

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

STHEFANE AZEVEDO DOS SANTOS SILVA

TESTES HIDRODINÂMICOS NA CONSTRUÇÃO DE NAVIOS MERCANTES

RIO DE JANEIRO

2016

STHEFANE AZEVEDO DOS SANTOS SILVA

TESTES HIDRODINÂMICOS NA CONSTRUÇÃO DE NAVIOS MERCANTES

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 (a): Prof. Eng. Hermann Regazzi Gerk

Engenheiro Químico

Especialista em Mecânica dos Fluidos

RIO DE JANEIRO

2016

STHEFANE AZEVEDO DOS SANTOS SILVA

TESTES HIDRODINÂMICOS NA CONSTRUÇÃO DE NAVIOS MERCANTES

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. Eng. Hermann Regazzi Gerke

Engenheiro Químico

Especialista em Mecânica dos Fluidos

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Dedico este Trabalho aos alunos da Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante e aos futuros oficiais da Marinha Mercante na esperança de contribuir em sua formação e aperfeiçoamento e fazer com que sejam excelentes profissionais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois, sem Ele, nada disso seria possível. Não posso deixar de agradecer àqueles que me deram a vida: pai e mãe, vocês são tudo para mim. Seu carinho, apoio e compreensão me trouxeram até aqui. Agradeço à minha irmã, meu exemplo, que sempre me inspirou. Agradeço à minha família em geral: tios, primos e avós por sempre me acolherem e motivarem. Agradeço aos meus amigos, mas em especial, Ivanielle, Juliane e Myllena, e ao meu namorado, Andrey, por estarem comigo nos momentos em que mais precisei. Gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Hermann Gerck Regazzi, não só por ter aceitado o pedido de orientação, mas também por ter ministrado com louvor o conteúdo deste trabalho.

“A excelência pode ser obtida se você se importa mais do que os outros julgam ser necessário; se arrisca mais do que os outros julgam ser seguro; sonha mais do que os outros julgam ser prático; e espera mais do que os outros julgam ser possível.”

(Vince Lombardi)

RESUMO

A construção de navios requer diversas etapas: desde a idealização do navio até a prova de mar, momento em que o desempenho do navio é testado. Dentre as principais fases, a avaliação hidrodinâmica do futuro navio deve ser realizada.

Os chamados testes hidrodinâmicos têm a função de determinar a possibilidade de construção de uma embarcação através de ensaios e previsões de aspectos como resistência, capacidade de manobra e propulsão.

O objetivo deste trabalho é caracterizar os métodos utilizados para a realização dos testes hidrodinâmicos em um navio mercante. Em termos de testes, serão abordados os métodos empíricos e estatísticos, os métodos experimentais em modelos de escala reduzida e de escala real e os métodos numéricos.

Visando exemplificar esses métodos, a resistência ao avanço foi escolhida como parâmetro hidrodinâmico relevante do comportamento de um navio determinado na fase de projeto preliminar, bem como as metodologias para o cálculo ou previsão desse.

Palavras-chave: Testes hidrodinâmicos, construção de um navio, resistência ao avanço, modelo em escala reduzida.

ABSTRACT

The construction of vessels requires several steps: since the idealization of the ship until the moment in which the performance of the ship is tested. Among the main stages, the future ship must have its hydrodynamic aspects analyzed.

The so-called hydrodynamic tests have the function to determine the possibility of building a vessel through testing and projections of aspects such as resistance, ability to maneuver and propulsion.

The objective of this study is to characterize the methods used for performing the hydrodynamic tests in a merchant vessel. In terms of testing, will be addressed the empirical methods and statistical data, the experimental methods in scale models and the numeric methods.

In order to exemplify these methods, resistance was chosen as a parameter relevant hydrodynamic behavior of the ship at the preliminary stage, as well as the methodologies for the calculation or estimate of this.

Keywords: hydrodynamic tests, ship construction, resistance, scale models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Espiral de projeto	12
Figura 2	Planos de referência	14
Figura 3	Comprimentos longitudinais	15
Figura 4	Medidas de boca, calado e pontal	16
Figura 5	Tanque de Provas de Reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)	22
Figura 6	Tanque de provas para ensaios em superfícies com gelo	23
Figura 7	Tanque de provas com geradores de ondas do <i>Australian Maritime Hydrodynamics Research Centre (AMHRC)</i>	24
Figura 8	Equações modelo para o escoamento dos fluidos incompressíveis em regime não-estacionário	26
Figura 9	Malhas colocada e defasada respectivamente	26
Figura 10	Decomposição da resistência	29
Figura 11	Sistemas de ondas da proa e da popa	30
Figura 12	Tipos de resistência de avanço	31
Figura 13	Arranjo geral do modelo em ensaios de resistência ao avanço	35
Figura 14	Proa bulbosa	39
Figura 15	Comparação entre as proas	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	GEOMETRIA DO NAVIO	14
3	TESTES HIDRODINÂMICOS	19
3.1	Métodos empíricos	19
3.2	Métodos experimentais	20
3.2.1	instalações laboratoriais	21
3.3	Simulações numéricas	24
4	RESISTÊNCIA DE AVANÇO	28
4.1	Decomposição da resistência de avanço	29
4.2	Leis de Semelhança	32
4.3	Ensaio de resistência em tanques de reboque	32
4.4	Previsão da resistência com séries sistemáticas e dados estatísticos	36
4.5	Resistências adicionais	37
4.5.1	método de Harvald	38
4.6	Resultados e otimizações	38
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

1 INTRODUÇÃO

O homem, por milhares de anos, atravessou o mar sem ao menos saber como e por que isso era possível. Os egípcios e os fenícios foram os primeiros povos a construir estruturas flutuantes semelhantes a embarcações que operavam no Mar Mediterrâneo em 7000 a.C.

Entretanto, foi no terceiro século d.C que os conceitos de flutuabilidade e estabilidade das embarcações ganharam vida a partir das pesquisas e estudos de Arquimedes. Desde então, considerando o princípio de Arquimedes interligando um corpo flutuante a forças hidrostáticas, diversos projetos e conceitos de embarcações foram desenvolvidos, variando dos mais convencionais aos mais sofisticados, os chamados AMVs (*Advanced Marine Vehicles*).

Embarcações são construídas com o objetivo de atender as necessidades de quem as demanda através de serviços específicos, que podem ser ou não comerciais. Caso seu fim seja comercial, a embarcação deve gerar lucro a seu proprietário ou armador. Mas, caso esteja empregada em um serviço sem fins comerciais, a embarcação estará ligada ao serviço público e, na maioria das vezes, estará sob controle do Estado

Atualmente, o transporte marítimo é o modal mais completo e eficiente, pois pode adequar-se ao tipo de carga a ser transportada, carrega grande quantidade de mercadoria, além de ser mais veloz e barato e menos poluente se comparado a outros modais. Sendo assim, visando atender as exigências de seu proprietário e as exigências acima citadas, houve a necessidade de se introduzir cada vez mais indicadores de eficiência que aprimoram o desempenho dessas embarcações.

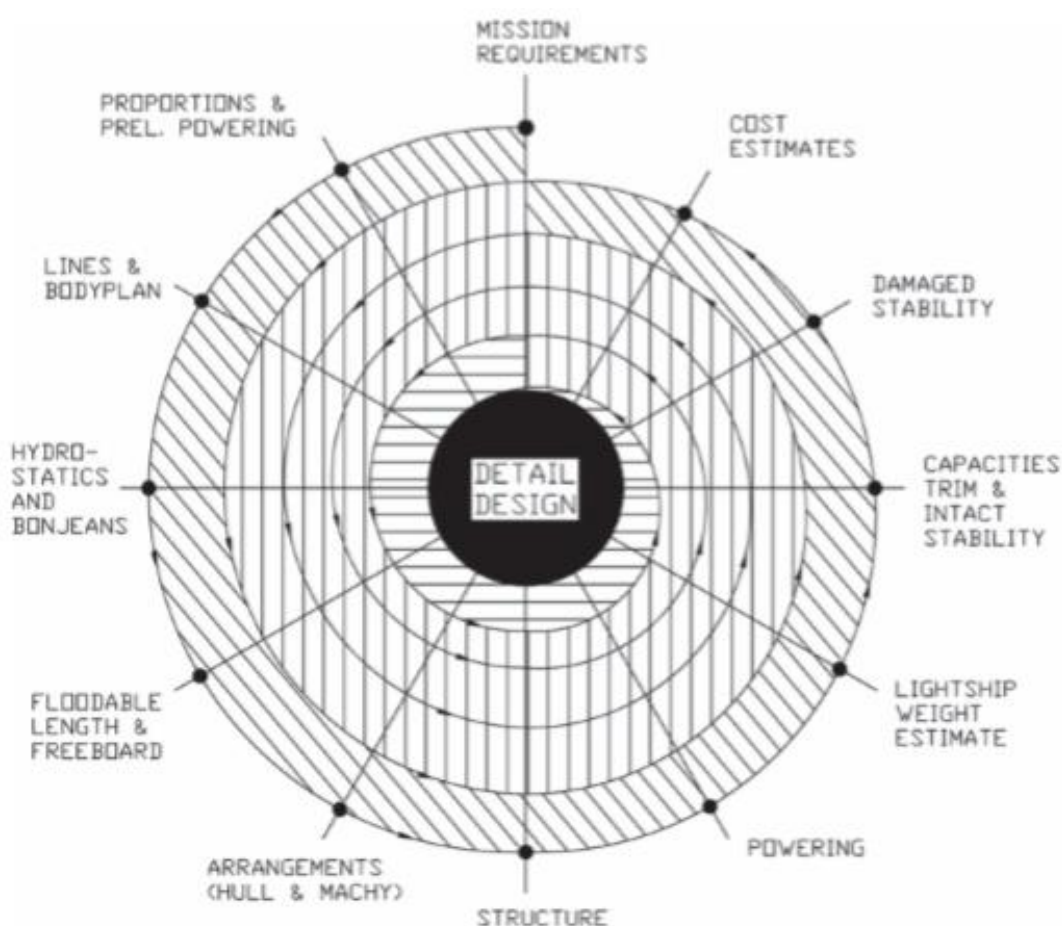
A construção de uma embarcação requer diversas variáveis que precisam ser bem analisadas e definidas ao longo do projeto. Segundo Saunders (1957), projetar uma embarcação envolve maneiras de pensar e planejar que, acopladas ao conhecimento, inteligência e compreensão, garantem um projeto ótimo.

Embora existam diversas embarcações para inúmeros propósitos, o processo de construção naval destas possui a mesma essência, visando objetivos comuns e critérios e exigências similares e correlatos. De acordo com Gillmer (1975), na

maioria dos projetos, há uma fase exploratória seguida da fase preliminar de projeto.

Entretanto, os procedimentos do projeto começam, de fato, com um processo progressivo e repetitivo, conhecido como espiral de projeto (*design spiral*). Nessa espiral, são avaliados coeficientes de forma, propulsão e resistência, tipo de maquinário, calado, boca, borda livre e outros parâmetros que podem variar dependendo do tipo de embarcação e preferências do cliente. Abaixo, a figura 1 demonstra uma espiral de projeto com a típica sequência de parâmetros.

Figura1 – Espiral de projeto



Fonte: GILLMER, Thomas C., Modern Ship Design, 1975.

Ainda de acordo com Gillmer (1975), a construção de uma embarcação está baseada em três fases distintas: a fase de viabilidade do projeto, a fase preliminar do projeto e a fase de contrato do projeto.

A fase de viabilidade é baseada em estudos e análises que mais se adequam à proposta inicial do projeto, ou seja, as exigências do dono da embarcação. Ainda,

como seu próprio nome indica, é a fase em que é determinado se o projeto é ou não viável. A fase preliminar é considerada a mais importante, visto que é nela que a maioria das características e identidade do navio é definida.

Por último, a fase de contrato é definida como a fase de preparação de planos e especificações para o financiamento do projeto e construção da embarcação. Outros autores ainda consideram uma quarta fase de projeto, a fase de projeto detalhado, que é posterior à fase de contrato e é definida como sendo a fase de preparação para as etapas de produção e instalação de equipamentos e estruturas (Misra, 2015).

A fase preliminar será a mais discutida neste trabalho, visto que é nela que são definidos os aspectos hidrodinâmicos da embarcação. Nessa fase, são realizados cálculos mais detalhados para determinar os principais parâmetros e as características de desempenho do navio, tais como seu maquinário e equipamentos. A partir disso, então, são preparados um plano geral e uma breve especificação da embarcação.

Devido à crescente competitividade do mercado e a demanda por embarcações com um alto nível de excelência, houve a necessidade de realizar os estudos hidrodinâmicos e de comportamentos estruturais por meio de métodos informatizados, que serão abordados ao longo do trabalho. A partir daí, então, os custos da construção começam a ser estimados (Misra, 2015).

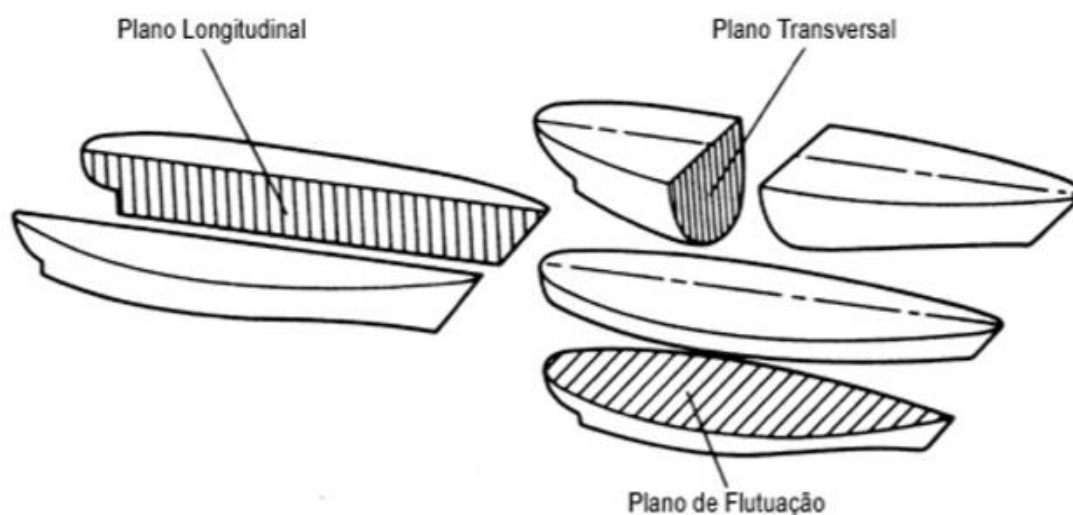
2 GEOMETRIA DO NAVIO

Antes de analisarmos o comportamento de uma embarcação, é preciso conhecer suas formas e estruturas. As dimensões de um navio são de suma importância para sua concepção, uma vez que afetam suas características hidrodinâmicas, sua resistência estrutural e sua capacidade de carga.

Quando determinadas, as dimensões formarão o plano geométrico do navio. Segundo Trindade (2012), o plano geométrico pode ser gerado através da deformação de um navio de referência, por modelo matemático para definição da forma em função de parâmetros do navio ou pela utilização de séries sistemáticas.

Conhecendo as dimensões do navio é possível determinar a forma de seu casco, que é tridimensional e, na maior parte dos casos, simétrica a um plano longitudinal do navio. Seu contorno, então, fica definido pela interseção de três planos ortogonais: o plano de flutuação de projeto, o plano longitudinal e o plano transversal.

Figura 2 – Planos de referência

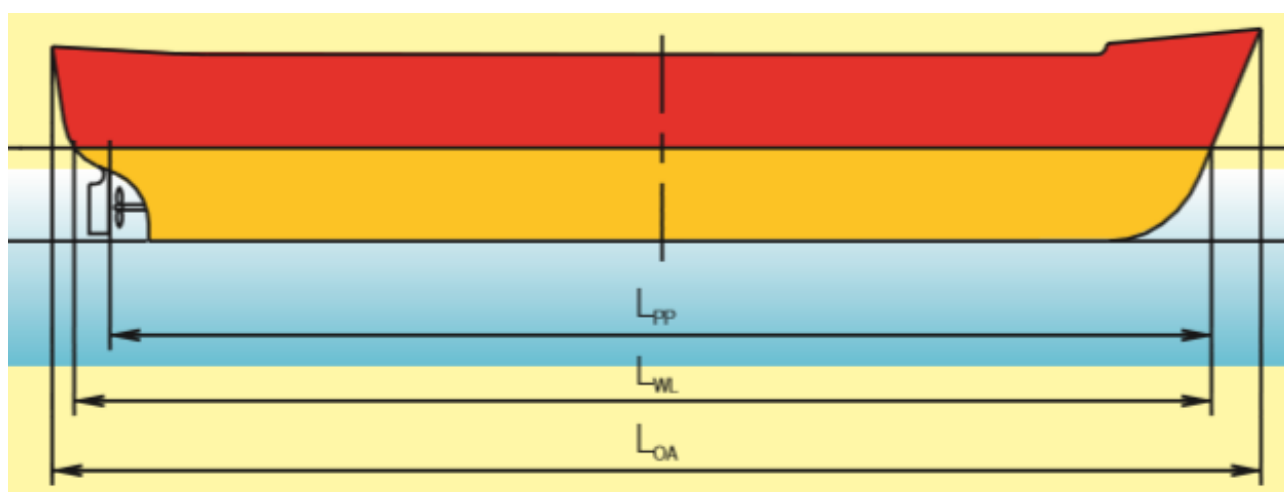


Os chamados planos de referência são os planos ortogonais em que são projetadas as linhas que interceptam a superfície do casco. O plano longitudinal ou plano diametral é o plano de simetria, que faz com que o navio seja visto de perfil quando cortado por ele. O plano de flutuação ou plano de superfície da água é perpendicular ao plano diametral. Já o plano transversal é um plano perpendicular ao plano diametral e ao de flutuação.

Além disso, a embarcação possui dimensões que variam conforme o tipo de navio, o tipo de casco e ainda o tipo de cálculo que se deseja realizar. Essas dimensões são chamadas de dimensões lineares. São consideradas dimensões lineares do navio: comprimento, boca, calado e pontal.

O comprimento é a medida longitudinal do navio e possui diversas nomenclaturas e classificações de acordo com o ponto de referência considerado da embarcação, como, por exemplo, comprimento de registro, comprimento de roda a roda, comprimento total e comprimento entre perpendiculares (L_{pp}), considerando o comprimento genérico do navio. O comprimento entre perpendiculares toma como referência as perpendiculares de vante e de ré do navio, ou seja, é a distância entre essas duas perpendiculares.

Figura 3 – Comprimentos longitudinais



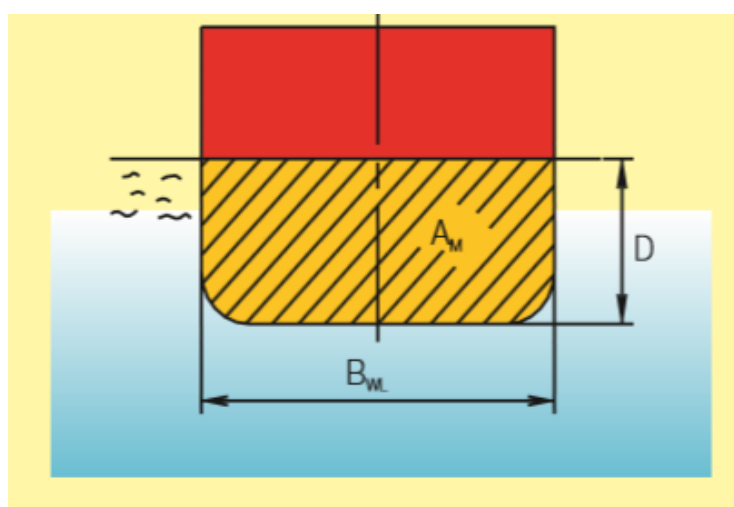
Fonte: TRINDADE, Jorge, Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de máquinas marítimas, 2012.

O comprimento transversal é definido como a boca da embarcação, tida como sua largura, e pode ser classificada como boca moldada e boca máxima.

A distância entre a superfície da água e a parte mais baixa da embarcação é chamada de calado e varia de acordo com a condição de carregamento dela, se completamente carregada ou com o mínimo de carga. Além disso, são calculados os calados a vante, a ré e à meia-nau.

O pontal é a distância vertical entre a linha reta da superfície do convés principal da embarcação e a parte mais baixa dela, medida sobre o plano diametral e a meia-nau.

Figura 4 – Medidas de boca, calado e pontal



Fonte: TRINDADE, Jorge, Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de máquinas marítimas, 2012.

A partir das principais dimensões também é possível definir os coeficientes de forma do navio que denotam a relação entre as diversas áreas e volumes da carena e as áreas e volumes das figuras planas ou sólidas. São de grande utilidade, uma vez que definem a finura do casco do navio e suas seções. Segundo Fonseca (2002), são os seguintes:

1) Coeficiente de bloco (C_b) – É a relação entre o volume deslocado e o volume da embarcação.

$$C_b = \frac{\nabla}{L_{pp} B T}$$

Onde: ∇ - o volume do deslocamento; L_{pp} - o comprimento entre perpendiculares; B - a boca máxima abaixo da linha d'água; e T - o calado médio da embarcação.

2) Coeficiente prismático (C_p) – Conhecido como coeficiente cilíndrico ou coeficiente longitudinal – É a relação entre o volume deslocado e a área imersa a meio navio e o comprimento entre as perpendiculares. Este coeficiente é utilizado principalmente para os cálculos de potência e velocidade do navio.

$$C_p = \frac{\nabla}{A_m L_{pp}}$$

Onde: ∇ - o volume da carena; A_m - área imersa a meio navio; e L_{pp} - o comprimento entre perpendiculares.

3) Coeficiente da seção a meia-nau ou seção mestra (C_{sm}) – É a relação entre a área da parte imersa da seção a meia-nau e a área do retângulo circunscrito:

$$C_{sm} = \frac{A_m}{BT}$$

Onde: A_m - área imersa na seção mestra; B - a boca na seção mestra; e T - o calado a meio navio.

4) Coeficiente da área de flutuação (C_{wp}) – É a relação entre a área de flutuação e a do retângulo que a circunscribe. Este coeficiente refere-se sempre à linha-d'água projetada.

$$C_{wp} = \frac{A_{wp}}{L_{wp} B}$$

Onde: A_{wp} - área do plano de flutuação; L_{wp} - o comprimento na linha de flutuação; e B - a boca máxima na linha de flutuação.

Como aplicação prática desses coeficientes na construção de um navio, podemos indicar a fórmula de Alexander que estabelece uma relação empírica entre o coeficiente de finura total do navio, a sua velocidade e o comprimento através da seguinte fórmula:

$$C_b = K - 0.5 \times \frac{V}{\sqrt{L}}$$

Entretanto, devido à especificidade de cada caso, o valor de K poderá alterar-se em relação ao valor inicialmente previsto durante o processo de otimização das características do navio.

Tabela 1 - Valores de K na fórmula de Alexander

Tipo de Navio	<i>K</i>
Petroleiro	1.13
Graneleiro	1.11
Carga geral	1.10
Navio de linha	1.05
Ferry	1.08
Rebocador	1.18

Fonte: TRINDADE, Jorge, Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de máquinas marítimas, 2012.

3 TESTES HIDRODINÂMICOS

Navios são estruturas de alto custo de construção e possuem tempo médio operacional de 25 anos. Visto isso, o atual desafio de engenheiros e especialistas responsáveis por projetos de embarcações é garantir eficiência operacional nos novos moldes tecnológicos a um custo que seja tão menor ou equivalente aos custos de construção anteriores. Ainda, possibilidade de aumentar a vida útil dessas estruturas.

Assim como qualquer estrutura de grande porte, um navio deve ser construído com precisão e cumprindo as especificações determinadas por quem o demandou. Para isso, são necessários diversos testes e avaliações que verifiquem se é possível ou não atender o que foi rascunhado e aprimorá-lo, se preciso.

Tentando prever o comportamento das embarcações, são realizadas avaliações que testem seus componentes e sistemas perante os esforços exercidos por forças da natureza, como vento, correnteza e ondas, tendo em vista o cenário de atuação dessas estruturas. Conclui-se, a partir daí, que para tal análise é necessário um complexo sistema de modelagem, processamento e visualização.

As metodologias para cálculo ou previsão dos parâmetros hidrodinâmicos abordados podem ser classificados como: empíricas ou estatísticas, experimentais e numéricas.

3.1 Métodos empíricos

Os métodos empíricos fundamentam-se na vivência do pesquisador no ambiente de seu objeto de estudo. Por esses métodos, é possível criar um embasamento para o conteúdo abordado ou um complemento à pesquisa teórica, materializando o conceito.

Para fins de testes hidrodinâmicos, esses métodos são realizados a partir de um modelo físico relativamente simples e na comparação entre as variáveis de entrada e saída, a chamada análise por regressão, tomando como base as características de apenas um navio ou diversos. O resultado obtido, então, é expresso sob a forma de tabelas, gráficos, constantes e fórmulas, por exemplo.

A aplicabilidade desses métodos permitiu resultados a partir da década de 40, quando os principais parâmetros do casco começaram a ser estudados e, como consequência, séries de “boas formas” de carena foram criadas. O casco do navio, então, é alterado.

3.2 Métodos experimentais

Os métodos experimentais propõem-se a comprovar a conceituação do objeto de estudo e, segundo Fonseca (2002), são realizados com o propósito de apreender as relações de causa e efeito através da eliminação de explicações conflitantes das descobertas realizadas. Através de testes e experimentos, assegura-se a veracidade dos dados coletados no estudo.

No campo da hidrodinâmica das embarcações, esse método é incorporado aos conceitos de resistência de Froude, que servem de base até os dias atuais. Utilizando um modelo de escala reduzida, os aspectos do navio na escala real começam a ser definidos. Entretanto, pode-se afirmar que, ainda que esses modelos sejam utilizados, existe uma relação empírica entre o modelo e o navio (Trindade, 2012).

Existem diversos tanques, bacias e túneis de testes e os diversos ensaios são realizados de acordo com métodos próprios do centro de estudo. De acordo com Trindade (2012), essa falta de uniformidade dificulta a padronização dos métodos de avaliação e torna, por vezes, difícil o reaproveitamento de qualquer dado proveniente de outras fontes.

Contudo, a falta de padronização permite que diversos outros estudos sejam realizados, como ensaios de manobrabilidade devido à presença de geradores de ondas em alguns tanques e testes de desempenho do hélice.

Em geral, os tanques de prova são divididos em tanques oceânicos, túneis de cavitação, túneis de vento e águas circulantes e tanques de reboque (Malta, 2010). As dimensões e características gerais estão relacionadas à funcionalidade do tanque, assim como os equipamentos que os compõem.

Visto a necessidade e importância de tais ensaios, a *International Towing Tank Conference* (ITTC), uma organização a nível mundial, estabelece aspectos

sobre a predição do comportamento hidrodinâmico de navios e instalações marítimas baseado no resultado de ensaios físicos e numéricos.

Vale ressaltar também, ainda de acordo com Trindade (2012), que alguns aspectos técnicos foram modificados, como técnicas experimentais não-intrusivas, a exemplo a técnica *Laser-Doppler Velocimetry*, que, dentre outras funções, mede o campo de velocidade e gera melhorias ao projeto de hélice do navio; o padrão do comportamento das ondas geradas pelo modelo para estimar a resistência de ondas; e a possibilidade de medir as grandezas relacionadas à propulsão da embarcação, como seu impulso.

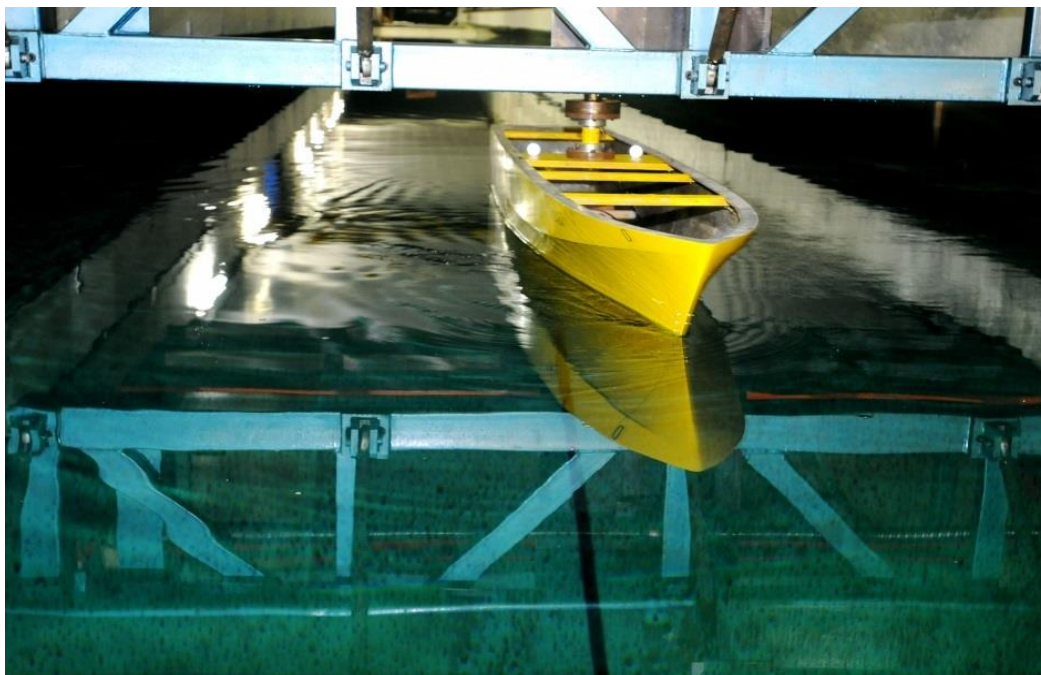
3.2.1 Instalações laboratoriais

As instalações laboratoriais abrangem tanques, bacias e túneis e servem para a realização de testes e ensaios das embarcações e, muitas vezes, instalações offshore. Abaixo, serão apresentados três centros de estudo e experimentos conhecidos mundialmente.

a) Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Atualmente, no Brasil, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) possui instalações que permitem o desenvolvimento de novas soluções para o transporte e indústria marítimos. Com sede no estado de São Paulo, esse instituto conta com tanque de provas de reboque com 280 m de comprimento, túnel de cavitação e túnel de vento de 40 m de comprimento, todos equipados com tecnologia de ponta, visando resultados precisos e de alto desempenho. Ademais, são realizados testes como de desempenho propulsivo, manobrabilidade e resistência de ondas.

Figura 5 – Tanque de Provas de Reboque do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)



Fonte: <http://www.ipt.br> (2016).

b) *Hamburg Ship Model Basin*

A *Hamburg Ship Model Basin* ou, simplesmente, HSVA é um centro de pesquisas localizado na Alemanha, que estuda e elabora novas soluções para a indústria marítima. Suas instalações contam com tanque de provas de reboque com 300 m de comprimento e equipado com geradores de ondas multidirecionais e túnel de cavitação, chamado HYKAT. Além disso, esse centro conta com um singular tanque de provas de gelo. Dentre os principais testes realizados estão manobrabilidade, resistência de ondas, desempenho propulsivo e testes específicos para regiões com gelo.

Figura 6 – Tanque de provas para ensaios em superfícies com gelo



Fonte: <http://www.hsva.de> (2016).

c) *Australian Maritime Hydrodynamics Research Centre*

A Tasmânia conta com um dos mais completos e sofisticados centros de pesquisa e ensaios hidrodinâmicos da atmosfera marítima, o *Australian Maritime Hydrodynamics Research Centre* (AMHRC). Esse centro faz parte da Universidade da Tasmânia e conta com tanque de provas de reboque com 100 m de comprimento, tanque provas com geradores de ondas com 35 m de comprimento, além de túnel de cavitação e um túnel de água circulante. Dentre os principais testes realizados estão resistência, escoamento, propulsão e capacidade de manobra.

Figura 7 – Tanque de provas com geradores de ondas do *Australian Maritime Hydrodynamics Research Centre (AMHRC)*



Fonte: <http://www.amc.edu.au> (2016).

3.3 Simulações numéricas

As simulações numéricas, segundo Pegden (1990), são uma forma de projetar um modelo computacional tomando como base um sistema real e conduzir testes e ensaios com este modelo visando entender seu comportamento e forma de operar. Essas simulações podem substituir testes de alto grau de periculosidade e eventualmente detectar problemas de segurança, prevenindo graves acidentes. Ainda é possível, executar testes numéricos de situações que não poderiam ser reproduzidas em laboratório (Anderson, 1995).

Com as simulações numéricas, é possível o relacionamento com diversas simulações simultaneamente e o não monitoramento do processo durante curtos intervalos de tempo, diferente do ocorrido em métodos realizados em laboratórios. Contudo, as simulações numéricas apresentam grande complexidade matemática devido as equações de conservação, pois são fundamentalmente compostos de um conjunto ou sistema de equações diferenciais parciais.

O sistema de equações diferenciais parciais, dependendo do tipo de

escoamento, pode ser acrescido de equações de estado, leis de mistura e equações para turbulência, por exemplo. O comportamento matemático de tais sistemas de equações diferenciais pode assumir características matemáticas distintas, como sistemas hiperbólicos, parabólicos ou elípticos (Maliska, 1995).

Segundo Ferziger (1999), as técnicas de solução numéricas aplicadas, assim como as condições de contorno impostas aos escoamentos, dependem intrinsecamente da classificação do sistema de equações diferenciais parciais.

Atualmente, os computadores que processam tais dados possuem a capacidade de reproduzir numericamente resultados que se aproximam, com razoável precisão, dos obtidos experimentalmente. Dentre os mais conhecidos, estão *SHIPFLOW*[®] (FLOWTECH, 1993), *WAVERES* (MARINTEK, 2001) e *CFX* (ANSYS, 2008) (Ribeiro, 2009).

No campo hidrodinâmico, as simulações numéricas voltam-se para a Dinâmica dos Fluidos Computacional, ou *Computational Fluid Dynamics* (CFD), que analisa escoamentos. A Dinâmica dos Fluidos Computacional surgiu com o objetivo de otimizar o tempo de projeto, visando-se gastar menos tempo e quantidade de testes.

Ainda que seus resultados não sejam totalmente realistas, o CFD permite a análise da resistência do casco da embarcação ou da força propulsiva desta (Trindade, 2012) Além disso, permite a análise e previsão de riscos que não podem ser reproduzidos ou gerados.

De acordo com Trindade (2012), o escoamento dos fluidos incompressíveis em regime não-estacionário é modelado pelas seguintes equações: Equação da Continuidade, Equação da Conservação da Quantidade de Movimento, Equação de Conservação da Energia em sua forma simplificada

Figura 8 – Equações modelo para o escoamento dos fluidos incompressíveis em regime não-estacionário

Equação da continuidade,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Equação de conservação da quantidade de movimento,

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \rho b_i$$

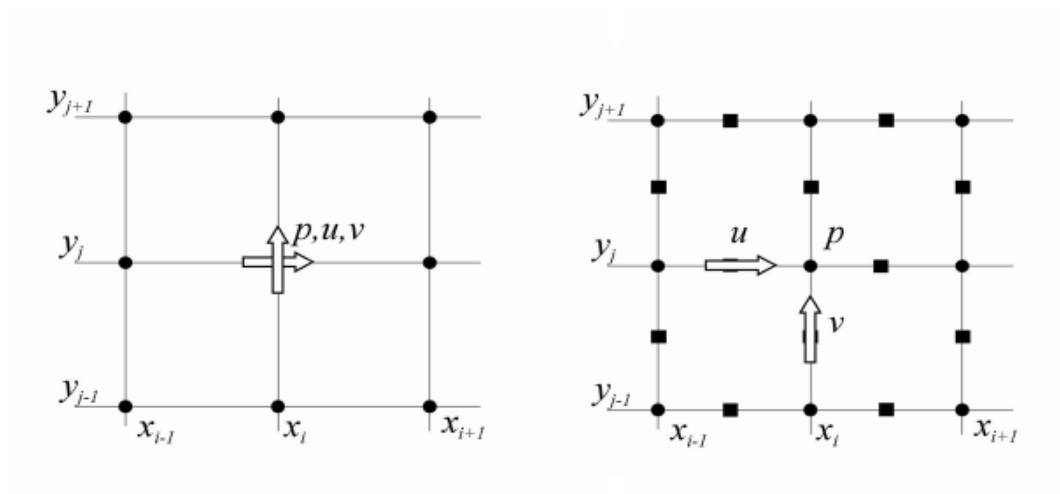
Equação de conservação da energia (forma simplificada)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial (\theta u_j)}{\partial x_j} = \frac{\kappa}{\rho c} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j}$$

Fonte: TRINDADE, Jorge, Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de máquinas marítimas, 2012.

As equações, então, são descritas no espaço como sendo malhas, podendo ser malhas defasadas ou malhas colocadas. Nelas estão contidas as variáveis e suas posições características.

Figura 9 – Malhas colocada e defasada respectivamente



Fonte: TRINDADE, Jorge, Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de máquinas marítimas, 2012.

Trindade (2012) ainda ressalta que ambas malhas possuem vantagens e desvantagens, dentre elas as relacionadas a alta complexidade de programação,

fronteiras do problema e solução para o acoplamento pressão-velocidade. Além disso, o autor cita que, após a escolha da malha, deve-se decidir qual método de solução deverá ser aplicado. Os métodos numéricos tradicionais para resolução são: o Método das Diferenças Finitas (MDF), empregado na área da mecânica dos fluidos; o Método dos Elementos Finitos (MEF), explorado na área de engenharia estrutural na solução de problemas de elasticidade; e o Método dos Volumes Finitos (MVF) (Menezes, 2012).

4 Resistência de avanço

Resistência de uma embarcação ou, resistência de avanço, a uma velocidade constante é a força necessária para rebocar a embarcação nessa velocidade em águas tranquilas, ou seja, em águas com pouca incidência de ondas. Mais especificamente, a energia necessária para movimentar a embarcação a dada velocidade é denominada potência efetiva ou potência de reboque (Trindade, 2012). A potência efetiva é dada por:

$$Pe = V R_T$$

Em termos de resistência de uma embarcação, além de seu valor absoluto, é preciso também calcular sua relação com outro valor, em termos de semelhança dimensional (Trindade, 2012). Para tal, abaixo será apresentada a resistência de avanço de uma embarcação considerando a sua análise dimensional.

A resistência do navio está diretamente ligada a seus próprios elementos, como velocidade e dimensões lineares; as características do fluido em que este se encontra, como massa específica do fluido e viscosidade cinemática do fluido; e à aceleração da gravidade. Portanto, sua fórmula física apresenta-se da seguinte maneira:

$$R_T = V^a L^b \rho^c \nu^d g^e$$

Para a fórmula de resistência total do navio, tomando como referência uma constante dimensionalmente semelhante, coeficiente de resistência, tem-se:

$$c_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho S V^2}$$

Deve-se ainda ressaltar que a resistência de avanço está interligada aos estudos e conceitos de Froude e Reynolds através dos grupos adimensionais. Esses grupos são designados pelos número de Froude (Fr) e número de Reynolds (Re).

Definido como a razão entre as forças de inércia e as forças gravitacionais, o número de Froude é utilizado quando se deseja determinar a resistência de um corpo movendo-se a determinada velocidade em um fluido. O número de Reynolds é encontrado a partir da razão entre as forças inerciais e as forças viscosas e é esse o parâmetro para se determinar a característica do fluxo em um fluido. Em suma, o número de Froude é utilizado quando as forças gravitacionais são predominantes e

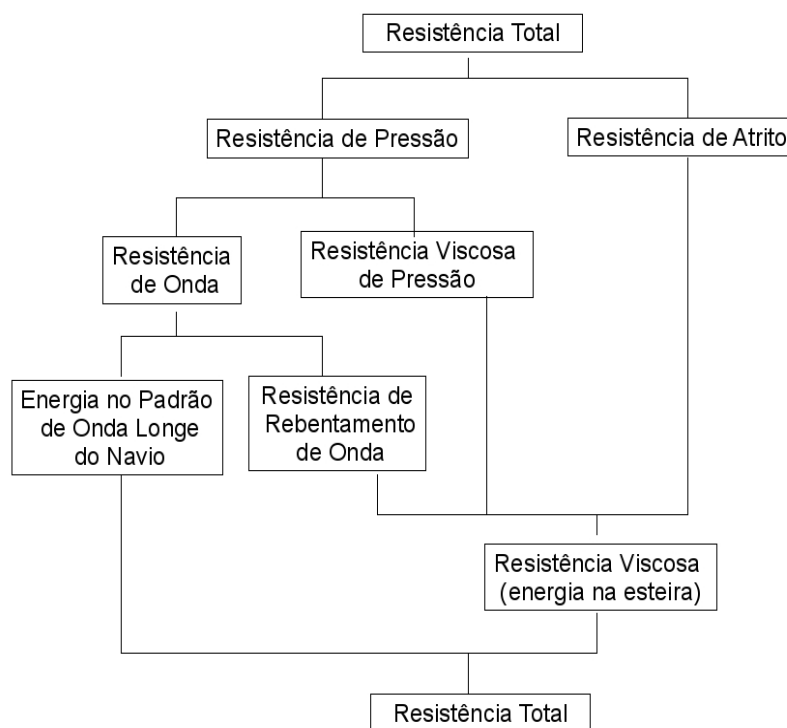
o número de Reynolds é utilizado quando as forças viscosas são as predominantes no sistema.

4.1 Decomposição da resistência de avanço

A resistência total de avanço é dividida em três componentes: Resistência de Onda, Resistência Friccional e Resistência de Pressão Viscosa.

De acordo com Trindade (2012), além da condição de carena simples em águas tranquilas, ainda devem ser considerados termos adicionais de resistência, como resistência aerodinâmica na área emersa do casco e superestrutura do navio, resistência adicional de ondas incidentes no casco e superestrutura e resistência devido aos apêndices do casco.

Figura 10 – Decomposição da resistência



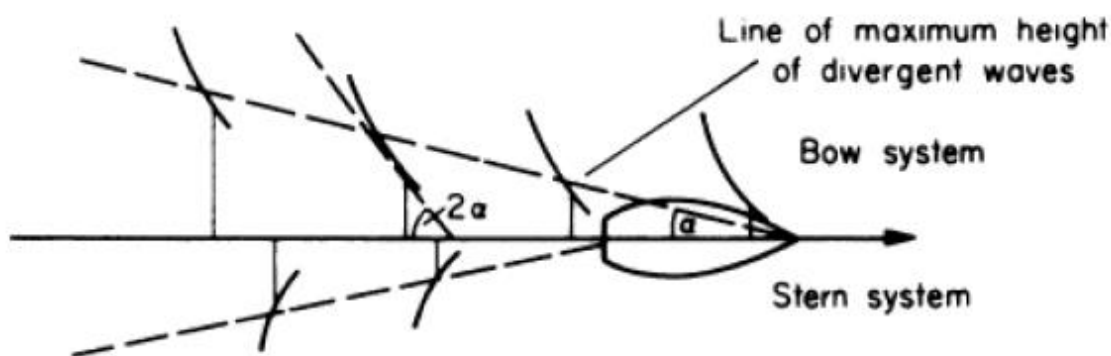
Fonte: TRINDADE, Jorge, Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de máquinas marítimas, 2012.

A resistência de ondas é resultado da reação das ondas ao atingirem o casco do navio, formando uma região “ondosa”, parte pelo efeito da difração das ondas no

costado e parte por efeitos indiretos. Essa formação, entretanto, é imperceptível a baixas velocidades, sendo somente expressiva a partir de uma dada velocidade. Além da dependência com a velocidade, a região formada também está relacionada ao formato da carena, portanto, diretamente interligada ao coeficiente de bloco da embarcação.

Para um navio deslocando-se em alta velocidade, a formação de ondas é constituída por um sistema de proa e um sistema de popa e cada um desses sistemas é formado por ondas transversais e ondas divergentes. Abaixo, esses sistemas são ilustrados.

Figura 11 - Sistemas de ondas da proa e da popa



Fonte: TRINDADE, Jorge, Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de máquinas marítimas, 2012.

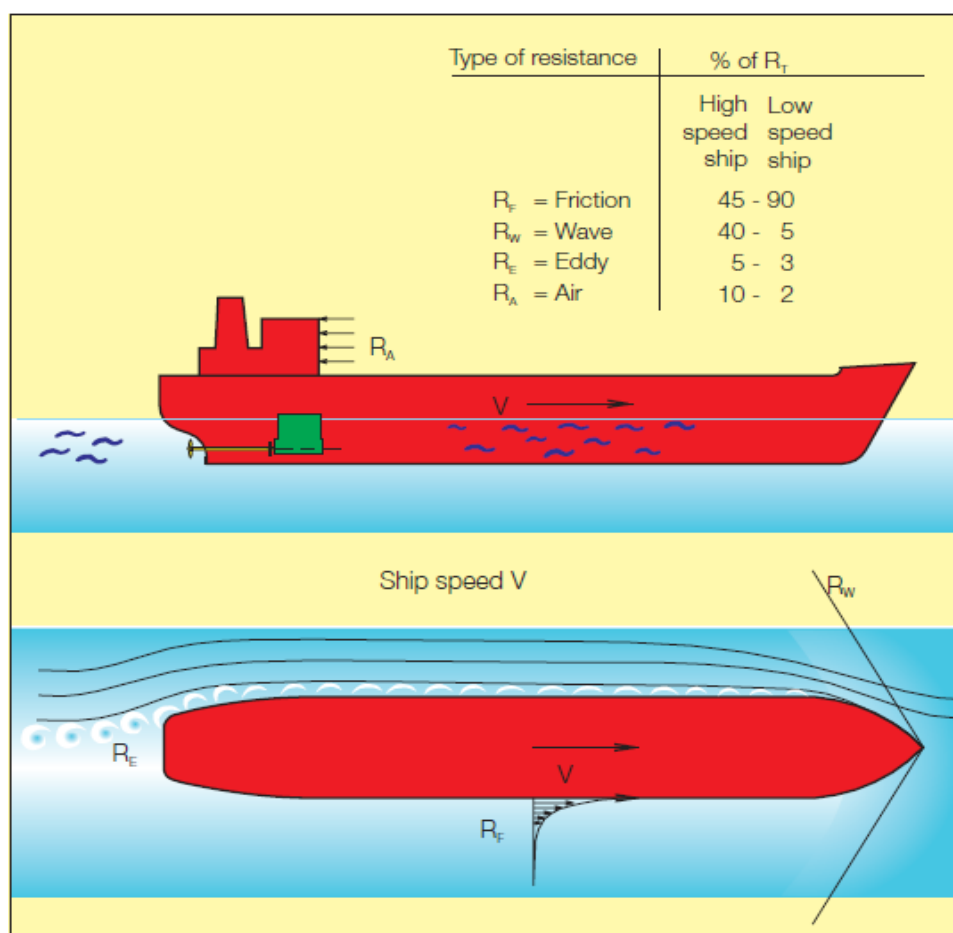
A resistência friccional provém do movimento que a embarcação realiza em um fluido viscoso, que, neste caso, é a água. Além disso, essa resistência pode ser aproximada pela resistência de uma placa plana (Trindade, 2012). A resistência friccional do casco do navio depende do tamanho das suas obras vivas, ou seja, da região abaixo da superfície da água; e do coeficiente de resistência (Harvald, 1983). A fricção aumenta conforme o casco do navio fica mais áspero, resultado de incrustações causadas por organismos marinhos e são chamadas popularmente de “fouling”.

De acordo com Harvald (1983), a resistência friccional representa parte considerável da resistência de avanço total do navio, cerca de 70 a 90%. Isso ocorre em

embarcações que apresentam baixa velocidade, como navios-tanque e navios de carga geral. Para embarcações destinadas à alta velocidade, como navios de passageiros, a resistência friccional pode representar menos de 40% da resistência total.

A resistência de pressão viscosa é resultado das diferenças de pressão que atuam no casco devido os efeitos viscosos do escoamento, ou seja, devido à geração de vórtices no casco e ao aumento de espessura da camada limite. Segundo Trindade (2012), para que o escoamento seja ideal, a pressão exercida na popa deve ser igual à pressão exercida na proa, ou seja, a força resultante deve ser nula. Entretanto, os efeitos viscosos reduzem a pressão exercida na popa do navio na prática. Além disso, os aspectos concernentes a esse tipo de resistência são condicionados ao formato do casco do navio.

Figura 12 – Tipos de resistência de avanço



Fonte: TRINDADE, Jorge, Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de máquinas marítimas, 2012.

4.2 Leis de Semelhança

Quando se deseja construir uma embarcação, é necessário realizar uma série de ensaios que verifiquem a possibilidade de construção de tal projeto. Para que isso ocorra, então, é necessário realizar uma comparação entre o modelo real e o modelo reduzido, que devem ser fisicamente semelhantes.

Para o estudo e análise de resistência dos modelos, são consideradas três formas de semelhança: semelhança geométrica, semelhança dinâmica e semelhança cinemática.

Segundo Trindade (2012), semelhança geométrica é a razão constante entre qualquer dimensão linear do modelo e sua dimensão real correspondente, como boca, calado e comprimento do navio. Essa razão é conhecida como Fator de escala. A semelhança geométrica também é conhecida por semelhança de forma.

A semelhança dinâmica, conhecida como semelhança das forças, acontece quando os valores absolutos das forças atuantes em um sistema estão em uma razão fixa. Em um navio, atuam as forças de inércia, forças gravitacionais e as forças de atrito entre as camadas da água.

A semelhança cinemática, conhecida como semelhança do movimento, ocorre quando há semelhança de comprimentos e semelhança entre intervalos de tempo, ou seja, a existência de uma razão entre o tempo na escala real e o tempo na escala do modelo. Conseqüentemente, a partir da análise da semelhança geométrica e do tempo, os fatores velocidade e aceleração de ambas as escalas podem ser determinados (Trindade, 2012).

4.3 Ensaios de resistência em tanques de reboque

Ensaios experimentais mostram-se bastante expressivos para a determinação de um projeto ótimo. Visto isso, os ensaios com modelos em escala reduzida em tanques de reboque são de suma importância para a avaliação hidrodinâmica do navio.

Todavia, os ensaios em um tanque de provas de reboque se voltam para os estudos de resistência ao avanço e reproduzem o comportamento do navio em

águas calmas e a geração de ondas através de seu modelo reduzido. Vale ressaltar que, os resultados obtidos são essenciais para a determinação da potência necessária para rebocar o navio e, após as devidas extrapolações, a potência necessária para dimensionar o seu sistema propulsivo (Muñoz, 2011).

Os testes devem ser realizados de tal forma que o modelo e o navio possuam comportamentos semelhantes e os resultados obtidos para o modelo possam ser extrapolados para a escala real (Trindade, 2012). Para que isso ocorra, os ensaios devem respeitar a igualdade do número de Froude.

De acordo com a lei de semelhança de Froude, corpos geometricamente semelhantes de tamanhos diferentes terão o mesmo coeficiente de resistência (C_t) ao se deslocarem com os mesmos parâmetros. A semelhança ocorre, porém, para os casos em que o modelo e o navio forem ensaiados no mesmo fluido.

O modelo apresenta uma estrutura rugosa em seu revestimento para estimular artificialmente a transição da camada limite de laminar para turbulenta e encontra-se mais próxima de sua proa (Trindade, 2012). Por ser um modelo em pequena escala, o número de Reynolds é duas ordens de grandeza menor em sua escala quando comparada à escala do navio; mais especificamente, o modelo apresenta, geralmente, escala de 10^7 e o navio, 10^9 . Entretanto, devido à falta de continuidade do número de Reynolds durante o ensaio, são necessárias correções empíricas ao final do teste.

Vale ressaltar ainda que, devido ao escoamento turbulento ao redor do casco do navio, é importante tentar reproduzir esse regime no modelo através de estimuladores de turbulência. Os estimuladores têm a função de estabilizar a resistência devido ao atrito no modelo, além de garantir que os resultados sejam uniformes a partir de modelos de diferentes fatores de escala (Muñoz, 2011). Há quatro tipos de estimuladores: pinos de turbulência, cabos verticais, faixas de areia espalhada e triângulos Hama.

Nos ensaios de resistência ao avanço, o modelo é colocado sobre um sistema que se desloca ao longo do comprimento do tanque, o chamado carro dinamométrico, para obter as forças contrárias ao movimento, no caso, as “resistências do avanço”. Além disso, o sistema deve ser capaz de simular o movimento de avanço e re-

cuo, caturro e arfagem, sendo limitado aos outros três restantes. As forças, então, são medidas através de sensores de força.

De acordo com Muñoz (2011), os testes devem ser realizados sob condições ideais de profundidade, sem simulação de ondas ou vento e em condições de temperatura média, de tal modo que o modelo possa ser testado com e sem os apêndices correspondentes para a determinação dos coeficientes de resistência adicional.

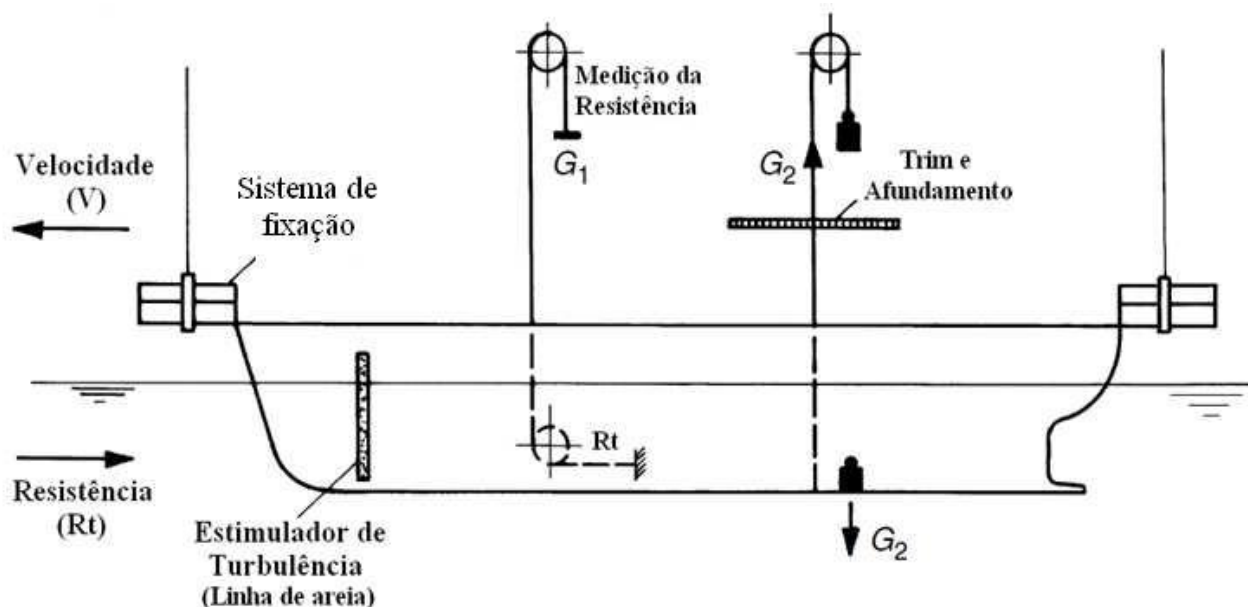
Muñoz (2011) ainda ressalta a importância das calibrações e devidas manutenções aos equipamentos, como sensores de velocidade e gerador de ondas, que devem ser realizadas com frequência, uma vez que esses equipamentos são de suma importância para uma boa simulação.

São valores usualmente utilizados pelos centros de estudos para a determinação dos parâmetros para os ensaios com modelo reduzido em tanques de reboque: comprimento entre $L_{mín} = 1\text{ m}$ e $L_{máx} = 12,2\text{ m}$; velocidade de acordo com a velocidade do carro dinamométrico, que pode variar de $V_{mín} = 1\text{ m/s}$ e $V_{máx} = 3\text{ m/s}$; e viscosidade cinemática correspondendo a $\nu = 1,140 \times 10^6$ (ITTC, 2008).

A escolha dos equipamentos varia de acordo com parâmetros específicos e individuais de cada ensaio, como dimensão do modelo reduzido por exemplo. Geralmente, os equipamentos utilizados em um tanque para a simulação são: gerador de ondas, carro dinamométrico, absorvedor de ondas e sistema de aquisição de dados e instrumentação.

A ITTC determina que o modelo deve obedecer as devidas medições de trim e afundamento, o apropriado cálculo de deslocamento e a colocação dos respectivos simuladores de resistência. A convenção ainda determina que os parâmetros mais importantes a serem medidos no teste são velocidade do modelo, resistência total, trim e temperatura d'água.

Figura 13 – Arranjo geral do modelo em ensaios de resistência ao avanço



Fonte: MUÑOZ, Jaime M. M. S., Estudo de uma metodologia para o dimensionamento de um tanque de provas do tipo reboque, 2011.

O próximo passo consiste no reboque do modelo a uma velocidade constante, a partir de um período de aceleração e estabilização do sinal (Muñoz, 2011). Após, determina-se o número de Reynolds correspondente à velocidade estabelecida para o ensaio e, a partir dele, é possível determinar o coeficiente de resistência ao atrito do modelo. Com o coeficiente de resistência ao atrito estabelecido, é possível calcular a resistência ao atrito do modelo.

Com os conceitos de semelhança de Froude, determina-se a resistência total do modelo e separam-se as resistências de atrito e residual. Através da lei de semelhança, o valor do coeficiente de resistência residual será o mesmo tanto para o modelo quanto para o navio e, como consequência, é possível extrapolar a resistência total para o navio calculando uma nova faixa de velocidade que devem satisfazer a relação do número de Froude.

De acordo com Muñoz (2011), com as novas velocidades, calculam-se os novos números de Reynolds e após calcula-se o coeficiente de resistência ao atrito para o navio. O resultado da soma da resistência residual obtida no ensaio será a resistência total.

Ao final do ensaio, a resistência do modelo precisa ser extrapolada de forma a se obter uma estimativa da resistência do navio, agora em escala real (Trindade, 2012). Os principais métodos de extrapolação são: método ITTC 1957, método de Hughes/Prohaska, método ITTC 1978 e método Geosim de Telfer. Atualmente, porém, o mais utilizado é o método ITTC 1978.

O método ITTC 1978 é o mais preciso que os métodos ITTC 1957 e Hughes/Prohaska, sendo uma modificação do último. Esse método inclui a resistência do ar, além de considerar também o fator de forma para a previsão do coeficiente de resistência total do navio.

4.4 Previsão da resistência com séries sistemáticas e dados estatísticos

Para a fase preliminar do projeto de um navio, podem ser utilizados métodos aproximados de previsão de resistência baseados em ensaios de séries sistemáticas ou pela regressão estatística de dados do modelo e do navio (Trindade, 2012).

A série sistemática, para este caso, é o conjunto de formas de carena em que se provocou a variação sistemática dos parâmetros de forma. Essa variação é feita baseada na “forma mãe”, ou *parent form*. Trindade (2012) trata os resultados obtidos por esse ensaio como o fator determinante de um coeficiente adimensional de resistência para as formas de carena contida ou interpolada na série.

Diversas séries foram criadas ao longo dos anos, com destaque à série de Taylor que mediu 80 modelos e, a partir do cruzador “Leviathan” como *parent form*, determinou, por variação sistemática, dados referentes à razão entre o comprimento e a raiz cúbica do deslocamento, à razão entre a boca e o calado e ao coeficiente prismático. Mais tarde, Gertler alterou alguns dados e criou diagramas de resistência residual.

Outra série de grande importância para navios mercantes é a série de Todd, ou “série 60”, que consta de cinco *parent forms* para a determinação de coeficiente de espessura e cada uma dessas *parent forms* possui variações de razão entre o comprimento e a raiz cúbica do deslocamento, razão entre a boca e o calado e coeficiente prismático.

O método de previsão de resistência com dados estatísticos pode ser exemplificado pelo método de Holtrop e Mennen. Esse método conta com uma extensa base de dados que abrange diversos tipos de navio, sendo aplicado para a análise qualitativa da resistência de avanço. De acordo com Trindade (2012), o método baseia-se na regressão estatística de resultados dos ensaios dos modelos e resultados de provas de mar dos navios.

4.5 Resistências adicionais

Na prática, devem ser consideradas condições que não são levadas em consideração em um ensaio de modelo reduzido, como presença de apêndices da carena, vento, profundidade local, condições do mar e rugosidade do casco ao longo de sua vida útil. Para aproximar o modelo reduzido à escala real, então, são utilizadas correções empíricas baseadas em pressupostos físicos (Trindade 2012).

Os apêndices do casco contribuem para o aumento da superfície molhada do navio e, simultaneamente, alteram seu fator de forma do casco. O escoamento em torno dos apêndices é devido as forças viscosas, logo, seriam necessárias condições de semelhança de Reynolds. Então, a determinação da resistência nesse caso é através de ensaios com e sem apêndices. Seu valor é obtido descontando a resistência de atrito resultante da variação da superfície molhada da resistência verificada.

Tabela 2: Valores, em porcentagem, da resistência adicional

Resistência adicional	
Propulsores: de proa	0 a 1%
transversais de popa	1 a 6%
Leme	1%

Em casos de pouca profundidade abaixo da quilha, o navio apresenta um aumento de resistência de atrito e resistência de ondas. Quando o número de Froude encontra-se próximo ao valor crítico, há um aumento expressivo da resistência. Caso o navio seja utilizado em águas muito rasas, não serão possíveis correções simples, visto a complexidade dos fenômenos. Como solução atual para tal problema, serão realizados testes em modelos ou simulações CFD.

4.5.1 Método de Harvald

Guldhammer and Harvald (1965) desenvolveram um método empírico baseado na análise de diversos ensaios anteriormente publicados. Seu método de predição de resistência residual consistia da análise do coeficiente de resistência de avanço em função de apenas alguns parâmetros: taxa de comprimento-deslocamento, coeficiente prismático e número de Froude.

Seus estudos permitiram o desenvolvimento de curvas para os parâmetros acima citados. Entretanto, não há curvas para o coeficiente prismático de embarcações que possuam popa bulbosa ou outras formas de casco, tampouco para outras posições do centro de empuxo. Portanto, é necessário que haja correções para essas curvas.

4.6 Resultados e otimizações

Como resultado de estudos e ensaios para novas soluções de navios, o bulbo de proa foi introduzido aos recentes projetos de construção. O bulbo é um apêndice localizado na proa do navio com a finalidade de diminuir a resistência ao avanço, devido à geração de ondas, durante a navegação. Esses têm sido bastante utilizados nos navios comerciais de grande porte e com alto coeficiente de bloco, que pode significar cerca de 5% de economia de combustível por conta de sua utilização quando em velocidade de cruzeiro.

Além disso, os bulbos também tendem a reduzir a resistência viscosa, pois suavizam o escoamento ao redor do casco. Apesar disso, não é garantia que o bulbo reduzirá a resistência ao avanço do navio, necessitando de um estudo mais aprofundado acerca do assunto, uma vez que uma embarcação, até mesmo

sem, pode assumir valores de resistência ao avanço menores que aquelas com a presença dele.

Figura 14 – Proa bulbosa

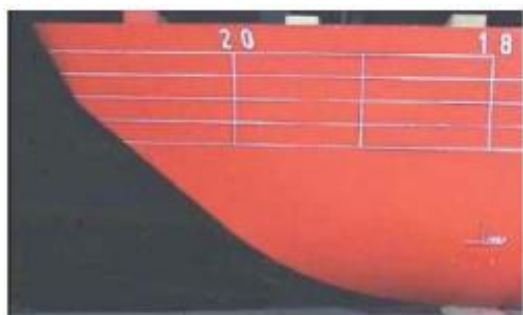


Mais recentemente, porém, os bulbos de proa estão sendo projetados para utilização em embarcações mais rápidas, como navios militares, com geometrias adequadas à redução de ondas geradas a altas velocidades. De acordo com Padovezi (2010), um *destroyer* estudado apresentou economia de combustível de cerca de 4% com adoção do bulbo.

Há, também, uma tendência de embarcações de menor porte adotarem bulbos de proa. Contudo, Padovezi (2010) ressalta que a geometria de cada bulbo, como forma e comprimento, deve ser estudada convenientemente para que haja vantagens efetivas, uma vez que um bulbo mal projetado pode contribuir com algum acréscimo de resistência.

A *EcoShip Engineering*, baseada nos projetos da HSVA, desenvolveu um bulbo de proa específico para navegação no gelo. Esse bulbo de proa apresenta, ao mesmo tempo, baixa resistência ao avanço em regiões com gelo e baixa resistência ao avanço em navegação em águas abertas.

Figura 15 – Comparação entre as proas



Classical icebreaking stem



Conventional bulbous bow



Icebreaking bulbous bow

Fonte: <http://www.mar.ist.utl.pt> (2010).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto de um navio deve ser minuciosamente pensado para seguir e logo o projeto estar realizado. Sendo assim, um projeto devidamente planejado, realizado e concluído, não é um simples resultado de criatividade. Devem ser considerados aspectos como normas a serem cumpridas ou roteiros seguidos. Para isso, o método é o caminho a ser percorrido, demarcado, do começo ao fim, por fases ou etapas. Essas fases são a fase de viabilidade do projeto, a fase preliminar do projeto e a fase de contrato do projeto.

Entretanto, para determinar a viabilidade de um navio, devem ser realizados testes e experimentos dos aspectos hidrodinâmicos da futura embarcação. Para isso, são utilizadas ferramentas como modelos teóricos e numéricos em hidrodinâmica e estudos experimentais com modelos em escala.

O uso de modelos teóricos e numéricos tem evoluído ao longo do tempo, destacando-se a ferramenta numérica CFD de simulação do escoamento ao redor de cascos, que possui bons resultados na obtenção de valores totais de resistência. Os ensaios com modelos em escala reduzida tem uma grande importância no processo de busca de soluções para obtenção de navios mais eficientes, como laboratórios equipados com tanques de reboques e túneis de cavitação, ferramentas utilizadas no processo de previsão da resistência ao avanço do navio.

Como descrito no Trabalho, a resistência ao avanço do navio pode ser prevista através de ensaios de resistência em tanques de reboque e de séries sistemáticas e dados estatísticos. Cada um desses métodos mostra-se bastante expressivo. Como resultado dos estudos da resistência ao avanço através dos métodos acima citados, novos meios de otimização foram desenvolvidos. Dentre eles, o bulbo de proa que diminui a resistência ao avanço durante a navegação.

Conclui-se, então, que o projeto hidrodinâmico do navio é de suma importância. O futuro da utilização de embarcações passa pelo desafio de aperfeiçoar ao máximo o projeto da embarcação. As ferramentas experimentais e numéricas são cada vez mais utilizadas para se chegar a navios mais eficientes, o que significa obter navios com menores custos operacionais e menores interferências ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMC, **Model Test Basin & Towing Tank**. Disponível em: <<http://www.amc.edu.au/model-test-basin-towing-tank>>. Acesso em 5 de Maio de 2016.
2. BERTRAM, Volker. **Practical Ship Hydrodynamics**, 2ª ed. 2011.
3. FONSECA, Maurílio M., **Arte Naval**, vol. I. Rio de Janeiro, 2002.
4. GERK, Hermann R., Material de acervo pessoal. Rio de Janeiro, 2016.
5. GILLMER, Thomas C., **Modern Ship Design**, 2ª ed., 1975.
6. HSVA, **Resistance and propulsion tests**. Disponível em: <<http://www.hsva.de/our-services/model-testing/resistance-and-propulsion-tests.html>>. Acesso em 10 de Maio de 2016.
7. IPT, **Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica**. Disponível em: http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CTMNE. Acesso em 26 de Maio de 2016
8. ITTC, **25th Conference (Fukuoka 2008)**. Disponível em: <[http://ittc.info/downloads/Proceedings/25th%20Conference%20\(Fukuoka%202008\)/index.html](http://ittc.info/downloads/Proceedings/25th%20Conference%20(Fukuoka%202008)/index.html)>. Acesso em 27 de Julho em 2016.
9. Mecaflux, **Ship Hydrodynamics**. Disponível em: <<http://www.mecaflux.com/en/ship%20Hydrodynamics.htm>>. Acesso em 27 de Julho de 2016.
10. MISRA, Suresh C., **Design Principles of Ships and Marine Structures**. 1ª ed., 2015.
11. MUÑOZ, Jaime M. M. S., **Estudo de uma metodologia para o dimensionamento de um tanque de provas do tipo reboque**. São Paulo, 2011.
12. PADOVEZI, Carlos D., **A importância do projeto hidrodinâmico de cascos e de sistemas de propulsão de navios**. Disponível em: <http://www.ipinamericas.org/sites/ba_viejo/downloads/articulos/a-importancia-do-projeto-hidrodinamico.pdf>. Acesso em 26 de Maio de 2016.
13. TRINDADE, Jorge, **Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de máquinas marítimas**, 2012.
14. VENTURA, Manuel, **Bulbous Bow Design and Construction**. Disponível em: <<http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/EN/SD-1.5.4-Bulbous%20Bow%20Design.pdf>>. Acesso em 11 de agosto de 2016.