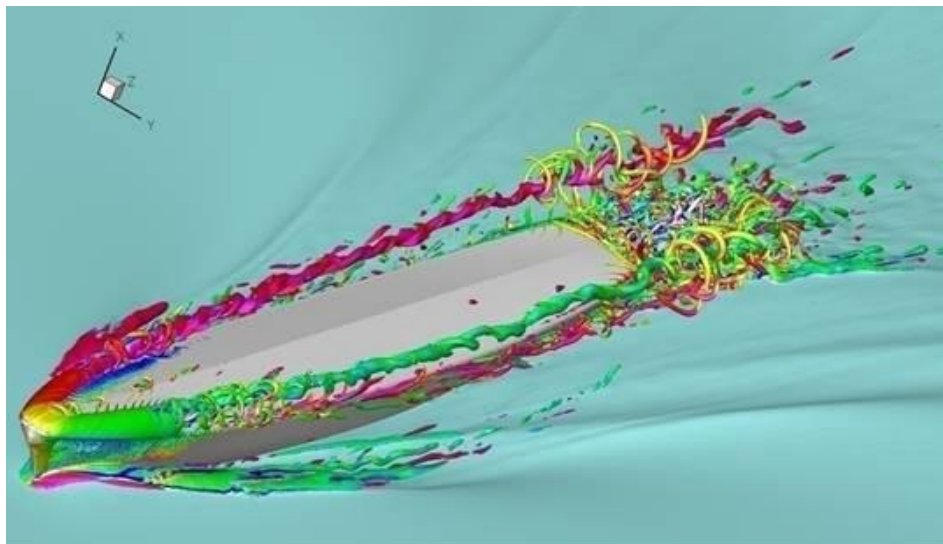
Fonte: (<http://www.stadttowingtank.no/>).

No entanto, mesmo com os grandes avanços nas pesquisas e os esforços para uma máxima padronização dos experimentos, ainda assim certo grau de empirismo se faz necessário, sobretudo na equiparação do protótipo ao modelo. Isso se dá através de aproximações realizadas para cada tipo de experimento em especial como uma forma de tornar mais acurada a previsão que será realizada no teste.

O método Numérico, por sua vez, abrange tanto o método Analítico quanto o da Computação Fluidodinâmica (CFD). Principalmente no que se diz respeito ao

processo de desenho, a CFD é extremamente importante e, ultimamente, tem-se feito indispensável nessa etapa. Através da CFD, é possível aplicar modelos matemáticos, como o Método dos Elementos de Contorno (*Boundary Element Method* - BEM), de forma a resolver equações diferenciais formuladas em forma integral tais como Navier Stokes. Sendo assim, esse tipo de software é capaz de simular o comportamento de um fluido, possibilitando a análise dos resultados da interação deste com uma superfície. Com isso, arquitetos navais conseguem, por exemplo, aprimorar o desenho de um casco ainda na fase de projeto, selecionando o que lhes parecer mais promissor.

Figura 4: Análise por CFD do comportamento da água ao longo de um casco



Fonte: (<http://www.iuhr.uiowa.edu/shiphydro/>).

3.1 A Semelhança Física

Sabe-se que ainda se tem muito a estudar sobre um tratamento puramente numérico da análise hidrodinâmica das embarcações e, por esse motivo, os testes em modelos ainda são extremamente essenciais como uma forma de validação dos projetos.

Para garantir que esses testes com modelos possam de fato representar o protótipo, é necessário que ambos apresentem um comportamento similar,

possibilitando a transferência dos resultados obtidos no tanque de provas para a escala real, a partir de um fator de proporcionalidade. Nesse contexto, semelhança é o nome dado a esse estudo das previsões das condições de um protótipo a partir de observações de modelos, utilizando parâmetros adimensionais. Nele, são aplicados os três tipos de semelhança física: geométrica, cinemática e dinâmica.

A semelhança geométrica existirá quando os comprimentos correspondentes do protótipo e do modelo guardarem entre si uma relação constante, chamada de fator de escala (λ).

Figura 5: Semelhança Geométrica

$$L_s = \lambda \cdot L_m$$

Fonte: (BERTRAM, 2000, p.4).

De forma análoga, essa relação também se aplica a áreas e volumes, porém proporcionalmente ao quadrado e ao cubo, respectivamente.

Respeitada a semelhança geométrica, o modelo, em sua essência parece já ser o mesmo que seu protótipo por ter forma igual à deste. No entanto, somente essa semelhança não será suficiente para prever qualquer comportamento hidrodinâmico do protótipo. Acontece que ela, por si só, não é sequer obrigatória nas representações e já houve, inclusive, propostas de não incluí-la em testes a fim de alcançar resultados mais fiéis. Contudo, essa ideia não foi aceita na prática e a semelhança geométrica continua a integrar a grande maioria dos modelos construídos e, por esse motivo, não se tem tantas informações de como seriam os testes sem ela. É importante mencionar também que essa semelhança só é visada no caráter macroscópico, visto que, devido às diferentes rugosidades das superfícies dos materiais, ela não é alcançada microscopicamente com perfeição.

A cinemática, por definição, é a parte da mecânica que estuda os movimentos sem se referir às forças que os produzem ou às massas dos corpos em movimento.

Portanto, a semelhança cinemática existirá quando também existir uma relação constante entre os tempos do protótipo (T_s) e do modelo (T_m). Essa relação é conhecida como escala cinemática (τ).

Figura 6: Semelhança Cinemática

$$t_s = \tau \cdot t_m$$

Fonte: (BERTRAM, 2000, p.15).

Ao se combinar semelhança geométrica e cinemática, obtém-se uma relação fixa tanto entre as dimensões quanto entre os tempos, o que, por consequência, garante que os pontos homólogos guardem entre si velocidades e acelerações proporcionais. Em outras palavras, as velocidades (V_s , do protótipo, e V_m , do modelo) e as acelerações (A_s e A_m) são vetores de mesma direção e sentido nos dois corpos e cujos módulos são correlacionados por uma constante.

Figura 7: Fatores de proporção entre velocidades e acelerações

$$V_s = \frac{\lambda}{\tau} \cdot V_m \quad a_s = \frac{\lambda}{\tau^2} \cdot a_m$$

Fonte: (BERTRAM, 2000, p.15).

A semelhança dinâmica se concretizará, por sua vez, quando as forças forem vetores de mesma direção e sentido e guardarem entre si uma relação fixa. Em outras palavras, ela ocorrerá quando a razão entre os valores absolutos das forças em pontos equivalentes se mantiver fixa. A essa proporção, dá-se o nome de escala de forças (k).

Figura 8: Semelhança Dinâmica

$$F_s = \kappa \cdot F_m$$

Fonte: (BERTRAM, 2000, p.15).

O conceito de semelhança dinâmica engloba as forças que atuam no corpo analisado como um todo. Em uma embarcação, por exemplo, destacam-se as forças de inércia, gravidade e viscosidade. Além disso, é esse o princípio utilizado nos ensaios em túneis aero e hidrodinâmicos, na análise do escoamento em dutos e, principalmente, nos cálculos de resistência ao avanço das embarcações.

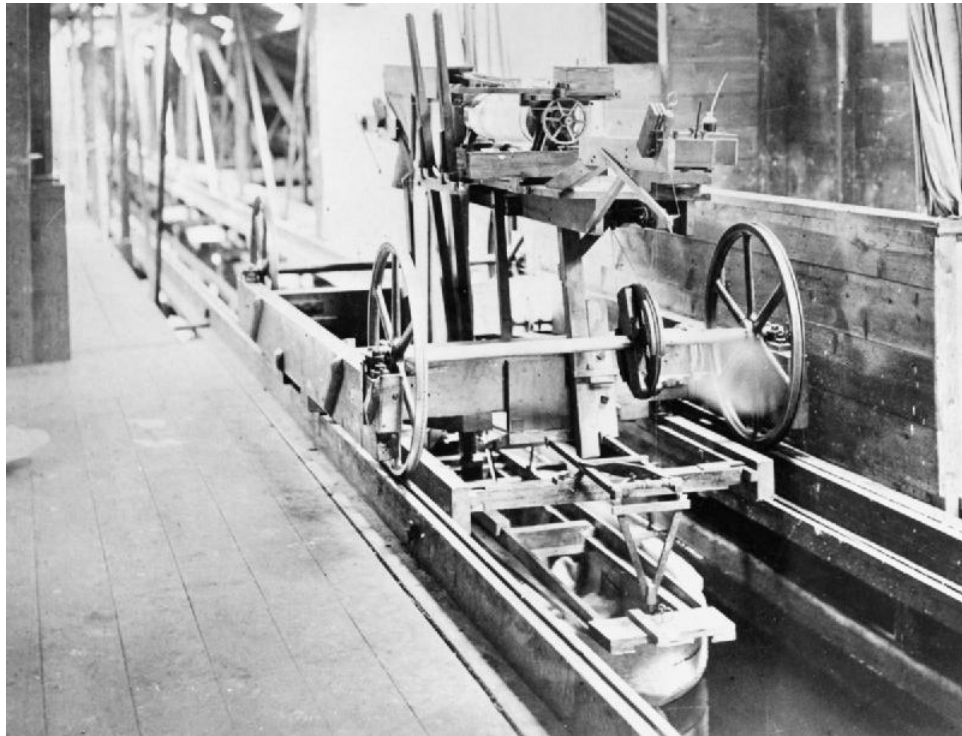
3.2 O Número de Froude

Após a realização de alguns testes, William Froude notou que o padrão de ondas geradas por um navio ao se deslocar sobre a superfície de água, mesmo que completamente parada, representava, de certa forma, uma perda de energia. Perda essa que era causada por um motivo completamente distinto da simples fricção da superfície molhada do casco com a água. Além do mais, esses dois tipos de resistência ao avanço não necessariamente obedeceriam a uma escala de proporção comum quando os testes com os modelos fossem aplicados ao navio em escala natural e, portanto, deveriam ser determinados e tratados separadamente.

Todavia sabe-se que não é possível rebocar um modelo de navio sem que ambas as resistências devam ser levadas em conta. A saída encontrada por Froude foi, então, realizar o reboque de placas finas completamente imersas, sem que fosse criado nenhum tipo expressivo de onda, a fim de investigar puramente a resistência de superfície (causada pelos esforços cisalhantes). Foram executados vários testes nos quais placas de tamanhos e acabamentos diferentes, variando de envernizados suaves a ásperos como areia, eram rebocadas na água em um tanque propriamente construído a diferentes velocidades. Isso era realizado conectando essas placas a

um dispositivo de reboque que, por sua vez, era arrastado sobre trilhos por um guincho a vapor, o que possibilitava o controle da velocidade e a medição da força de arrasto.

Figura 9: Primeiro Tanque de Provas desenvolvido por Froude em Torquay, Reino Unido



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

Esse foi o primeiro arranjo de um tanque de provas a ser utilizado e, embora as instalações atuais e os equipamentos de medição sejam consideravelmente mais sofisticados, os princípios básicos que nele foram aplicados ainda o são nos modernos tanques.

A análise de Froude dos resultados obtidos nos testes o permitiu determinar a resistência de superfície tanto da placa quanto do navio, entre as quais ele estabeleceu uma relação e a denominou *Equivalent Flat Plate Resistance*.

O próximo passo foi executar novamente esses mesmos testes, entretanto, agora com modelos em escala dos navios. A força de arrasto total dos modelos foi medida e dela foi extraída a parte anteriormente determinada pelos testes com as

placas. Dessa forma, a resistência residual não incluiria a parte relacionada à fricção da superfície molhada com a água. Deduziu-se, portanto, que esse arrasto restante seria causado pela perda de energia ao se colocar parte do volume deslocado pelo modelo em movimento, produzindo, assim, o padrão de ondas observado ao redor deste.

Notou-se também que o número de cristas de onda existente entre a proa do modelo e sua popa estaria relacionado ao seu comprimento e à sua velocidade - o que de fato é real para ondas pequenas, nas quais a força da gravidade é o único fator relevante - e que, além disso, comportamentos de ondas semelhantes poderiam ser obtidos desde que a razão entre as velocidades de reboque fosse igualada à razão entre as raízes quadradas dos comprimentos dos modelos de diferentes escalas. Em outras palavras, se dois modelos de escalas diferentes são rebocados a fim de produzir um mesmo padrão de ondas, eles devem obedecer a essas relações. Estabelecia-se, então, a Lei de Comparação de Froude, a qual é definida no livro *Principles of Naval Architecture* da seguinte forma: "*The (residuary) resistance of geometrically similar ships is in the ratio of the cube of their linear dimensions if their speeds are in the ratio of the square roots of their linear dimensions*". Nesse caso, uma mesma proporção de água do volume deslocado pelos modelos é posta em movimento e, conseqüentemente, a resistência residual seria proporcional a esse deslocamento do casco, tanto em volume quanto em massa.

Figura 10: Padrão de ondas estudado por Froude



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

À essa resistência residual, deu-se o nome de resistência de ondas ou *wave making resistance*, a qual Froude agora tinha um procedimento para estimar em um navio de escala natural em diferentes velocidades, conquanto que os modelos fossem testados em velocidades que produzissem o mesmo efeito na água. Para tanto, era necessário que ambos obedecessem à Lei de Comparação de Froude. Por exemplo, se o fator de escala é de 1:64, então, a velocidade apropriada para o teste deveria ser reduzida em uma escala de $1:\sqrt[3]{64}$, ou 1:8. Sendo assim, testes para determinar a resistência ao avanço de um navio em escala natural a 16 nós poderiam ser realizados a 2 nós. A resistência de superfície seria calculada com base na área molhada do modelo e, então, subtraída da resistência total para se obter a resistência de ondas. Essa resistência de ondas poderia, então, ser transportada para a escala natural pela razão deslocamento do protótipo : deslocamento do modelo, possibilitando a previsão do seu valor no tamanho natural. Desse ponto adiante, seria feito o caminho contrário, porém utilizando os dados do navio. A partir de sua área molhada, obter-se-ia a sua resistência de superfície que, somada à resistência de ondas prevista, resultaria na resistência total do protótipo.

A Lei da Comparação de Froude pode ser resumida de forma simples pela manutenção de iguais Números de Froude entre o modelo e o protótipo.

Figura 11: Equação do Número de Froude

$$F_n = \frac{V^2}{\sqrt{gL}}$$

Fonte: (ACOSTA, 2008, p.4).

Na equação do Número de Froude, “V” é a velocidade do corpo, “L”, o seu comprimento característico e “g”, a aceleração da gravidade.

O trabalho de Froude foi colocado à prova ao serem conduzidos testes em escala natural com o navio inglês H.M.S. Greyhound após terem sido levantados os dados com o modelo de seu casco no tanque de provas. Os valores da resistência para o tamanho natural encontrados eram sempre maiores que os previstos, no entanto, o formato das curvas de arrasto encontradas era, essencialmente, o mesmo desde que os valores de escala usados fossem adequados. Froude logo desenvolveu fatores de correção para os dados do modelo a fim de aprimorar a precisão das previsões.

Seu método foi adotado pelo Almirantado Britânico, que o patrocinara, e, após o seu falecimento em 1879, seu filho Robert deu continuidade a seu trabalho, permitindo a consolidação dos procedimentos utilizados em tanques de prova até hoje.

3.2.1 O bulbo de proa

O bulbo de proa se apresenta como uma aplicação prática do Número de Froude nos navios. Trata-se de uma protuberância na área molhada da proa do navio cuja finalidade é reduzir a resistência ao avanço do navio.

Figura 12: Bulbo de proa do primeiro navio da classe Triple-E construído, o Maersk Mc-Kinney Møller



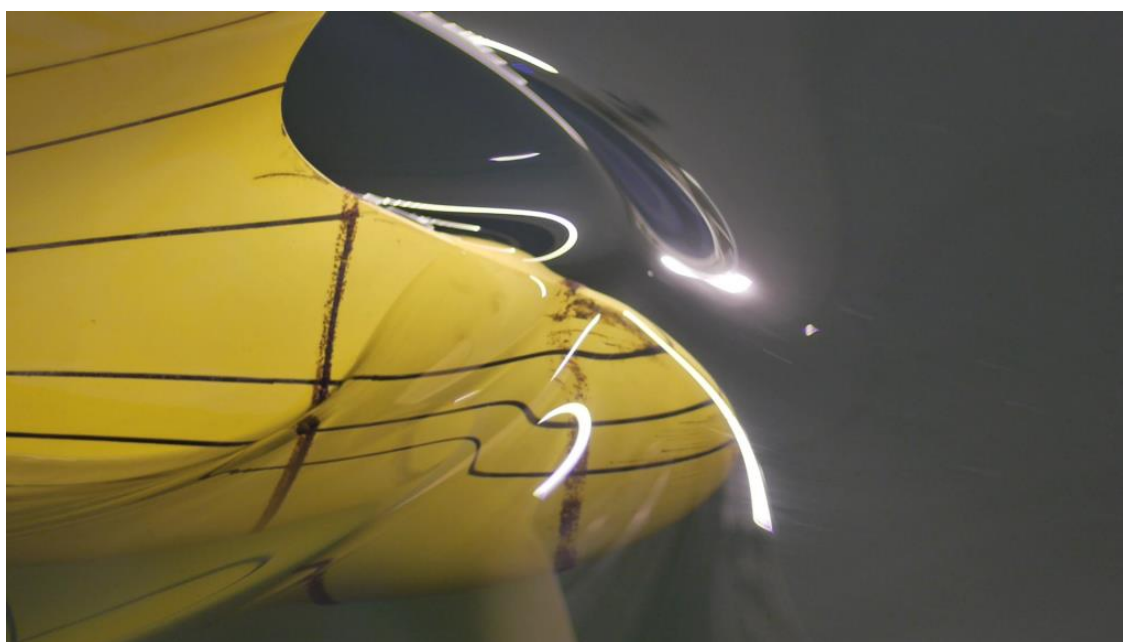
Fonte: (<http://www.worldslargestship.com/>).

Uma embarcação, ao se deslocar sobre a água gera um padrão de ondas em sua proa. Entretanto, a energia observada nessas ondas tem origem no próprio movimento do navio, visto que é este o elemento perturbador do ambiente. Dessa forma, é fácil concluir, pelo princípio de conservação da energia, que as ondas geradas representam, na verdade, uma perda de energia do navio e a consequente resistência ao seu avanço.

Mediante isso, o bulbo de proa possui a finalidade de gerar uma segunda onda que interferirá na onda produzida pelo deslocamento da embarcação de forma a cancelá-la ou reduzi-la. Para que isso ocorra de forma mais proveitosa, é necessário que essa onda gerada pelo bulbo de proa seja defasada da originada pela proa em um valor o mais próximo possível de meio comprimento de onda, ou 180° . Porém, isso iria requerer um bulbo de proa muito extenso (com cerca de 20 metros, para um navio de velocidade regular) e a resistência causada pelo aumento da área molhada não mais seria compensada pela redução na resistência de ondas.

Ainda assim, é possível chegar a um equilíbrio entre o aumento da resistência de apêndice, causada pela maior área molhada, e a redução da resistência de ondas de forma a obter um menor arrasto total. É o que os arquitetos navais procuram fazer nos seus projetos.

Figura 13: Resultado da interferência de ondas no bulbo de proa



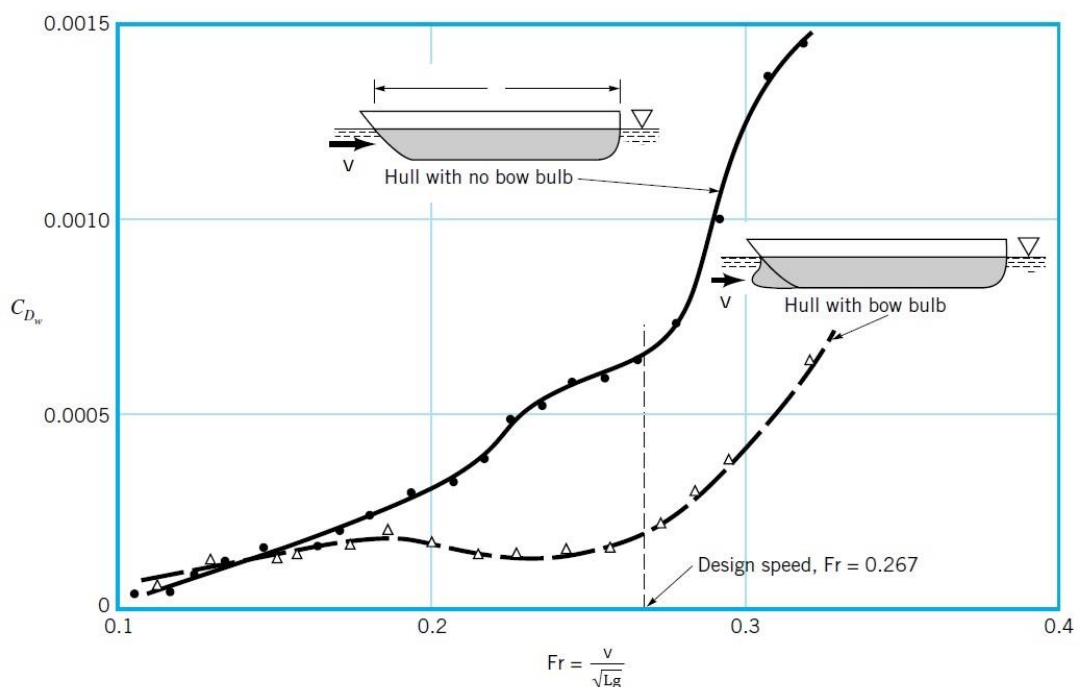
Fonte: (<http://www.stadttowingtank.no/>).

Contudo, para se chegar a esse consenso, é necessária a escolha de uma velocidade em que se teria o melhor aproveitamento desse arranjo estrutural. Essa velocidade é conhecida como a velocidade de cruzeiro do navio. Outro fator que deve ser levado em conta é o comprimento do navio, no caso, o seu comprimento

entre perpendiculares. Com base nesses dois parâmetros, é possível estabelecer-se o Número de Froude do navio em questão e assim analisar se é vantajoso ou não instalar um bulbo de proa nele.

O gráfico da figura 14 apresenta uma comparação entre os coeficientes de arrasto de um navio com bulbo de proa e de outro sem bulbo de proa em função do Número de Froude.

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



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

Nele observamos que, para baixas velocidades, o bulbo de proa se torna prejudicial à eficiência do navio. Isso também ocorre com o navio numa condição de deslocamento próximo da condição leve, em que o bulbo se encontra parcialmente imerso, impedindo-o de realizar a sua função como já explicado. Percebe-se ainda que até um Número de Froude de aproximadamente 0,16, as diferenças entre os coeficientes de arrasto de onda dos navios com e sem o bulbo não são tão expressivas, o que não compensaria a instalação do equipamento, visto que haveria o aumento da resistência de apêndices da embarcação sem ter, em contrapartida, a

redução da resistência de onda. Contudo, a partir desse valor, observa-se que essa diferença se torna bastante significativa, comprovando assim a eficiência do bulbo de proa na redução do arrasto do navio.

3.3 O Número de Reynolds

De acordo com Frank M. White, a análise dimensional se define por "*a method for reducing the number and complexity of experimental variables which affect a given physical phenomenon*". Além disso, ele estabelece duas pressuposições importantes ao se aplicar esse método: a homogeneidade dimensional entre as relações físicas e a inclusão de todas as variáveis relevantes nessas relações.

Com base nessa premissa, Osbourne Reynolds desenvolveu um parâmetro adimensional que permitia analisar o comportamento de um escoamento fechado. Esse parâmetro ficou conhecido como Número de Reynolds e é usado para prever padrões semelhantes de escoamento em diferentes condições de fluxo.

Os experimentos de Reynolds demonstraram que um fluxo se tornaria turbulento quando as forças viscosas nele se tornassem fracas demais para conter o movimento das partículas deste, impossibilitando-se a continuidade de um fluxo laminar. Nesses experimentos, foi observado que um fluxo turbulento era mais provável de acontecer a velocidades mais altas e com fluidos mais densos, no entanto, menos viscosos. Ele então reuniu todos esses fatores para descrever uma série de condições de fluxo através de um único parâmetro, o Número de Reynolds

O número em questão segue exatamente as premissas da análise dimensional e leva em conta as duas principais forças que influenciam um escoamento fechado: a força de inércia e a de viscosidade. A relação entre elas é que define o Número de Reynolds.

Figura 15: Extrato da tabela de grupos adimensionais

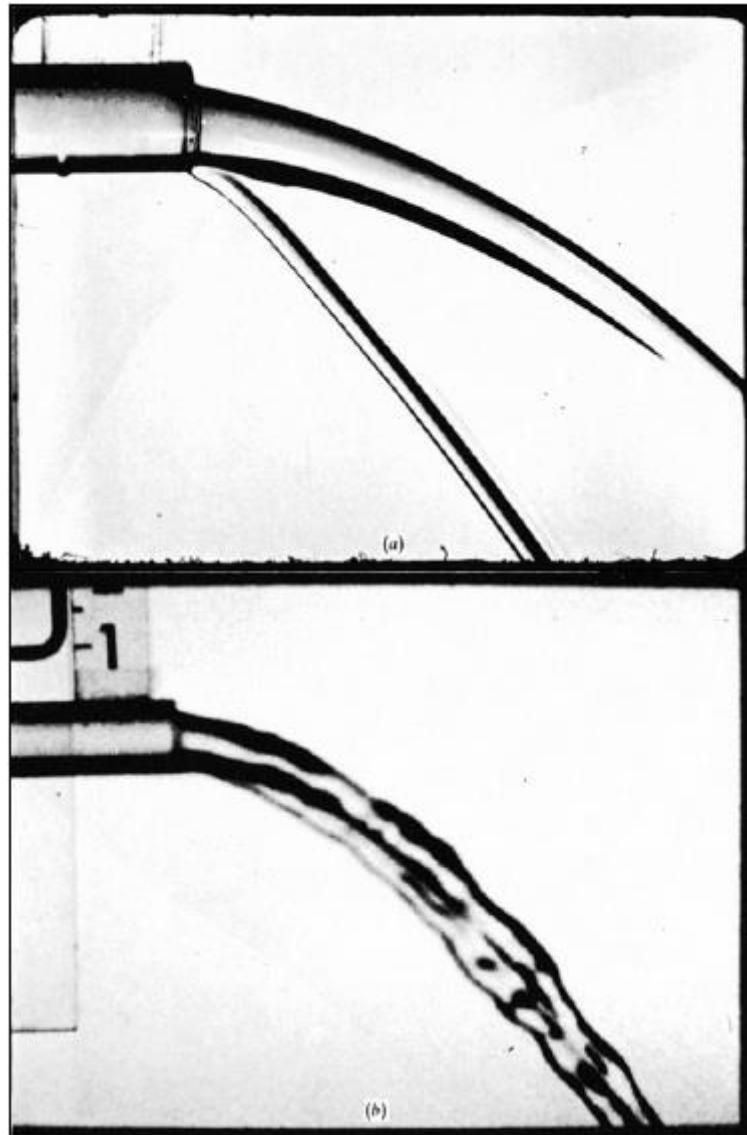
Parameter	Definition	Qualitative ratio of effects	Importance
Reynolds number	$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$	$\frac{\text{Inertia}}{\text{Viscosity}}$	Always
Froude number	$Fr = \frac{U^2}{gL}$	$\frac{\text{Inertia}}{\text{Gravity}}$	Free-surface flow

Fonte: (WHITE, 2003, p.297).

Para um dado corpo e seu comprimento característico, é estabelecido empiricamente um Número de Reynolds crítico. Crítico, pois é esse o número que representará a faixa de transição de um fluxo laminar e suave para um turbulento e irregular.

Observando-se, por exemplo, o fluxo de água ao sair de uma tubulação, percebe-se claramente o significado desse parâmetro. Nesse caso, o Número de Reynolds crítico é de aproximadamente 2300. Para fluxos abaixo desse valor, o escoamento se apresenta laminar e suave com rápida velocidade no centro e menor fluxo próximo às paredes do tubo, o que justifica as múltiplas trajetórias assumidas pelo fluido ao sair do duto. Os fluxos com valores acima do Número de Reynolds crítico, por sua vez, apresentam-se à primeira vista instáveis e irregulares, mas, observando-os por um intervalo maior de tempo, pode-se notar que estes são, na verdade, estáveis e, principalmente, previsíveis.

Figura 16: Diferença entre fluxo laminar e turbulento



Fonte: (WHITE, 2003, p.327).

Na figura 16, em (a) tem-se um fluxo laminar devido ao baixo Número de Reynolds e, em (b), esse número é alto e, conseqüentemente, o fluxo é turbulento.

A importância do Número de Reynolds para a construção naval se dá a partir do momento em que ele influi diretamente no arrasto do navio. De acordo com o livro *Ship Dynamics for Mariners*, “the fluid frictional resistance is directly proportional to laminar flow speed but becomes directly proportional to approximately (flow speed)² when the flow turns turbulent”.

O trabalho de Froude foi bastante baseado nos seus experimentos e grande parte dos seus dados foi usado para desenvolver fórmulas empíricas a fim de produzir dados aceitáveis. Por esse motivo, talvez não seja uma surpresa que ele tenha, originalmente, subestimado os valores da força de arrasto nos testes em escala natural. Acontece que esses trabalhos se deram cerca de dez anos antes dos estudos de Reynolds sobre a resistência do fluxo de fluidos no interior de tubulações e, conseqüentemente, Froude não teve nenhuma base científica que pudesse o orientar a respeito da transição do fluxo laminar para o turbulento e o seu efeito na resistência de superfície das embarcações.

A maioria de seus modelos foi, na realidade, testada sob um fluxo, no mínimo, parcialmente turbulento, enquanto que, o fluxo ao longo dos cascos das embarcações em tamanho natural seria invariavelmente turbulento e, portanto, a resistência devido aos esforços cisalhantes seria consideravelmente maior. Froude realmente superou os erros obtidos aplicando fatores de correção a eles, entretanto, ele não conseguiu atribuir nenhuma razão lógica a eles.

Atualmente, alguns modelos em escala construídos para testes contam com pequenas travas em suas proas a fim de induzir, artificialmente, um fluxo turbulento de forma a proporcionar resultados mais compatíveis com as condições em escala natural. Essa é uma alternativa muito válida, visto que, a única solução que permite manter a igualdade dos números de Reynolds e Froude, ao mesmo tempo, entre um protótipo e seu modelo seria a construção deste nas mesmas dimensões daquele, o que inviabilizaria a execução dos testes em laboratório.

Outro motivo da sua importância para a construção naval é que um Número de Reynolds alto para o escoamento ao longo do casco de um navio, por outro lado, contribuiria para uma menor resistência de forma (*form drag*). Dessa forma, a camada limite, ou *boundary layer*, possuiria energia o suficiente para evitar seu descolamento precoce e a conseqüente perda de energia na forma de vórtices de água. Acontece que esse descolamento precoce da camada limite produziria um centro de baixa pressão estática na parte posterior da embarcação, o que induziria uma resistência a seu avanço pela diferença de pressão existente entre a proa e a popa desta, mas, da forma citada, esse efeito seria atenuado.

3.4 Aplicação direta dos números de Reynolds e Froude

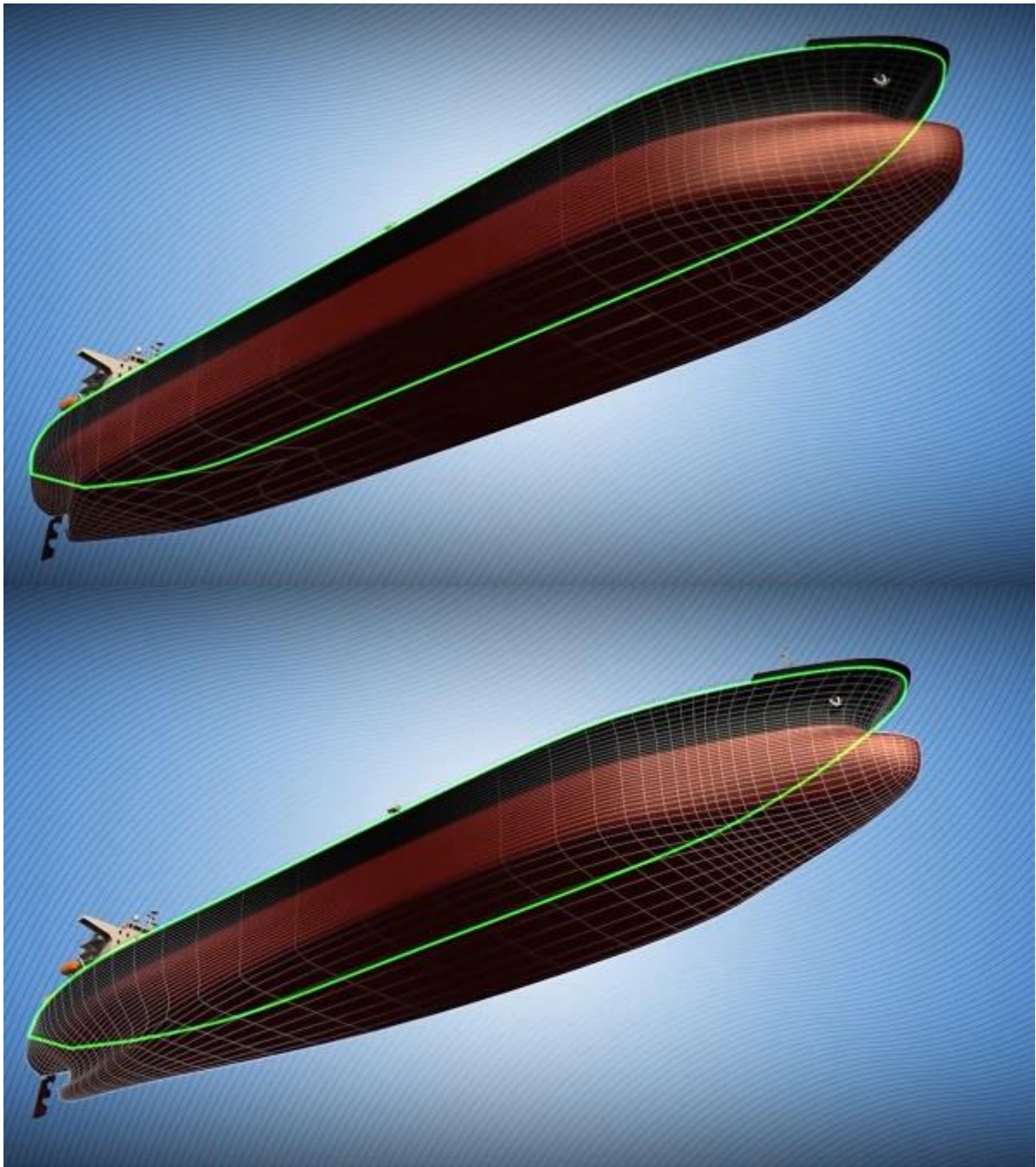
A *Teekay* pretende construir uma nova geração de navios-tanque para o final de 2015 e o ano seguinte com o foco voltado para a redução do consumo de combustível. Segundo os dados apresentados pela empresa, o preço dos combustíveis, de 1999 a 2011, cresceu mais de 500%, saltando de 100 dólares por tonelada para 750 dólares por tonelada. Dessa forma, os gastos com combustíveis se tornaram a maior fonte de despesas de um navio em toda a sua vida útil. Em sua campanha publicitária, a empresa afirma que esse quadro de aumento deve continuar, ao passo que novas leis de meio ambiente entram em ação.

Diante disso, a *Teekay* desenvolveu o *OneSpirit*, um design apropriado para os seus navios que permite uma diminuição de cerca de 30% no consumo de combustível, reduzindo, assim, os custos de viagem e propiciando uma solução mais ambientalmente eficiente para a rede de transportes.

Para isso, foi-se necessário voltar aos fundamentos da embarcação, começando pelo casco. Inúmeros desenhos de casco foram testados até que se fosse encontrado um design tido como ótimo capaz de reduzir a resistência ao avanço, sem alterar a sua capacidade de carga.

As primeiras alterações foram o estreitamento da boca da embarcação e a adoção de extremidades mais delgadas. Com isso, obteve-se a redução da resistência de forma da embarcação, além de se evitar um descolamento precoce da camada limite, o que também contribuiu para a redução do arrasto.

Figura 17: Adoção de um casco mais delgado



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

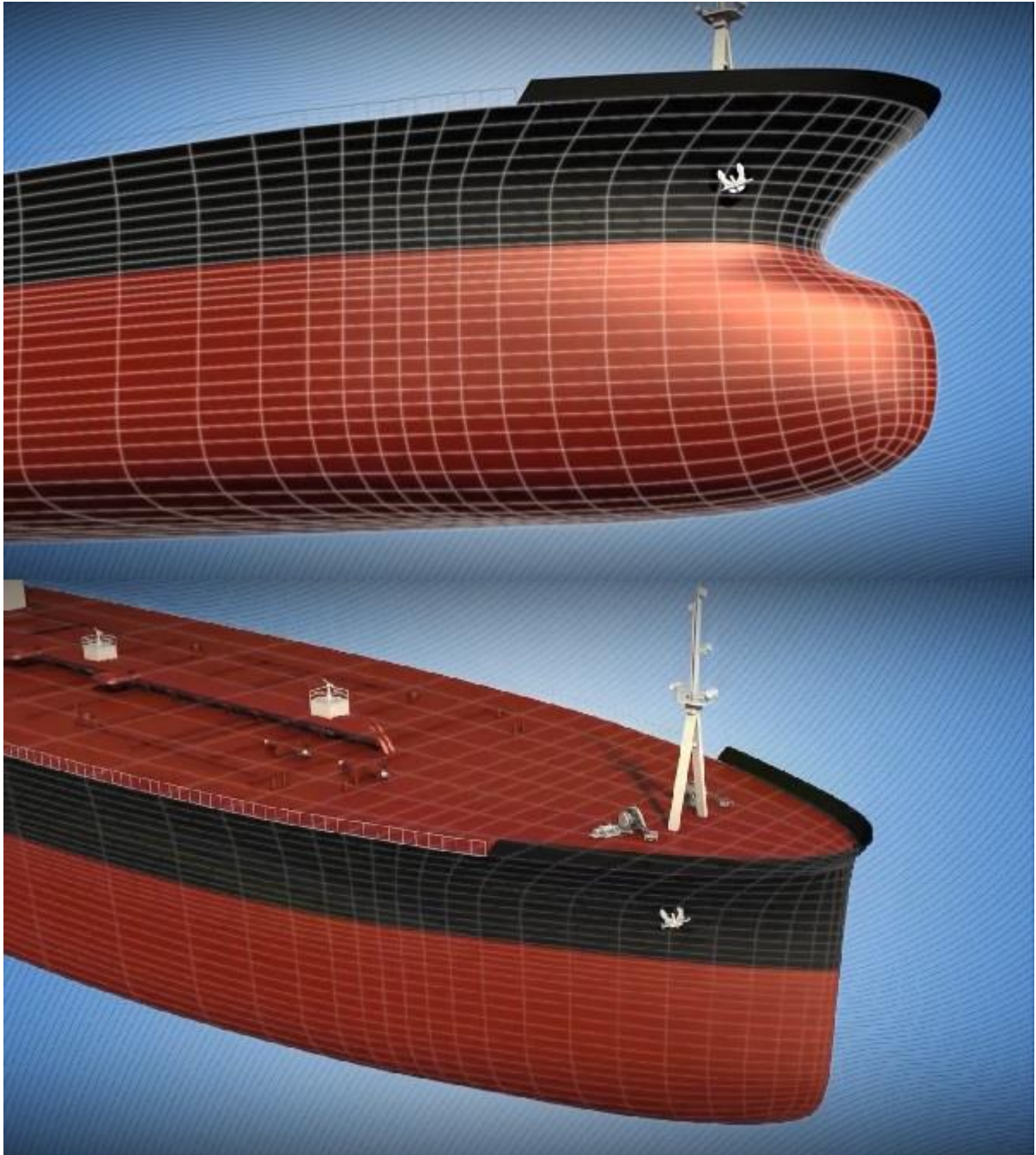
Entretanto, tais medidas reduzem sim o consumo de combustível, mas não mantêm a capacidade de carga. Diante disso, o próximo passo dado pela *Teekay* foi o aumento do comprimento do navio e de seu pontal, permitindo um calado máximo

maior. Com essas alterações, a empresa afirma ter alcançado uma redução do consumo de 11%.

Contudo, sabe-se que o Número de Froude é inversamente proporcional ao comprimento do navio e, analisando-se o que foi feito, nota-se, portanto, que o *OneSpirit* possui um Número de Froude menor que o de seus antecessores. Essa mudança foi muito importante por permitir a próxima alteração realizada pela empresa.

Essa redução no Número de Froude foi feita de tal maneira que moveu o *OneSpirit* para fora da faixa em que o bulbo de proa se faz eficaz nas embarcações. O próximo passo, então, foi tirá-lo, de fato, do projeto.

Figura 18: Retirada do bulbo de proa



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

Dessa forma, o navio ganhou uma proa mais fina e uniforme, capaz de absorver muito menos impacto e de ser muito mais eficiente ao, literalmente, cortar a água. Isso resultou em mais uma redução no consumo, desta vez, de 6%.

Figura 19: Redução da absorção de impacto na proa



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

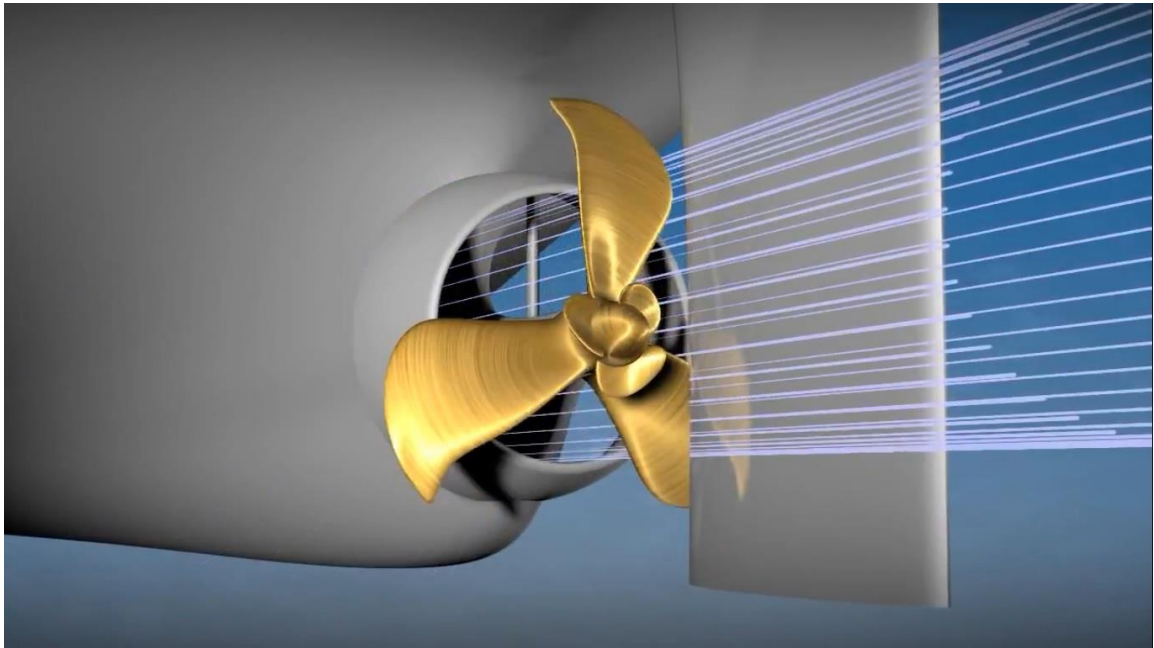
A etapa seguinte foi o desenvolvimento de um motor de combustão principal maior e mais poderoso, o *G Type Engine*. Com a sua capacidade aumentada de queima de combustível, foi possível reduzir o processo de combustão e, conseqüentemente, a rotação do motor, que passou de 90 RPM para 60 RPM. De acordo com a empresa, essa medida os permitiu aproveitar melhor a queima do combustível, resultando em uma economia de 6% no consumo.

Por conseguinte, a redução na rotação do eixo principal permitiu um aumento do diâmetro do propulsor de 20% e uma redução do número de pás (de quatro para três), de forma a movimentar mais água a cada rotação. A *Teekay* combinou, então, o seu novo propulsor a um dispositivo equalizador de esteira, o *Mewis Duct*, de forma a corrigir o fluxo de água que alcançava o propulsor. A ideia desse dispositivo é proporcionar um melhor fluxo de água na posição conhecida como *Top Dead Centre*, ou posição das doze horas. Dessa maneira, ele compensa o sombreamento das pás causado pelo casco, melhorando a eficiência do propulsor.

Como se não bastasse, todo esse arranjo foi somado a um dispositivo pós-hélice: o *Propeller Boss Cap Fins* (PBCF), cuja principal função é converter as

componentes rotacionais do fluxo em uma componente axial útil à propulsão, além de eliminar os vórtices na região do *hub* do propulsor. Com isso, obteve-se mais 7% de redução no consumo de combustível.

Figura 20: *Mewis Duct* e *Propeller Boss Cap Fin (PBCF)*



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

Embora a soma de todas as reduções no consumo dê, de acordo com os dados fornecidos pela empresa, exatamente 30%, é importante ressaltar que todas essas melhorias atuam sobre um mesmo navio, possibilitando o efeito da sinergia. Isso quer dizer que a melhoria proporcionada por todas elas juntas é ainda maior que a soma simples de seus efeitos individuais. Além disso, a empresa afirma que com essa considerável redução no consumo de combustível, o *OneSpirit* se lança no mercado já atendendo aos requisitos de eficiência energética propostos pela Organização Marítima Internacional no *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) para 2025, mostrando ser, de fato, uma nova tendência em construção naval.

4 TESTES EM ESCALA

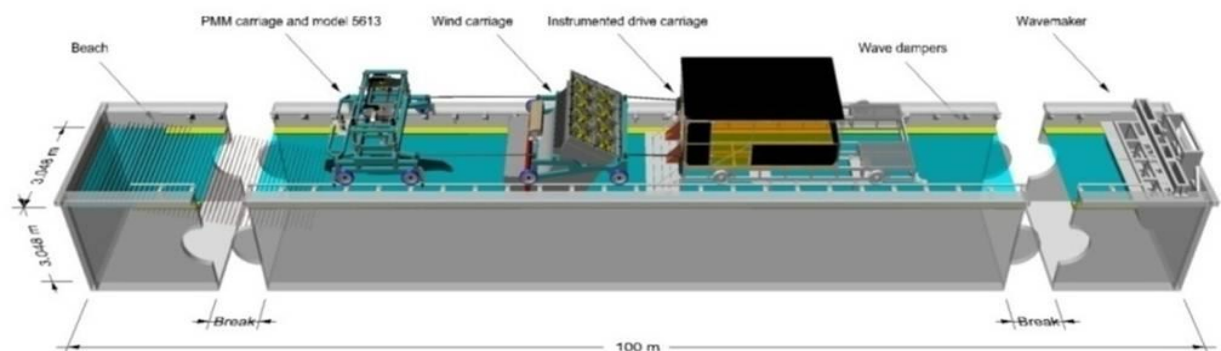
Testes em escala possuem aplicações diversas que concernem, principalmente, à validação de dados de projeto. Trata-se de uma ferramenta fundamental utilizada por arquitetos navais e outros profissionais com a finalidade de coletar dados sobre o comportamento da estrutura analisada em um ambiente controlado. Porém, antes da realização de qualquer tipo de teste é necessário se ter em mãos as ferramentas que serão utilizadas. A primeira a ser levada em consideração deve ser o laboratório em si, que contará com as seguintes instalações:

4.1 Tanque de Provas

As principais capacidades de um tanque de provas são: medir a resistência ao avanço dos cascos dos navios - a fim de prover previsões adequadas de propulsão a ele, reduzir o consumo de combustível e, conseqüentemente, o dano ao meio ambiente - e executar testes para analisar outros tipos de comportamento sob diferentes condições de ambiente.

Um tanque de provas é constituído, basicamente, de uma piscina de alguns metros de largura e centenas de metros de comprimento equipada com uma série de instrumentos auxiliares, como o dispositivo de reboque, geradores e atenuadores de ondas, dispositivo gerador de vento e ainda, em alguns casos, um segundo dispositivo de reboque utilizado em testes de interação entre navios.

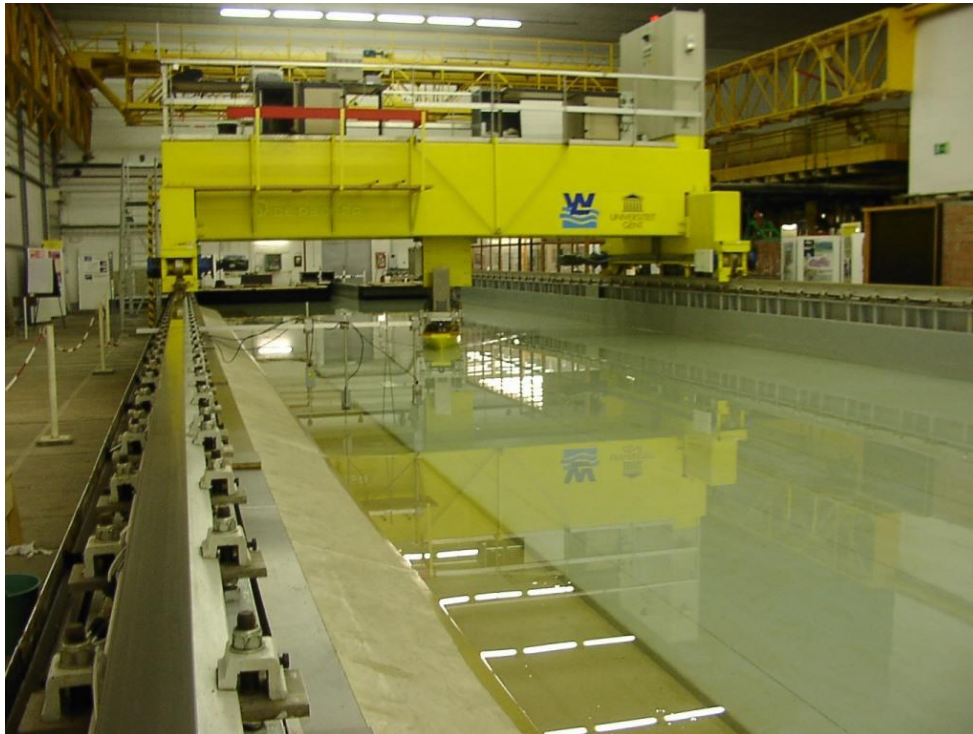
Figura 21: Arranjo geral de um tanque de provas



Fonte: (<http://www.watlab.be/en>).

Toda essa aparelhagem se encontra no interior de um galpão, objetivando o total isolamento das condições de teste, o que possibilita a realização deles sob circunstâncias extremamente precisas e realistas.

Figura 22: Tanque de provas da Universidade de Gante, na Bélgica



Fonte: (<http://www.watlab.be/en>).

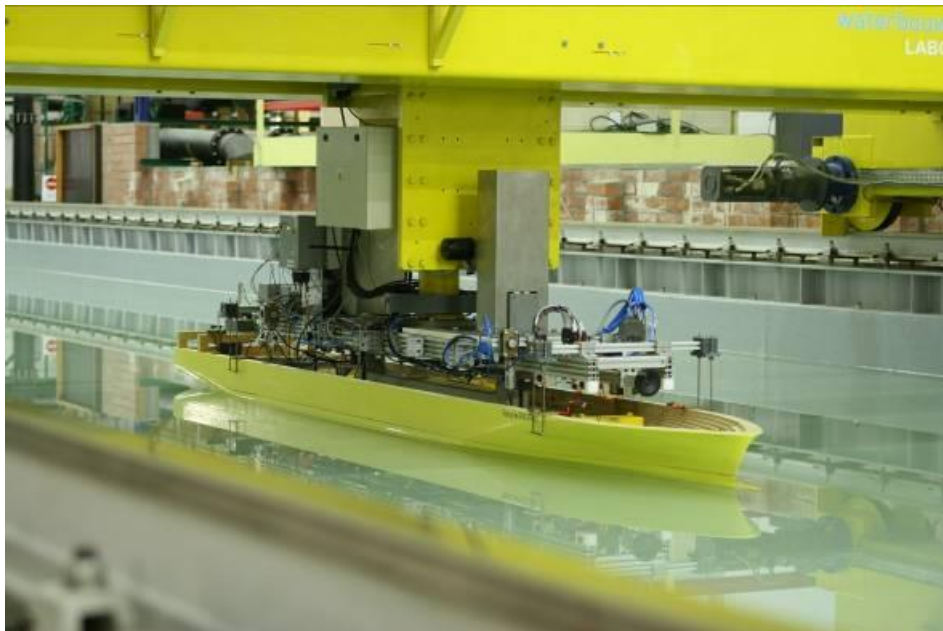
A profundidade do tanque é dada em função da finalidade dos testes a serem executados, ou seja, se estes visarão analisar o comportamento das embarcações em águas rasas ou profundas. Para aqueles que simulam as condições em águas rasas, é importante um perfeito nivelamento do seu leito, visto que, por trabalhar em escala, um desnivelamento, mesmo que mínimo, poderia resultar em interações indesejáveis entre este e o casco que se tornariam consideráveis quando transportadas para a escala natural. Nesses casos, pode-se ter a possibilidade de regulação da profundidade a fim de atender à escala adotada.

De cada lado do tanque, são instalados trilhos que sustentam todo o aparato móvel utilizado nos testes. É sobre eles que se locomovem, por exemplo, o dispositivo de reboque e os instrumentos de medição. Por esse motivo, também é

necessária uma precisão bastante rigorosa em sua construção, pois, por exemplo, uma leve diferença entre as alturas dos trilhos poderia induzir erros nas leituras dos equipamentos.

O dispositivo de reboque é equipado com um mecanismo de movimento planar, ou *Planar Motion Mechanism* (PMM), sendo capaz de tanto rebocar o modelo (*captive mode*) quanto de seguir aqueles que possuem propulsão própria (*free running mode*). No primeiro caso, em que se aplica o PMM, o modelo seguirá uma trajetória previamente determinada, sendo, literalmente, arrastado ao longo desta, enquanto que, no segundo, ele seria apenas acompanhado. O PMM é que fará o elo entre o dispositivo de reboque e o modelo, impondo a este os movimentos ao longo do plano horizontal por meio de conexões rígidas. Contudo, são permitidos ao modelo arfagem e cabeceio, existindo também a opção da restrição ou não do seu movimento angular de jogo.

Figura 23: *Planar Motion Mechanism*, ou PMM utilizado na Universidade de Gante, na Bélgica



Fonte: (<http://www.watlab.be/en>).

Outra opção de mecanismo de movimento seria a aplicação de motores elétricos controlados por computador. Nesse caso temos um mecanismo conhecido

por *Computerized Planar Motion Carriage*, ou CPMC, que, devido ao seu mais alto nível tecnológico, é bem mais caro que o convencional PMM, mas que, por outro lado, permite uma maior liberdade de movimento do modelo no interior do tanque e uma maior precisão da medição nos testes em *free-running mode*. Essa maior mobilidade lhe é concedida pelos seus três sub-dispositivos de reboque localizados abaixo do dispositivo principal. Enquanto o principal se move uniformemente e horizontalmente pelo tanque, os auxiliares se apoiam em sua base, sendo mecanicamente independentes uns dos outros e permitindo, cada um deles, um único tipo de movimento, seja este transversal, rotacional ou progressivo. Um software apropriado realiza o gerenciamento de todos esses dispositivos, possibilitando o ajuste adequado às condições de testes desejadas.

Figura 24: *Computerized Planar Motion Carriage* (CPMC) sendo aplicado em testes no modelo do Titanic II



Fonte: (<http://bluestarline.com.au/>).

Pode haver ainda um segundo dispositivo desse que, funcionando de forma auxiliar, permite testes de interação entre dois navios.

O dispositivo de reboque possui uma série de sensores, dentre eles dinamômetros e sondas Pitot, que o permitem a análise da esteira gerada e das forças que atuam no casco, propulsor e leme.

Dois dos principais sensores utilizados em um tanque de provas são o *Laser Doppler Anemometry* (LDA) e o *Particle Image Velocimetry* (PIV). Ambos utilizam técnicas de análise óptica por meio de lasers. A ideia básica nesses dois sensores é a mesma: emitem-se raios lasers de forma direcionada à região ou ponto em que se deseja analisar a velocidade do fluxo, os raios são então refletidos e captados por um sensor luminoso. No caso do LDA, é utilizado um fotodetector, enquanto que, no PIV, uma câmera especial é aplicada. A fim de permitir uma ideal reflexão dos raios luminosos no fluido, se necessário, podem ser introduzidas partículas que possibilitam um melhor rastreamento do movimento naquele local. Contudo, é de considerável importância que a concentração dessas partículas seja muito baixa, de forma a não alterar as propriedades do fluido em análise. Embora bastante semelhantes, cada um dos dois tipos de sensores possui suas determinadas vantagens e desvantagens em função de seu aparato óptico e dos componentes que o integram, mas, como mencionado, a essência do funcionamento permanece a mesma.

Figura 25: *Particle Image Velocimetry* (PIV) sendo utilizado em testes hidrodinâmicos



Fonte: (GJELSTRUP, 2009, p.).

Como pode ser observado na imagem acima, esses sensores são montados em um arranjo de sonda que permite acompanhar o movimento do modelo ao longo do teste.

Figura 26: Sonda LDA em que é possível observar todo o arranjo estrutural do equipamento



Fonte: (GJELSTRUP, 2009, p.5).

Na figura 25, a parte traseira (à direita na imagem) é conectada a um mecanismo que permite a rotação da sonda. A janela esquerda emite quatro feixes monocromáticos perpendiculares ao eixo da sonda junto com as duas janelas menores na parte de trás que também emitem raios lasers. A janela do meio, por sua vez contém os sensores ópticos.

O tanque de provas pode contar também com um grupo gerador de ondas. Esse equipamento funciona por meio de um mecanismo hidráulico associado a diversas placas que, controlados por um software apropriado, permite a produção de uma gama de perfis de onda, de forma a atender as necessidades dos testes.

Figura 27: Gerador de ondas em um tanque de provas



Fonte: (<http://www.edesign.co.uk/>).

Contudo, por se tratar de um ambiente com dimensões limitadas, existe a reflexão das ondas no seu interior e isso poderia causar não só a interferência das ondas, fazendo-as divergir do padrão idealizado, como também uma grande perda de tempo na transição de uma condição para outra, visto que seria preciso aguardar a água voltar para o estado calmo sozinha. Por esse motivo, se faz necessária a presença de um mecanismo absorvedor dessas ondas que evitará esse problema. Uma solução, de certa forma, simples é a construção de uma praia artificial na extremidade oposta a dos geradores de onda no tanque. Isso permitiria uma dissipação das ondas nesse local, o que resolveria o impasse da reflexão delas. No entanto, de uma maneira geral, as pás geradoras de onda já realizam sua função absorvendo as ondas que a ela retornam. Sendo assim, também pode ser feito um arranjo dispondo-as em extremidades opostas ou lateralmente e, enquanto um conjunto seria o responsável pela geração das ondas, o outro realizaria o papel de uma praia ativa (*wave dumpers*), absorvendo o movimento da água por ele detectado.

Figura 28: Praia artificial regulável construída em um tanque de provas

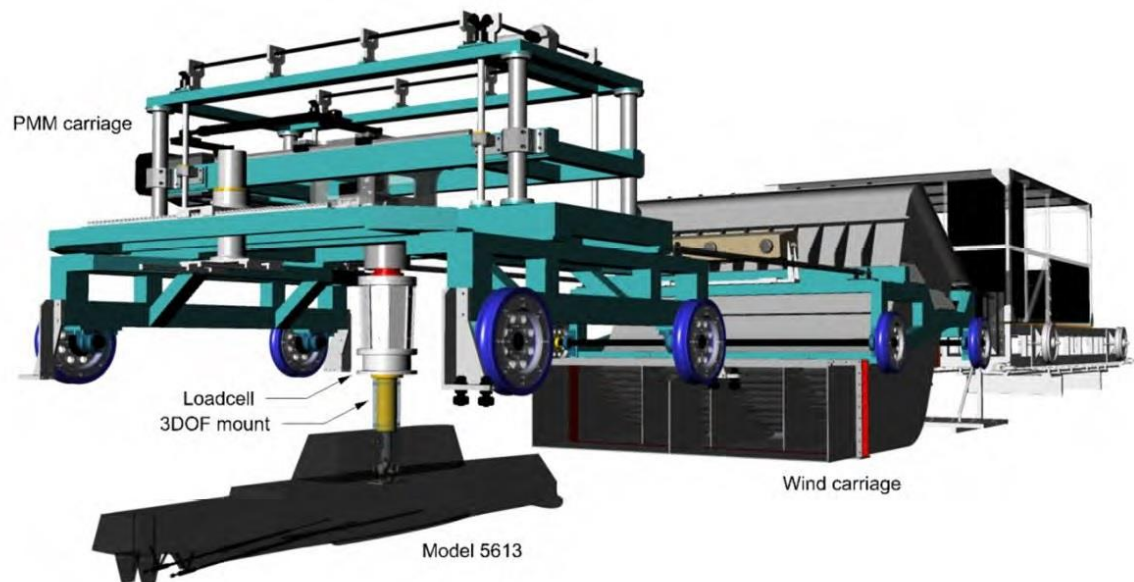


Fonte: (<http://www.edesign.co.uk/>).

Na praia artificial regulável exemplificada pela figura 8, a redução da profundidade, somada à ação da gravidade, força a transformação da energia potencial das ondas em energia cinética, permitindo, assim, a dissipação destas.

Além de todos esses equipamentos, um tanque de provas pode contar também com um trem equipado com um dispositivo gerador de ventos. Esse equipamento proporciona, assim como os geradores de ondas, as condições ideais de teste, sendo capaz de gerar ventos uniformes e constantes na direção desejada. Para que isto seja possível, ele conta com um conjunto de ventiladores, um cotovelo com palhetas direcionadoras em seu interior e, em sua saída, uma estrutura com seção semelhante a um favo de mel, também com a finalidade de direcionar o vento, mantendo-o com as características mais estáveis possíveis. Sua saída é posicionada logo acima da superfície da água, paralela a ela, permitindo uma melhor verossimilhança nos testes.

Figura 29: Esquema de aplicação do *wind carriage* em testes



Fonte: (COOK, 2011, p.7).

Alguns tanques de provas podem ainda ser utilizados no desenvolvimento de cascos de navios quebra-gelos. Para isso, eles devem possuir um mecanismo de refrigeração do ambiente que permita controlar a camada de gelo a ser formada na superfície da água ou precisam ser equipados com algum tipo de mecanismo que permita o manuseio conveniente dos produtos a serem usados para a simulação do gelo, caso o tanque não seja refrigerado. Nesse caso, são usados produtos, como a cera de parafina, gesso e até misturas de espuma. O grande desafio desse tipo de tanque é justamente a correta redução das propriedades do gelo, atendendo as escalas adotadas de forma a proporcionar resultados fiéis.

Figura 30: Tanque de provas de gelo (*ice tank*) do *Institute for Ocean Technology*



Fonte: (<http://articles.maritimepropulsion.com/article/HHI-Plans-Ice-breaking-Iron-Ore-Carrier-to-Transit-Northwest-Passage-2077.aspx>).

4.2 Oficina

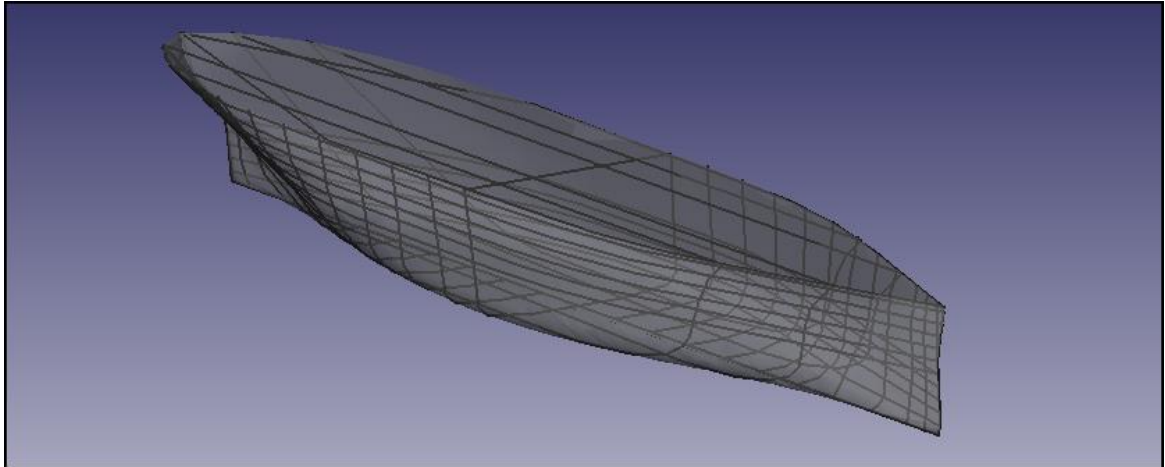
Antes de se iniciar a construção do modelo em escala reduzida, é necessário estabelecer qual será a escala adotada para tal. Determina-se isso com base nas condições de teste capazes de serem aplicadas. A melhor escala é aquela que permite a obtenção de resultados precisos, utilizando as ferramentas que se tem à mão. Caberá ao pessoal envolvido nos experimentos determinar a escala que lhes proporcionar maior riqueza de detalhes a partir das instalações do laboratório.

Uma vez determinada essa escala, inicia-se, então, o processo de construção do modelo. A confecção pode ser executada por uma firma terceirizada ou pelo próprio laboratório. Neste caso, será necessário que ele possua uma oficina com equipamentos apropriados para tal por se tratar de uma tarefa que requer um certo nível de precisão.

Primeiramente, o projeto do navio é importado para um software especializado de CAD/CAM onde a escala final desejada será selecionada. Esse software, por sua

vez, realizará a comunicação com a ferramenta de construção através de uma linguagem de dados comum.

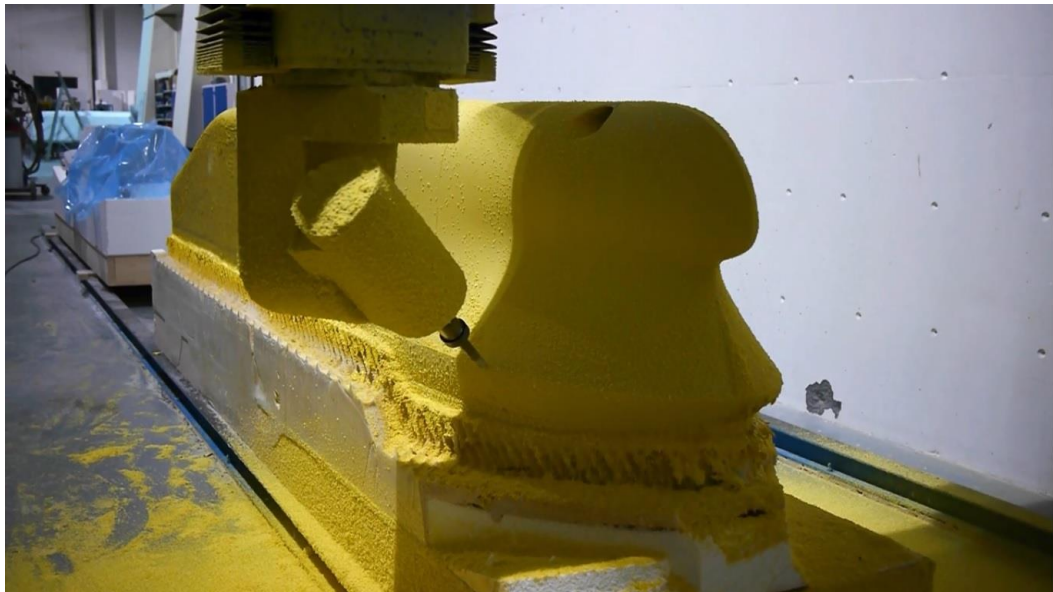
Figura 31: Modelo de casco em CAD



Fonte: (<http://www.stadttowingtank.no/>).

A principal ferramenta utilizada é a fresadora, uma máquina de corte em três dimensões capaz de dar ao objeto uma grande riqueza de detalhes, sendo a alta precisão de trabalho e a automatização as suas principais características. É ela a responsável pela modelagem do casco, do propulsor e outros componentes que se façam necessários serem confeccionados.

Figura 32: Máquina fresadora



Fonte: (<http://www.stadttowingtank.no/>).

Os principais materiais usados na construção dos modelos são: madeira, cera de parafina, resinas especiais, fibra de vidro ou até mesmo a combinação destes. Os detalhes do modelo são feitos com os materiais mais leves, podendo até ser aplicada a impressão 3D. Para os testes de embarcações de alta velocidade, em que o deslocamento é pequeno, utiliza-se a fibra de carbono como matéria prima para o modelo.

Após o termino da fresagem, o modelo passa por um acabamento manual, em que ele é lixado até atingir uma superfície lisa o suficiente. Este recebe então uma pintura especial e tem as suas marcas de calado destacadas.

A partir de então, o modelo já possui a sua forma final, mas ainda não está pronto para os testes. É importante ressaltar que, quando o navio é transportado para a escala do modelo, não só ele deve ser reduzido, como também todas as forças que o atinge. Em outras palavras, é necessário que ele atenda à relação de semelhança dinâmica, juntamente com o protótipo. Para que isso seja possível, é preciso também que o modelo tenha uma distribuição interna de pesos semelhante à de seu protótipo.

Nesse contexto, o modelo passa por uma prova de inclinação muito parecida com a realizada nos estaleiros, entretanto, adaptada para as dimensões reduzidas.

Essa prova visa, basicamente, estabelecer a posição do centro de gravidade do modelo, permitindo, assim, obter-se uma referência para os cálculos de estabilidade, o que possibilita a manipulação de suas condições de calado, compasso e banda, assim como o seu comportamento dinâmico.

Uma vez determinada a posição do centro de gravidade do modelo, é possível modificá-lo a fim de deixá-lo como seu protótipo. Para isso, o modelo é lastrado com barras de metal distribuídas pela sua estrutura.

Figura 33: Barras de metal sendo utilizadas como lastro em modelo



Fonte: (COOK, 2011, p.38).

A partir de então, o modelo e o protótipo passam a guardar entre si os requisitos de semelhança física, o que garante a fidelidade dos testes. Portanto, aquele está, agora, apto a ser utilizado.

4.3 Tipos de testes

Existem dois tipos de testes com modelos aplicados em tanque de provas: o *forced captive* e o *free-running*. Este tem o seu foco voltado para a realização de manobras reais a fim de avaliar a controlabilidade do protótipo, enquanto aquele é bastante usado no desenvolvimento de coeficientes a serem aplicados nas equações que realizarão a previsão do movimento do navio. Esses testes têm por objetivo permitir a análise dos três segmentos da hidrodinâmica dos navios: resistência e propulsão, comportamento dinâmico e manobrabilidade.

Os testes realizados no modo *free-running* são feitos a partir de um modelo com propulsão e governo próprios e similares aos do protótipo, com controle remoto e capacidade de registro de dados em função do tempo. Nesse tipo de teste, além dos sensores de acompanhamento dos sistemas de governo e propulsão, também são necessários outros capazes de determinar e registrar a posição do modelo em coordenadas no interior do tanque, assim como o seu rumo na superfície e, se desejado, o seu ângulo de banda. Dessa forma, ao se executar manobras específicas de testes iguais às realizadas com o navio em escala natural, como a curva de giro, é possível, a partir dos dados coletados, prever as características de manobrabilidade do protótipo.

Figura 34: Teste em modo free-running na Universidade de IOWA



Fonte: (<http://www.iuhr.uiowa.edu/shiphydro/>).

A fim de permitir a execução das manobras, o tanque utilizado nesse modo tem uma forma mais larga, diferentemente do convencional *towing tank* desenvolvido por Froude, como se pode observar na figura 34.

Com o propósito de se obter fidelidade às manobras executadas em escala natural, é necessário que se priorize alguns pontos no momento da iniciação das manobras. Primeiramente, a velocidade de avanço do modelo deve ser aquela correspondente à rotação de seu propulsor e, em seguida, ela deve ser começada de tal forma que a razão de guinada do seja nula, assim como o ângulo do leme. Vale ressaltar que, devido à dificuldade de concretização de uma manobra perfeitamente idêntica à do protótipo com o modelo, o caimento é deixado em segundo plano em relação aos pontos acima expostos como uma forma de adequação da realidade dos testes a uma maior precisão nos resultados.

Os testes do tipo *captive*, por sua vez, são realizados com o auxílio do mecanismo de movimento plano (PMM) ou um braço rotacional, atualmente menos usado. Em ambos os casos, o modelo é testado variando suas principais características, como o ângulo de deriva, a razão de guinada, as acelerações de

caimento e de cabeceio, a RPM do propulsor, o compasso, o calado e o ângulo de leme. Os dados coletados pelos sensores são, então, analisados, obtendo-se os coeficientes necessários às equações de movimento da embarcação.

A partir desse último método, é possível, por exemplo, determinar a resistência ao avanço do casco projetado. Para isso, reboca-se o modelo a diferentes velocidades e, pelas leituras nos dinamômetros, desenvolve-se a curva de resistência da embarcação, estabelecendo-se os coeficientes de arrasto dela nas mais variadas condições de calado e compasso. Esse teste é essencial à construção naval por ser uma das maneiras mais precisas de se obter dados para os cálculos de eficiência de combustível, assunto tão estudado atualmente.

Figura 35: Teste em modo *captive* do casco do Triple E



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

Contudo, o ideal seria executar-se também um experimento com o acoplamento de uma unidade propulsora ao modelo, como é feito no modo *free-running*. Trabalhando-se paralelamente com ambos os tipos de testes, temos resultados ainda mais precisos. Isso ocorre, pois, embora o modo *captive* nos forneça os coeficientes de arrasto com precisão, é no *free-running* que o propulsor

irá trabalhar sob a esteira do casco adotado, fornecendo, portanto, dados ainda mais precisos sobre os requisitos de potência daquela embarcação.

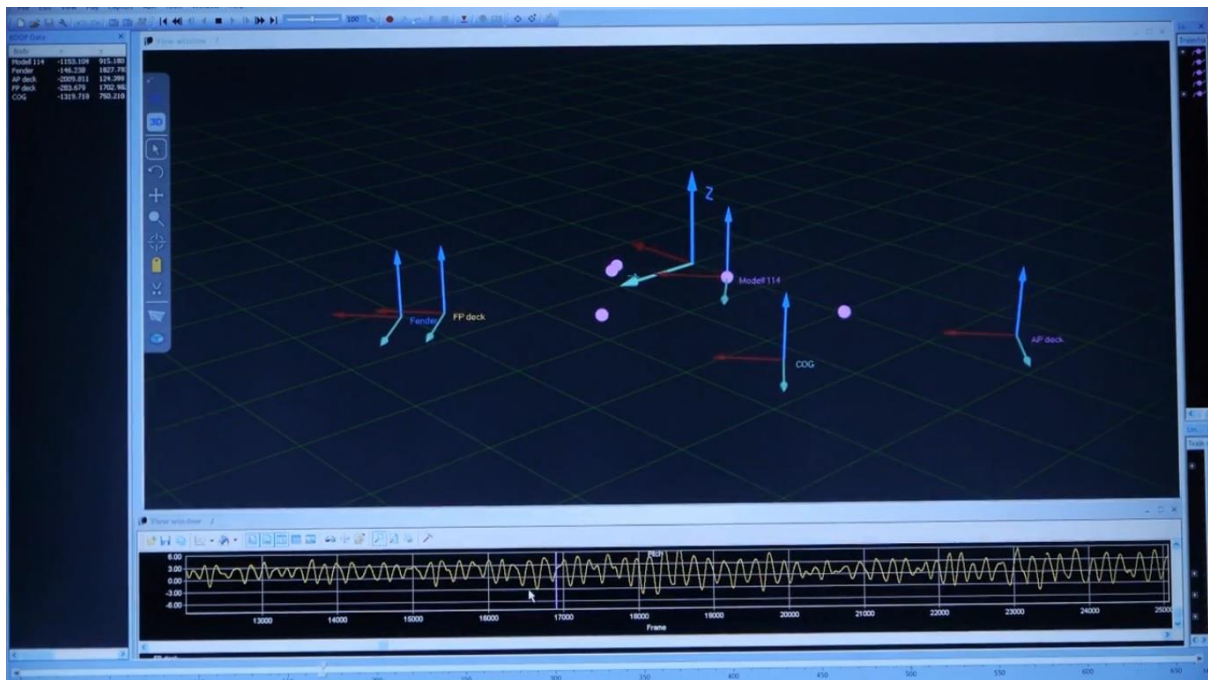
Figura 36: Mecanismos de propulsão e de governo instalados em modelo



Fonte: (<http://www.stadttowingtank.no/>).

O terceiro dos principais segmentos abordados pelos testes com modelos em escala reduzida é o do comportamento dinâmico. Esse teste visa simplesmente analisar o comportamento do navio nas ondas. Nele, o modelo é exposto a uma série de ondas, que podem atingi-lo de qualquer direção desejada, e tem todo o seu movimento registrado e analisado. Sendo assim, é possível prever, por exemplo, as condições de estabilidade dinâmica que o protótipo apresentará e verificar se estas estão de acordo com o projeto.

Figura 37: Acompanhamento do comportamento dinâmico



Fonte: (<http://www.stadttowingtank.no/>).

Apesar de muito eficientes, algumas dificuldades são encontradas na realização dos testes. A primeira está no fato do efeito da escala física adotada no modelo não atender a todos os fenômenos envolvidos, como já explicado nos capítulos anteriores. Cai-se então no mesmo erro que Froude cometia em seus ensaios, contudo agora é sabido o motivo causador dele, o que permite a aplicação de correções, sejam físicas – a exemplo dos apêndices simuladores de fluxo turbulento - ou simplesmente numéricas – como os coeficientes.

Outro ponto importante é que, por uma questão de redução de custos, normalmente utiliza-se o mesmo modelo dos testes no modo *captive* e *free-running*. Em virtude disto, são construídos modelos maiores, o que auxilia na redução das diferenças causadas pelo uso da escala, porém é preciso cuidado na execução do experimento devido à limitação das dimensões dos tanques de prova. Porém, essa limitação pode ser superada na execução de testes em águas abertas. Nesse caso, embora se tenha a interferência do ambiente local, ainda sim é possível executar os testes de propulsão e manobrabilidade, caso as condições não sejam tais que influenciem significativamente os resultados.

Figura 38: Teste em águas abertas

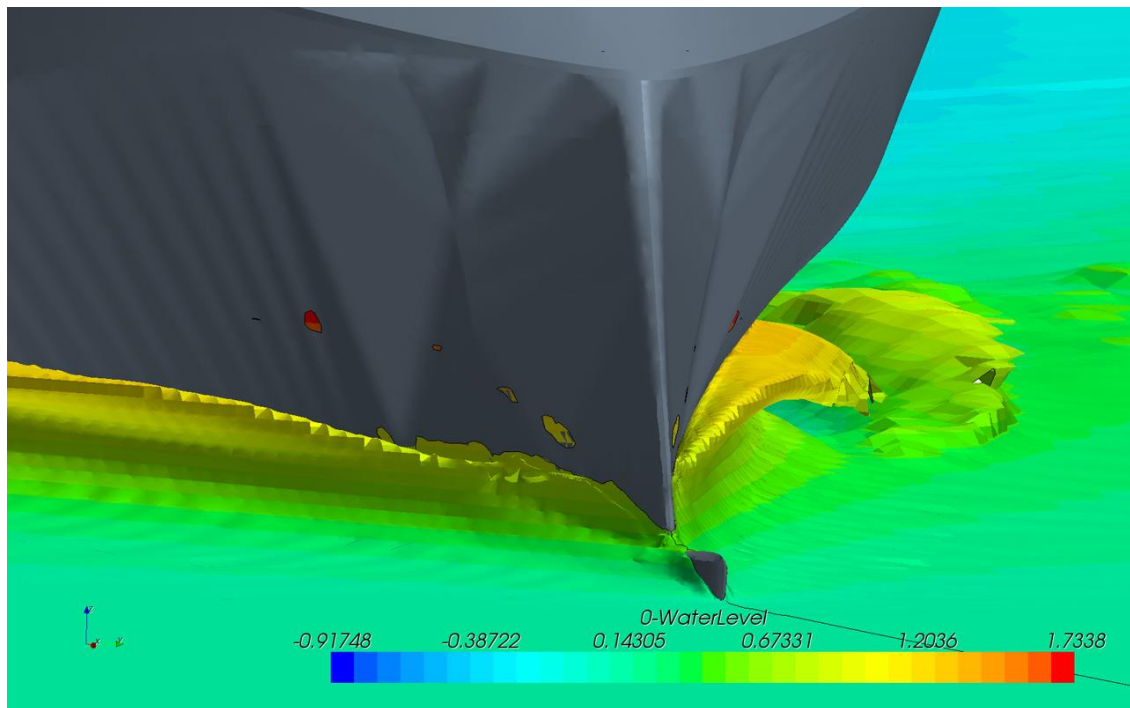


Fonte: (<http://www.stadttowingtank.no/>).

Além de todas as formas já citadas de avaliação de uma embarcação, existe a computação fluidodinâmica (CFD). Ela se apresenta na fase inicial do projeto como uma ferramenta bastante econômica, visto que, para a execução de um teste, não são necessários gastos com a construção de modelos físicos. Sendo assim, ela permite, por exemplo, a avaliação de vários projetos de casco a fim de determinar qual deles é o mais promissor para a embarcação em questão, sem a necessidade, ainda, de confecção de nenhum deles.

A CFD é usada para uma análise mais detalhada do fluxo, possibilitando a visualização do campo de pressões ao redor da embarcação. Por esse motivo, ela permite ao arquiteto naval diagnósticos mais claros e, conseqüentemente, soluções mais simples para os problemas de escoamento ao longo do navio, mas que exigiriam bastante tempo para que se fosse posto em prática o método experimental físico da tentativa e erro.

Figura 39: Análise por CFD da proa de um navio



Fonte: (<http://www.stadttowingtank.no/>).

Embora bastante eficiente, a CFD não é tão precisa como os testes convencionais na determinação de coeficientes e previsão de forças nos protótipo. Por isso, ela deve ser vista como um método auxiliar a esses testes com modelos físicos e não como uma substituta para eles. A combinação de ambos permite o aproveitamento das vantagens fornecidas pelas duas partes, possibilitando um melhor entendimento do efeito da escala nos modelos e a realização de previsões mais precisas para as forças em escala natural.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso visou esclarecer os princípios básicos utilizados no estudo dos fatores hidrodinâmicos de um navio, a fim de tornar mais simples um assunto que, a uma primeira vista, parece se apresentar com alto nível de complexidade. Foi também bastante ressaltada a dificuldade existente em transformar a realidade de um fluido em números que possam ser manipulados.

Embora complicado e aproximado, esse estudo permitiu grandes avanços na construção naval, provando possuir elevada eficiência. Por esse motivo é que hoje se têm disponíveis as várias ferramentas aqui citadas, sendo essa análise imprescindível a qualquer embarcação em fase de projeto e construção.

Da mesma forma em que se tem, atualmente, uma aplicação cada vez mais comum da CFD como mais um método de abordagem, pode-se afirmar que, em virtude das necessidades de mercado, todo o assunto tratado por este trabalho tende a sofrer inúmeras modernizações. Estas que possibilitarão um contínuo desenvolvimento da indústria naval de uma forma sustentável, sem deixar de lado a preocupação com o meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA, J. **Comparative Hydrodynamic Testing of Small Scale Models**. University Of New Orleans Theses and Dissertations, New Orleans, United States of America, n.864, p.1-45, 2008.
- ANDERSON, J. D. **Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications**. United States of America: McGraw-Hill, 1995. 544p.
- BERTRAM, V. **Practical Ship Hydrodynamics**. Oxford, England: Butterworth Heinemann, 2000. 280p.
- CLARK, I. C. **Ship Dynamics For Mariners**. First Edition. ed. London: The Nautical Institute, 2005. 300p.
- COOK, S. S. **Effects of headwinds on towing tank resistance and PMM tests for ONR Tumblehome**. 2011. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - University of Iowa, Iowa City, Iowa, 2011. Disponível em: <<http://ir.uiowa.edu/etd/2688>> Acesso em: 6 ago. 2014
- FERREIRA, A. B. H. **Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Positivo, 2009. 2120p.
- GJELSTRUP, P. **State-of-the-art Towing-Tank PIV and LDA systems**. 2009. 14f. Monografia (Bacharelado em Naval Engineering) - Dantec Dynamics A/S, Denmark, 2009.
- MANEN *et al.* **Principles of Naval Architecture: Volume II**. Second Revision. ed. Jersey City, NJ: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. 327p.
- WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. New York, NY: McGraw-Hill, 2003. 866p. **Australian Maritime College**. Disponível em: <<https://www.amc.edu.au/maritime-engineering/towing-tank>> Acesso em: 9 ago. 2014
- Blue Star Line**. Disponível em: <<http://bluestarline.com.au/>> Acesso em: 9 ago. 2014
- Discovery Channel**. Disponível em: <<http://www.discovery.com/>> Acesso em: 7 ago. 2014
- Edinburgh Desings**. Disponível em: <<http://www.edesign.co.uk/>> Acesso em: 5 ago. 2014
- Flanders Hydrolics Research**. Disponível em: <<http://www.watlab.be/en>> Acesso em: 9 ago. 2014
- Imperial War Museums**. Disponível em: <<http://www.iwm.org.uk/>> Acesso em: 31 jul. 2014

Making The Modern World. Disponível em:
<<http://www.makingthemodernworld.org.uk/>> Acesso em: 31 jul. 2014

Maritime Propulsion. Disponível em:
<<http://articles.maritimepropulsion.com/article/HHI-Plans-Ice-breaking-Iron-Ore-Carrier-to-Transit-Northwest-Passage-2077.aspx>> Acesso em: 11 ago. 2014

Stadt Towing Tank. Disponível em: <<http://www.stadttowingtank.no/>> Acesso em: 5 ago. 2014

Teekay Tankers. Disponível em: <<http://www.teekaytankers.com/>> Acesso em: 15 jul. 2014

The University of Iowa. Disponível em: <<http://www.iuhr.uiowa.edu/shiphydro/>>
Acesso em: 22 jul. 2014

Universidade de Brasília. Disponível em:
<<http://www.gffm.unb.br/index.php/br/linhas-de-atuacao/elementos-de-contorno>>
Acesso em: 6 ago. 2014

Wärtsilä. Disponível em: <<http://www.wartsila.com/en/>> Acesso em: 8 ago. 2014

Wikipédia. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/SS_Great_Eastern> Acesso em: 19 jul. 2014

World's Largest Ship. Disponível em: <<http://www.worldslargestship.com/>> Acesso em: 1 ago. 2014