

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
PROPULSÃO NAVAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise de projeto do bow thruster do Navio Doca Multipropósito Bahia



Primeiro Tenente MARIO PAULO ESCOBAR ELEUTERIO

Rio de Janeiro
2023.2

PRIMEIRO TENENTE MARIO PAULO ESCOBAR ELEUTERIO

Análise de projeto do bow thruster do Navio Doca Multipropósito Bahia

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Orientadores:

Prof Joel Sena Sales Junior, DSc – UFRJ

CC (EN) Yuri de Souza Duarte, MSc – DEN

CIAA
Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO TENENTE MARIO PAULO ESCOBAR ELEUTERIO

Análise de projeto do bow thruster do Navio Doca Multipropósito Bahia

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

Prof Joel Sena Sales Junior, DSc – UFRJ

CC (EN) Yuri de Souza Duarte, MSc – DEN

CC (EN) Carlos Alfredo Órfão Martins, MSc – CIAA

Dedico este trabalho a todos os meus professores que foram responsáveis, em grande parte, pelo meu desenvolvimento intelectual e profissional.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar toda minha gratidão primeiramente à Deus, pelo acompanhamento e cuidado reservados a mim e as pessoas ao meu redor em cada etapa do desenvolvimento desse trabalho, que tornou possível a minha dedicação ao longo desse período.

Em seguida, sou extremamente grato a todos os meus familiares, em especial, minha dedicada esposa e graciosa filha. Tudo o que sou e o que posso ser está intimamente ligado a todos eles. O suporte, acolhimento e ensinamentos que recebo deles me faz capaz de sobrepujar os desafios da vida e me tornar melhor a cada dia que passa.

Especificamente voltado para a área acadêmica, expresso minha gratidão a todos os docentes envolvidos no curso de aperfeiçoamento, em especial os responsáveis pela orientação dessa pesquisa. Os suportes intelectual e motivacional foram decisivos no processo de incentivo à busca de conhecimento e no processo de encantamento com os ensinamentos transmitidos.

A matemática é a única linguagem
que temos em comum com a natureza

Stephen Hawking

Análise de projeto do bow thruster do Navio Doca Multipropósito Bahia

Resumo

O presente trabalho acadêmico aborda o tema dos *bow thrusters*, equipamentos essenciais em embarcações para melhorar a manobrabilidade. São detalhados alguns parâmetros calculados relacionados aos *bow thrusters*. Além disso, discute-se a influência desses dispositivos nas embarcações, notando-se que eles aumentam a resistência ao avanço, mas proporcionam maior controle e segurança durante manobras. Em seguida são aplicados os cálculos descritos ao NDM BAHIA para verificar se o projeto do navio se encontra dentro dos parâmetros julgados razoáveis para uma embarcação com propulsor lateral. A conclusão do estudo enfatiza a importância da instalação de *bow thrusters* em embarcações maiores e aquelas que precisam navegar em águas restritas. Isso se deve à necessidade de manobrabilidade aprimorada em situações desafiadoras, como portos congestionados ou áreas de navegação restrita. Além disso, devido aos cálculos apresentados, conclui-se que para navios que necessitam de velocidade ou navios que não possuem grandes dimensões o uso de *bow thrusters* pode não ser a alternativa mais eficiente.

Palavras-chave: *bow thruster*, empuxo, NDM BAHIA, emprego do *bow thruster*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3-1 – Diagrama básico de um <i>bow thruster</i> | 17 |
| Figura 3-2 – Gráfico de potência pelo diâmetro | 18 |
| Figura 3-3 – Gráfico do empuxo pelo diâmetro | 18 |
| Figura 3-4 – Gráfico de rotações pelo diâmetro | 19 |
| Figura 4-1 – Variação ideal de ζ , C e T_p/T em relação à fração entre áreas..... | 25 |
| Figura 4-2 – Coeficientes de força de empuxo e momento por U_∞/U_J de um <i>bow thruster</i> | 26 |
| Figura 4-3 – Distribuição de pressões hidrodinâmicas ao longo de um casco | 27 |
| Figura 4-4 – Faixa de taxa de rotação em função do deslocamento com velocidade do navio nula | 28 |
| Figura 4-5 – Centro de rotação e constante de taxa de rotação para uma força lateral única atuando em um navio..... | 29 |
| Figura 4-6 – Eficiência de um <i>bow thruster</i> em relação ao comprimento do duto | 30 |
| Figura 4-7 – Duto com parede interna côncava..... | 31 |
| Figura 4-8 – Duto com parede interna côncava..... | 32 |
| Figura 4-9 – Perfil de velocidades ao redor de um casco com um propulsor transversal | 34 |
| Figura 5-1 – Imagem de um <i>bow thruster</i> | 36 |
| Figura 5-2 – Fotografia do desenho técnico do NDM BAHIA utilizado para as medições..... | 36 |
| Figura 5-3 – Extrato do manual do fabricante do <i>Bow Thruster</i> do NDM Bahia documentado pela MARINE NATIONALE..... | 39 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 5-1 – Dados do NDM BAHIA..... | 35 |
| Tabela 5-2 – Dados obtidos pelo método considerando taxa de guinada 0,45°/s..... | 37 |
| Tabela 5-3– Dados obtidos pelo método considerando taxa de guinada 0,35°/s..... | 38 |

LISTAS DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------------|---|
| C | Coeficiente de mérito estático |
| T | Empuxo lateral total |
| T_{unducted} | Empuxo lateral total de propulsor sem duto |
| T_{ducted} | Empuxo lateral total de propulsor com duto |
| T_P | Empuxo do impelidor |
| SHP | Shaft Horse-power |
| ρ | Densidade da água |
| D | Diâmetro do duto |
| K_T | Coeficiente de empuxo de um propulsor |
| Q | Torque do impelidor |
| K_Q | Coeficiente de torque de um propulsor |
| ζ | Fator de empuxo estático de Bendemann |
| P_s | Potência do eixo |
| P_{ducted} | Potência de propulsor com duto |
| P_{unducted} | Potência de propulsor sem duto |
| n | Frequência de rotação do propulsor |
| m | Fluxo de massa por segundo |
| U_j | Velocidade do fluxo na saída do duto |
| $U_{j\infty}$ | Velocidade final de deslizamento do hélice sem duto |
| U_I | Velocidade do fluido na região de aspiração do impelidor |
| A_I | Área do disco do impelidor |
| A_j | Área transversal da saída do duto |
| P_V | Pressão de vapor da água |
| P_0 | Pressão hidrostática do fluido |
| x_T | Distância característica, normalmente distância do centro do duto a meia nau ou ao centro de gravidade |
| J_p | Momento de inércia |
| θ | ângulo entre a proa do navio e um ponto fixo passando pelo eixo de rotação do navio |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | PREFÁCIO | 13 |
| 2 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2.1 | Apresentação do problema | 14 |
| 2.2 | Justificativa e relevância | 14 |
| 2.3 | Objetivos | 14 |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 4 | METODOLOGIA | 20 |
| 4.1 | Coefficientes e parâmetros do método | 20 |
| 4.2 | Força, momento e velocidade independentes dos parâmetros do impelidor | 25 |
| 4.3 | Velocidade angular de proa | 26 |
| 4.4 | Arranjo Geral | 29 |
| 4.5 | Formato Interno do Duto | 31 |
| 4.6 | Abertura do Duto | 32 |
| 4.7 | Propulsores | 33 |
| 4.8 | Interação com a velocidade avante | 34 |
| 5 | DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DO BOW THRUSTER DO NDM BAHIA | 35 |
| 5.1 | Dados do navio | 35 |
| 5.2 | Valores obtidos pelo método | 37 |
| 5.3 | Limitações do Método | 39 |
| 6 | CONCLUSÃO | 40 |
| 6.1 | Considerações Finais | 40 |
| 6.2 | Sugestões para Futuros Trabalhos | 41 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 42 |

1 PREFÁCIO

O *Bow Thruster* é um equipamento idealizado para melhorar os desempenhos de manobrabilidade de uma embarcação em baixas velocidades e em ambientes com espaço restrito para manobras. (MOHAN, 2017)

Esse interesse pela capacidade de manobra dos navios tem relação com o desenvolvimento das relações comerciais, pois o transporte marítimo movimenta cerca de oitenta por cento de todo o comércio mundial através de quase cem mil embarcações (ANDRADE e BIAZON, 2021). Pode-se concluir, dessa maneira, que esse volume de barcos – de variados tipos – interfere no ambiente portuário significativamente. A segurança das manobras e sua agilidade garantem a fluidez do comércio no setor marítimo

O desenvolvimento das relações comerciais mundiais estimula o desenvolvimento econômico e, conseqüentemente alavanca as inovações tecnológicas, permitindo, assim, o crescimento de diversos setores na economia, principalmente se esse setor está tão fortemente ligado ao comércio. Santos (2012) resume algumas constatações de Schumpeter sobre o a relação entre recursos e inovações:

Schumpeter associou, ainda, a intensidade de inovação ao tamanho das empresas, ou seja, a maior intensidade está associada às grandes empresas. Estudos posteriores a estes realizados por Schumpeter chegaram a duas proposições; primeiramente, a inovação tem uma relação positiva com o tamanho da empresa: a inovação cresce mais que proporcionalmente ao tamanho da empresa e cresce também com a concentração de mercado. Aplicando-se a associação feita por Schumpeter à realidade atual das organizações, pode-se afirmar que as grandes empresas possuem recursos próprios para financiarem suas atividades em P&D, empresas maiores e diversificadas podem explorar melhor os resultados incertos de P&D.

No setor da engenharia naval não poderia ser diferente. A necessidade de melhores condições de manobrabilidade evoluiu como um diferencial de segurança e agilidade. E foi nesse contexto que os propulsores transversais foram desenvolvidos.

2 INTRODUÇÃO

A manobrabilidade de um navio é um fator de bastante relevância quanto ao seu emprego. Existem diversos tipos diferentes de embarcações baseados no que elas se propõem a cumprir como por exemplo: navios de carga, fragatas, navios de transporte, contratorpedeiros, submarinos, pesqueiros entre vários outros.

Cada embarcação é pensada para se adequar melhor a sua atividade em questão de desempenho, eficiência e segurança. Logo, percebe-se que os parâmetros desejados por um grupo projetista podem variar, dependendo da necessidade que embarcação deva suprir. A instalação de equipamentos, o *design* e tamanho da embarcação, a disposição de estruturas específicas são exemplos de fatores que interferem na concepção do projeto.

Portanto, como propulsores são equipamentos determinantes quando se trata de aplicação de uma embarcação, como ensina Carlton (2007) em sua obra, os *bow thrusters* não são diferentes.

2.1 Apresentação do problema

O propulsor lateral e as características de um navio se afetam mutuamente, como será visto posteriormente, ou seja, um *bow thruster* deve se adequar a determinadas condições estruturais do navio e o navio deve possuir acomodações estruturais que otimizem seu funcionamento. Logo, os parâmetros modificados no navio pelo propulsor de proa podem indicar as nuances sobre os objetivos específicos de uma embarcação. Será realizada uma análise de alguns coeficientes relativos ao funcionamento de *thrusters* para entender melhor a aplicação desse equipamento no Navio Doca Multipropósito BAHIA e sua conformidade com o tipo da embarcação ao qual o BAHIA é classificado. O foco deste trabalho serão as interações hidrodinâmicas do duto e do funcionamento do propulsor com o a embarcação.

2.2 Justificativa e relevância

Este estudo procura uma conexão matemática de alguns métodos desenvolvidos no início das pesquisas sobre *bow thrusters*, utilizando a didática principalmente qualitativa a fim de unir conhecimentos matemáticos com situações práticas para interpretá-las.

2.3 Objetivos

Nesse trabalho, será apresentado alguns estudos, métodos de determinação de coeficientes e ensaios que podem indicar quando e porque os propulsores de proa podem ser

instalados. Alguns coeficientes serão calculados com o exemplo do NDM BAHIA para que se possa concluir o emprego desse equipamento quanto ao tipo e objetivo dessa embarcação, extrapolando para outras embarcações em geral.

No capítulo 3 será desenvolvida uma breve explicação qualitativa do emprego de propulsores de proa além de citar a contribuição das principais referências do trabalho.

O capítulo 4 busca discorrer sobre a teoria relativa ao tema antes da digitalização dos métodos hidrodinâmicos. Essa teoria será aplicada posteriormente ao NDM BAHIA no capítulo 5.

O capítulo 6 concluirá o trabalho relacionando os coeficientes com o tipo e emprego específico do navio usado como exemplo, extrapolando para demais navios.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Existem muitos tipos de propulsores, como elucida John S. Carlton em seu livro *Marine Propellers and Propulsion*, primeiramente publicado em 1994. Seu título se dedica a fazer uma coletânea das principais teorias variados estudos voltados para o desenvolvimento e análise de propulsores de navios. Cada tipo de propulsor tem seus índices de desempenho especificados: eficiência, velocidade, discricção e manobrabilidade, portanto, a instalação de cada propulsor está ligada ao objetivo específico de uma embarcação, seja um rebocador, um navio rápido, um submarino (que necessita de discricção), um navio de transporte, um navio que opera em condições específicas de manobrabilidade, rebocadores etc. Cada função específica altera a proposta de propulsão.

Para atender os requisitos de manobrabilidade de embarcações são considerados os seguintes conjuntos de propulsão:

- Propulsão azimutal;
- *Podded Propulsion*; e
- Propulsores transversais.

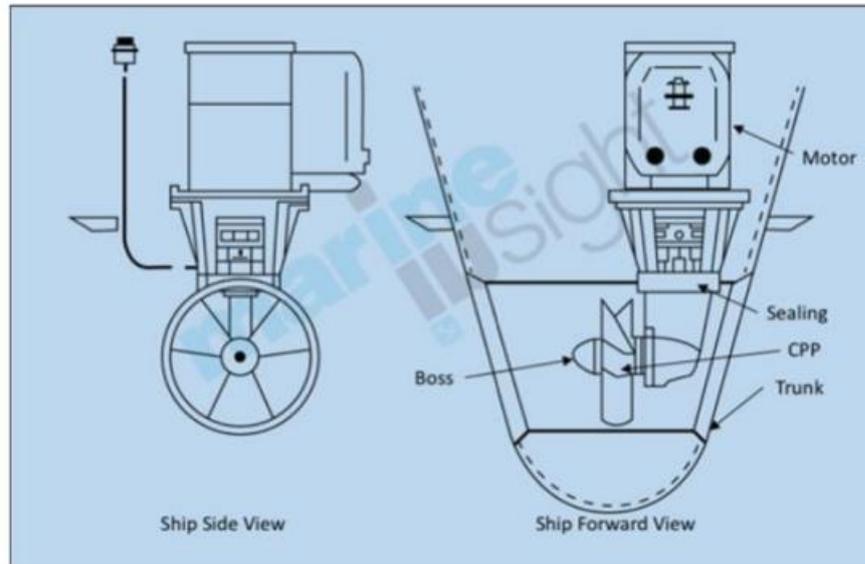
A ideia por trás da concepção dos propulsores transversais é relativamente simples: um propulsor auxiliar que possa gerar empuxo capaz de direcionar o navio em uma direção desejada de maneira a facilitar determinada manobra. Sendo ainda mais específico, nesse caso, deseje-se um empuxo transversal para realizar movimentos laterais (sentido bombordo e boreste) em situações de ajuste da posição do navio.

O propulsor transversal pode ser um equipamento facilitador em manobras específicas como atracação, fundeio, suspender, e, mais recentemente, o posicionamento dinâmico. Portanto, navios que frequentemente operam em águas com espaço reduzidos e realizam as manobras citadas acima lançam mão desse meio, como, por exemplo, *ferry boats*. Além desse conjunto de embarcações, os propulsores de manobras também são bem difundidos entre os grandes transportadores que, devido ao seu tamanho, necessitam de maior suporte à manobrabilidade (CARLTON, 2007). Vale ressaltar que o uso desse equipamento também contribui para a manobra da embarcação ao enfrentar situações de vento e corrente desfavoráveis. (UMANA, MAURICE e MICHAEL, 2022).

Os *bow thrusters* são propulsores transversais de túnel fixos. Inseridos nessa mesma classificação estão os *stern thrusters*, muito semelhantes ao anterior, porém posicionados na popa da embarcação. É importante levar em consideração que esses equipamentos são sistemas complexos e precisam ser analisados como um todo – o hélice, o túnel, as grades (caso haja), o

suporte do hélice a posição do túnel no casco, a abertura do túnel –, a avaliação ou otimização de algum parâmetro sob perspectivas isoladas de cada componente pode fornecer resultados incorretos. (CARLTON, 2007).

Figura 3-1 – Diagrama básico de um *bow thruster*



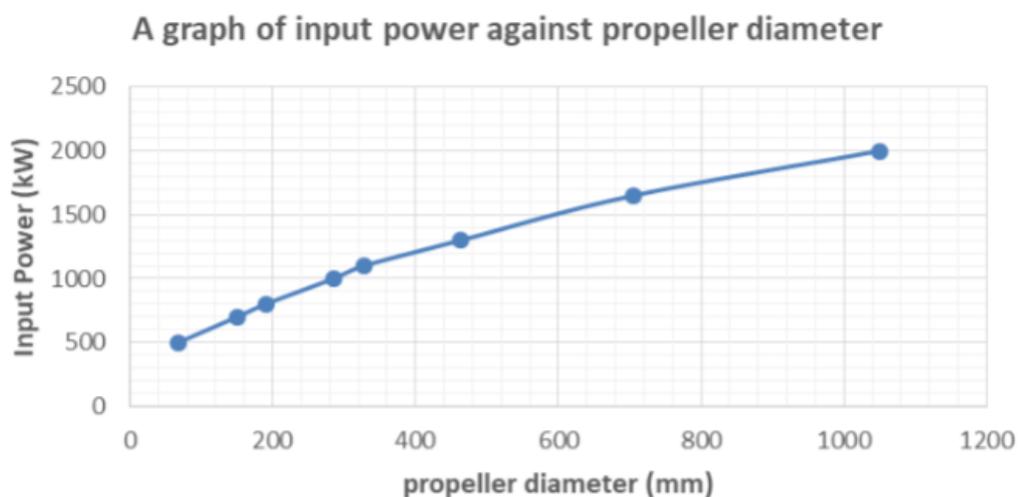
Fonte: Umana, 2022

Para determinação das características de um *bow thruster* capaz de realizar determinado empuxo ou de entregar determinada potência há dois métodos principais com abordagens distintas: a primeira abordagem vale-se de cálculos rigorosos e testes de modelos em tanques e túneis de vento para precisar as resistências enfrentadas pelo navio em várias condições de corrente e vento. Com esses dados em mãos torna-se possível calcular o empuxo que é necessário, em um ponto específico do casco, para girar o navio a uma taxa definida. Esse método encontra dificuldades com correlações e efeitos de escalas além disso, os custos de modelagens, testes e cálculos são elevados. A outra maneira para se estimar um empuxo ou uma potência de *bow thrusters* é empregando-se uma formulação pseudo-empírica para aproximação de resultados com base em navios similares já existentes. Essa abordagem busca estabelecer uma relação geral entre velocidade angular de proa, resistência hidrodinâmica, resistência do ar e empuxo necessário – ou potência necessária (CARLTON, 2007).

Uma abordagem mais recente e particularmente interessante foi o trabalho de Umana (2022), que utilizou referências dos estudos de *bow thrusters* de meados do século XX (algumas delas também utilizadas nesse trabalho) associadas com as principais equações utilizadas para a abordagem de escoamentos – equações semiempíricas que possibilitam a análise

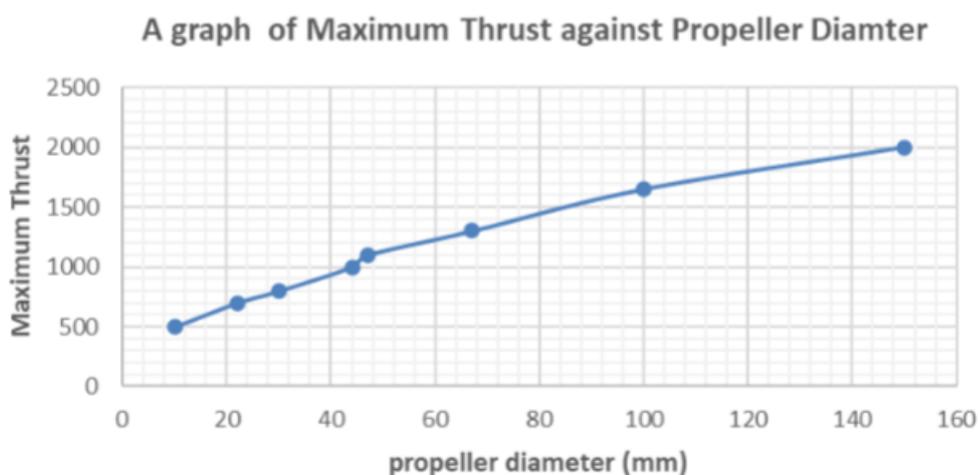
computacional do comportamento dos fluidos, simplificando equações mais complexas da área da mecânica dos fluidos, como por exemplo a equação de Navier-Stokes – para encontrar relações entre diâmetro, rotação, empuxo e potência de um propulsor de proa. Em sua pesquisa, concluiu-se que com o aumento do diâmetro do *bow thruster* ocorre aumento do empuxo gerado e da potência desenvolvida. Outro resultado alcançado pelo estudo de Umana foi que, para uma dada potência conforme aumenta o diâmetro a rotação diminui.

Figura 3-2 – Gráfico de potência pelo diâmetro



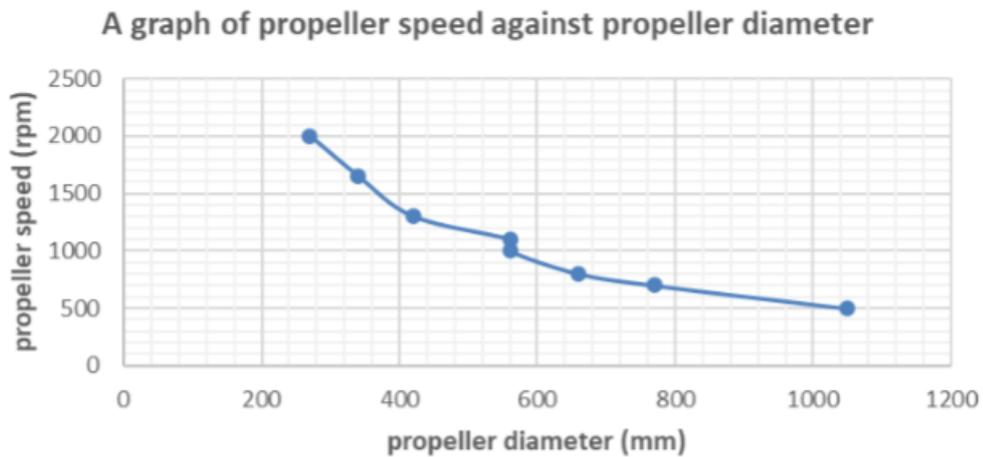
Fonte: Umana, 2022

Figura 3-3 – Gráfico do empuxo pelo diâmetro



Fonte: Umana, 2022

Figura 3-4 – Gráfico de rotações pelo diâmetro



Fonte: Umana, 2022

Carlton (2007) possui uma obra muito ampla sobre as teorias que governam o estudo dos propulsores de maneira geral. Além disso, sua obra traz diversos exemplos de tipos diferentes de propulsores com suas respectivas características.

Beveridge (1971) reuniu uma série de dados de estudos a respeito de *bow thrusters* disponíveis na época de sua pesquisa para facilitar o planejamento da concepção desses equipamentos em projetos de embarcações

Taniguchi (1966) realizou uma série de testes com impelidores transversais e modelos de casco para fornecer um arcabouço de informações que pudessem aumentar a compreensão dos projetistas sobre os fenômenos envolvendo *bow thrusters*.

English (1966) também buscou complementar o estudo de coeficientes e parâmetros desses equipamentos para alcançar relações e conclusões que fossem esclarecedoras e úteis para a engenharia naval de seu tempo.

4 METODOLOGIA

4.1 Coeficientes e parâmetros do método

O método a ser empregado foi proposto por John L. Beveridge, em sua obra de 1971, na qual o autor expõe alguns coeficientes que se relacionam com os parâmetros desejados para o projeto de um propulsor lateral. Esse método exige algumas abordagens que podem ser distintas da teoria de desenvolvimento para propulsores em geral.

Essa distinção ocorre devido ao propulsor, na situação de manobra, possuir uma velocidade de avanço muito baixa, próxima de zero, no instante do início do empuxo lateral. Uma vez que o propulsor gera empuxo sem desenvolver velocidade a sua eficiência também se aproximaria de zero (BEVERIDGE, 1971).

Portanto, a fim de relacionar o empuxo, que ainda existe, com os parâmetros do propulsor, é necessário apresentar outra forma de calcular ou comparar a performance do empuxo. O primeiro coeficiente importante apresentado como parâmetro de desempenho do *bow thruster* por Beveridge (1971) foi o Coeficiente de mérito estático (*static merit coefficient*, *ipsis litteris*):

$$C = \frac{0,00182 \cdot T^{3/2}}{SHP \cdot \sqrt{\rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}} = \frac{K_T^{3/2}}{\pi^{3/2} \cdot K_Q} \quad (4.1)$$

Outro parâmetro comumente utilizado é o fator de empuxo estático de Bendemann (*Bendemann static thrust factor*, *ipsis litteris*) (BEVERIDGE, 1971):

$$\zeta = \frac{T}{P_s^{2/3} \cdot D^{2/3} \cdot (\rho \cdot \pi/2)^{1/3}} = \frac{K_T}{K_Q^{2/3} \cdot \pi \cdot 2^{1/3}} \quad (4.2)$$

Onde K_T e K_Q são, respectivamente coeficientes dimensionais de empuxo e torque do propulsor, dados por (CARLTON, 2007):

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (4.3)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (4.4)$$

Essas expressões são oriundas da Teoria do Momentum e podem mostrar que, para um fluido ideal, não-viscoso, os valores máximos de C e ζ para propulsores com duto – incluindo *bow thrusters* – são, respectivamente (BEVERIDGE, 1971):

$$C_{\max} = 2 \quad (4.5)$$

$$\zeta_{\max} = \sqrt[3]{2} \quad (4.6)$$

deve-se observar, também, que há a seguinte relação entre (5.2) e (4.2) (BEVERIDGE, 1971):

$$\frac{C}{\zeta} = \sqrt[3]{\frac{2}{K_Q}} \cdot \sqrt{\frac{K_T}{\pi}} \quad (4.7)$$

$$C = \sqrt{\zeta^3 \cdot 2} \quad (4.8)$$

Uma relação muito importante, esclarecida pelo autor do método é que, quanto maiores são os coeficientes C ou ζ , mais eficiente é o *bow thruster*, ou seja, mais empuxo e transferido para o fluido por unidade de potência. (BEVERIDGE, 1971).

Com as equações (4.2), (4.3), (4.4), (4.4) e (4.8) pode se obter as seguintes relações entre dois propulsores:

Se $T_1 = T_2$,

$$T_1 = T_2 = \rho \cdot D_1^4 \cdot K_{T_1} \cdot n_1^2 = \rho \cdot D_2^4 \cdot K_{T_2} \cdot n_2^2 \quad (4.9)$$

a relação entre potências será:

$$\frac{P_{s_1}}{P_{s_2}} = \frac{D_2 \cdot K_{Q_1}}{D_1 \cdot K_{Q_2}} \cdot \left(\frac{K_{T_2}}{K_{T_1}} \right)^{3/2} \quad (4.10)$$

Se $P_{s_1} = P_{s_2}$,

$$P_{s_1} = P_{s_2} = \rho \cdot D_1^5 \cdot K_{Q_1} \cdot n_1^3 = \rho \cdot D_2^5 \cdot K_{Q_2} \cdot n_2^3 \quad (4.1)$$

a relação entre empuxos será:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{2/3} \cdot \frac{K_{T_1}}{K_{T_2}} \left(\frac{K_{Q_2}}{K_{Q_1}}\right)^{2/3} \quad (4.2)$$

Um dado relevante sobre testes estáticos comparativos entre propulsores com e sem duto foi realizado por Platt, em 1948. Com o emprego da Teoria do Momentum, considerando fluido não viscoso, um duto com pouca ou nenhuma difusão (ângulo de abertura), e atrito inexistente nas paredes do duto (um sistema conservativo), concluiu-se que toda a energia fornecida ao fluido pelo hélice é transmitida para o fluxo ao fim do duto (BEVERIDGE, 1971).

Para impelidores com duto (PLATT, 1948, p. 10):

$$P_{\text{ducted}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U_j^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_j \cdot U_j^3 \quad (4.3)$$

Para impelidores sem duto (PLATT, 1948, p. 10):

$$P_{\text{unducted}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U_{j\infty}^2 = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_I \cdot U_{j\infty}^3 \quad (4.4)$$

Cálculo do momentum em propulsores com e sem duto respectivamente

$$T_{\text{ducted}} = \rho \cdot A_j \cdot U_j^2 \quad (4.5)$$

$$T_{\text{unducted}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_I \cdot U_{j\infty}^2 \quad (4.6)$$

Relacionando ambos os casos (4.5) e (4.6):

$$\frac{T_{\text{ducted}}}{T_{\text{unducted}}} = \frac{2 \cdot A_j}{A_I} \cdot \left(\frac{U_j}{U_{j\infty}} \right)^2 \quad (4.7)$$

Em situações de igual potência entre um propulsor com duto e um sem duto:

$$\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_I \cdot U_{j\infty}^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_j \cdot U_j^3 \quad (4.8)$$

Rearranjando (4.8):

$$\left(\frac{U_j}{U_{j\infty}} \right)^3 = \frac{A_I}{2 \cdot A_j} \quad (4.9)$$

Quando se aplica (4.9) em (4.7):

$$\frac{T_{\text{ducted}}}{T_{\text{unducted}}} = \left(\frac{2 \cdot A_j}{A_I} \right)^{1/3} \quad (4.10)$$

English (1966, p. 16), demonstrou em seu artigo que a relação acima é igual ao coeficiente de Bendemann logo,

$$\frac{T_{\text{ducted}}}{T_{\text{unducted}}} = \left(\frac{2 \cdot A_j}{A_I} \right)^{1/3} = \zeta \quad (4.11)$$

Servindo-se das equações (4.8) e (4.11) tem-se:

$$C = 2 \cdot \sqrt{A_j/A_I} \quad (4.12)$$

As equações (4.11) e (4.12) são úteis para definir o limite máximo dos valores ideais que esses coeficientes podem alcançar (BEVERIDGE, 1971).

Outro parâmetro de impelidores em dutos explorado por alguns autores é a relação entre empuxo produzido somente na ação do impelidor pelo empuxo total. O empuxo é determinado

por diferenças de pressão entre as regiões antes e depois do disco, na Teoria do Momentum (CARLTON, 2007, p. 169-170).

$$T_P = (P_2 - P_1) \cdot A_I \quad (4.13)$$

Pelas equações de Bernoulli, tem-se (BEVERIDGE, 1971):

$$P_2 = P_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_j^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_I^2 \quad (4.14)$$

$$P_1 = P_0 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_I^2 \quad (4.15)$$

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_j^2 \quad (4.16)$$

$$T_P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_j^2 \cdot A_I \quad (4.17)$$

$$\frac{T_P}{T_{\text{ducted}}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_j^2 \cdot A_I}{\rho \cdot A_j \cdot U_j^2} = \frac{A_I}{2 \cdot A_j} \quad (4.18)$$

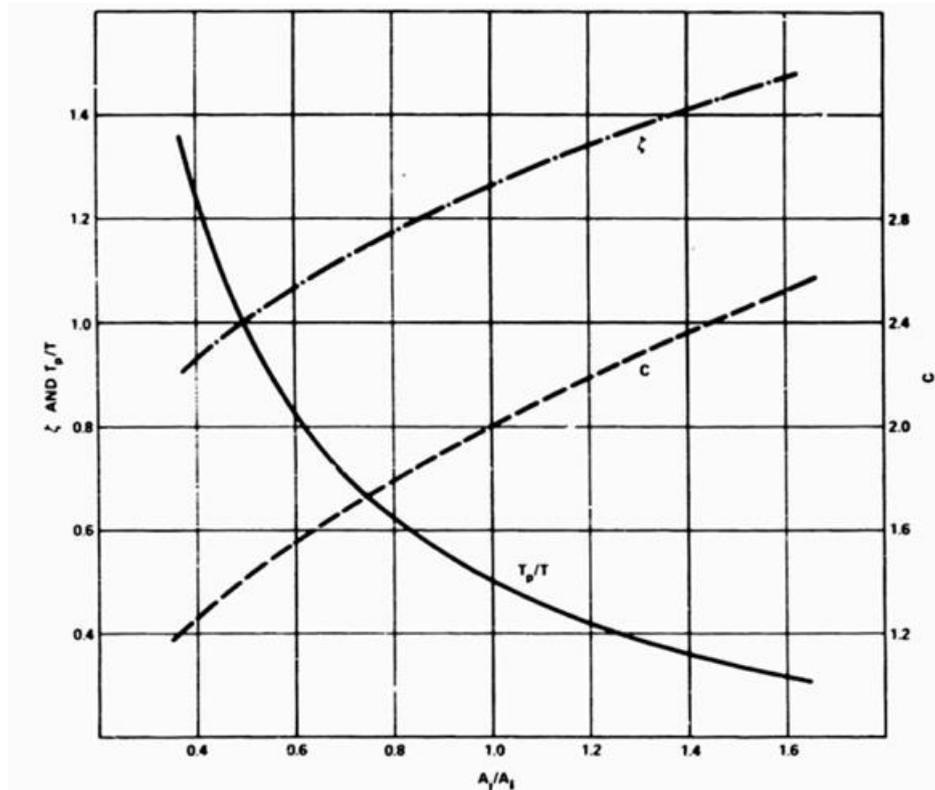
Logo, a força de empuxo de um propulsor com duto é igualmente dividida entre o impelidor e as paredes do duto, em outras palavras, o valor total do empuxo gerado pelo conjunto é duas vezes o valor do que é fornecido ao fluido pelo hélice (BEVERIDGE, 1971). Assim como Beveridge, outros autores também contribuíram para conclusões semelhantes quando se trata de hélices e invólucros. English trata mais especificamente de *bow thruster*:

Durante a operação de um conjunto de propulsor lateral o casco nas proximidades do conjunto desempenha um papel muito importante e é responsável por uma grande parte do empuxo total provido com os arredondamentos instalados na interseção do duto e do casco. Para um conjunto ideal empregando uma constante área do duto metade do empuxo total é aplicado pelo rotor enquanto a outra metade é desempenhado pelo casco na região de entrada. (ENGLISH, 1966, p. 23, tradução nossa)

E Platt Jr, que, tratando de assuntos aeronáuticos, encontrou uma relação de dois para um, semelhante aos autores supracitados:

Na faixa testada, para potência igual, a hélice com invólucro produz aproximadamente duas vezes mais empuxo estático do que a hélice sem invólucro, principalmente porque a hélice sem invólucro estava em *stall*¹ enquanto a hélice com invólucro não estava em *stall*. (PLATT, 1948, p. 12, tradução nossa)

Figura 4-1 – Variação ideal de ζ , C e T_p/T em relação à fração entre áreas



Fonte: Beveridge, 1971.

4.2 Força, momento e velocidade independentes dos parâmetros do impelidor

Além das formas adimensionais de força e momento descritas em (4.3) e (4.4) respectivamente, outras formas adimensionais que não dependem da rotação e do diâmetro do impelidor também são úteis:

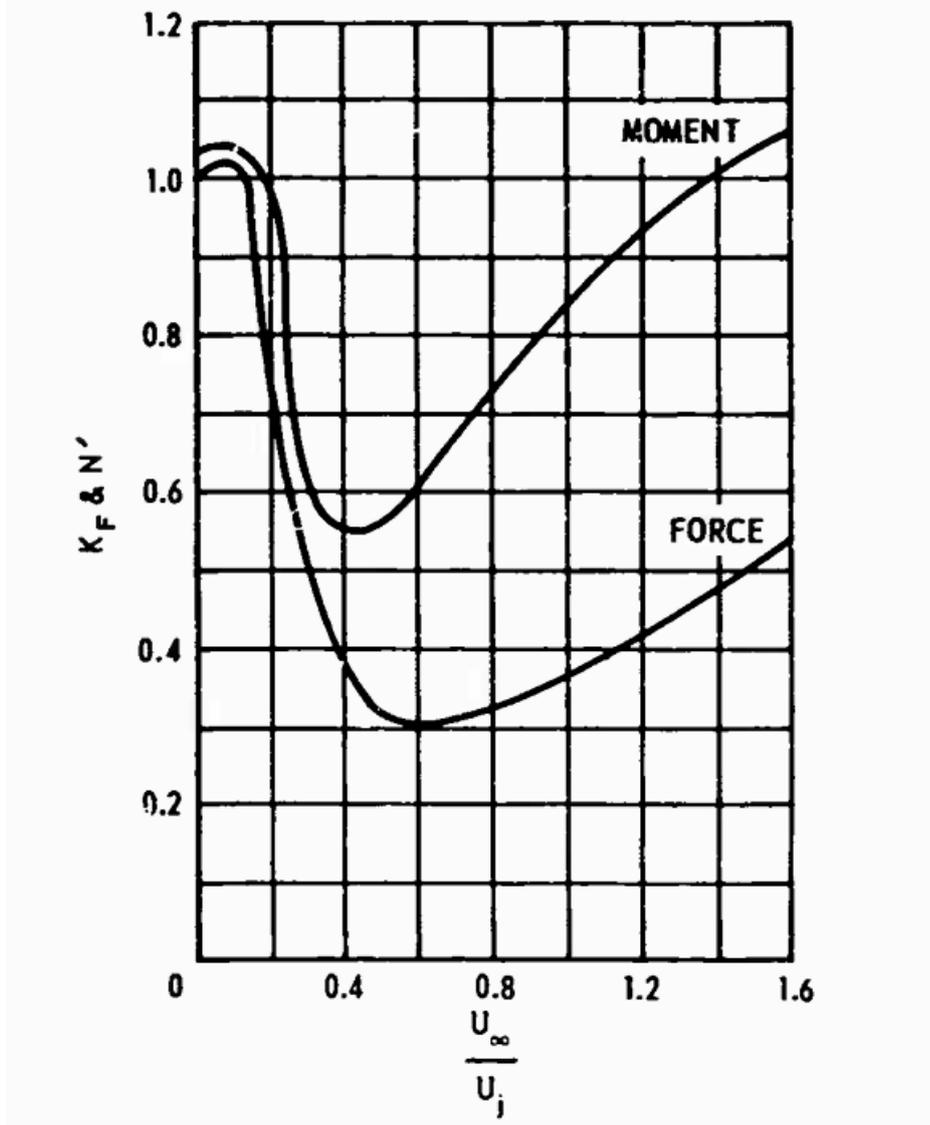
$$K_F = \frac{T}{\rho \cdot A \cdot U_j^2} \quad (4.29)$$

$$N' = \frac{N}{\rho \cdot A \cdot U_j^2 \cdot x_T} \quad (4.30)$$

¹ Stall é o fenômeno de separação do fluxo que passa por uma lâmina com inclinação relativa ao escoamento. Essa separação gera vórtices no dorso da lâmina que, por sua vez, causam a perda de sustentação da lâmina.

Os valores de K_F e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são próximos de um para um navio a velocidade de avanço próxima de zero, fornecendo, assim, uma escala percentual para a influência da velocidade de avanço do navio (BEVERIDGE, 1971).

Figura 4-2 – Coeficientes de força de empuxo e momento por U_∞/U_j de um *bow thruster*



Fonte: Chislett apud Beveridge, 1971.

4.3 Velocidade angular de proa

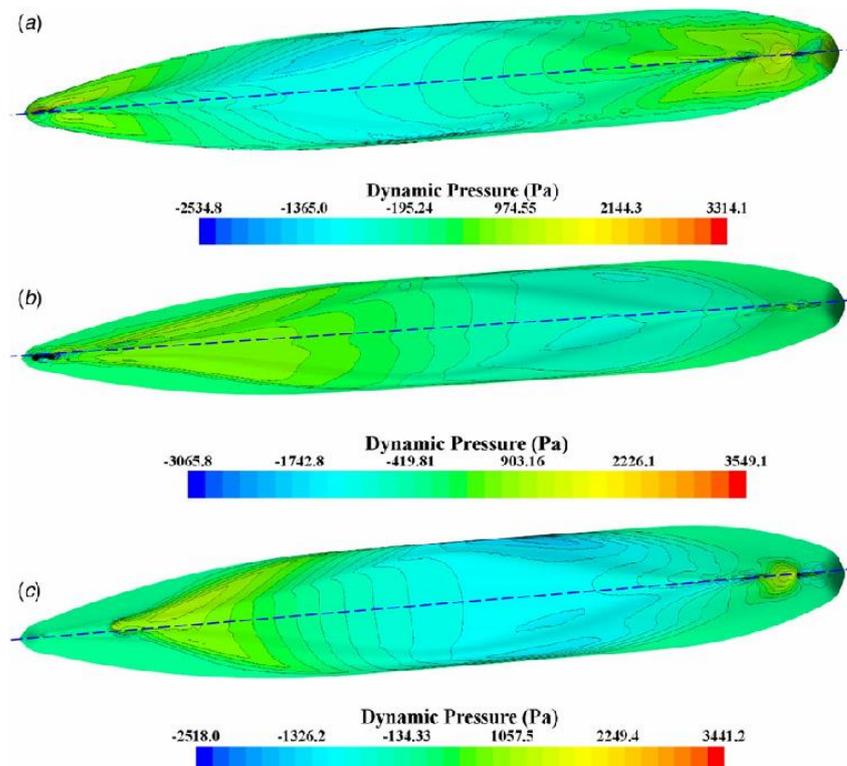
A determinação de uma velocidade angular de proa em relação às forças empregadas em um navio é um assunto extremamente complexo. Carlton (2007) introduz o assunto, considerando o navio um corpo rígido que gira sobre um ponto:

$$J_p \cdot \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \right) = M_H + M_W + M_P \quad (4.31)$$

Nota-se que as acelerações e, conseqüentemente, as velocidades angulares dependem de diversos fatores como a resistência do ar, resistências hidrodinâmicas, empuxo e diversos parâmetros relativos ao formato do casco. Todas essas interferências alteram os movimentos que o navio executa em seu curso, afetando, assim, sua manobrabilidade. Como comentado anteriormente, *bow thrusters* e a manobrabilidade de um navio estão diretamente relacionados um ao outro.

Para considerações mais profundas sobre os dados de manobrabilidade, os métodos de determinação das forças envolvidas iniciam-se com Teoria Hidrodinâmica de Corpos Adelgaçados, tradução nossa – *Hydrodynamics of Slender Bodies*, (NEWMAN, 1977) – e possuem diversos trabalhos referentes ao assunto. Em resumo, essa teoria e seus desdobramentos estudam as forças ao longo do casco de um navio e os conseqüentes movimentos causados.

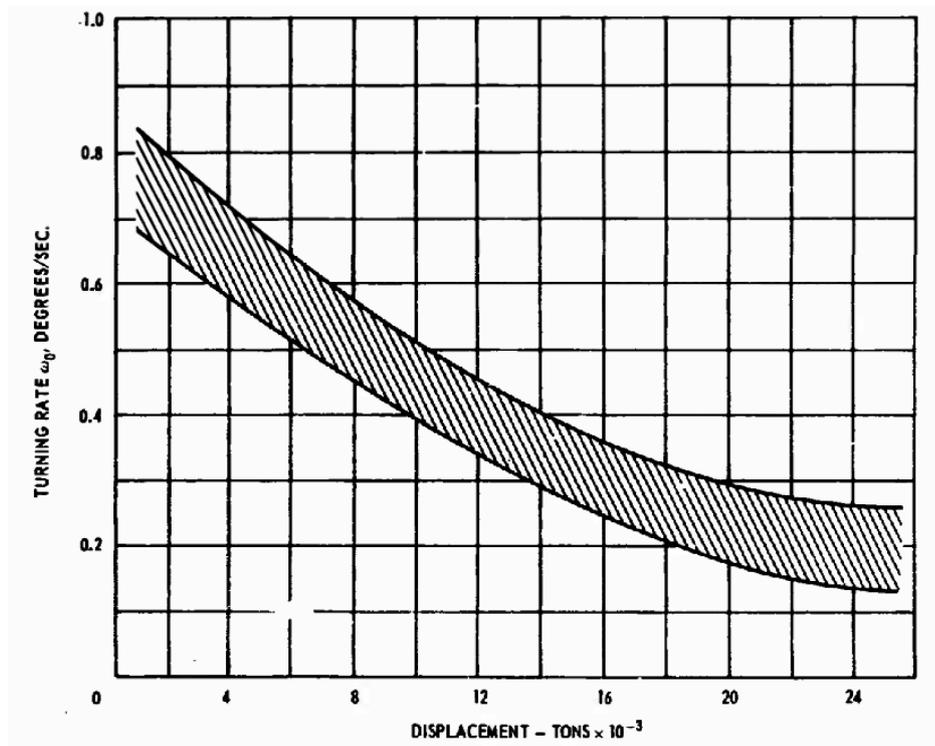
Figura 4-3 – Distribuição de pressões hidrodinâmicas ao longo de um casco



Fonte: MA, MA, *et al.*, 2021

Para o desenvolvimento do método de Beveridge será considerada o gráfico proposto por Hawkins, que considerou navios como placas planas com dimensões das obras-vivas de L e H, onde L é o comprimento do navio e H o calado. Os resultados se mostraram muito próximos com as diversas variações de cascos analisados (BEVERIDGE, 1971).

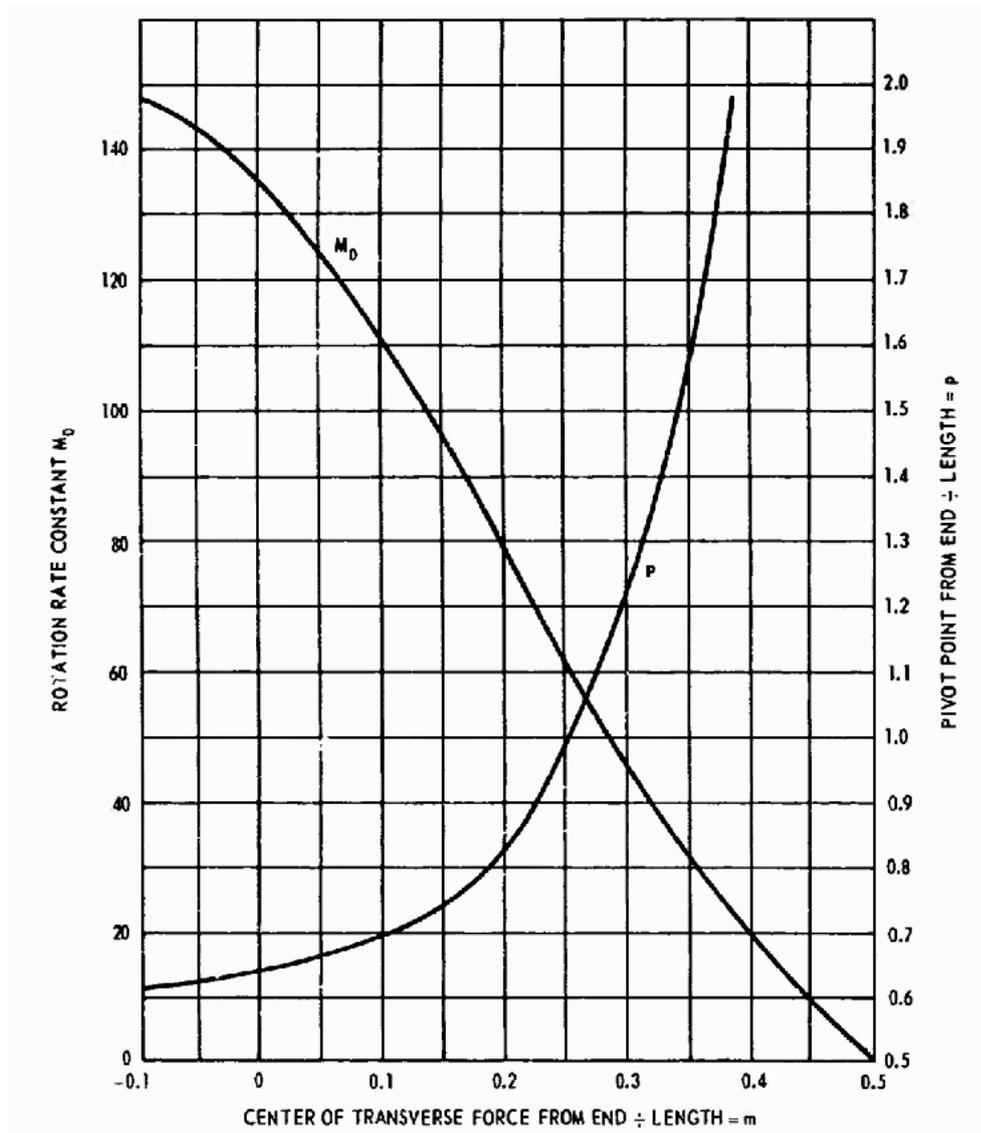
Figura 4-4 – Faixa de taxa de rotação em função do deslocamento com velocidade do navio nula



Fonte: Hawkins apud Beveridge, 1971.

Outro gráfico oriundo dos estudos de Hawkins citado por Beveridge é o gráfico da constante de taxa de rotação e o ponto de rotação p adimensional em função da localização adimensional do ponto de aplicação do empuxo. Tais curvas foram calculadas para um único propulsor agindo em uma placa plana.

Figura 4-5 – Centro de rotação e constante de taxa de rotação para uma força lateral única atuando em um navio



Fonte: Hawkins apud Beveridge, 1971.

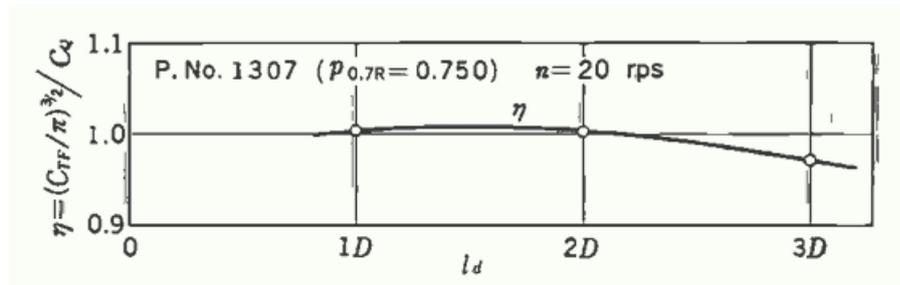
4.4 Arranjo Geral

A localização do *bow thruster* no casco do navio é um fator importante para o seu desempenho hidrodinâmico, porém é limitado por algumas considerações pragmáticas. Para conseguir obter o maior momento, o ideal seria alocar o equipamento o mais a vante o possível da embarcação, mas especificações de segurança limitam sua instalação para atrás das anteparas de colisão e, além disso, dependendo do formato da proa a resistência ao avanço durante a operação normal da embarcação pode se elevar significativamente (BEVERIDGE, 1971).

O formato da proa no local de instalação do conjunto pode ocasionar dimensões inadequadas do comprimento do túnel. Conforme o comprimento do duto aumenta, o aumento

do atrito entre o fluido e as paredes do duto podem ocasionar perda de eficiência do conjunto (TANIGUCHI, WATANABE e KASAI, 1966)

Figura 4-6 – Eficiência de um *bow thruster* em relação ao comprimento do duto



Fonte: Taniguchi, Watanabe e Kasai, 1966

Onde:

C_{TF} é o empuxo total desenvolvido pela unidade, ou seja, propulsor e duto;

C_q é o K_Q descrito nesse trabalho em (4.4);

η é a eficiência do conjunto;

n é o número de revoluções por segundo do eixo;

l_D é o comprimento do duto em valores de D ; e

D é o diâmetro do duto.

Pode-se observar pelo gráfico que a eficiência tende a diminuir conforme o comprimento do duto aumenta. Outra observação pertinente é que o duto deve estar a uma profundidade suficiente para evitar que alcance a linha d'água conforme as ondas atingem a proa, ou conforme o navio caturra e balança ao sabor das ondas (BEVERIDGE, 1971). Não é o foco deste trabalho tratar de casos de superfície livre devido a entrada de ar atmosférico no duto do *bow thruster*.

Taniguchi (1966) também estudou o efeito da distância da abertura do duto à linha de base do navio, que deve ter a dimensão de, ao menos, uma vez o diâmetro da abertura do duto.

O diâmetro do duto também é um fator que pode fazer o duto alcançar o ar atmosférico conforme o navio se movimenta na água. Também altera diretamente o formato do casco na região e, conseqüentemente, perturba o escoamento na proa da embarcação. Diâmetros mais largos podem reduzir potência de giro do eixo, o que evita melhor a cavitação, todavia pode aumentar significativamente as dimensões da máquina propulsora e consumir mais recursos financeiros (BEVERIDGE, 1971).

[...]difusores podem levar a uma grande abertura no casco o que não é desejável para o ponto de vista da resistência do navio, ou se equipamentos necessitarem de ser instalados próximos da região[...] (ENGLISH, 1966, p. 17, tradução nossa)

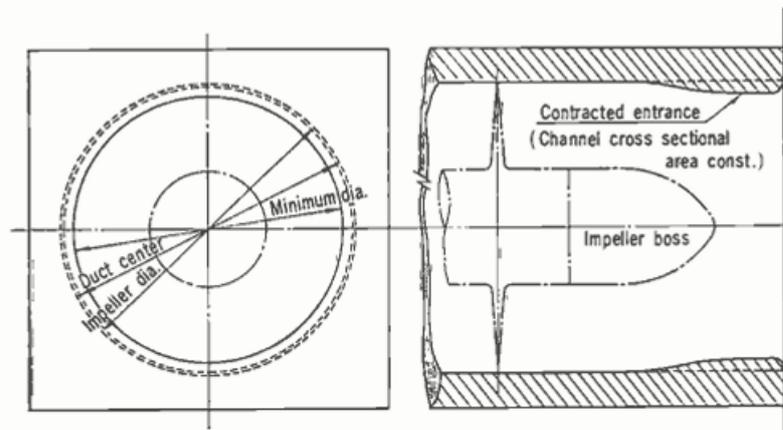
A posição a vante do duto pode reduzir o poder de gerar empuxo de um propulsor lateral. Como visto anteriormente, metade do empuxo gerado vem da energia do fluxo encontrando o casco do navio no bordo da aspiração. Logo, como não se trata de um fluido ideal tampouco de uma região totalmente plana como uma parede, esses T_p/T pode variar entre 0,52 até 0,8 (BEVERIDGE, 1971).

4.5 Formato Interno do Duto

Em relação ao formato interno do duto o formato cilíndrico se sagrou o mais eficiente se comparado com os dutos de paredes côncavas e convexas (TANIGUCHI, WATANABE e KASAI, 1966).

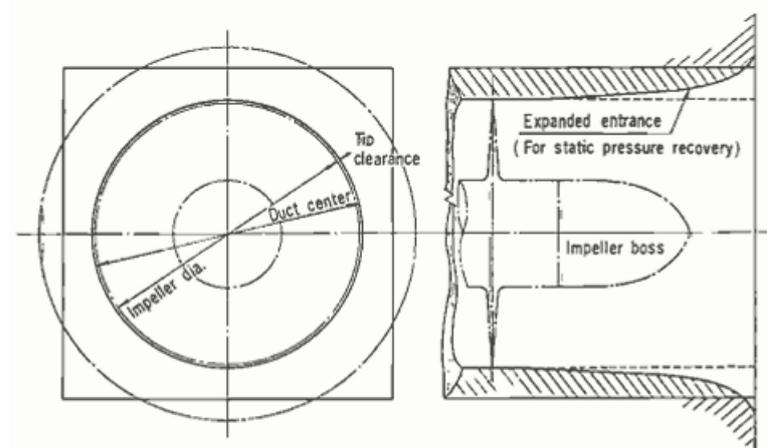
[...] C_T e C_Q obtiveram maiores valores nos dutos do tipo de paredes côncavas, seguido do duto do tipo de paredes cilíndricas, e em terceiro os dutos do tipo de paredes convexas. No caso de C_F , entretanto, nenhuma diferença pode ser observada entre eles, apesar de o duto cilíndrico parecer ter uma vantagem entre os demais. O duto de paredes cilíndricas obteve o maior valor de eficiência entre os três, enquanto o duto de paredes internas convexas obteve um pequeno valor de eficiência. (TANIGUCHI, WATANABE e KASAI, 1966, p. 6, tradução nossa)

Figura 4-7 – Duto com parede interna côncava



Fonte: Taniguchi, Watanabe e Kasai, 1966

Figura 4-8 – Duto com parede interna côncava



Fonte: Taniguchi, Watanabe e Kasai, 1966

Cabe ressaltar que o estudo de formatos e desempenhos de hélices, dutos e escoamentos tem se tornado cada dia mais complexo com auxílio de cálculos, programas e computadores cada vez mais rebuscados. Um exemplo disso é o emprego de CFD's (*Computational Fluid Dynamics*) para estudo de escoamentos, velocidade e pressões de um fluido.

4.6 Abertura do Duto

Esse é um assunto bastante estudado segundo Beveridge(1971). Existe uma peculiaridade no assunto: o lado da entrada requer uma construção diferente em relação ao lado da saída. O impasse ocorre quando os *bow thrusters* são projetados para serem reversíveis. No lado de aspiração do duto, é necessária uma borda encurvada, a fim de evitar velocidades tendendo ao infinito no escoamento, isso causa uma separação no fluxo. Parte significativa do empuxo gerado se concentra nessa região de escoamento, logo é importante aplicar um raio de arredondamento na borda da entrada do duto. Por outro lado, no lado da descarga do duto, o ideal é uma borda descontínua, “afiada”, para garantir uma que o fluxo de saída se dissipe com perdas mínimas (BEVERIDGE, 1971). O ideal é empregar um meio termo que otimize esse problema. Resultados semelhantes sugerem que a relação entre o raio da curvatura da borda e o diâmetro do duto deve estar em algum ponto entre 0,08 e 0,012 (BEVERIDGE, 1971).

Se a abertura do duto não é coberta por válvulas, o efeito de resistência ao avanço do navio aumenta.” A abertura do duto bem como seu raio de arredondamento para um *thruster* eficiente não são compatíveis com uma baixa resistência ao avanço” (BEVERIDGE, 1971, p. 17, tradução nossa). Se a abertura contém válvulas ou grades, a eficiência do propulsor lateral diminui (TANIGUCHI, WATANABE e KASAI, 1966).

4.7 Propulsores

Os estudos sobre desenvolvimento de propulsores bem como a otimização de parâmetros como eficiência, arrasto, empuxo etc. são muito numerosos na literatura. No caso de impelidores em dutos, as perdas se dão de várias maneiras, entre elas (BEVERIDGE, 1971): Rotação do fluxo: o impelidor não só impulsiona axialmente como também faz o fluido ganhar velocidade tangencial. As magnitudes das perdas e da rotação do fluxo dependem da distribuição de torque e do tamanho do boss do propulsor;

Difusão: os elementos de sustentação e o cubo do hélice causam difusão e podem ser comparados com a eficiência típica de um difusor;

Separação: Qualquer elemento que se encontrar no duto e que gere separação do fluxo, vórtices.

Uma constatação importante é a de que o coeficiente de mérito estático, C , atinge valor máximo quando o passo tem valores próximos ao valor do diâmetro do hélice. (BEVERIDGE, 1971). A respeito das pás do hélice, sabe-se que propulsores com 4 pás tendem a se sair melhores do que os de 3 pás e, as pás largas possuem melhor desempenho nas condições de operação do *bow thruster* do que as elípticas e assimétricas (BEVERIDGE, 1971).

Para ter um critério de cavitação, será utilizada a seguinte equação (BEVERIDGE, 1971):

$$\sigma' = \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot D^2 \cdot n^2} \quad (4.32)$$

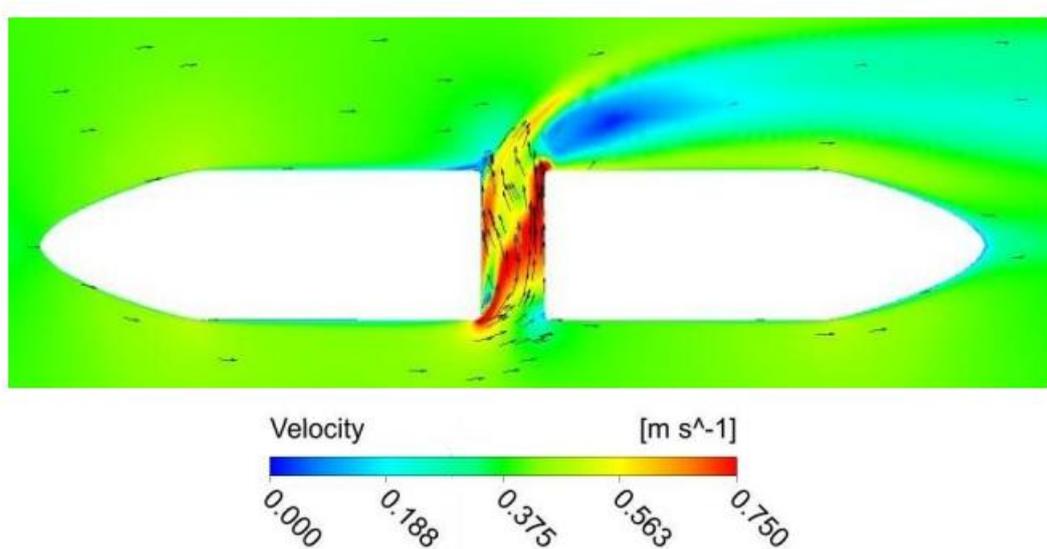
para evitar cavitação, deve-se $\sigma' > 3,5$.

Ainda sobre propulsores, apesar de o coeficiente de mérito estático teórico máximo poder atingir o valor de 2, uma postura conservadora é, ao menos, obter o valor de uma unidade quando P/D possui valores próximos de 1. Nesse ponto, o coeficiente $K_T = 0,45$ é sugerido (BEVERIDGE, 1971).

4.8 Interação com a velocidade avante

Bow thrusters normalmente são projetados para operar com alguma velocidade de avanço da embarcação (BEVERIDGE, 1971). As aberturas laterais no casco são as principais regiões responsáveis pelo acréscimo de resistência ao avanço. No decorrer do funcionamento do propulsor lateral, o bordo de descarga do duto é o que mais interfere no desempenho da variação do ângulo de proa isso porque, o jato transversal perturba o fluxo principal do escoamento a vante e vice-versa. Apesar de existir algumas fórmulas de estimar parâmetros que descrevam essas interferências, os estudos empíricos precisam ser desenvolvidos (BEVERIDGE, 1971).

Figura 4-9 – Perfil de velocidades ao redor de um casco com um propulsor transversal



Fonte: Mohan, 2017

Para os cálculos mais precisos envolvendo fluxos de fluidos reais, a equação de Navier-Stokes é o principal recurso a se utilizar em uma análise do comportamento do escoamento, distribuição de velocidades e de pressões ao longo de um espaço observado. As pesquisas em CFD vem trabalhando no sentido de conseguir estimar aproximações razoáveis da equação de Navier-Stokes (MOHAN, 2017).

5 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DO BOW THRUSTER DO NDM BAHIA

O NDM BAHIA é um navio de com diversas finalidades, como propõe seu nome. Observando algumas delas, tais como: transporte de tropas, de aeronaves, de combustíveis, de carros de combate, é possível compreender que suas atribuições estão relacionadas a navios transportadores de grandes cargas. Foi visto que, conforme os navios ficam maiores, sua capacidade de manobras vai se comprometendo. Além disso, como uma das principais atribuições do antigo TCD SIROCO (o nome do navio antes de compor as fileiras da esquadra da Marinha do Brasil) era o desembarque de carros e tropas. Essa manobra é realizada relativamente próximo à costa, mais um motivo para que a instalação do *bow thruster* fosse vantajosa ao projetista.

Nesta seção, será aplicado os conceitos abordados anteriormente para calcular os parâmetros básicos de uma instalação de propulsão lateral a fim de comparar com os trabalhos desenvolvidos sobre o tema.

5.1 Dados do navio

Navio Doca Multipropósito Bahia, (G40) da Marinha do Brasil:

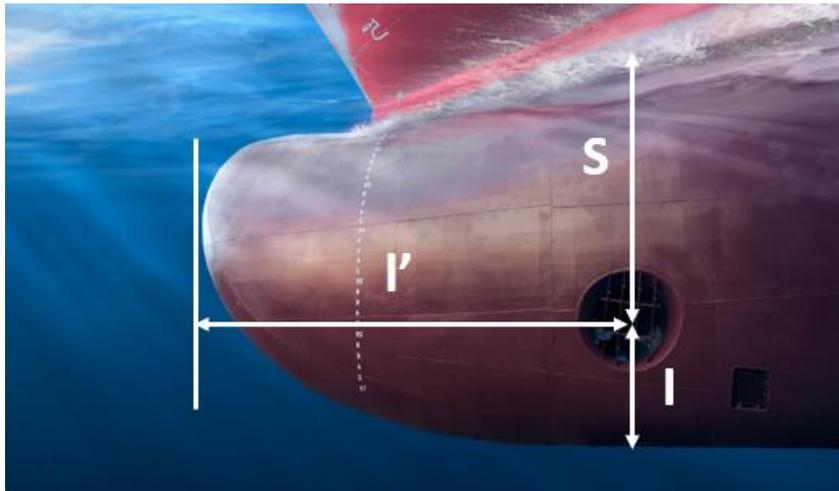
Tabela 5-1 – Dados do NDM BAHIA

| Grandeza Física | Símbolo | Valor | Unidade de medida |
|--|----------|--------|-------------------|
| Deslocamento | Δ | 11.500 | toneladas |
| Comprimento | L | 165,6 | metros |
| Boca | B | 23,5 | metros |
| Calado | H | 5,5 | metros |
| Comprimento do duto | l | 3,8 | metros |
| Diâmetro do duto | D | 1,65 | metros |
| Posição longitudinal | l' | 18,7 | metros |
| Distância do centro do duto à quilha | I | 2,55 | metros |
| Distância do centro do duto à linha d'água | S | 2,95 | metros |

| | | | |
|----------------------|-------|-----|----------|
| Número de pás | N_p | 4 | unidades |
| Rotação do propulsor | n | 247 | rpm |

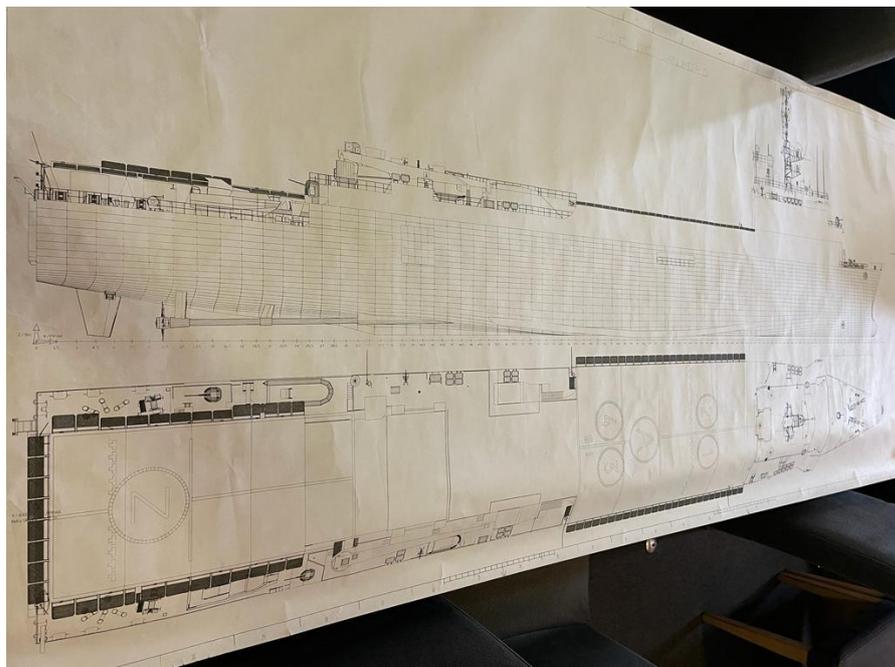
Fonte: Marine Nationale, 1997

Figura 5-1 – Imagem de um bow thruster



Fonte: NxBoats, 2023

Figura 5-2 – Fotografia do desenho técnico do NDM BAHIA utilizado para as medições



Fonte: Autor, 2023²

² Dados extraídos do desenho técnico constam referenciados na tabela 5-1.

5.2 Valores obtidos pelo método

Os valores de I e S estão na faixa entre 1,5 D e 2 D, o comprimento l do duto não se distancia do sugerido anteriormente, com um valor próximo a 2,3 D.

Utilizando o valor de Δ no gráfico da figura 3-4, extrai-se um valor entre 0,45 e 0,35 graus por segundo e, em seguida, da figura 3-5 com a proporção entre a posição do *bow thruster* em relação a proa pelo comprimento do navio o M_0 encontrado foi de aproximadamente 110.

Para o cálculo do empuxo, o método utiliza-se da seguinte expressão

$$T = \frac{\omega_0^2 \cdot L^3 \cdot H}{M_0^2} \quad (5.1)$$

Utilizando uma relação contida no trabalho de Umana (2022):

$$U_j = \sqrt{T/\rho \cdot A} \quad (5.2)$$

A partir do valor de U_j e considerando a utilização do propulsor lateral restrita a velocidade de avanço da embarcação de, no máximo, 3 nós (5,063 ft/s), a noção de perda de eficiência do equipamento pode ser analisada utilizando a figura 3-2.

Dados de rotação e com a pressão relativa à profundidade, para um propulsor com 4 pás, em 4-32, permitem calcular o valor de $\sigma \gg 3,5$, desconsiderando perdas de carga no duto.

Foi analisado utilizando o valor máximo e mínimo da faixa do relativa ao gráfico da figura 3-4.

Tabela 5-2 – Dados obtidos pelo método considerando taxa de guinada 0,45°/s

| Grandeza | Símbolo | Valor 1 | Unidade 1 | Valor 2 | Unidade 2 |
|----------------------------|------------|----------|-----------|---------|-----------|
| Velocidade angular de proa | ω_0 | 0,45 | °/s | 0,00785 | rad/s |
| Constante de rotação | M_0 | 110 | - | - | - |
| Empuxo | T | 48.419,4 | lb | 24,21 | tnf |

| | | | | | |
|---------------------|----------|-------|------|-------|----|
| Velocidade do jato | U_j | 32,53 | ft/s | 19,26 | kn |
| Índice de cavitação | σ | 6,5 | - | - | - |

Tabela 5-3– Dados obtidos pelo método considerando taxa de guinada 0,35°/s

| Grandeza | Símbolo | Valor 1 | Unidade 1 | Valor 2 | Unidade 2 |
|----------------------------|------------|-----------|-----------|---------|-----------|
| Velocidade angular de proa | ω_0 | 0,35 | °/s | 0,00611 | rad/s |
| Constante de rotação | M_0 | 110 | - | - | - |
| Empuxo | T | 29.290,74 | lb | 14,65 | tnf |
| Velocidade do jato | U_j | 32,53 | ft/s | 14,98 | kn |
| Índice de cavitação | σ | 6,5 | - | - | - |

Cabe a ressalva que não foi o foco detalhar o modelo em si instalado com dados do fabricante e, sim, utilizar algumas de suas grandezas que podem – e precisam – ser utilizadas no método, para comparação com os parâmetros que se desenvolvem na realidade. Pode-se observar que, para o caso da segunda tabela, os valores de empuxo são relativamente aproximados, 10,7 tnf pelo manual e 14,6 tnf pelo método, um erro de 36%.

Figura 5-3 – Extrato do manual do fabricante do *Bow Thruster* do NDM Bahia documentado pela MARINE NATIONALE

1.2 - CARACTERISTIQUES

1.2.1 - Propulseur

- FabricantKa Me Wa
- Type..... 1650G/BMS-CP
- Poussée (sans grille de protection)..... 10,7 t à 750 kW de puissance
- Diamètre de l'hélice 1650 mm
- Vitesse de l'hélice247 tr/min
- Nombre de pales d'hélices..... 4

Fonte: Marine Nationale, 1997

5.3 Limitações do Método

Apesar de ser bastante elucidativo e didático, esse método tem algumas limitações. A primeira está relacionada com sua obsolescência. Com o advento de tecnologias mais profundas no ramo da computação e simulação, métodos como esse vão perdendo sua utilidade e praticidade.

Outras limitações ocorrem por causa da tentativa de sistematizar um amplo conjunto de variáveis em poucos elementos os quais podem ser mais facilmente manuseados. O estudo da hidrodinâmica se debruça sobre um tema literalmente fluido que, em boa parte das vezes, não é tão simples de determinar.

Outra limitação que pode ser percebida é a não utilização do padrão internacional de sistema de medidas por alguns autores no momento de desenhar os gráficos e publicar tabelas, o que acaba forçando os pesquisadores subsequentes de outras nacionalidades a ajustarem seus cálculos com mais dificuldades.

6 CONCLUSÃO

Esse trabalho se propôs a aplicar o método organizado por Beveridge – método esse planejado para sugerir boas práticas de engenharia e construção naval no que diz respeito ao local de instalação, formatos, parâmetros de desempenho, entre outros assuntos discorridos no trabalho – para comparar com a unidade do *bow thruster* que equipa o Navio Doca Multipropósito BAHIA.

Logo, foi observado que, em relação ao posicionamento no casco e às dimensões do equipamento, o modelo instalado no NDM BAHIA está de acordo com o sugerido pelas conclusões dos autores referenciados.

O valor encontrado de velocidade de fluxo desse equipamento evita diminuições demasiadas nos coeficientes de torque e de empuxo, sinalizando que seu ponto de projeto está adequado para as velocidades de avanço sugeridas como máximas neste trabalho.

O índice de cavitação também foi satisfeito, demonstrando uma boa sinergia de todo conjunto com o escoamento do fluido ao longo do interior do duto.

Conclui-se que para navios do porte do NDM BAHIA que precisam de boa manobrabilidade, o uso do equipamento é vantajoso, ainda mais se considerar a sua operação principal próximo à costa.

Uma extrapolação pode ser considerada neste ponto: como o *bow thruster* interfere na resistência ao avanço do navio, navios menores, que possuem relativa facilidade de manobrar, podem perder eficiência com esse equipamento. Isso também vale para navios que procuram desenvolver velocidades elevadas. O efeito da adição de resistência ao avanço, ao instalar o conjunto a bordo, pode ter desvantagens preponderantes em relação as vantagens do acréscimo de manobrabilidade a baixas velocidades.

6.1 Considerações Finais

O desenvolvimento das simulações computacionais vem acelerando ao longo dos últimos anos devido aos avanços da tecnologia digital (GALLINA, 2015). Essa tendência aumenta a precisão e complexidade das simulações conduzidas. É possível perceber, portanto, que as práticas navais de estudos hidrodinâmicos, que afetam diretamente o universo de desenvolvimento de propulsores laterais, está mudando de paradigma.

Cabe ressaltar que os trabalhos de Beveridge (1971), Platt, (1948), English, (1966), Taniguchi (1966), entre outros não citados nesse trabalho são bases, em grande parte, de soluções da engenharia naval que são aplicadas em cálculos e simuladas até os dias atuais. Suas

contribuições ainda acumulam alguma relevância não só por fornecer o alicerce das teorias e conclusões construídas dentro do assunto mas também pela riqueza didática que seus métodos carregam.

A própria concepção ou idealização de modelos digitais para teste podem partir de conhecimentos do trabalho desses autores de meados do século vinte. Resumidamente, os trabalhos e pesquisas nem sempre se sobrepõem, em muitos casos eles se complementam.

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Semelhanças, diferenças, aplicações, vantagens e desvantagens entre *bow thrusters* elétricos e eletro-hidráulicos;

Transferência de potência entre propulsor e seu equipamento acionador;

Principais falhas e quais os métodos de evitá-las, através de dados para análise de uma manutenção preditiva ou prescritiva, com um possível emprego de *machine learning*

O sistema de controle de um propulsor lateral, possíveis relações com posicionamento dinâmico.

Análises mais específicas para determinadas condições, equipamentos e/ou parâmetros através de uma abordagem com emprego de *CFD*.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Bernardo; BIAZON, Tássia. O transporte marítimo e o uso sustentável do oceano. **Jornal da USP**, São Paulo, 6 Outubro 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/artigos/o-transporte-maritimo-e-o-uso-sustentavel-do-oceano/>. Acesso em: 29 Agosto 2023.

BEVERIDGE, John L. **Design and performance of bow thrusters**. Naval Ship Research and Development Center. Bethesda, MD, United States of America, p. 45. 1971. (3611).

CARLTON, John S. **Marine Propellers and Propulsion**. 2^a. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.

DCNS. **Maquette 3D, TDC SIROCO**. Marine Nationale. Brest, França. 1997.

ENGLISH, J. W. Further considerations in the design of lateral thrust units. **International Shipbuilding Progress**, 13, n. 137, 1 janeiro 1966. 14-28.

GALLINA, Andre D. F. **Aplicação de CDF para obtenção de derivadas hidrodinâmicas de embarcações em condição de manobra**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 147. 2015.

MA, Ning *et al.* Numerical study on hydrodynamic forces and course stability of a ship in surf-riding condition based on planar motion mechanism tests. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, Publicado online, 28 Maio 2021. 12.

MARINE NATIONALE. **Propulseur d'etrave type TT1650G/BMS-CP: documentation logistique utilisateur appareil**. Marine Nationale. [S.l.], p. 80. 1997.

MOHAN, Anoop. **Numerical analysis of bow tunnel thruster performance**. Marine Technology, Specialization Ship Hydromechanics. Delft University of Technology. Mekelweg, Delft, Netherlands, p. 71. 2017.

NEWMAN, John N. **Marine hydrodynamics**. 40th anniversary edition. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1977.

NX BOATS. Bow thruster e stern thruster: tudo o que você precisa saber. **NXBOATS**, 2023. Disponível em: <https://nxboats.com.br/blog/bow-thruster/>. Acesso em: 28 Setembro 2023.

PLATT, Robert J. J. **Static tests of a shrouded and an unshrouded propeller**. Langley Memorial Aeronautical Laboratory. Langley Field, VA, United States of America, p. 40. 1948. (NACA Research Memorandum L7H25).

SANTOS, Adriana B. A. D.; FAZION, Cíntia B.; MEROE, Giuliano P. S. D. Inovação: um estudo sobre a evolução do conceito de Schumpeter. **Caderno de Administração**, São Paulo, 27 março 2012.

TANIGUCHI, Kaname; WATANABE, Kyoji; KASAI, Hironao. **Investigations into the fundamental characteristics and operating performances of side thruster**. Mitsubishi Heavy Industries LTD. [S.l.], p. 24. 1966. (MTB 010035).

UMANA, Emediong C.; MAURICE, Joseph J.; MICHAEL, Udoh M. Maneuverability of a vessel using bow thrusters. **Global Journal of Engineering and Technology Advances**, Akwa Ibom State, p. 48-56, Agosto 2022. ISSN 2582-5003.