



REVISTA

Naval e Oceânica

<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rno>

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA GEOMETRIA DE CASCO E PROPULSÃO PARA UM REBOCADOR EM ESCALA REDUZIDA

Development and Experimental Evaluation of Hull Geometry and Propulsion System for a Scale-Model Tugboat

Daniel da Cruz Pereira Filho¹, Vitor Afonso Queiroz Basso¹, Marcelo dos Reis Farias¹,
Eduarda da Silva Belloni^{1*},

Recebido em: 19 nov. 2025 | Aceito em: 21 nov. 2025

RESUMO

O presente trabalho apresenta o processo de desenvolvimento e avaliação experimental da geometria de casco e do sistema de propulsão de um rebocador em escala reduzida, desenvolvido para o Desafio Universitário de Nauti Design (DUNA). Inicialmente, foram analisados diferentes tipos de cascos monócitos por meio de revisão bibliográfica, modelagem e análise hidrodinâmicas utilizando o método de *Holtrop*. A partir dessa análise, adotou-se uma geometria híbrida composta por um casco *Flat Bottom* com modificação *Shallow Vee* na proa, buscando reduzir a resistência ao avanço sem comprometer a estabilidade. Paralelamente, o sistema propulsivo foi otimizado por meio de ensaios de tração estática com hélices comerciais e hélices projetadas e fabricadas através de manufatura aditiva, variando número de pás, passo e diâmetro. Os resultados mostraram que o casco modificado apresentou redução média de 16% na resistência e 15% na potência requerida em velocidades acima de 2 nós. Já para o sistema de propulsão, a hélice de três pás (80 mm, passo 94,3 mm) apresentou o melhor desempenho, atingindo melhores resultados avante e a ré, enquanto hélices com mais pás apresentaram perda de eficiência que pode ser devido à interferência entre pás em altas rotações. Embora não controlados em laboratório, os testes de campo da embarcação durante a competição permitiram observar tendências coerentes com as análises realizadas. Os resultados demonstram que a integração entre otimização geométrica e propulsiva é essencial para melhorar a performance da embarcação.

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (Cefet/optimisation RJ), Itaguaí – Rio de Janeiro, Brasil Modelling.



REVISTA

Naval e Oceânica

Palavras-chave: rebocador; otimização de casco; hélices; bollard pull.

ABSTRACT

The present study describes the optimization process of the hull geometry and propulsion system of a scale-model tugboat developed for the Desafio Universitário de Nautidesign (DUNA). Initially, different monohull configurations were examined through a literature review, geometric modeling, and hydrodynamic analysis using the Holtrop method. Based on this assessment, a hybrid geometry was adopted, combining a flat-bottom hull with a Shallow Vee bow modification, aiming to reduce resistance without compromising stability. In parallel, the propulsion system was optimised through bollard pull tests using both commercial propellers and custom-designed propellers manufactured via additive processes, varying the number of blades, pitch, and diameter. The results showed that the modified hull achieved an average reduction of 16% in resistance and 15% in required power at speeds above 2 knots. For the propulsion system, the three-bladed propeller (80 mm, 94.3 mm pitch) demonstrated the best performance, achieving higher bollard pull both ahead and astern. Propellers with a greater number of blades exhibited efficiency losses likely associated with blade-to-blade flow interference at high rotational speeds. Although not conducted under controlled laboratory conditions, the field tests performed during the competition revealed trends consistent with the analytical results. Overall, the findings indicate that integrating hull-form optimization with systematic propeller evaluation through bollard pull testing is essential for improving the vessel's performance.

Keywords: tugboat; hull optimisation; propeller; bollard pull.

1 INTRODUÇÃO

O transporte marítimo, que responde por mais de 80% do volume global de cargas (Siqueira, 2024), exige soluções navais que conciliam desempenho, confiabilidade e sustentabilidade ambiental. O desenvolvimento de embarcações eficientes e seguras depende da integração entre o projeto hidrodinâmico do casco e o sistema de propulsão, garantindo melhor aproveitamento energético e redução dos impactos ambientais. Um dos principais desafios enfrentados na construção de cascos é garantir resistência e durabilidade suficientes para suportar as condições severas do ambiente marítimo sem comprometer o desempenho hidrodinâmico.

Os cascos devem ser capazes de resistir esforços hidrodinâmicos, estruturais e operacionais, assegurando a integridade estrutural e a segurança da tripulação (Chapman et al., 1991). Além disso, a busca por eficiência demanda o equilíbrio entre peso, resistência mecânica e desempenho hidrodinâmico, visando reduzir a resistência ao avanço e o consumo energético sem afetar a estabilidade (Lewis, 1989). A construção naval é uma área de natureza



REVISTA

Naval e Oceânica

multidisciplinar, que combina conhecimentos de engenharia naval, ciência dos materiais, mecânica dos fluidos e sistemas de propulsão (Carlton, 2007).

O processo de projeto e fabricação de cascos envolve a escolha criteriosa de materiais, processos produtivos e geometrias, com o objetivo de otimizar o desempenho estrutural e hidrodinâmico da embarcação (Megson, 2012). Com os avanços da engenharia, vindo sendo incorporado técnicas de modelagem computacional, como a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e a Análise de Elementos Finitos (FEA), permitindo simular o comportamento do casco sob diferentes condições de operação e otimizar geometrias antes da fabricação física (Malenica et al., 2017; Anderson et al., 2014). Com isso, essas ferramentas têm se mostrado fundamentais para o desenvolvimento de embarcações.

De maneira complementar, a propulsão naval surge como outro pilar essencial para otimização das embarcações, integrando-se ao desempenho do casco. Além de garantir a movimentação das embarcações, o sistema propulsivo influencia diretamente a eficiência energética, o comportamento hidrodinâmico e a operação segura da embarcação, tornando indispensável sua integração com o projeto do casco.

O projeto do sistema de propulsão é fortemente influenciado pela geometria da hélice, que determina a relação entre passo e diâmetro (p/D), número de pás, ângulo de inclinação (*rake*) e curvatura (*skew*) (GOJI, et al., 2019). Esses parâmetros impactam diretamente a eficiência, o risco de cavitação e as vibrações transmitidas à estrutura do casco (MAN, 2018). Assim, a integração entre o formato do casco e o dimensionamento da propulsão é de extrema importância para garantir um desempenho otimizado, sobretudo em embarcações de pequeno porte, onde pequenas variações geométricas têm efeito significativo sobre a resistência ao avanço.

Tendo em vista o exposto anteriormente, o presente trabalho tem como objetivo projetar e avaliar o desempenho da geometria de casco e o sistema de propulsão de um rebocador em escala reduzida para o Desafio Universitário de Nauti Design (DUNA), com base em modelagem computacional e análise de resistência do casco e testes experimentais de hélices. Além de promover o aprendizado prático em engenharia, este estudo se alinha às diretrizes de sustentabilidade e inovação tecnológica do setor naval, dialogando com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU — especialmente o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).



REVISTA

Naval e Oceânica

Dessa forma, o trabalho contribui para o desenvolvimento de soluções mais eficientes, sustentáveis e aplicáveis à formação de engenheiros comprometidos com os desafios contemporâneos da construção naval.

2 METODOLOGIA

O projeto foi dividido em duas etapas: geométrica do casco e sistema propulsivo, conforme o fluxograma apresentado na Figura 1. Na otimização geométrica do casco, o trabalho iniciou com uma revisão bibliográfica para fundamentar teoricamente o estudo. Em seguida, foi realizada a modelagem, permitindo a criação de formas geométricas de cascos. Na etapa seguinte foi realizada a análise hidrodinâmica, na qual se avalia o desempenho do casco em termos de resistência e eficiência. Por fim, realizou-se a fabricação do casco, com base no modelo otimizado.

Paralelamente, no projeto do sistema propulsivo também se iniciou com uma revisão bibliográfica, garantindo a fundamentação do estudo de componentes propulsivos. Em seguida, foi realizada a modelagem dos componentes levando em consideração as restrições do projeto como: motor, diâmetro de hélice, espaço e potência. Depois da modelagem foi realizada a fabricação e montagem do sistema propulsivo. Finalmente, testes foram feitos e dados coletados, permitindo avaliar o desempenho do sistema.

Figura 1 – Estrutura metodológica do projeto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.1 Análise e Modelagem da Geometria do Casco



REVISTA

Naval e Oceânica

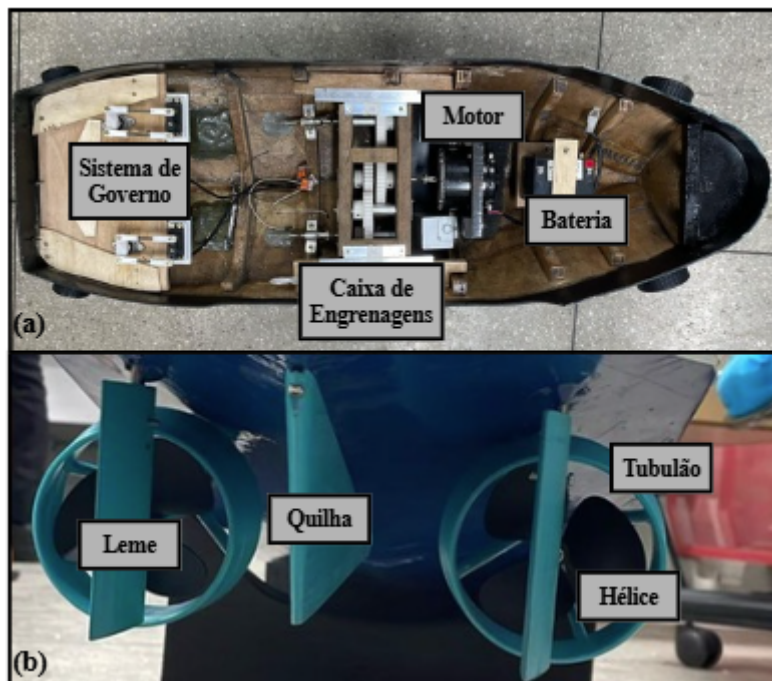
Através de uma revisão bibliográfica, foram analisados quatro tipos de cascos monocascos: *Flat Bottom*, *Round Bottom*, *Shallow Vee* e *Deep Vee*. Buscando a associação entre o tipo de casco e estabilidade, força, velocidade e facilidade de construção. A partir desse estudo, definiu-se a configuração *Flat Bottom* como geometria base, visto que é uma geometria típica utilizada em rebocadores em escala real.

Após, foi proposto uma modificação na proa buscando uma geometria *Shallow Vee* para reduzir a resistência ao avanço e melhorar a estabilidade longitudinal. As duas geometrias foram modeladas no software *Freeship*, analisadas e comparadas no software *Maxsurf Resistance* utilizando o método de Holtrop (Holtrop, 1982).

2.2 Sistema de Propulsão

O sistema propulsivo foi desenvolvido com duas linhas de eixo e uma caixa de engrenagens de relação 1:1, garantindo rotação contrária das hélices para mitigar o efeito de *Prop Walk* (MAN, 2018), conforme mostrado pela Figura 2. Todos os componentes (engrenagens, suportes, lemes e tubulão), foram projetados no software *SolidWorks* e fabricados em Ácido Polilático (PLA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) através de manufatura aditiva. O sistema é composto por um motor elétrico modelo IMOBRAS 1014102 com tensão nominal de 13V, com uma corrente de 28A, torque de 0,8 N.m, potência de 240W e rotação máxima de 2900 rpm. Esse motor é responsável por converter a energia elétrica em energia mecânica e é acionado por um rádio controle. Para alimentação do motor é utilizado uma bateria de chumbo ácido selada, de 12V e capacidade de até 6Ah. Esse sistema foi determinante para a execução dos testes experimentais nos hélices.

Figura 2 – Sistema de Propulsão da Embarcação. (a) Partes interna do sistema de propulsão e (b) Componentes da popa.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para melhor desempenho do sistema de propulsão, foram testadas hélices comerciais e hélices projetadas e fabricadas em Ácido Polilático (PLA) através de manufatura aditiva. Os parâmetros analisados foram: número de pás, diâmetro (limitado a 80mm por DUNA) e passo. A tabela 1 apresenta os parâmetros das hélices analisadas.

Tabela 1 - Parâmetros das hélices analisadas.

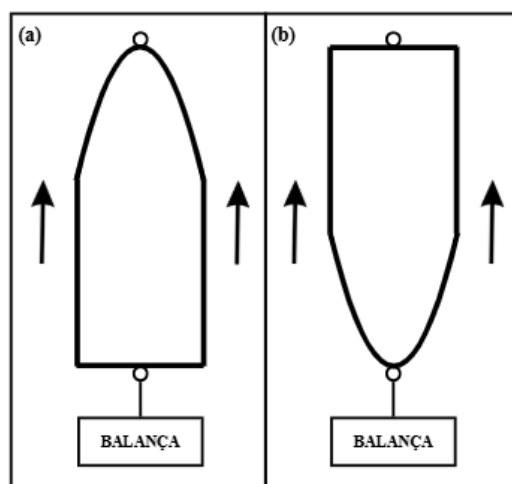
Tipo de Hélice	Nº de Pás	Diâmetro (mm)	Passo (mm)
Projetada	2	76	76,9
Projetada	3	76	76,9
Projetada	4	78	76,9
Projetada	6	78	76,9
Comercial	3	75	94,3
Comercial	3	80	94,3

Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise e comparação foi realizada através da força de tração estática (*bollard pull*) medida avante e a ré, através de uma balança digital portátil com capacidade máxima de 50 kg e resolução de 10 g. A balança foi fixada entre o ponto de amarração da embarcação e uma

estrutura de ancoragem rígida para minimizar erros, conforme esquema apresentado na Figura 3. Os dados de força foram coletados com a embarcação numa piscina, acionando o motor gradualmente até a sua rotação máxima e mantendo na rotação máxima durante 20 segundos para estabilizar o comportamento dinâmico e registro adequado da força.

Figura 3 – Esquema de ensaio para medição de tração estática. (a) Avante e (b) A ré.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Otimização da Geometria do Casco

A seguir serão apresentados os resultados e discussões da revisão bibliográfica, modelagem, análise hidrodinâmica, construção e testes do casco.

3.1.1 Comparação dos tipos de casco

Com a revisão bibliográfica, foi possível construir a comparação teórica da Tabela 2, que apresenta uma síntese das características de estabilidade, desempenho em ondas, velocidade em águas rasas e facilidade de construção para quatro tipos de cascos comumente utilizados.

Tabela 2 – Comparação sintetizada dos cascos das embarcações.

Tipo de Casco	Estabilidade (Repouso)	Desempenho em Ondas	Velocidade em Águas Rasas	Construção Simples
Flat Bottom	Alta	Baixo	Baixa	Excelente



Round Bottom	Baixa	Alta	Alta	Moderada
Shallow Vee	Moderada	Moderada	Moderada	Boa
Deep Vee	Baixa	Excelente	Alta	Ruim

Fonte: Elaborado pelos autores.

Além disso, também foi possível realizar uma análise de comparação dos coeficientes geométricos (C_b , C_m , C_p , C_{wl}) de diferentes tipos de embarcações, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes médios das embarcações.

Embarcação	Geometria	C_b	C_m	C_p	C_{wl}
Cargueiro grande	Round Bottom	0,78	0,99	0,78	0,84
Cargueiro médio	Round Bottom	0,71	0,98	0,72	0,80
Rebocadores	Flat Bottom	0,59	0,89	0,65	0,80
Iates à vela	Round Bottom	0,20	0,40	0,50	0,75
Lancha	Shallow Vee	0,60	0,70	0,50	0,70
Iates	Deep Vee	0,57	0,94	0,60	0,72
Cruzeiros	Round Bottom	0,67	0,99	0,78	0,84

Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise das características dos diferentes tipos de casco, conforme apresentado nas Tabela 2 e 3, indicou que os rebocadores utilizam o casco *Flat Bottom*, proporcionando características essenciais para operações desse tipo de embarcação. Entretanto, para atender às demandas de velocidade e desempenho durante as provas do DUNA, tornou-se evidente a necessidade de adaptar o design convencional do casco de forma a melhorar o desempenho hidrodinâmico sem comprometer a estabilidade. Tendo em vista essa análise, o design de uma geometria híbrida, combinando o *Flat Bottom* com uma proa em formato *Shallow Vee* ou *Deep Vee*, pode representar uma solução viável para a otimização do casco. Essa adaptação pode reduzir a resistência ao avanço e aumentar a velocidade operacional, mantendo as vantagens de estabilidade e força do casco *Flat Bottom*.

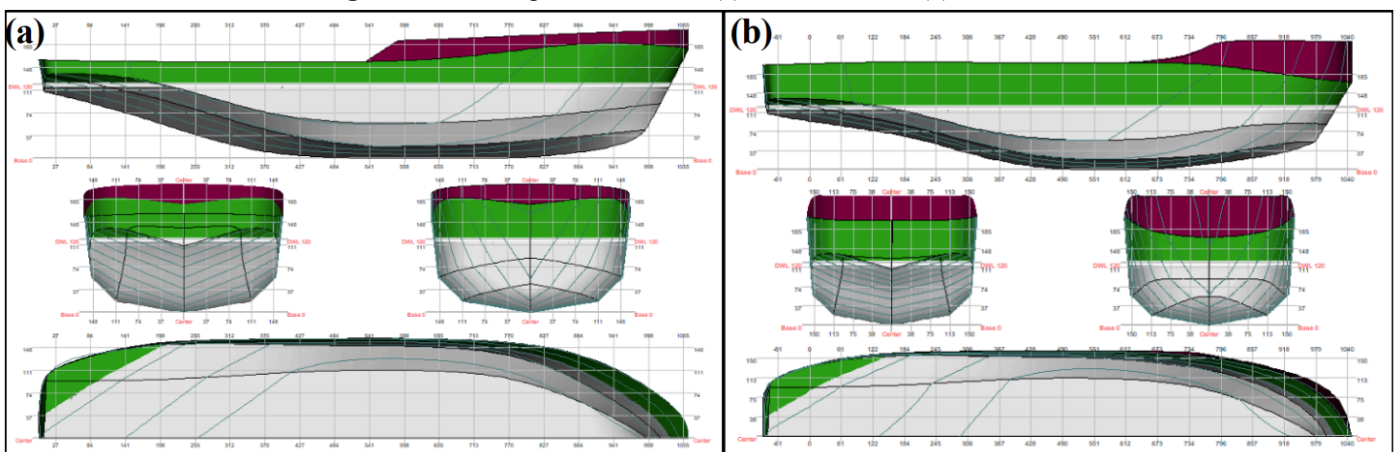
Dessa maneira, a proposta de um casco híbrido demonstra ser uma alternativa eficiente para rebocadores que necessitam conciliar estabilidade, manobrabilidade e desempenho em velocidade, atendendo aos critérios funcionais e operacionais. A análise evidencia que a união de geometrias é uma estratégia promissora para otimizar o desempenho de embarcações com múltiplos requisitos operacionais.

3.1.2 Modelagem dos Cascos

A Figura 4 apresenta o casco padrão de um rebocador (Figura 4 – a) e um casco com a geometria modificada (Figura 4 – b). O casco padrão apresentou um coeficiente de bloco de 0,498 e um coeficiente prismático de 0,614, refletindo em um casco de formas mais cheias, característico de rebocadores convencionais voltados para elevada manobrabilidade e tração em baixas velocidades.

O casco com geometria modificada (Figura 2) apresenta valores inferiores de coeficiente de bloco de 0,464 e coeficiente prismático de 0,566. Além disso, essa geometria possui um ângulo de entrada mais afilado (*Vee*) para obter maior eficiência hidrodinâmica, com redução da resistência de forma e melhor desempenho em regime de maior velocidade. Para otimizar ainda mais o rebocador, o centro de carena (CC) foi ajustado. O casco padrão o CC encontra-se avançado (6,47%), enquanto no casco modificado está mais próximo ao meio do comprimento (2,92%), o que favoreceu o equilíbrio longitudinal.

Figura 4 – Modelagem dos Cascos. (a) Casco Padrão e (b) Casco Modificado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

No que se refere à estabilidade, ambos os modelos apresentaram valores próximos de metacentro transversal (0,169 m e 0,177 m, respectivamente), porém o casco modificado demonstrou maior metacentro longitudinal (1,206 m contra 0,969 m), indicando menor suscetibilidade a variações de trim. Além disso, o casco modificado apresenta área molhada superior (0,387 m² contra 0,370 m²), o que implica maior



REVISTA

Naval e Oceânica

resistência por fricção, o que aumenta a resistência, porém esse efeito está sendo parcialmente compensado pelas formas mais hidrodinâmicas do casco.

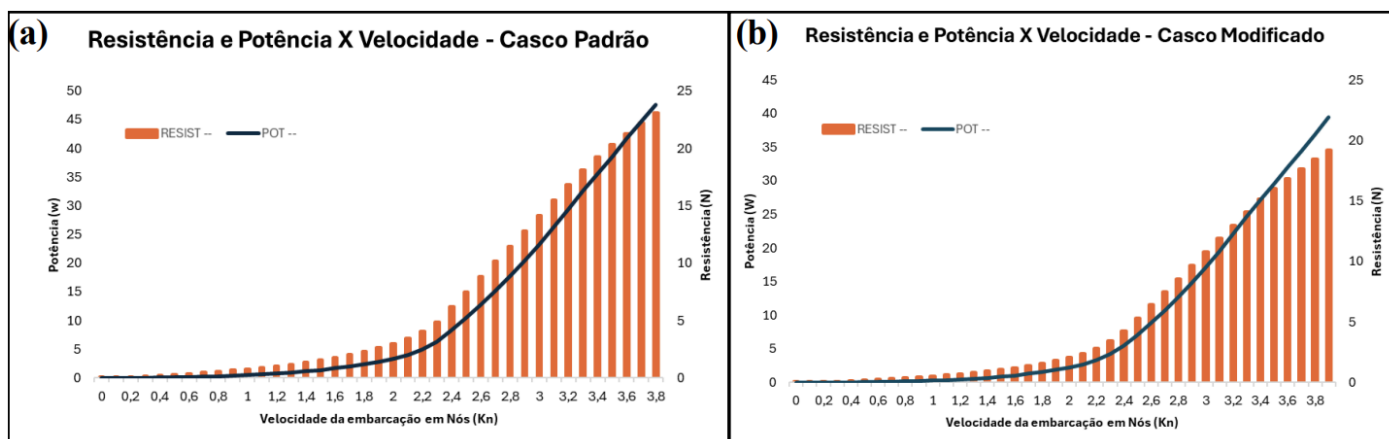
Com isso, os resultados apontam que, enquanto o casco padrão mantém as características tradicionais de um rebocador portuário, o casco modificado representa uma pequena melhoria no projeto sem perder os atributos fundamentais para atender às exigências da competição.

3.1.3 Análise Hidrodinâmica

A partir da definição do casco conforme apresentada na seção anterior, o passo seguinte foi analisado o modelo do casco padrão e o modelo do casco modificado (Figura 4) no programa *Maxsurf* com base na metodologia *Holtrop* (HOLTROP et al., 1982) para diferentes velocidades da embarcação e obter a força de resistência do casco e a potência necessária.

A seguir a Figura 5 apresenta os resultados obtidos na análise do casco padrão e do casco modificado, respectivamente.

Figura 5 – Resultados da Análise de Resistência e Potência. (a) Casco Padrão e (b) Casco Modificado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ambos os cascos apresentam um aumento progressivo da resistência e potência à medida que a velocidade aumenta. O casco modificado apresenta uma resistência de aproximadamente 20 N a 4 nós, enquanto o casco padrão atinge 24 N na mesma condição. Essa diferença é especialmente relevante em velocidades acima de 2,0 nós, com o casco modificado mantendo uma resistência menor em toda a faixa de operação. Além disso, o casco modificado também se destaca na potência, exigindo cerca de 40 W a 4 nós,



REVISTA

Naval e Oceânica

enquanto o casco padrão demanda 47 W para a mesma velocidade. Esta redução no consumo de energia sugere que o casco modificado é mais eficiente em termos de propulsão, o que pode resultar em uma maior autonomia e eficiência energética para a embarcação.

A redução da resistência e da potência no casco modificado visa uma otimização do design, que pode ser atribuído a melhorias na forma hidrodinâmica e na distribuição de carga do casco. O menor consumo de energia aumenta a autonomia da embarcação durante a competição, e pode contribuir para uma operação mais sustentável e ecológica, buscar a otimização pode representar um avanço significativo em projetos de embarcações.

3.1.4 Construção do Casco

Após a modelagem e análise hidrodinâmica, foi realizada a construção do primeiro rebocado. A fabricação envolveu diversos métodos, ferramentas, materiais e técnicas. O casco foi modelado no software *FreeShip*, enquanto sistemas de transmissão, governo e superestrutura foram desenvolvidos nos softwares *SolidWorks*, *Inventor* e *AutoCAD 2D*, permitindo geometrias conforme a necessidade.

O plano de linhas foi impresso em escala real, e o casco construído com madeira compensada, revestido com tecido de fibra de vidro e resina epóxi, garantindo resistência e impermeabilidade. O acabamento utilizou gel *isocoat* e tinta epóxi. O método construtivo foi o *strip planking*, com fabricação por usinagem manual usando serras, furadeiras, lixas, além de rolos e pincéis para laminação. A escolha dos materiais considerou acessibilidade e viabilidade técnica, com uso adequado de EPIs. A Figura 6, apresenta a construção do casco e a Tabela 4 apresenta as dimensões principais do rebocador construído.

Figura 6 – Construção do Casco.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 3 - Dimensões Principais do Rebocador Modificado.

Parâmetro	Projeto	Real
Comprimento (mm)	1000	1010
Boca máxima (mm)	340	345
Borda livre (mm)	80	80
Calado (mm)	120	150
Deslocamento (kg)	21	22,5
Volume submerso (m ³)	0,02	-

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1.5 Testes em campo

Os testes realizados não puderam ser controlados em laboratório. Essa etapa ocorreu durante a própria competição DUNA, o que limita a análise quantitativa detalhada. Ainda assim, é possível correlacionar o desempenho com as características do casco desenvolvido. A embarcação destacou-se nas provas de velocidade, refletindo os efeitos positivos do casco modificado, que favorecem redução da resistência hidrodinâmica e eficiência avante.

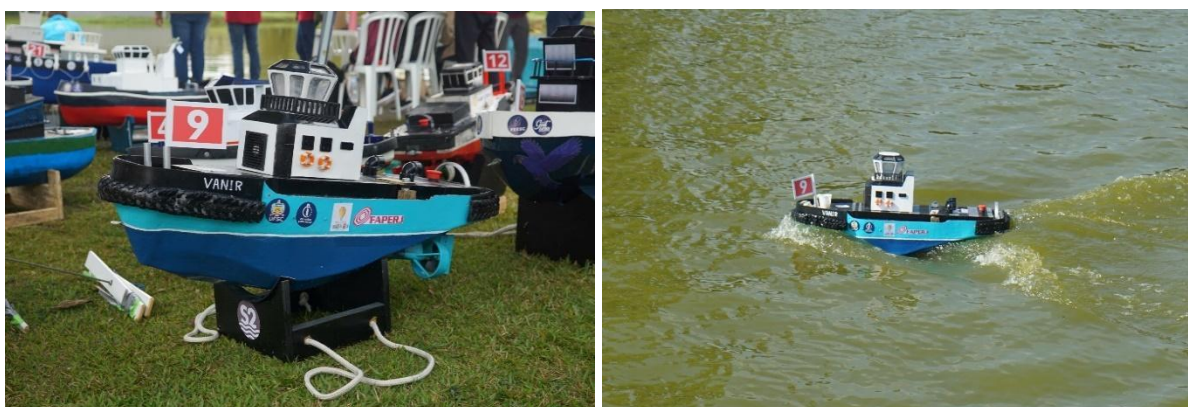
Em contrapartida, durante o teste de pilotagem, a embarcação mostrou excelente desempenho avante, mas ao navegar à ré perdeu estabilidade direcional e começou a girar. Esse comportamento está sendo estudado para a otimização das próximas geometrias. Nas



provas de manobrabilidade e força, o casco apresentou desempenho mediano, resultado que decorreu mais da prática do piloto do que de limitações da geometria, pois essas provas consistiam em navegar com uma barçaça.

Por fim, o projeto do casco cumpriu seu objetivo de otimizar a geometria para melhor atender a demanda da competição, mas apresentou limitações em marcha à ré e menor performance em provas de força, demonstrando a importância de equilibrar as geometrias. A Figura 7 apresenta o rebocador durante a competição DUNA.

Figura 7 – Rebocador durante a Competição DUNA.



Fonte: Elaborado pelos autores.

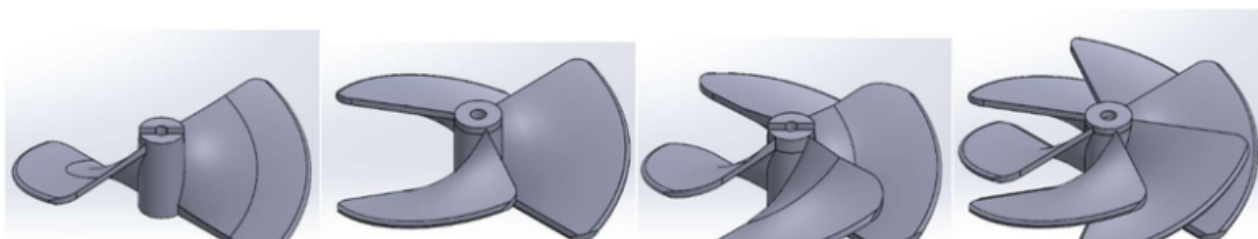
3.2 Desempenho Propulsivo

A seguir serão apresentados os resultados e discussões da modelagem e análise dos propulsores.

3.2.1 Propulsores

Foram testadas hélices comerciais e hélices projetadas com diferentes números de pás, diâmetro e passo. Elas foram modeladas no software *SolidWorks* conforme apresentado na Figura 8 e fabricadas em Ácido Polilático (PLA) através de manufatura aditiva. Após, foram montadas na embarcação (Figura 9) para a realização dos testes.

Figura 8 – Modelos de hélice com diferentes números de pás.



Fonte: Elaborado pelos autores.

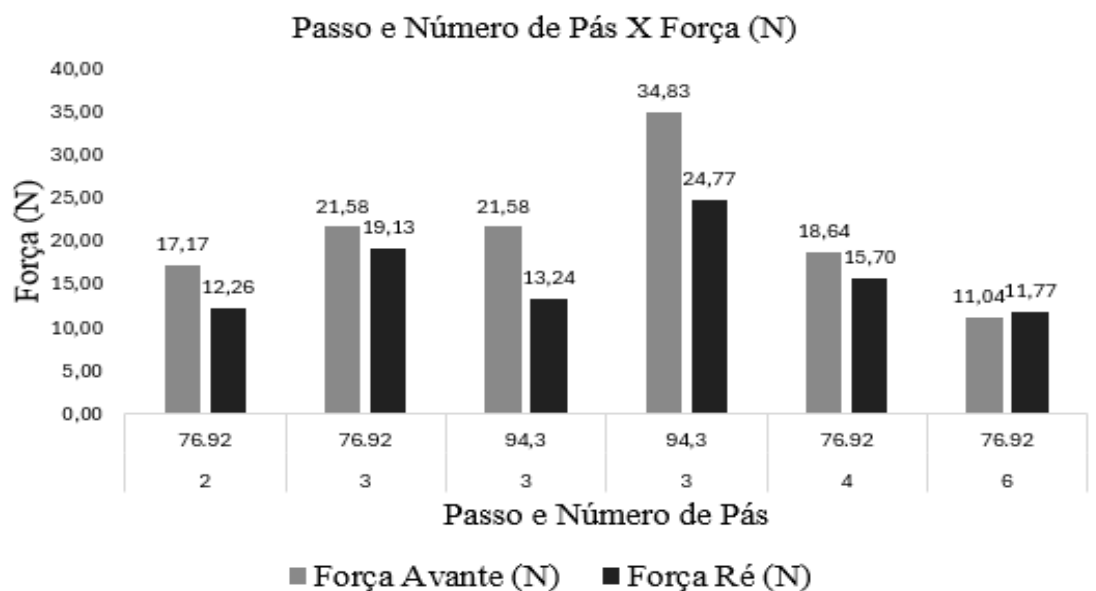
Figura 9 – Modelos de hélice com diferentes números de pás.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os modelos de hélices foram submetidos a ensaios de tração estática (*bollard pull*) avante e a ré, permitindo comparar o desempenho de cada configuração. Podemos observar os resultados obtidos na Figura 10.

Figura 10 – Resultados experimentais obtidos.



Fonte: Elaborado pelos autores.



Para as hélices projetadas com passo fixo de 76,92 mm, observou-se que a hélice de três pás apresentou as melhores condições, atingindo 21,58 N em avanço e 19,13 N em ré, valores superiores aos obtidos pelas configurações de duas, quatro e seis pás. Esse resultado sugere que, no regime de alta rotação utilizado nos testes, a hélice de três pás oferece um equilíbrio adequado entre área de pá e interferência hidrodinâmica, favorecendo a geração de força. Hélices com maior quantidade de pás oferecem mais resistência ao escoamento da água através delas, conforme observado na literatura como em KERWIN, Justin E, 1986.

Já a hélice de duas pás obteve força avanço de 17,17 N, porém apresentou queda mais acentuada em ré reduzindo para 12,26 N, o que pode gerar menor eficiência direcional. À medida que o número de pás aumentou para quatro e seis, verificou-se redução progressiva do desempenho, sendo a hélice de seis pás a que apresentou os menores valores, resultado compatível com o aumento da interferência entre pás em condições de alta rotação.

Quando comparadas às hélices comerciais de três pás e passo 94,3 mm, podemos observar uma grande diferença nos resultados. A hélice de 80 mm de diâmetro alcançou os maiores valores do conjunto, atingindo 34,83 N em avanço e 24,77 N em ré, enquanto o modelo de 75 mm de diâmetro apresentou valores menores para avanço e a ré, cerca de 38% e 23%, respectivamente. Esses resultados reforçam a tendência de que, em pequena escala e com rotações elevadas, a combinação três pás + passo maior tende a proporcionar maior força propulsiva. De modo geral, os dados experimentais indicam que a hélice de três pás foi a configuração mais eficiente dentro das condições avaliadas.

Além disso, durante os ensaios foi possível identificar o efeito de *side-thrust* (MAN, 2018). Esse fenômeno ocorre porque, em virtude das características do campo de esteira, as pás do hélice exercem maior esforço em sua posição inferior do que na superior, resultando em uma força lateral sobre o casco. Em condição de avanço, um hélice de rotação horária tende a deslocar a popa para boreste e a proa para bombordo, enquanto em ré o efeito é invertido e ainda mais pronunciado, já que o jato rotativo incide diretamente sobre a popa. Esse comportamento também foi notado nos testes em campo, durante a competição, conforme relatado no item 3.1.5. A



4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento e avaliação do protótipo demonstram a efetividade das metodologias empregadas e a coerência entre as análises computacionais e os ensaios experimentais. Os resultados das análises no software *Maxsurf* mostraram que o casco modificado apresentou redução média de 16% na resistência ao avanço e 15% na potência requerida em velocidades acima de 2 nós, quando comparado ao casco padrão. Além disso, o deslocamento do centro de carena para a região central do casco favoreceu o equilíbrio longitudinal, melhorando a estabilidade direcional.

Os testes com hélices de diferentes geometrias mostraram que a hélice de 3 pás com diâmetro de 80 mm e passo de 94 mm apresentou o melhor desempenho, atingindo forças médias de aproximadamente 35 N avante e 28 N em ré. O aumento do número de pás (4, 5 e 6) resultou em redução de tração estática, que pode ter sido gerado pela interferência do escoamento entre as pás, especialmente em rotações maiores. Esse comportamento é consistente com a literatura, que aponta maior eficiência em hélices de 3 pás para embarcações de pequeno porte e alta rotação.

Os recursos utilizados nos testes de força não possuíam a capacidade de registrar a variação de força ao longo do tempo durante os testes, o que seria ideal para uma análise estatística mais apurada dos resultados comparativos entre diferentes hélices usadas. No entanto os resultados obtidos já expressam coerência com o esperado pela literatura e permitiram a seleção da hélice com melhor desempenho, resultando num bom desempenho na competição DUNA sendo a terceira embarcação mais forte entre as 21 embarcações participantes na edição 2025. O melhor desempenho de força da embarcação será possível com o aumento da velocidade de rotação do sistema que pode ser realizado através de uma nova relação de transmissão para a caixa de engrenagens (que já está em desenvolvimento).

Por fim, destaca-se que o emprego de metodologias experimentais no desenvolvimento de embarcações em escala proporciona aos estudantes uma compreensão mais clara dos fenômenos físicos envolvidos, além de estimular a motivação e o engajamento no processo de aprendizagem. A vivência integrada de etapas como pesquisa, concepção, fabricação, testes e análise de resultados promove um aprendizado mais completo e significativo. Mesmo resultados simples contribuem para consolidar fundamentos científicos e fortalecer a estruturação do pensamento científico, demonstrando o valor pedagógico desse tipo de projeto.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro ao projeto, concedido por meio do edital FAPERJ Nº 06/2024 - Programa de Apoio a Equipes Discentes em Projetos de Base Tecnológica para Competições de Caráter Educacional.

REFERÊNCIAS

- Anderson, E., & Bonner, T. (2014). Computational modelling of ship propellers and rudders. CRC Press.
- Carlton, J. (2007). Marine propellers and propulsion. Butterworth-Heinemann.
- Chapman, J. C., Smith, C. S., Davidson, P. C., & Dowling, P. J. (1991). Recent developments in design of stiffened plate structures. In *Advances in marine structures* (pp. 529–547). Elsevier Science Publishers.
- Gorji, M., Ghassemi, H., & Mohamadi, J. (2019). Effect of rake and skew on the hydrodynamic characteristics and noise level of the marine propeller. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 43(1), 75–85.
- Holtrop, J., & Mennen, G. G. J. (1982). An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*, 29(335), 166–170.
- Kerwin, J. E. (1986). Marine propellers. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 18(1), 367–403.
- Lewis, E. V. (1989). *Principles of naval architecture* (2nd ed.). SNAME.
- MAN. (2018). *Basic principles of propulsion*.
- Malenica, Š., & Vladimir, N. (2017). *Computational fluid dynamics in ship hydrodynamics*. Butterworth-Heinemann.
- Megson, T. H. G. (2012). *Introduction to marine engineering*. Butterworth-Heinemann.
- Peclat, V. H. F. (2024). *Análise de manobras para comboios fluviais* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Siqueira, P. H. M. Junior, A. A. B., & Perobelli, F. S. (2024). Efeitos econômicos e regionais de variações na eficiência portuária no Brasil.