



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LUIS HENRIQUE MENGARDA FOLIATTI

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE EMBARCAÇÕES
CATAMARÃ EM FUNÇÃO DO CALADO E DISTÂNCIA ENTRE CASCOS**

Joinville

2024

LUIS HENRIQUE MENGARDA FOLIATTI

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE EMBARCAÇÕES
CATAMARÃ EM FUNÇÃO DO CALADO E DISTÂNCIA ENTRE CASCOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de engenharia naval do Centro tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval

Orientador(a): Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.

Joinville

2024

Foliatti, Luis Henrique Mengarda

Análise paramétrica da resistência ao avanço de embarcações catamarã em função do calado e distância entre cascos / Luis Henrique Mengarda Foliatti ; orientador, Thiago Pontin Tancredi, 2024.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Resistência ao avanço. 3. Catamarãs. 4. Slender Body. 5. Análise paramétrica. I. Tancredi, Thiago Pontin. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

Luis Henrique Mengarda Foliatti

ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE EMBARCAÇÕES CATAMARÃ EM FUNÇÃO DO CALADO E DISTÂNCIA ENTRE CASCOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Naval e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Local Sala U117, 02 de Julho de 2024.

Banca examinadora



Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr.
Orientador(a)

Prof. Lucas Weihmann Dr.
Instituição Universidade federal de Joinville

Prof. Luiz Eduardo Bueno Minioli Dr.
Instituição Universidade federal de Joinville

Joinville, 2024

RESUMO

A resistência ao avanço desempenha um papel crucial no desempenho e na eficiência de embarcações. Compreender os fatores que influenciam no arrasto de um casco permite aos engenheiros tomar decisões assertivas durante o projeto, facilitando a busca das características capazes de atender às necessidades específicas de operação das embarcações. Devido a existência de dois cascos, as embarcações catamarã possuem componentes que dificultam o cálculo da resistência ao avanço da embarcação, tais como os fatores de interferência viscosa e de onda. Diante da pouca literatura prática, este trabalho explora a influência que a distância entre cascos apresenta nas componentes da resistência ao avanço de catamarãs, com comprimento de até 40 metros. As análises apresentadas foram realizadas usando o método numérico do corpo esbelto (*slender body*), implementado no programa Marxsurf Resistance. A análise das componentes da resistência ao avanço, bem como a comparação entre os resultados referentes as embarcações completas e de cada casco isolado, permitiu a obtenção dos fatores de interferência de onda. Por fim, uma variação paramétrica da distância entre os cascos e do calado permitiu mapear a complexa influência desses parâmetros na resistência ao avanço total das embarcações estudadas. Os resultados mostraram uma diferença de até 40% no coeficiente de resistência de ondas quando diferentes distâncias entre cascos são analisadas e uma diferença de até 50% em virtude da variação do calado da embarcação.

Palavras-chave: Resistência ao avanço; Catamarã; Distância entre cascos; Análise paramétrica; *Slender body*.

ABSTRACT

Total hull resistance performs a crucial role in vessel performance and efficiency. Understanding the factors that influence total hull resistance allows engineers to perform informed decisions during the design process, facilitating the search for characteristics capable of meeting the specific needs of operation and performance of vessels. Due to the existence of two hulls, catamaran vessels have components that make it difficult to calculate its resistance, such as viscous and wave interference factors. In view of the little practical literature, this work explores the influence that the distance between hulls presents on the components of the resistance in catamarans, with a length of up to 40 meters. The analyses presented were performed using the numerical method of the slender body, implemented in the Marxsurf Resistance program. The analysis of the components of the resistance, as well as the comparison between the results referring to the complete vessels and each of the hulls analyzed separately, allowed the obtaining of the wave interference factors. Finally, a parametric variation of the distance between the hulls and the draft allowed to map the complex influence of these parameters on the total hull resistance of the studied vessels. Observing differences of up to 40% in the wave resistance coefficient by the distance between hulls and differences of up to 50% by the draft variation.

Keywords: Total hull resistance; Catamaran; Distance between hulls; Parametric analysis; *Slender body*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes básicos da resistência ao avanço.	17
Figura 2– Padrão de onda de Kelvin.	18
Figura 3– Componentes do sistema de ondas.	18
Figura 4 – Distribuição de pressão em um escoamento ideal invíscido.	20
Figura 5 – Escoamento em torno de um corpo submerso na água.	21
Figura 6 - Fatores de carga de catamarãs e monocascos	23
Figura 7 – Geometrias válidas para aplicação da teoria de corpo esbelto.	26
Figura 8 – Apêndice virtual aplicado em catamarã.	28
Figura 9 – Métodos disponíveis no programa <i>Maxsurf Resistance</i>	30
Figura 10 – Vistas e casco renderizado da embarcação (A).	32
Figura 11 – Vistas e casco renderizado da embarcação (B).	33
Figura 12 – Vistas e casco renderizado da embarcação (C).	34
Figura 13 – Exemplo da distância entre a linha central dos cascos.	35
Figura 14 – Exemplo do calado (DWL) da embarcação.	35
Figura 15 – Malhas de contorno 601, 81 e 41 da embarcação (C)	36
Figura 16 – Curva da resistência ao avanço das embarcações estudadas.	37
Figura 17 – Componentes da resistência ao avanço da embarcação (A).	38
Figura 18 – Componentes da resistência ao avanço da embarcação (B).	38
Figura 19 – Componentes da resistência ao avanço da embarcação (C).	39
Figura 20 – Fator de interferência da embarcação (A).	41
Figura 21 – Fator de interferência da embarcação (B).	41
Figura 22 – Fator de interferência da embarcação (C).	42
Figura 23 – Fator τ para as variações de boca: Embarcação (A).	43
Figura 24 – Fator τ para as variações de boca: Embarcação (B).	43
Figura 25 - Fator τ para as variações de boca: Embarcação (C).	44
Figura 26 – Coeficiente C_w à diferentes bocas: Embarcação (A).	45
Figura 27 – Coeficiente C_w à diferentes bocas: Embarcação (B).	45
Figura 28 – Coeficiente C_w à diferentes bocas: Embarcação (C).	46
Figura 29 – Resistência ao avanço à diferentes calados: Embarcação (A).	47
Figura 30 – Resistência ao avanço à diferentes calados: Embarcação (B).	47
Figura 31 – Resistência ao avanço à diferentes calados: Embarcação (C).	48
Figura 32 – Coeficiente C_w à diferentes calados: Embarcação (A).	49

Figura 33 – Coeficiente C_w à diferentes calados: Embarcação (B).	50
Figura 34 – Coeficiente C_w à diferentes calados: Embarcação (C).	50
Figura 35 – Fator de interferência de onda à diferentes calados: Embarcação (A)...	51
Figura 36 – Fator de interferência de onda à diferentes calados: Embarcação (B)...	52
Figura 37 – Fator de interferência de onda à diferentes calados: Embarcação (C). .	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variações paramétricas do valor de boca	31
Tabela 2 – Variações paramétricas do valor de calado.....	31
Tabela 3 – Características principais das embarcações estudadas.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFD	Computational Fluid Dynamics
DWL	Design Waterline
ITTC	International Towing Company
SWATH	Small-waterplane-area twin hull
USNA	United states naval academy

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Boca da embarcação
C_f	coeficiente de resistência friccional
C_T	coeficiente de resistência total
C_{Tcat}	coeficiente de resistência total do catamarã
C_W	coeficiente de resistência de onda
C_w	coeficiente de resistência de onda para um casco isolado
L_S	comprimento da embarcação
Pe	potência efetiva
Re	número de Reynolds
Rt	resistência ao avanço do navio
S	superfície molhada do navio
V_S	velocidade do navio
$(1 + k)$	fator de forma para um dos cascos em isolamento
$(1 + \beta k)$	fator de forma para catamarãs
β	fator de interferência da resistência viscosa
ρ	densidade do fluido
ϕ	fator de mudança do campo de pressão em torno do casco
σ	fator de mudança da velocidade entre os cascos
τ	fator de interferência da resistência de onda
∇	volume deslocado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	RESISTÊNCIA AO AVANÇO	16
2.1.1	Componentes da resistência ao avanço	16
2.1.1.1	<i>Resistência de ondas</i>	17
2.1.1.2	<i>Resistência friccional</i>	19
2.1.1.3	<i>Resistência viscosa de pressão</i>	19
2.1.1.4	<i>Resistencia viscosa total</i>	20
2.1.1.5	<i>Resistência de pressão</i>	21
2.1.1.6	<i>Somatório de resistências</i>	21
2.1.2	Resistência ao avanço de embarcações catamarãs	23
2.2	O METODO NUMÉRICO	25
2.2.1	Teoria do corpo esbelto	26
2.3	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	28
2.3.1	Fluidodinâmica computacional	28
3	DESENVOLVIMENTO	29
3.1	METODOLOGIA	29
3.2	CARACTERÍSTICAS DAS EMBARCAÇÕES	31
3.2.1	Definição das variações paramétricas	35
3.2.2	Estudo de convergência de malha	36
4	RESULTADOS E ANÁLISES	37
4.1	RESISTÊNCIA AO AVANÇO	37
4.1.1	Considerações sobre o fator de interferência viscosa (β)	40
4.1.2	Considerações sobre o fator de interferência de onda (τ)	41
4.1.3	Variação paramétrica dos valores de distância entre cascos	42
4.1.4	Variação paramétrica dos valores de calado	47
4.1.4.1	<i>Coefficiente de resistência viscosa e friccional</i>	48
4.1.4.2	<i>Coefficiente de resistência de onda e seu fator de interferência</i>	49

5	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A resistência ao avanço é a força que se opõe ao movimento de uma embarcação, sendo diretamente relacionada à potência necessária para impulsioná-la através do fluido (USNA, 2024).

Logo, compreender e mitigar a resistência ao avanço é um passo crucial no projeto de uma embarcação, pois, diferentes embarcações, podem desempenhar os mesmos serviços com eficiências diferentes, consumindo quantidades significativamente diferentes de combustível.

Segundo Martínez (2016), a característica fundamental e mais complexa da resistência ao avanço de um catamarã é o sistema de ondas gerado por cada casco isoladamente e a interferência surgida no escoamento ao redor de um casco em função da existência do outro.

Assim, como será discutido ao longo deste trabalho, a complexidade desse fenômeno reside nos diferentes comportamentos desenvolvidos para cada velocidade da embarcação, alternando entre interferências construtivas e destrutivas do sistema de ondas gerado pelos cascos (Martínez, 2016).

De acordo com DUBROVSKY (2010) e Martínez (2016), a configuração de catamarãs proporciona uma menor resistência ao avanço quando comparado a embarcações monocasco de mesmo porte. Enquanto um monocasco é influenciado principalmente por sua geometria, um catamarã sofre também uma influência decorrente do espaçamento entre seus cascos.

Dada a complexidade e o número de fatores influenciando o projeto hidrodinâmico de um catamarã, tornava-se custoso realizar as múltiplas iterações exigidas pelos métodos convencionais de projeto, pois a realização de ensaios com modelos em escala reduzida demanda altos custos e longos prazos de desenvolvimento.

Com o objetivo de diminuir os custos e prazos de desenvolvimento, desde 1960 a indústria naval investe em métodos numéricos e ferramentas computacionais destinadas ao projeto de novas embarcações.

Inicialmente desenvolvidas para projetos específicos e operações de fabricação, ferramentas de desenho auxiliado por computador (CAD), manufatura auxiliada por computador (CAM) e fluidodinâmica computacional (CFD) se tornaram

disponíveis a partir da década de 1970, apesar dos altos custos das licenças e dos elevados requisitos computacionais demandados. (LAMB, 2003).

Com a rápida evolução dos computadores, essas ferramentas se tornaram acessíveis, permitindo que os engenheiros realizem múltiplas iterações e/ou diferentes estudos em um curto período, possibilitando um refino mais rápido e eficiente dos projetos.

Nesse contexto, diversos estudos na literatura discutem a influência das características do casco na resistência ao avanço da embarcação. Entre eles, Pesce (1998) descreve o comportamento de corpos flutuantes em onda utilizando cálculo variacional e a teoria do corpo esbelto, Araujo (2014) estima o fator de forma e a resistência ao avanço de embarcações através da fluidodinâmica computacional e Molland et al. (1994) que apresenta um estudo sistemático com ensaios de arrasto envolvendo catamarãs com diferentes relações geométricas.

Este trabalho segue nessa linha, focando na influência da distância entre os cascos e do calado na resistência ao avanço de embarcações do tipo catamarã.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD), busca-se obter a curva de resistência ao avanço de três catamarãs, visando analisar a influência que a distância entre os cascos e o calado exercem na resistência ao avanço dessas embarcações.

1.1.2 Objetivos específicos

- Levantar as informações fundamentais sobre as embarcações escolhidas;
- Obter a curva de resistência ao avanço para as embarcações estudadas considerando a configuração original de projeto;
- Analisar a influência do calado e da distância entre os cascos na resistência ao avanço das embarcações estudadas;
- Obter os parâmetros ideais para a operação eficiente das embarcações estudadas, considerando as velocidades de serviço de cada caso.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos que sustentam o trabalho realizado, abordando a resistência ao avanço, o método numérico e a fluidodinâmica computacional.

2.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Segundo Trindade (2012), a resistência ao avanço se refere a força necessária para rebocar a embarcação, em águas calmas, a uma velocidade constante. Já a potência efetiva, também denominada potência de reboque, corresponde a potência exigida para superar essa resistência (Equação 1).

$$Pe = Vs * Rt \quad (1)$$

Em que:

Pe é a potência efetiva;

Vs é a velocidade do navio;

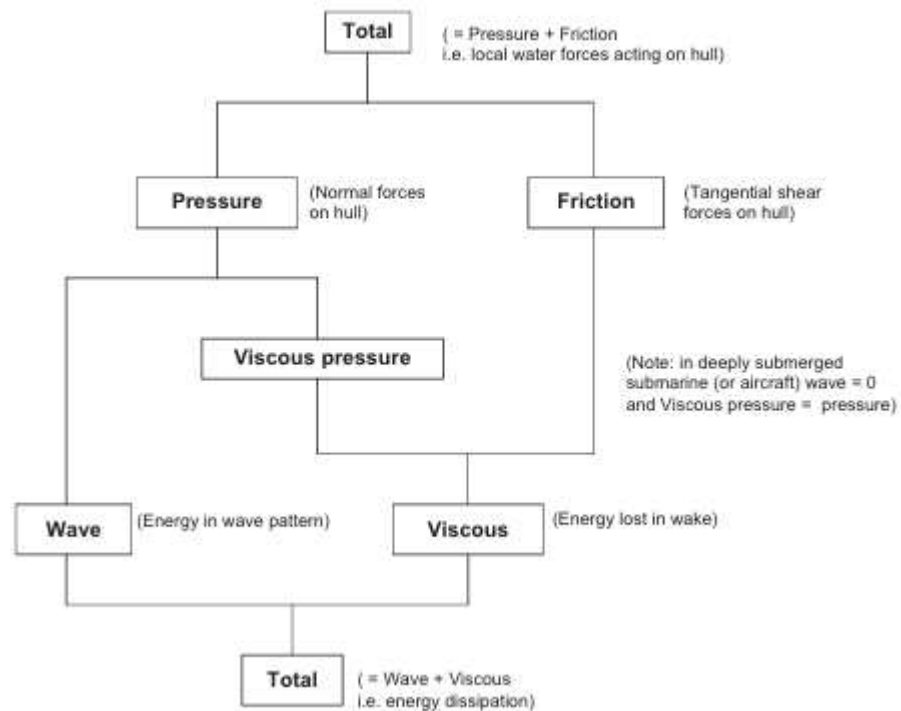
Rt é a resistência ao avanço total do navio;

2.1.1 Componentes da resistência ao avanço

As componentes da resistência ao avanço interagem entre si e, na sua maioria, não podem ser mensuradas individualmente (BERTRAM, 2000). Sendo que, segundo Molland, Turnock e Hudson (2016), a resistência ao avanço pode ser dividida em 3 componentes principais: a resistência de onda, a resistência friccional e a resistência viscosa de pressão.

Além disso é comum o uso do termo resistência viscosa para designar a soma da componente friccional com a componente viscosa de pressão. Por fim, o termo resistência de pressão muitas vezes é usado para designar a soma da componente viscosa de pressão com a componente de ondas (Figura 1).

Figura 1 - Componentes básicos da resistência ao avanço.



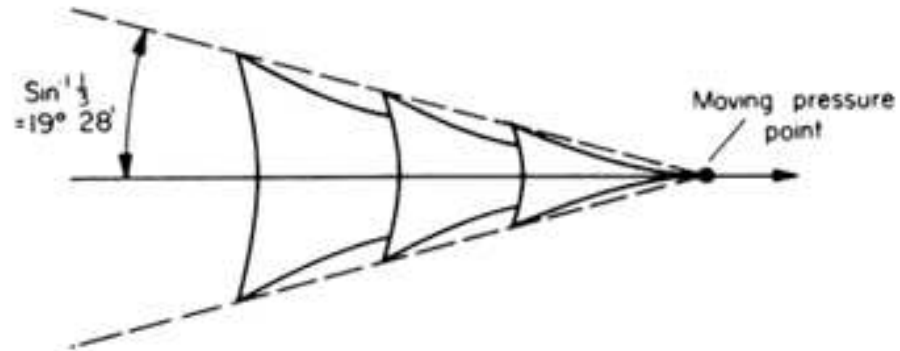
Fonte: Molland et al. (2016).

2.1.1.1 Resistência de ondas

Quando um corpo parcialmente submerso viaja por meio de um fluido, a pressão em torno do corpo varia aumentando na região de proa. Assim, a busca pela equalização do campo de pressão no entorno do corpo resulta em mudanças no nível do fluido próximo à superfície, formando ondas. A energia empregada na geração e destruição dessas ondas é chamada resistência de ondas. (MOLLAND ET AL., 2016).

Kelvin (1887), de forma analítica, abordou o caso simplificado do sistema de ondas formado pelo navio, considerando que o casco pode ser representado por um único ponto de pressão. Segundo essa hipótese, seu trabalho demonstrou que o avanço de um casco produz ondas transversais e ondas divergentes, tal como pode ser visto na Figura 2.

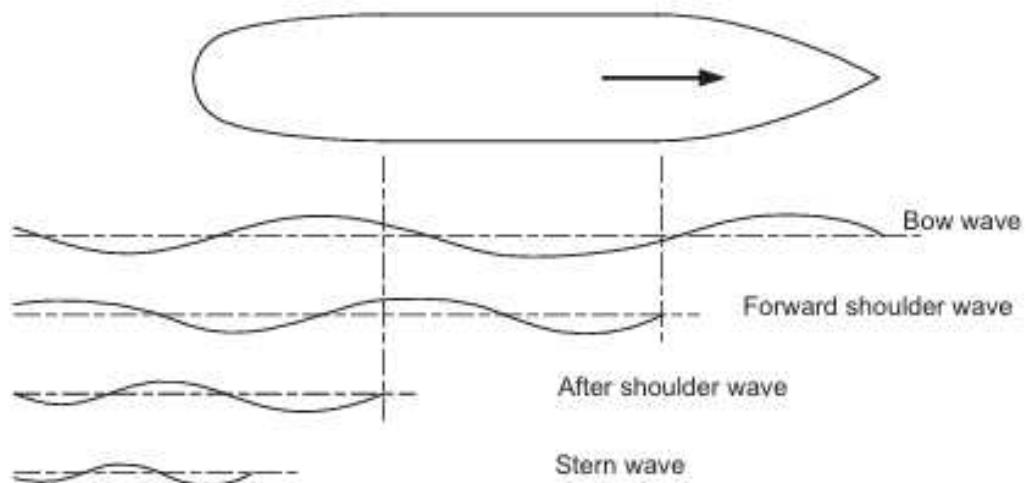
Figura 2– Padrão de onda de Kelvin.



Fonte: Trindade, 2012.

No entanto, segundo Molland et al. (2016), o sistema de ondas de um navio é formado por vários pontos de pressão, os quais interagem entre si. A variação causada por essa interferência acontece, em sua maioria, nas áreas onde ocorrem mudanças significativas da geometria próxima à superfície, incluindo o bulbo, a proa, a popa e as curvaturas de vante e ré, tal como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3– Componentes do sistema de ondas.



Fonte: Molland et al., 2016.

2.1.1.2 *Resistência friccional*

Quando um corpo se desloca em um fluido em repouso, uma camada desse fluido adere ao corpo em movimento, adquirindo a velocidade do corpo. No entanto, à medida que a distância aumenta, a variação da velocidade diminui e, após uma dada distância, o escoamento não é mais influenciado pela passagem do corpo.

Segundo Molland et al. (2016), essa camada de fluido afetada diretamente pelo arrasto do casco é chamada de camada limite, cuja espessura pode ser definida como a distância entre a superfície do corpo e o ponto onde a velocidade do fluido atinge 1% da velocidade do navio.

As alterações de velocidade dentro da camada limite são ocasionadas pelo atrito, o qual dissipa parte da energia do movimento. Logo, a integral do atrito na superfície molhada do casco resulta na componente da resistência ao avanço denominada resistência friccional. (TRINDADE, 2012; BERTRAM, 2000).

De acordo com a USNA (2024), a Equação 2, reconhecida pela ITTC (International Towing Tank Conference), pode ser utilizada para estimar o coeficiente de resistência friccional de uma embarcação, sendo o resultado de muitos anos de testes com navios e placas planas.

$$C_F = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2} \quad (2)$$

Em que:

C_F é o coeficiente de resistência friccional;

Re é o número de Reynolds;

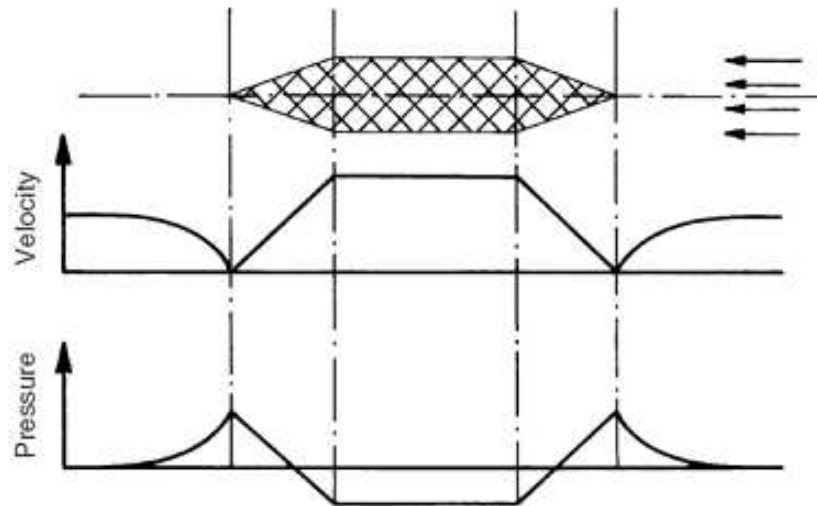
2.1.1.3 *Resistência viscosa de pressão*

Também chamada de resistência de forma, a componente denominada resistência viscosa de pressão origina-se na eventual diferença de pressão existente entre o fluido localizado a frente e a ré de um navio.

Conforme pode ser visto na Figura 4, em um escoamento ideal, a pressão existente nas regiões de proa e popa são iguais, resultando na ausência da resistência

viscosa de pressão. No entanto, na prática, os efeitos viscosos reduzem a pressão na popa do casco, gerando um gradiente de pressão proa-popa. (TRINDADE 2012).

Figura 4 – Distribuição de pressão em um escoamento ideal invíscido.



Fonte: Trindade, 2012.

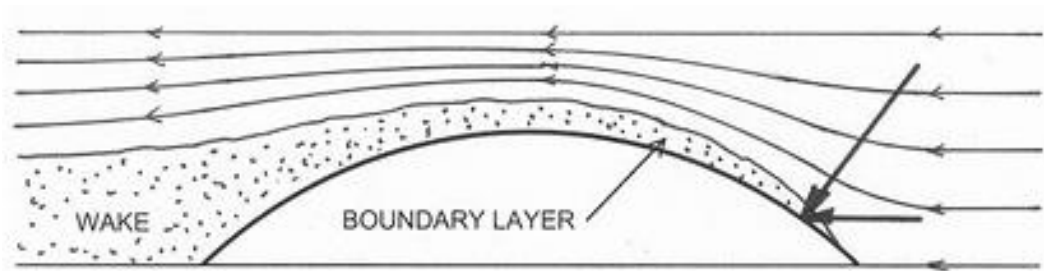
Além da viscosidade, que remove energia da linha de corrente, reduzindo a pressão do fluido, outros dois fenômenos podem contribuir para a resistência de pressão viscosa. O primeiro decorre da geração de vórtices nas discontinuidades do casco, os quais induzem mudanças no campo de velocidade. Já o segundo, refere-se ao aumento da espessura da camada limite, potenciada pela separação do escoamento ao longo do casco. (TRINDADE 2012).

2.1.1.4 Resistência viscosa total

Conforme já discutido, existem duas componentes da resistência que decorrem da interação viscosa entre o fluido e o casco do navio, a resistência viscosa de pressão e a resistência friccional.

No entanto, enquanto a resistência friccional decorre das tensões de cisalhamento no fluido e age de forma tangencial ao corpo, a resistência de pressão viscosa age como uma força normal ao corpo (Figura 5).

Figura 5 – Escoamento em torno de um corpo submerso na água.



Fonte: USNA (2020).

Dado que ambas as componentes têm origem na viscosidade, é comum que essas parcelas sejam agrupadas em uma única parcela, denominada de resistência viscosa da embarcação.

2.1.1.5 *Resistência de pressão*

Análogo ao que foi discutido no caso da resistência viscosa, foram apresentadas duas componentes que decorrem da integração do campo de pressão no entorno do corpo: a resistência de pressão viscosa e a resistência de ondas.

Embora a resistência de pressão viscosa tenha origem na viscosidade do fluido e a resistência de ondas tenha origem na incompressibilidade, é comum que ambas as parcelas sejam agrupadas em uma única componente denominada resistência de pressão da embarcação. (MOLLAND ET AL., 2016).

2.1.1.6 *Somatório de resistências*

Ao longo dos anos diversas abordagens e métodos foram propostos para estimar a resistência ao avanço de uma embarcação. No escopo deste trabalho, destacam-se: Hughes-Prohaska (1966), ITTC (1958) e o ITTC (1978).

Baseada na mesma decomposição apresentada neste capítulo, Hughes-Prohaska (1966) propõem que o coeficiente adimensional referente a resistência ao avanço total de uma embarcação pode ser calculado a partir da soma dos coeficientes adimensionais referentes a cada uma das componentes da resistência ao avanço (Equação 3).

$$C_T = (1 + k)C_F + C_W \quad (3)$$

Em que:

C_T é o coeficiente de resistência total;

$(1 + k)$ é o fator de forma;

C_F é o coeficiente de resistência friccional;

C_W é o coeficiente de resistência de onda.

Dado que a resistência friccional e a resistência de pressão viscosa estão diretamente relacionadas, é comum que a parcela de pressão viscosa seja expressa como uma porcentagem da parcela friccional, definida por meio do parâmetro k . Usualmente o termo $(1 + k)$ é chamado de fator de forma da embarcação (PNA, 1988).

Segundo Trindade (2012), o coeficiente referente a parcela friccional da resistência ao avanço pode ser calculado seguindo o método proposto por ITTC (1957). Já o coeficiente de forma k pode ser calculado experimentalmente ou por meio de modelos empíricos, tal como visto em Holtrop e Mennen (1982).

Por fim, a estimativa da resistência ao avanço total de uma embarcação pode ser calculada utilizando a Equação 4.

$$R_T = C_T \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot V_S \cdot S \quad (4)$$

Em que:

R_T é a resistência total;

ρ é a densidade da água;

V é a velocidade do navio;

S é a superfície molhada do navio.

Sobre a Equação 4 é importante dizer que, embora seja uma equação classicamente encontrada em diversos trabalhos na área naval, é possível substituir o parâmetro de adimensionalização S (área molhada) por outras grandezas. Por exemplo, em mecânica dos fluídos é comum a utilização do quadrado do comprimento característico do corpo na adimensionalização de C_T . Logo, é sempre importante confirmar qual o parâmetro utilizado na adimensionalização dos coeficientes da resistência ao avanço de um navio.

2.1.2 Resistência ao avanço de embarcações catamarãs

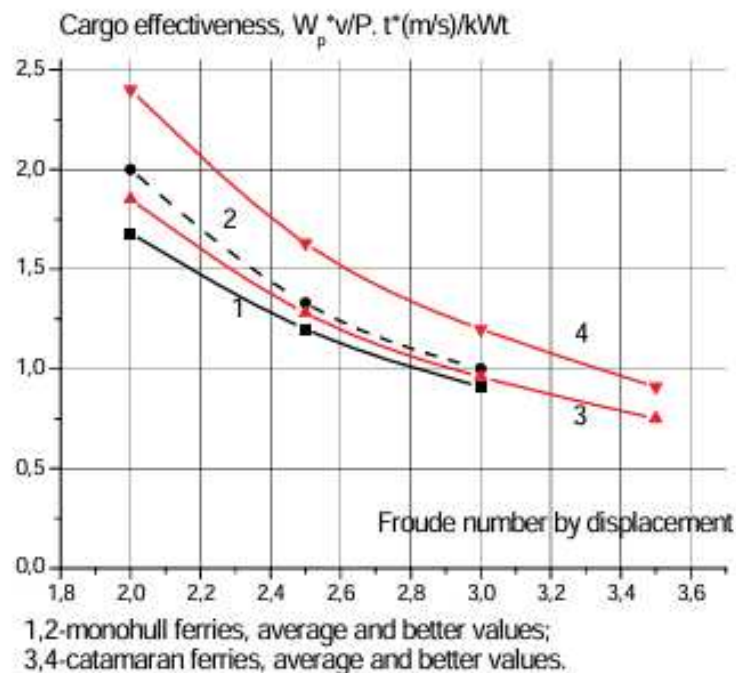
Aumentar a velocidade de uma embarcação deslocante convencional só é prático até um certo ponto, pois a resistência de ondas cresce exponencialmente quando a embarcação alcança números de Froude acima de 0,4.

Uma estratégia para minimizar a resistência de ondas consiste em afastar a maior parte do volume do casco da superfície da água, seja elevando-o acima da superfície da água (embarcações de planeio e embarcações sustentadas por hidrofólios) ou mantendo-o abaixo da superfície da água (submarinos, SWATHs e plataformas semissubmersíveis). (INSEL, 1990).

No entanto, tais soluções introduzem complexidades e limitações adicionais para o projeto, tais como problemas de estabilidade ou redução da capacidade de carga útil. (INSEL, 1990).

Segundo Dubrovsky (2010), a popularização das embarcações catamarã se deu na metade do século 20, sendo ampliada nas últimas décadas devido a capacidade dessas embarcações de atingirem altas velocidades, bem como a maior área de convés, a maior estabilidade transversal e a maior eficiência no transporte de pessoas e cargas (Figura 6).

Figura 6 - Fatores de carga de catamarãs e monocascos



Fonte: DUBROVSKY, 2010.

No caso das embarcações catamarã é possível alcançar maiores velocidades de quatro formas: obtendo uma interação de ondas favorável entre os cascos, projetando cascos com corpos esbeltos que causam mínima interferência na superfície livre, dispondo o volume de deslocamento acima da superfície da água como em embarcações de planeio ou com hidrofólio, ou dispondo o volume de deslocamento abaixo da superfície da água como em catamarãs *SWATH (small-waterplane-area twin hull)*. (INSEL, 1990).

Conforme já mencionado, estimar a resistência ao avanço de catamarãs apresenta uma complexidade adicional, pois além de calcular a resistência ao avanço de cada casco isolado, é necessário analisar a interferência existente entre eles. (INSEL & MOLLAND, 1991).

Segundo Insel e Molland (1991), existem dois fatores de interferência que devem ser considerados durante o cálculo da resistência ao avanço de catamarãs. O primeiro, refere-se à interferência viscosa, causada pelo escoamento assimétrico no entorno dos cascos e que pode afetar a formação da camada limite e a geração de vórtices. Já o segundo, refere-se à interferência de ondas, resultado da interação entre os sistemas de ondas gerados individualmente por cada casco.

Após analisarem o comportamento de quatro catamarãs simétricos, navegando em mar calmo a diferentes velocidades e com diferentes distâncias entre cascos, Insel e Molland (1991) propuseram que o coeficiente de resistência ao avanço total de um catamarã pode ser calculado utilizando-se a Equação 5.

$$C_{Tcat} = (1 + \phi k)\sigma C_F + \tau C_w \quad (5)$$

Em que:

C_{Tcat} é o coeficiente de resistência total do catamarã;

$(1 + k)$ é o fator de forma para cada casco isolado;

C_F é o coeficiente de resistência friccional proposto por ITTC (1957);

C_w é o coeficiente de resistência de onda para cada casco isolado;

ϕ é o fator que considera a mudança do campo de pressão em torno do casco;

σ é o fator referente à mudança da velocidade entre os cascos;

τ é o fator de interferência da resistência de ondas.

Por questões práticas, ϕ e σ podem ser combinados em um único fator de interferência viscosa β , como pode ser visto na Equação 6. Sendo que, para a análise de um casco isolado, tanto β quanto τ devem valer 1. (INSEL & MOLLAND, 1991).

$$C_{Tcat} = (1 + \beta k)C_F + \tau C_W \quad (6)$$

Dentre as diferentes conclusões observadas por Insel & Molland (1991), é importante ressaltar que, a resistência viscosa é dependente da razão entre o comprimento e a boca de um casco isolado, mas independe da velocidade e da distância entre os cascos. Já o fator de interferência de ondas pode ser ignorado a partir de uma velocidade crítica, a qual é dependente da distância entre os cascos. (INSEL & MOLLAND, 1991).

Com base nos estudos realizados por Insel e Molland (1991), Molland et al. (2001) desenvolveram as Equações 7 e 8 para o cálculo dos coeficientes de forma de embarcações do tipo catamarã.

$$(1 + \beta k) = 3,03 \left(\frac{L_S}{\nabla^{\frac{1}{3}}} \right)^{-0,4} \quad (7)$$

$$(1 + k) = 2,76 \left(\frac{L_S}{\nabla^{\frac{1}{3}}} \right)^{-0,4} \quad (8)$$

Em que:

$(1 + \beta k)$ é o fator de forma para um catamarã;

$(1 + k)$ é o fator de forma para cada casco isolado;

L_S é o comprimento da embarcação;

∇ é o deslocamento da embarcação.

2.2 O METODO NUMÉRICO

De acordo com Molland et al. (1994), quanto mais esbelto o corpo, ou seja, para navios de mesmo deslocamento, quanto maior for o comprimento, menor é a resistência de ondas do casco.

2.2.1 Teoria do corpo esbelto

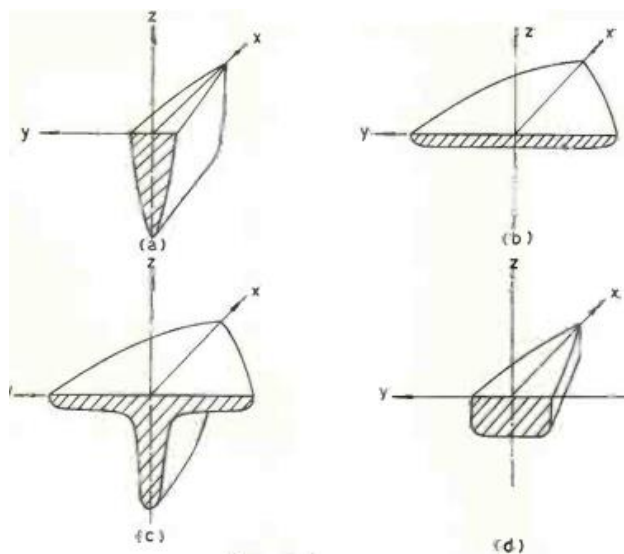
A teoria do corpo esbelto (*Slender body*) tem sido amplamente utilizada na análise da hidrodinâmica de corpos onde o comprimento é pelo menos uma ordem de grandeza maior do que a boca e o calado, auxiliando na otimização de projetos que buscam uma melhora no desempenho e na eficiência. (Wang, 2007)

Inicialmente desenvolvida por Munk (1924) para estudos aerodinâmicos, a teoria do corpo esbelto foi formalizada matematicamente nos anos 50, onde foi aplicada na análise do escoamento no entorno de corpos esbeltos de revolução. (PESCE, 1988).

O pioneirismo dessa teoria na área naval é atribuído a Korvin-Kroukowsky (1955) que estabeleceu a teoria de faixas (*Strip theory*), obtendo resultados satisfatórios que motivaram o desenvolvimento de uma formulação matemática apropriada para estimar a resistência de ondas de uma embarcação.

Atualmente, a aplicação dessa teoria é amplamente difundida, uma vez que tais métodos podem fornecer resultados rápidos e precisos para cascos de configuração esbelta. (Molland et al. 1999). No entanto, uma das restrições da teoria do corpo esbelto é a de que a amplitude das ondas formadas na superfície deve ser pequena, o que requer condições específicas na geometria do navio, como pode ser visto na Figura 7. (Vossers, 1962).

Figura 7 – Geometrias válidas para aplicação da teoria de corpo esbelto.



Fonte: Vossers, 1962.

Em que:

- (a) Tem uma boca pequena em relação ao comprimento do navio.
- (b) Tem um calado pequeno em relação ao comprimento do navio.
- (c) É uma combinação das geometrias (a) e (b).
- (d) Tem boca e calado pequenos em comparação ao comprimento do navio.

O conceito fundamental da teoria de corpos esbeltos é que, devido a diferença entre as dimensões transversais e o comprimento do corpo, o escoamento nas proximidades do casco pode ser aproximado considerando-se apenas os dois últimos termos da Equação 9, onde ϕ se refere ao potencial de velocidade do escoamento. (Vossers, 1962).

$$\phi_{xx} + \phi_{yy} + \phi_{zz} \quad (9)$$

Ou seja, ao se desconsiderar o termo ϕ_{xx} , referente a direção longitudinal do corpo, a Equação 10 descreve o problema bidimensional, ignorando a influência que uma seção do navio exerce nas outras.

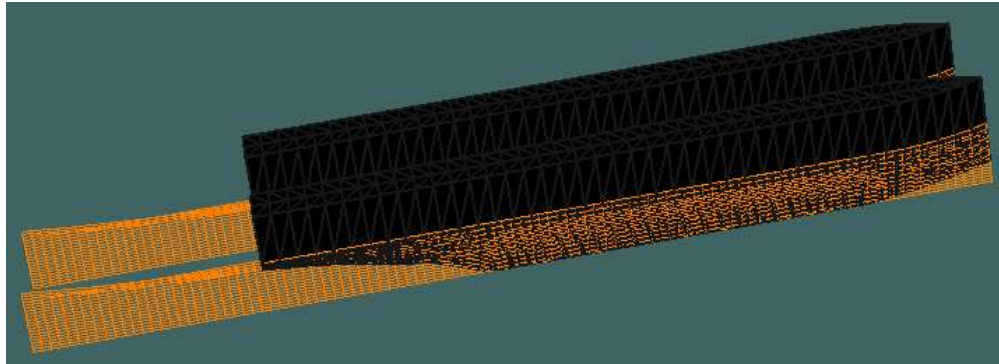
$$\phi_{yy} + \phi_{zz} \quad (10)$$

De acordo com Molland et al. 1999, o casco é então dividido em uma grande quantidade de painéis quadriláteros e as forças são calculadas de maneira isolada, dependendo apenas da inclinação local do painel.

Embora o método do corpo esbelto funcione adequadamente para a maior parte dos cascos deslocantes, foram encontrados problemas na aplicação desse método na análise de cascos com popa transom, especialmente nos casos em que a embarcação navega a altas velocidades.

A fim de resolver tais problemas, Molland, Couser e Wellicome (1999) propuseram a adição de um apêndice virtual junto a popa transom (Figura 8), cuja existência simula a separação do escoamento ocorrida quando a embarcação navega em baixas velocidades e, também, a bolsa de ar formada nos casos da navegação a altas velocidades.

Figura 8 – Apêndice virtual aplicado em catamarã.



Fonte: O autor (2024).

2.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

O entendimento da dinâmica de líquidos e gases está presente em diversas áreas, desde o projeto de navios até a previsão do clima. O uso de métodos numéricos para essas atividades é conhecido como fluidodinâmica computacional (CFD)

2.3.1 Fluidodinâmica computacional

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a fluidodinâmica computacional é a análise dos sistemas que envolvem escoamento de fluidos e transferência de calor por meio de simulações computacionais, as quais fornecem informações detalhadas sobre o fenômeno modelado.

Nessa abordagem, as equações governantes de um escoamento são resolvidas utilizando métodos numéricos, os quais resolvem as equações de Navier-Stokes, juntamente com a equação da continuidade (princípio da conservação da massa).

Amplamente utilizado na indústria naval, as simulações computacionais evitam a construção de modelos físicos em fases iniciais do projeto. No entanto, é importante destacar que os modelos numéricos possuem hipóteses simplificadoras e coeficientes de ajuste, os quais, em muitos casos, são difíceis de serem estimados. (FERZIGER & PERIC, 2002).

Assim, apesar dos avanços realizados nos últimos anos, os resultados obtidos utilizando CFD são uma aproximação da realidade, exigindo um extenso e rigoroso processo de verificação e validação experimental. (ARAÚJO, 2014).

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são apresentados e discutidos o desenvolvimento realizado neste trabalho, descrevendo a metodologia adotada, as características das embarcações estudadas, as modelagens realizadas, o estudo de convergência dos modelos, bem como o procedimento CFD realizado.

3.1 METODOLOGIA

Conforme discutido no capítulo anterior, para atender aos objetivos propostos, neste trabalho será realizada uma análise paramétrica da resistência ao avanço de três embarcações do tipo catamarã, variando-se a distância entre cascos e o calado de projeto.

As embarcações escolhidas referem-se a projetos preliminares de embarcações catamarã realizados no Laboratório de Simulação Naval (LaSiN) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), cujos detalhes fogem ao escopo deste trabalho.

A teoria do corpo esbelto foi escolhida para calcular a resistência de ondas da embarcação, sendo que a componente de resistência friccional foi calculada utilizando o método proposto por ITTC (1957), enquanto o fator de forma foi calculado com o modelo empírico proposto por Molland et al. (2011).

Destaca-se que, uma vez que a teoria do corpo esbelto apresenta correções para cascos com popa transom, espera-se que os resultados para as embarcações estudadas sejam mais precisos do que aqueles obtidos utilizando os tradicionais modelos empíricos empregados nas fases iniciais de projeto.

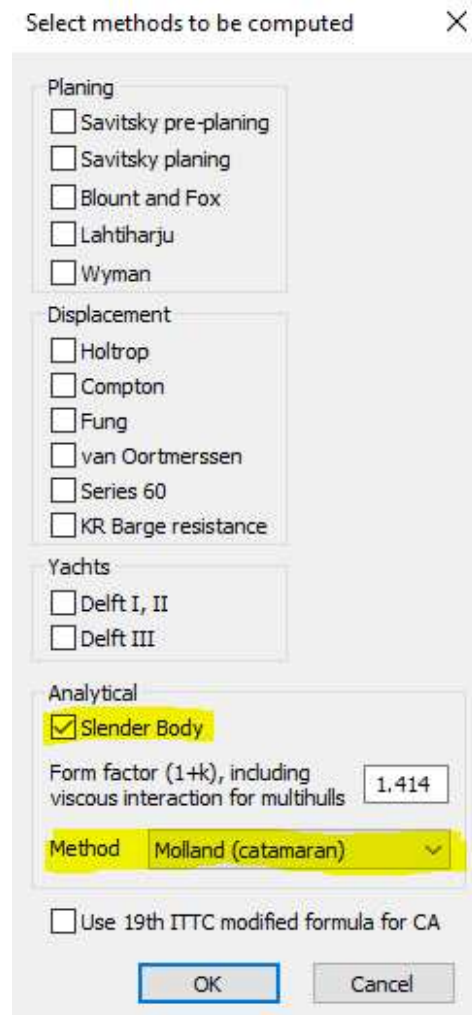
A ferramenta utilizada para este trabalho foi o *Maxsurf Resistance*, módulo destinado ao cálculo da resistência ao avanço de embarcações, o qual é pertencente ao conjunto *Maxsurf*. (BENTLEY SYSTEMS, 2020).

Embora a aplicação de alguns métodos empíricos possa ser feita apenas digitando-se os parâmetros de relevância, a aplicação da teoria do corpo esbelto exige a modelagem CAD do casco.

Uma vez importada a geometria, a análise da resistência ao avanço utilizando o *Maxsurf Resistance* foi conduzida com a configuração mostrada na Figura 9, sendo

sistematicamente repetido para cada uma das variações propostas no estudo paramétrico.

Figura 9 – Métodos disponíveis no programa *Maxsurf Resistance*



Fonte: O autor (2024).

As três embarcações estudadas são embarcações de médio porte, cujo calado e a distância entre os cascos podem ser alterados até mesmo com os cascos já construídos, tornando essas duas variáveis um interessante objeto de estudo para este trabalho.

Assim, para avaliar a influência desses parâmetros na resistência ao avanço, um estudo paramétrico foi realizado contando com 7 variações da distância entre cascos (Tabela 1) e 5 variações de calado (Tabela 2).

Tabela 1 – Variações paramétricas do valor de boca

Varição paramétrica	1	2	3	4	5	6	7
Boca da embarcação (A) [m]	7,00	8,50	10,00	11,50	13,00	14,50	16,00
Boca da Embarcação (B) [m]	9,14	10,64	12,14	13,64	15,14	16,64	18,14
Boca da Embarcação (C) [m]	8,82	10,32	11,82	13,32	14,82	16,32	17,82

Fonte: O autor (2024).

Tabela 2 – Variações paramétricas do valor de calado

Varição paramétrica	1	2	3	4	5
Calado Embarcação (A) [m]	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60
Calado Embarcação (B) [m]	2,23	2,43	2,63	2,83	3,03
Calado Embarcação (C) [m]	3,47	3,67	3,87	4,07	4,27

Fonte: O autor (2024).

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS EMBARCAÇÕES

As características principais das três embarcações estudadas neste trabalho são enumeradas na Tabela 3, sendo que para facilitar o entendimento, as embarcações foram nomeadas pelas letras A, B e C.

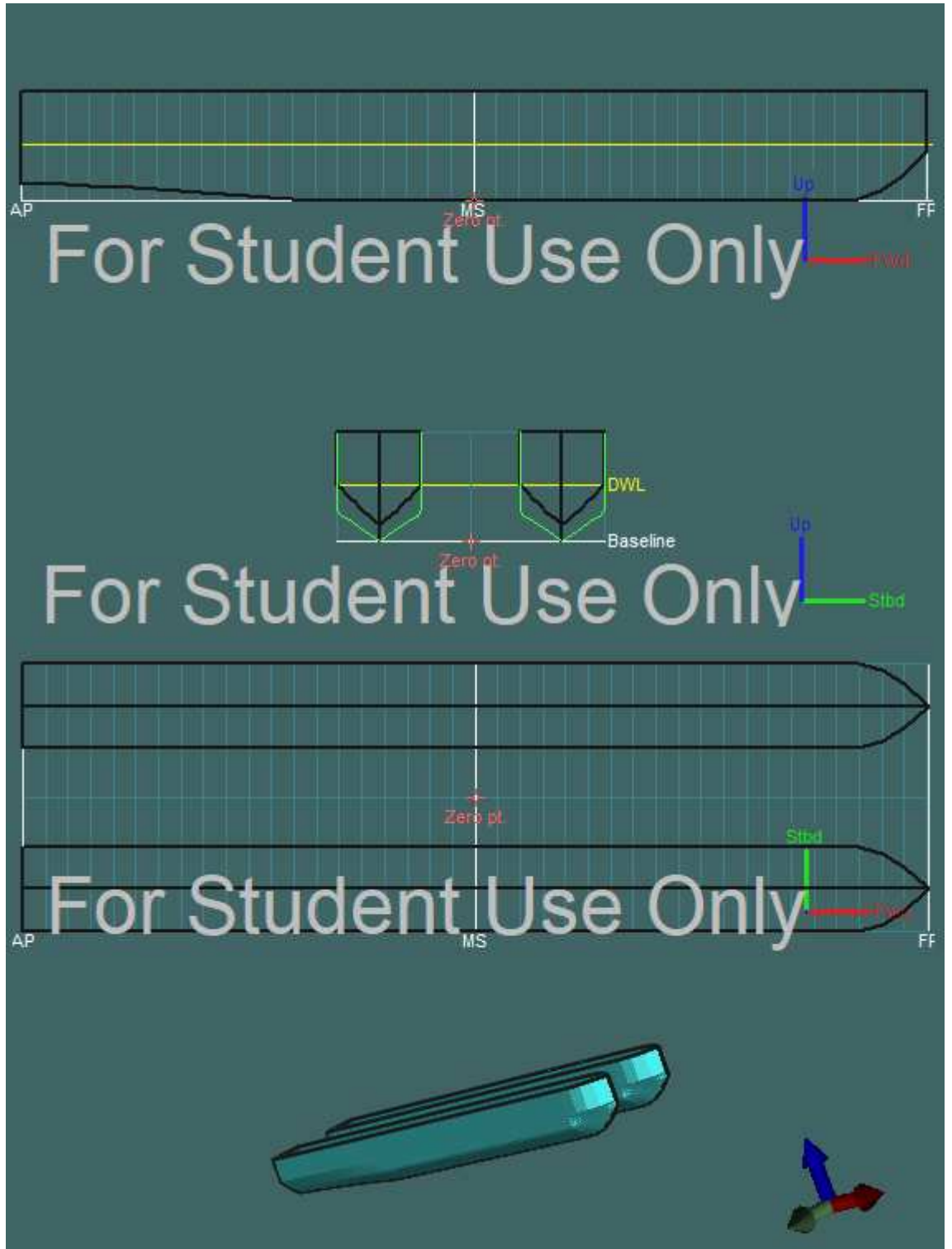
Tabela 3 – Características principais das embarcações estudadas.

Características	Embarcação (A)	Embarcação (B)	Embarcação (C)
Comprimento [m]	28,75	34,85	40,00
Boca total [m]	8,50	12,14	11,82
Boca de um casco [m]	2,70	3,50	3,20
Calado [m]	1,80	2,23	3,47
Área molhada [m ²]	261,44	371,92	519,44
Volume deslocado [m ³]	174,22	281,15	408,41
Raio L/B	5,32	4,98	6,28
Raio B/T	3,00	3,14	1,84
Raio $L/\sqrt[3]{V}$	5,15	5,32	5,39
Coefficiente de bloco	0,62	0,52	0,46

Fonte: O autor (2024).

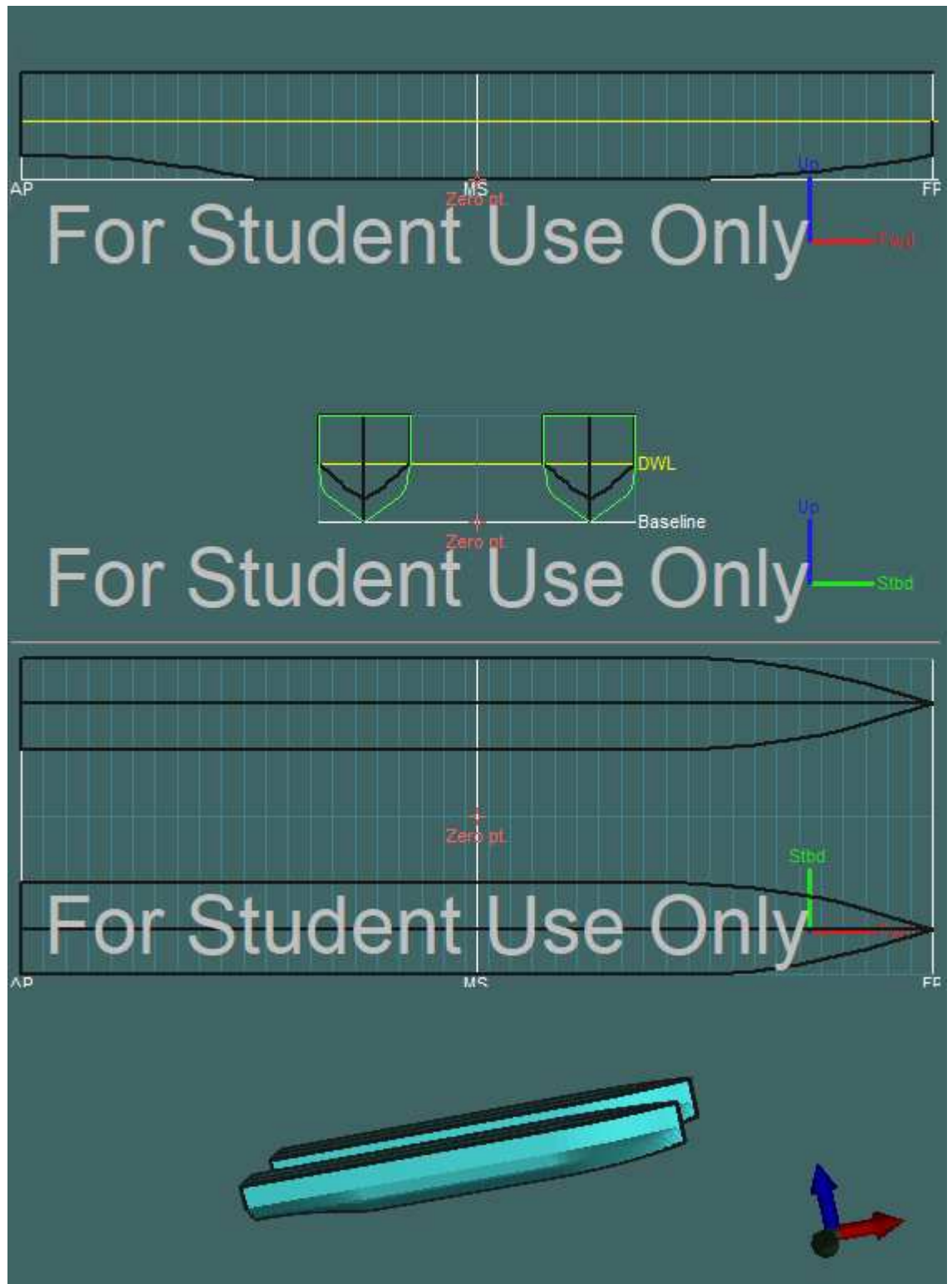
As características enumeradas na Tabela 3 foram obtidas a partir das geometrias fornecidas para esse trabalho, as quais podem ser vistas nas Figuras 10, 11 e 12.

Figura 10 – Vistas e casco renderizado da embarcação (A).



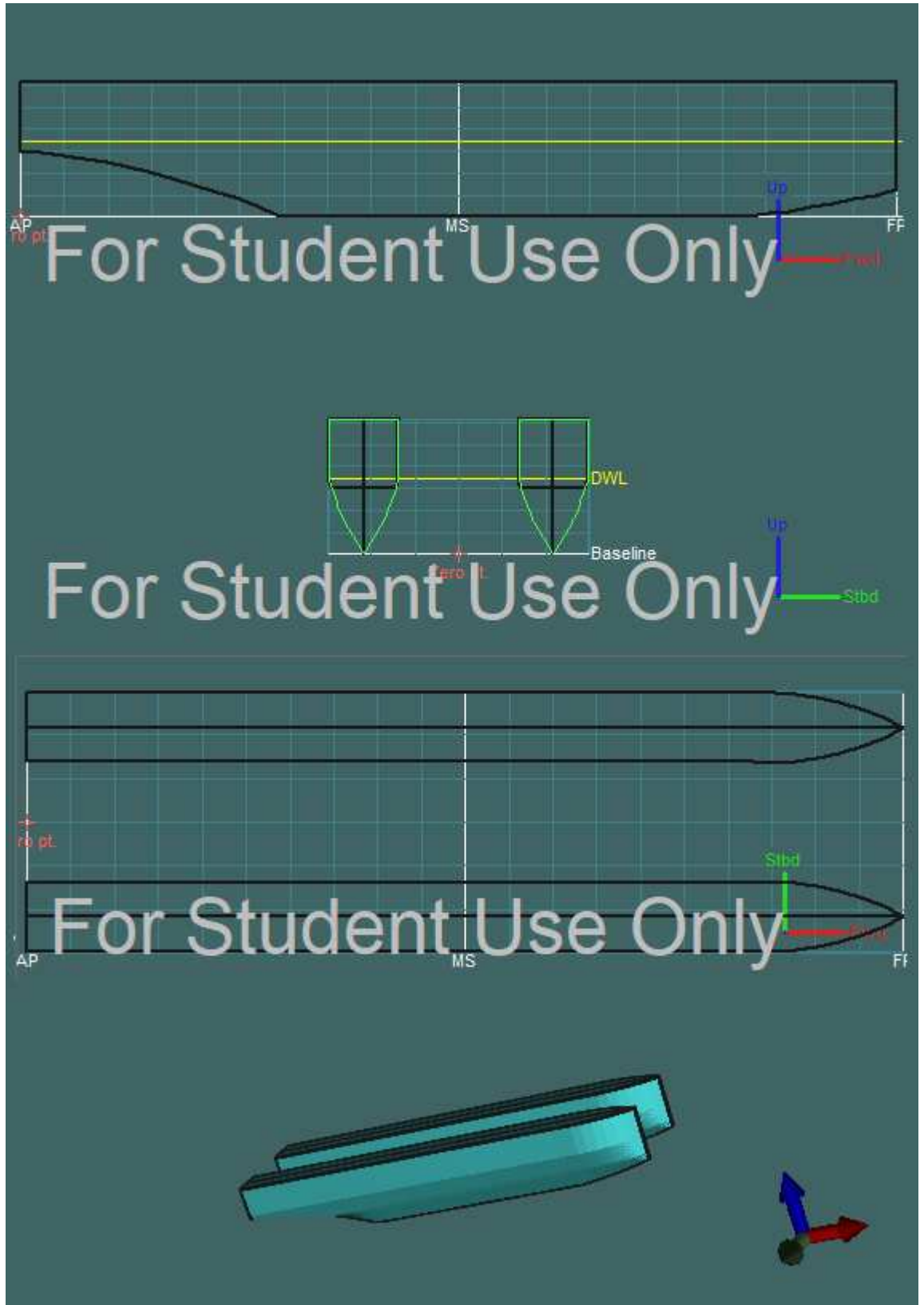
Fonte: O autor (2024).

Figura 11 – Vistas e casco renderizado da embarcação (B).



Fonte: O autor (2024).

Figura 12 – Vistas e casco renderizado da embarcação (C).

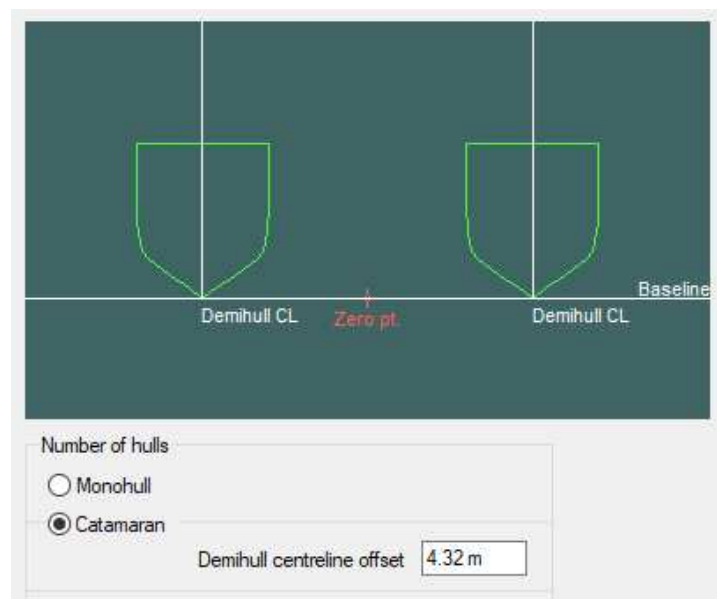


Fonte: O autor (2024).

3.2.1 Definição das variações paramétricas

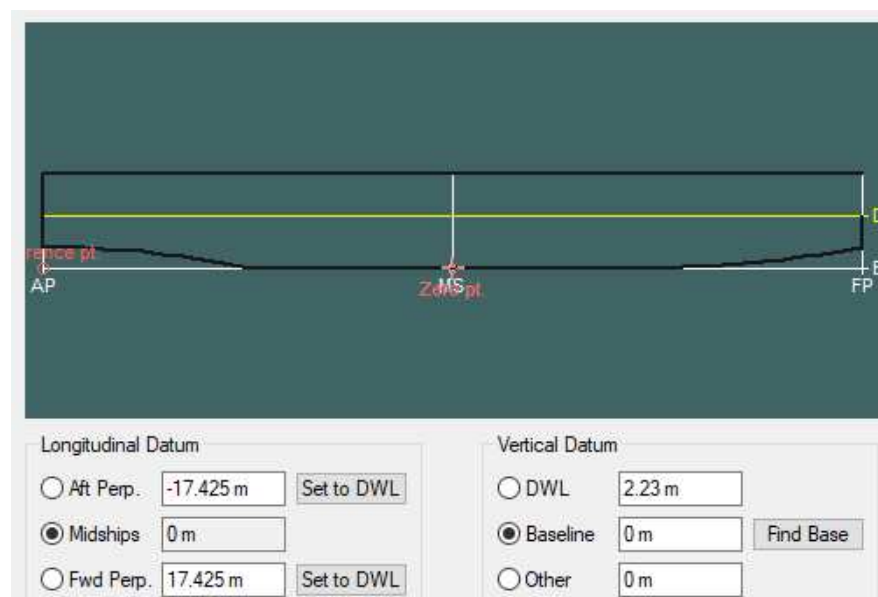
Para realizar a análise paramétrica é necessário realizar uma variação sistemática que permita a comparação dos resultados. Utilizando o Maxsurf Modeler, foi possível variar os parâmetros de distância entre os cascos (Figuras 13) e calado (Figura 14) da embarcação.

Figura 13 – Exemplo da distância entre a linha central dos cascos.



Fonte: O autor (2024).

Figura 14 – Exemplo do calado (DWL) da embarcação.



Fonte: O autor (2024).

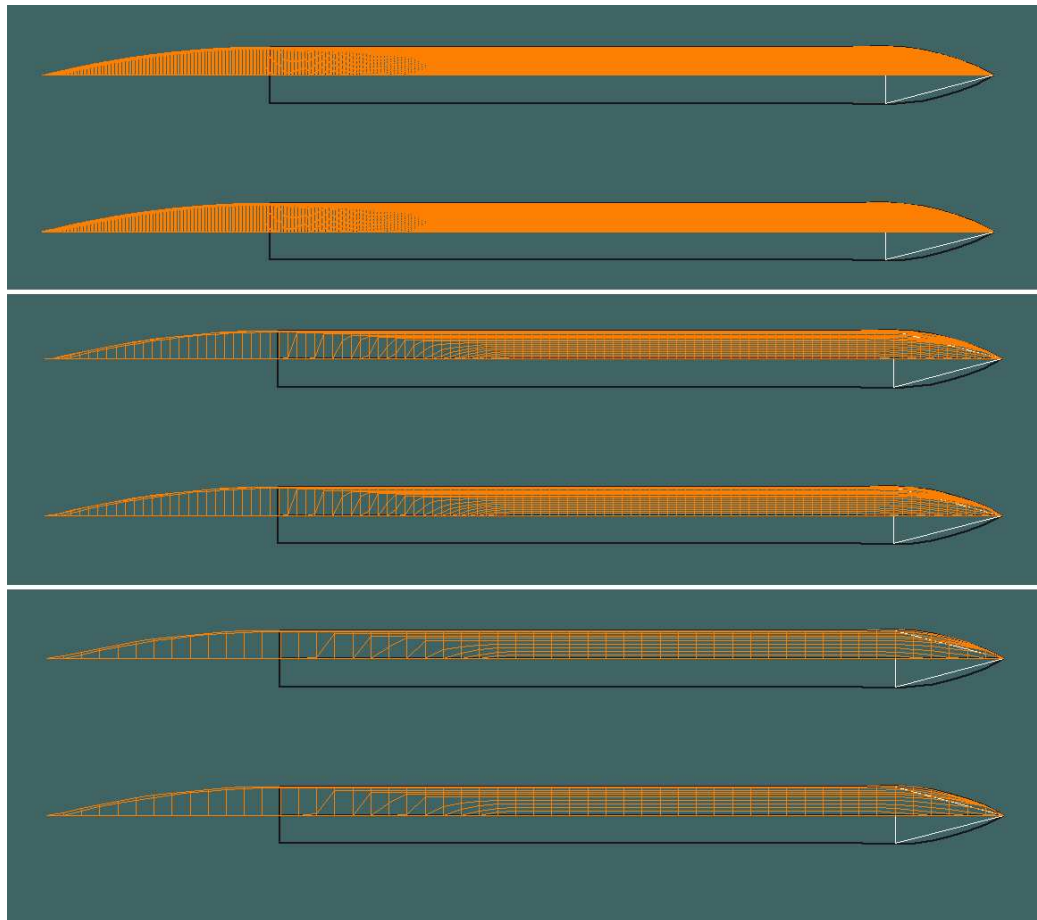
3.2.2 Estudo de convergência de malha

O número de contornos utilizado na malha padrão do *Maxsurf Resistance* é de 81. Para observar os efeitos relacionados ao número de contornos na malha foram analisados 5 intervalos de malha, sendo eles: 21, 41, 81, 601 e 1801.

Na análise realizada para a embarcação (C), vista na Figura 15, a diferença encontrada entre as malhas menores é considerável, principalmente em baixas velocidades. Porém, a diferença nos resultados obtidos para as malhas mais refinadas (com mais contornos) é insuficiente para justificar o tempo de processamento necessário para cada operação.

Assim, todas as análises realizadas neste trabalho utilizaram 81 contornos. A tabela contendo os resultados referentes a análise de convergência de malha pode ser vista no apêndice A.

Figura 15 – Malhas de contorno 601, 81 e 41 da embarcação (C)



Fonte: O autor (2024)

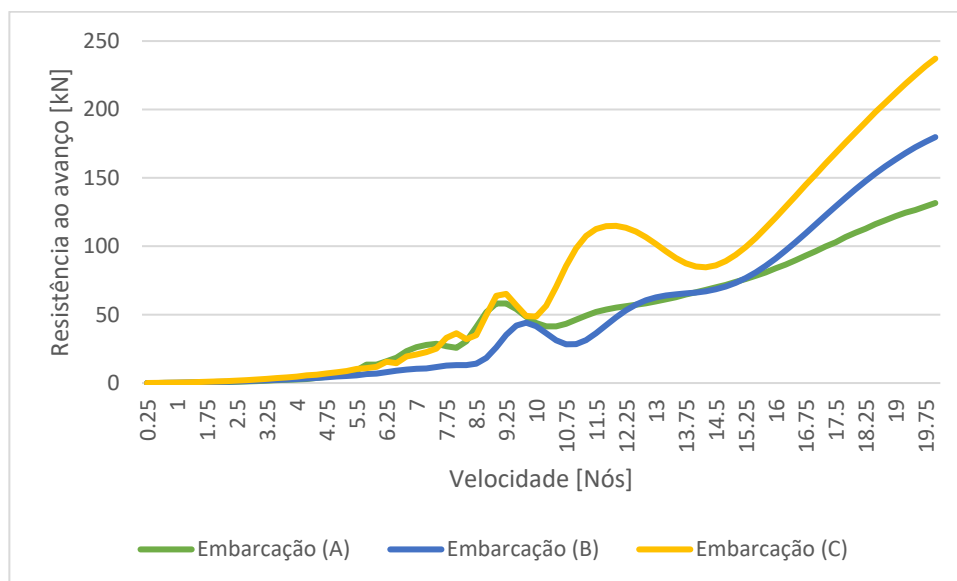
4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento descrito no capítulo anterior, além de serem apresentadas as análises referentes a influência das variações paramétricas na resistência ao avanço das embarcações estudadas.

4.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

O primeiro passo da análise envolveu a obtenção da curva de resistência ao avanço das 3 embarcações estudadas, as quais podem ser vistas na Figura 16.

Figura 16 – Curva da resistência ao avanço das embarcações estudadas.



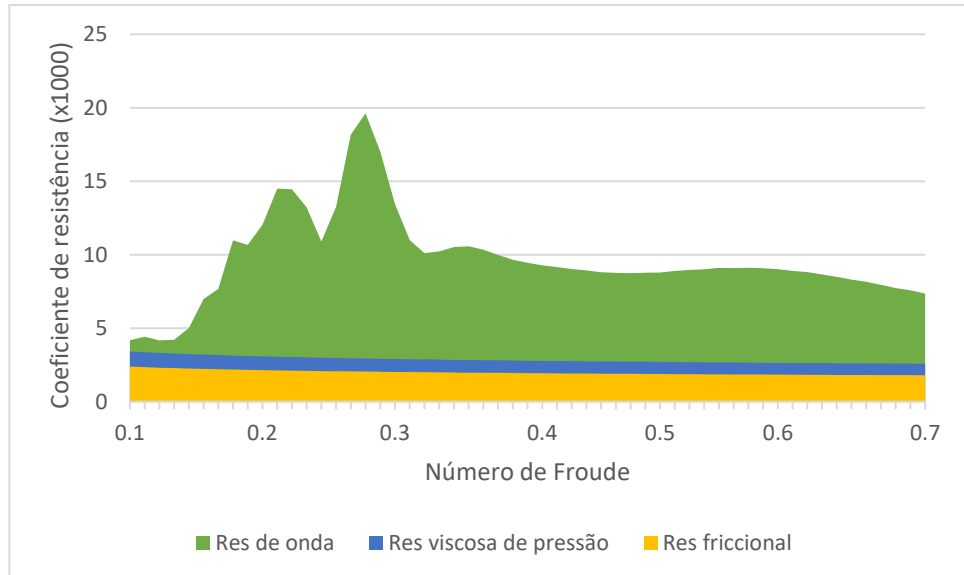
Fonte: O autor (2024).

Analisando os resultados, é possível observar o clássico comportamento oscilatório na resistência ao avanço de uma embarcação, cujo fenômeno é governado pela parcela de ondas. Pois, como descrito por PNA (1988), para algumas velocidades, a onda gerada na proa do navio amplifica a onda gerada no centro de pressão do casco, enquanto para outras, ocorre uma interferência destrutiva, reduzindo a resistência ao avanço da embarcação.

Além disso é possível observar que a resistência cresce exponencialmente quando a resistência de ondas passa a ser governante.

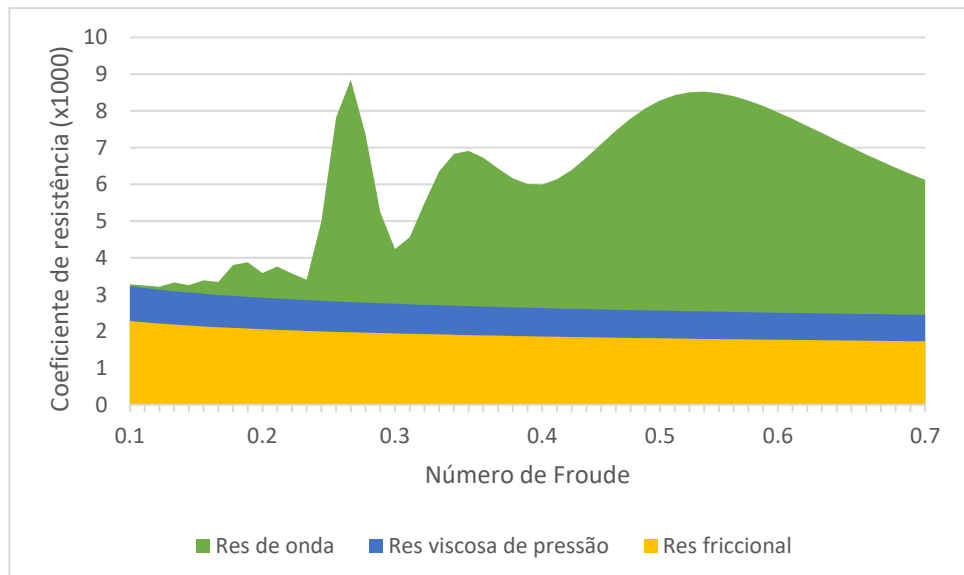
Para demonstrar a influência das diferentes componentes na resistência ao avanço, foram elaboradas as Figuras 17, 18 e 19, nas quais é possível observar a predominância da componente associada a resistência de ondas.

Figura 17 – Componentes da resistência ao avanço da embarcação (A).



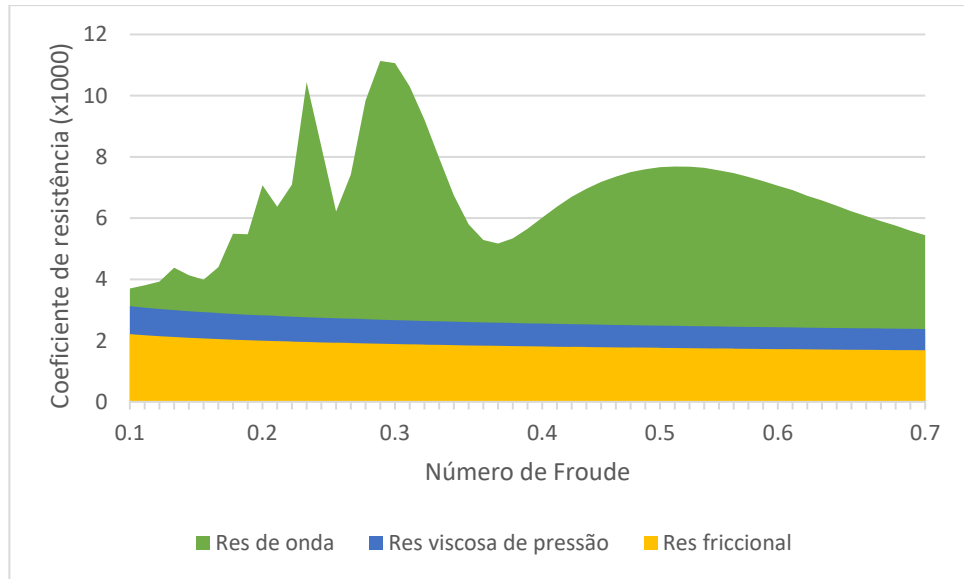
Fonte: O autor (2024).

Figura 18 – Componentes da resistência ao avanço da embarcação (B).



Fonte: O autor (2024).

Figura 19 – Componentes da resistência ao avanço da embarcação (C).



Fonte: O autor (2024).

Embora o número de Froude resulte da variação da velocidade considerada em cada análise, tais valores não representam a mesma escala de velocidades, pois o número de Froude também depende do comprimento da embarcação. Assim, para a embarcação (A) o número de Froude 0,7 é equivalente a 22,9 nós, enquanto para a embarcação (B) equivale a 25,5 nós e para a embarcação (C) 27,2 nós.

A similaridade observada nas componentes de resistência friccional e viscosa de pressão nas três embarcações estudadas pode ser explicada por Molland et al. (1994), onde é dito que a razão entre o comprimento e o deslocamento do casco é o parâmetro predominante para a estimativa dessas parcelas. Assim, dado que as embarcações possuem similaridade nesse parâmetro, são esperados valores similares para essas parcelas.

O aumento do coeficiente de onda da embarcação (A) quando navegando a 9,25 nós (Figura 16), pode ser explicado pelo formato arredondado da proa desse casco, o qual causa uma resistência de onda maior em baixas velocidades devido à dificuldade dessa geometria romper a superfície livre.

Responsáveis pelos maiores valores encontrados, os coeficientes de resistência de onda das três embarcações apresentam comportamentos diferentes. Apesar da similaridade nos parâmetros iniciais das embarcações, suas diferentes configurações geométricas, em especial as formas da proa e da popa, podem ser consideradas responsáveis pelos diferentes resultados obtidos.

4.1.1 Considerações sobre o fator de interferência viscosa (β)

Por meio do cálculo das componentes de resistência de um casco isolado de cada embarcação, mostrado no apêndice B, é possível observar que o coeficiente de resistência friccional apresenta os mesmos valores observados na análise do catamarã, ou seja, independe da distância entre os cascos ou do número de cascos.

Tal resultado é oriundo da metodologia utilizada, que calcula o coeficiente de resistência friccional com base na formulação de placa plana proposta por ITTC (1957), sendo assim, desconsidera a forma e o posicionamento dos cascos.

Já o coeficiente de resistência viscosa de pressão é consideravelmente menor para um casco isolado do que para o catamarã. Esse aumento pode ser explicado pela presença do fator de interferência viscosa (β), discutido no item 2.1.2, responsável pela mudança do campo de pressão em torno dos cascos e da velocidade do escoamento entre eles.

De acordo com Insel & Molland (1991), é possível calcular o fator de interferência viscosa (β) utilizando as Equações 7 e 8, discutidas na fundamentação teórica apresentada neste trabalho. Os resultados obtidos são apresentados a seguir:

Embarcação (A)	$(1 + k) = 1,236$
Embarcação (B)	$(1 + k) = 1,193$
Embarcação (C)	$(1 + k) = 1,221$

E o fator de forma do catamarã é:

Embarcação (A)	$(1 + \beta k) = 1,435$
Embarcação (B)	$(1 + \beta k) = 1,416$
Embarcação (C)	$(1 + \beta k) = 1,414$

Sendo assim,

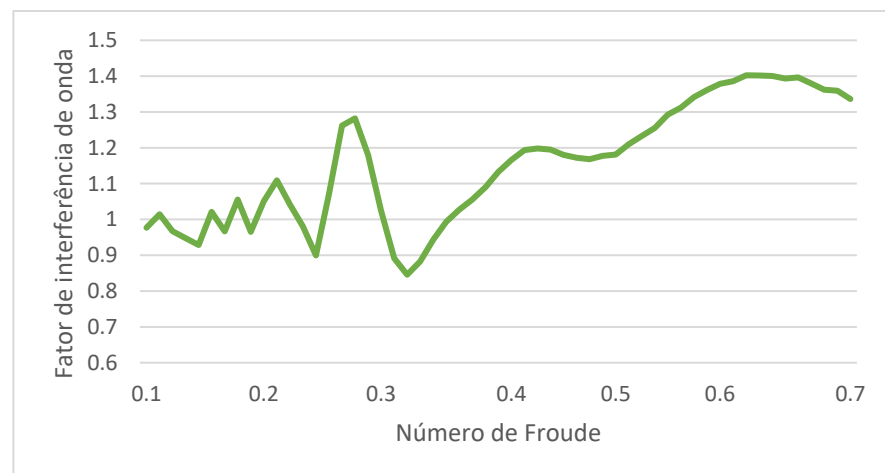
Embarcação (A)	$k = 0,236, e \beta = 1,84$
Embarcação (B)	$k = 0,193, e \beta = 2,15$
Embarcação (C)	$k = 0,221, e \beta = 1,87$

É importante observar que o valor de β independe da distância entre os cascos e da velocidade da embarcação, variando somente com mudanças no comprimento ou deslocamento da embarcação.

4.1.2 Considerações sobre o fator de interferência de onda (τ)

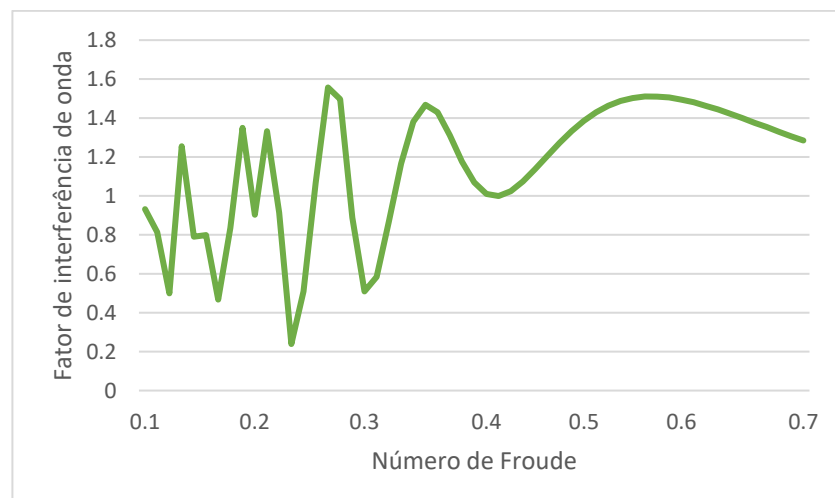
O fator de interferência de onda é a razão entre o coeficiente de onda do catamarã e o coeficiente de onda de um casco analisado isoladamente. Os resultados referentes ao fator de interferência de onda (τ) para cada embarcação estudada são mostrados nas Figuras 20, 21 e 22.

Figura 20 – Fator de interferência da embarcação (A).



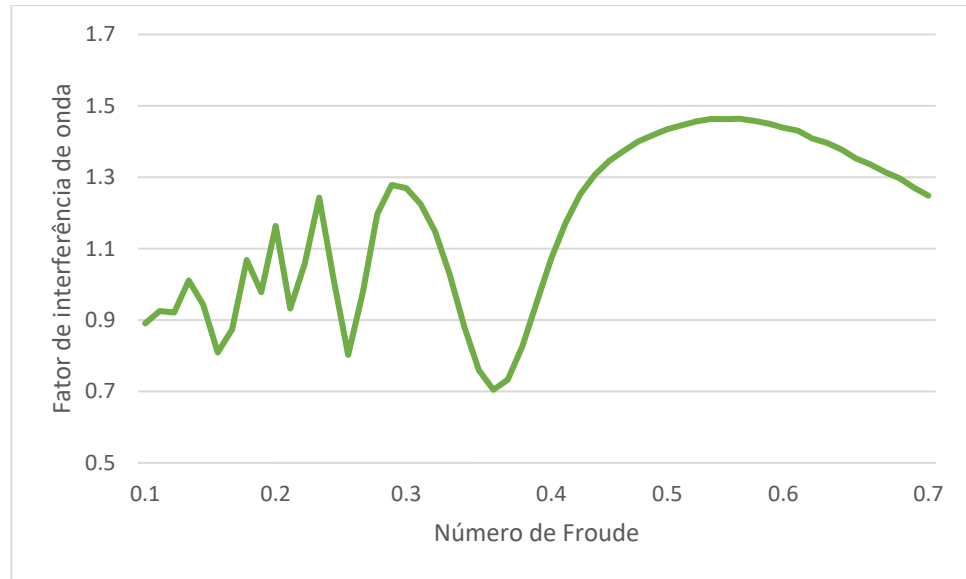
Fonte: O autor (2024).

Figura 21 – Fator de interferência da embarcação (B).



Fonte: O autor (2024).

Figura 22 – Fator de interferência da embarcação (C).



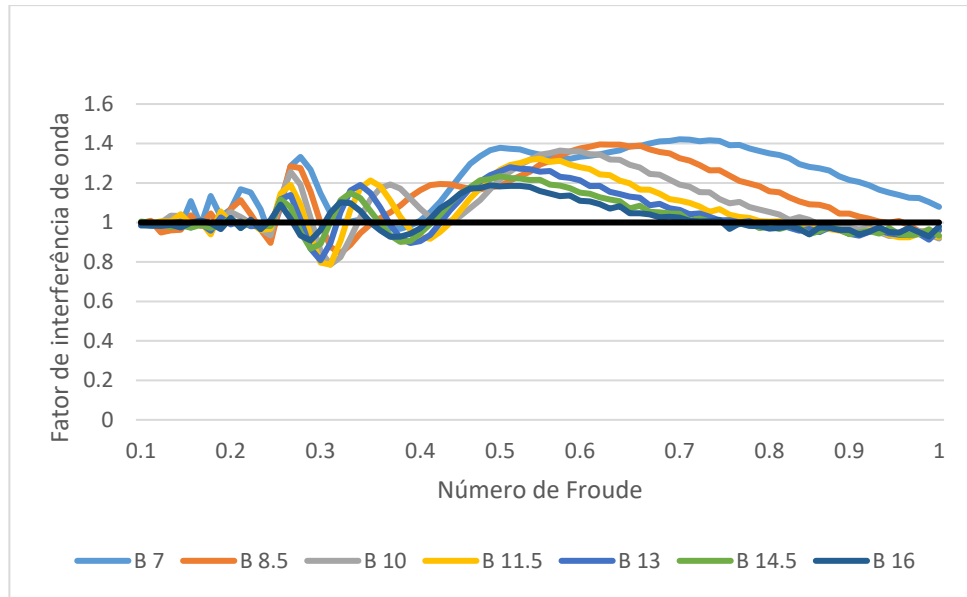
Fonte: O autor (2024).

Os valores de τ menores que 1 indicam que o coeficiente de resistência de onda é menor para o catamarã em relação ao casco individual, já os valores de τ maiores que 1, indicam o oposto. Por meio dessa análise, foi possível concluir que a interferência de ondas ocasionadas pela configuração do catamarã pode ser favorável ao coeficiente de resistência de ondas, ou prejudicial, dependendo da velocidade da embarcação.

4.1.3 Variação paramétrica dos valores de distância entre cascos

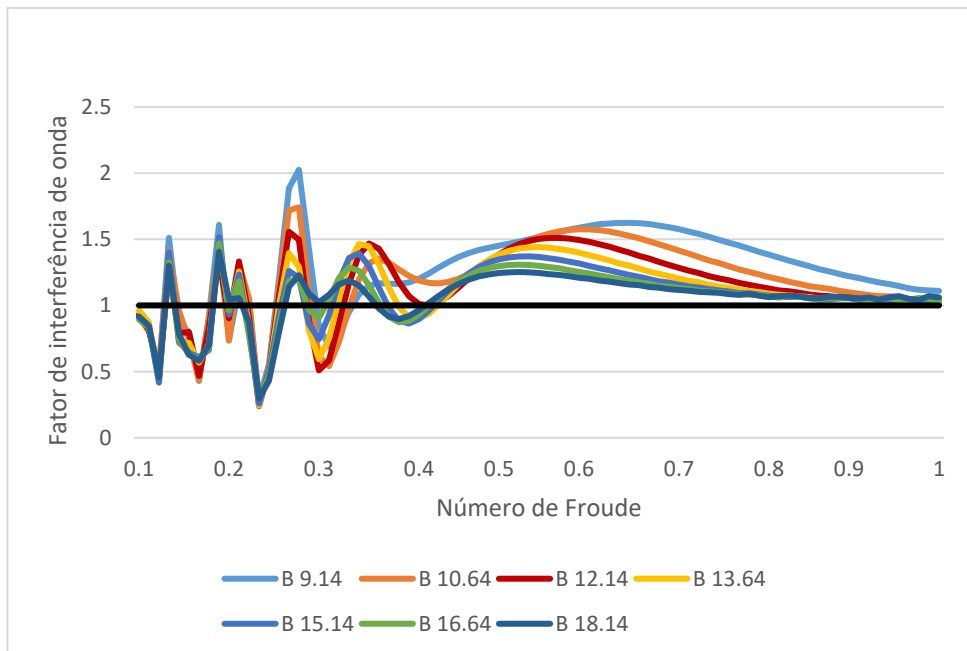
Nesta seção é realizada a variação paramétrica da distância entre os cascos das embarcações estudadas, onde buscou-se entender e mapear a variação do fator de interferência de onda (τ) dessas embarcações. Os resultados dessa análise são mostrados nas Figuras 23, 24 e 25.

Figura 23 – Fator τ para as variações de boca: Embarcação (A).



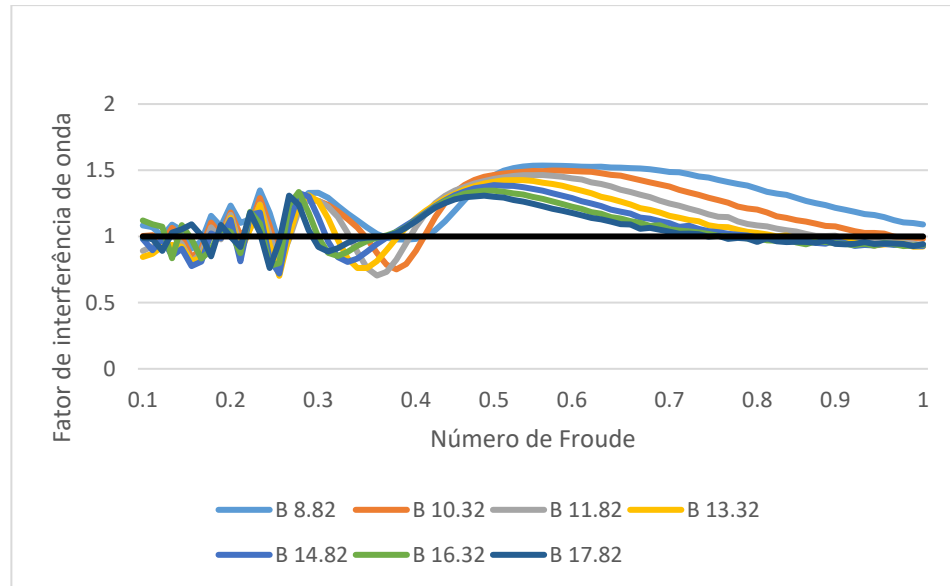
Fonte: O autor (2024).

Figura 24 – Fator τ para as variações de boca: Embarcação (B).



Fonte: O autor (2024).

Figura 25 - Fator τ para as variações de boca: Embarcação (C).



Fonte: O autor (2024).

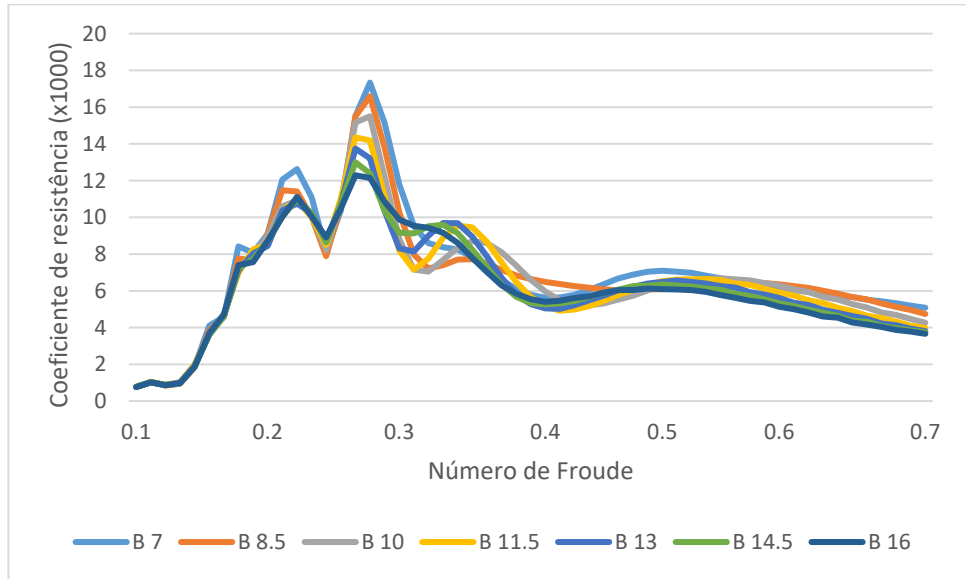
Segundo Insel & Molland (1991), o fator de interferência de ondas (τ) pode ser ignorado a partir de uma dada velocidade, a qual depende da distância entre os cascos da embarcação. Tal premissa pode ser vista nas Figuras 23, 24 e 25 onde é possível constatar que o fator de interferência de ondas (τ) tende a 1 após um determinado número de Froude ser alcançado.

Também é possível observar que os picos de interferência estão diretamente relacionados com a distância entre cascos. Em geral, quanto maior a distância entre cascos, menores são os picos, pois os efeitos de interferência perdem intensidade à medida que os cascos são afastados.

Porém, uma exceção pode ser vista na Figura 24, pois, para o número de Froude de 0,3, os valores do fator de interferência para as bocas de 10,64 e 12,14 metros são superiores aos da boca de 9,14 metros. Além disso, não é possível identificar um padrão claro nos dados da embarcação (C) quando essa navega com números de Froude abaixo de 0,2. A explicação para ambos os casos não é clara e deve motivar a realização de estudos futuros focados nesses aspectos.

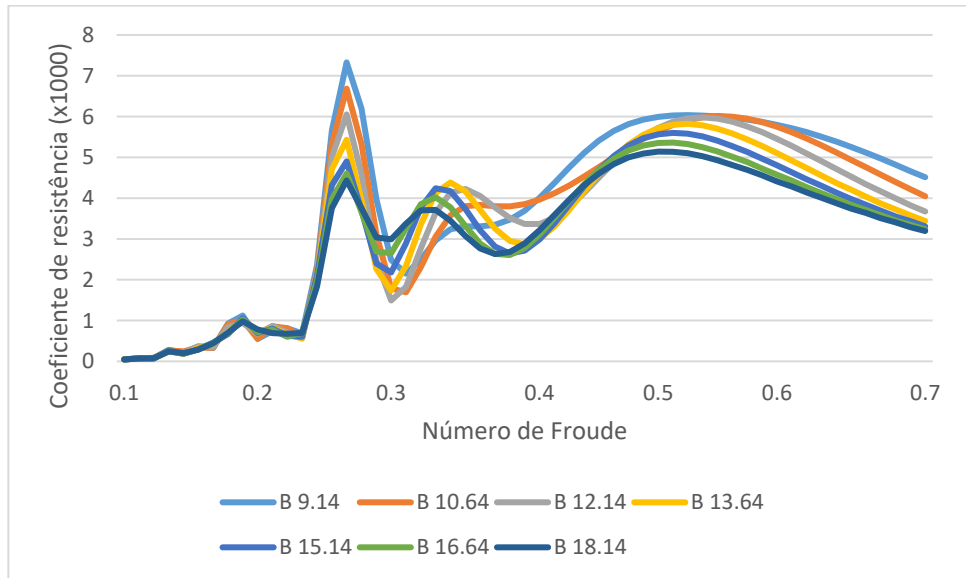
A seguir, nas Figuras 26, 27 e 28, é possível observar a influência do fator de interferência de onda no coeficiente de resistência de ondas das embarcações.

Figura 26 – Coeficiente de resistência de onda à diferentes bocas:
Embarcação (A).



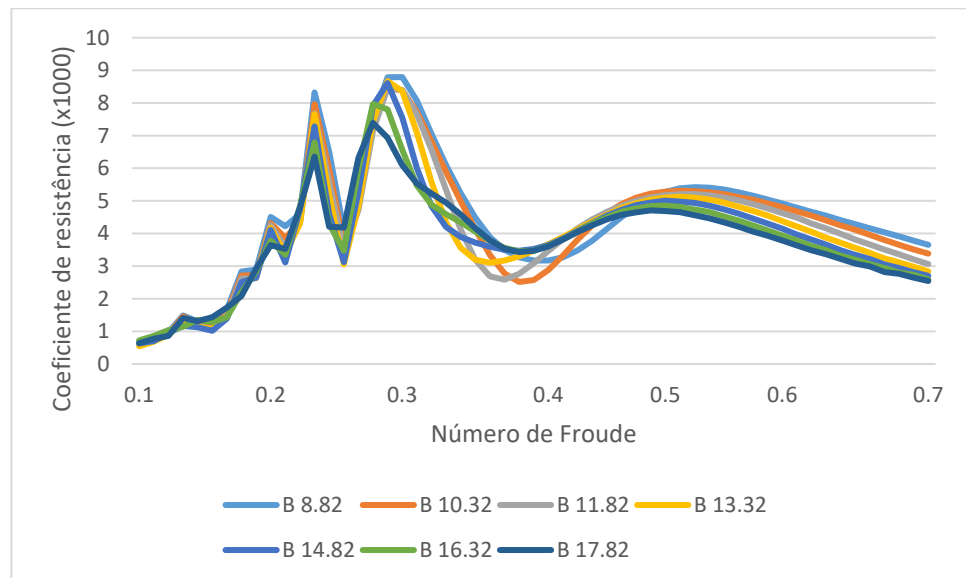
Fonte: O autor (2024).

Figura 27 – Coeficiente de resistência de onda à diferentes bocas:
Embarcação (B).



Fonte: O autor (2024).

Figura 28 – Coeficiente de resistência de onda à diferentes bocas:
Embarcação (C).



Fonte: O autor (2024).

Com o fator de interferência menor, o coeficiente de resistência de ondas é conseqüentemente menor. As grandes diferenças observadas nos números de Froude mais baixos tendem a diminuir à medida que o número de Froude aumenta, pois, após a velocidade crítica, o fator de interferência de ondas tende a 1.

Entre os números de Froude 0,2 e 0,3 é possível ver uma região de interferência destrutiva do sistema de ondas, na qual as embarcações com menor distância entre cascos apresentam um menor coeficiente de resistência ao avanço. Porém, em todos os outros intervalos esse coeficiente diminui conforme a distância entre os cascos aumenta.

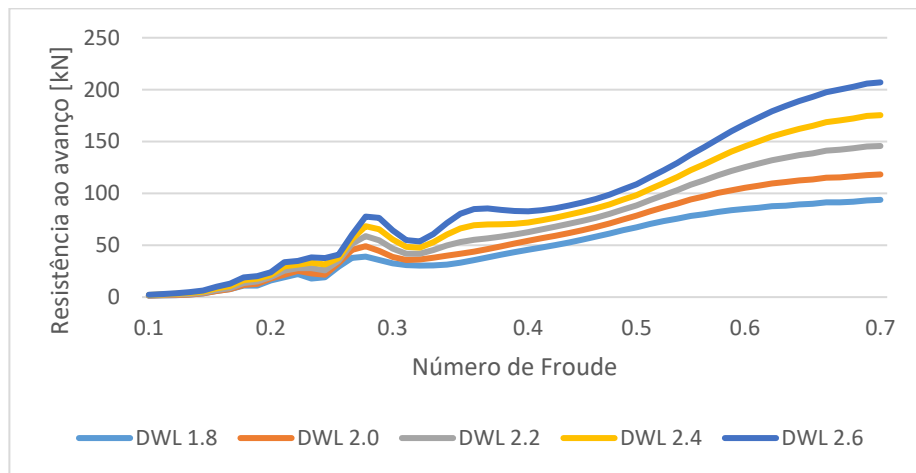
No caso da embarcação (A), a diferença mais significativa é encontrada no número de Froude de 0,27 (ou 7,4 nós), onde a maior distância entre os cascos corresponde a um coeficiente de resistência de ondas 40% menor.

Assim como nas outras embarcações, é possível observar que, no caso da embarcação (C), a maior distância entre os cascos corresponde usualmente ao menor coeficiente de resistência de ondas. Porém, uma exceção é visível no intervalo entre Froude 0,35 (ou 13,5 nós) e Froude 0,43 (ou 17,0 nós), onde distâncias da ordem de 10,32 e 11,82 metros provocam o menor coeficiente de resistência de ondas.

4.1.4 Variação paramétrica dos valores de calado

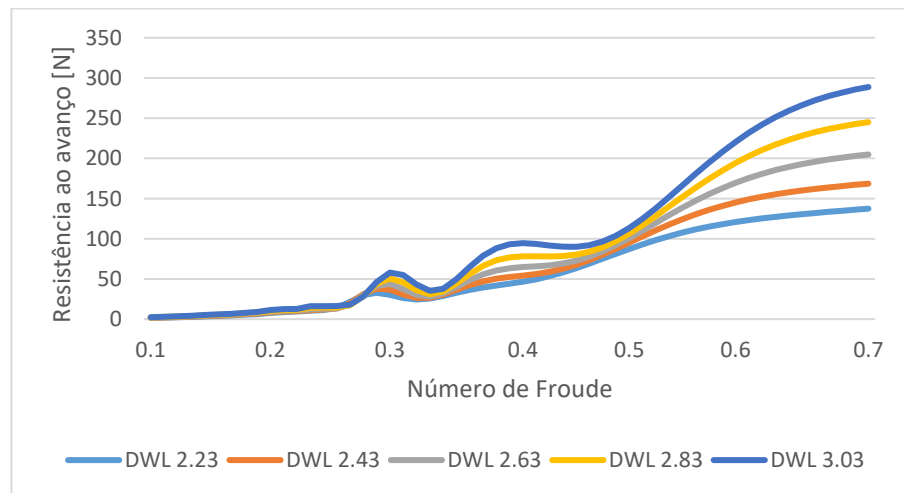
Nas Figuras 29, 30 e 31 são mostrados os resultados da análise paramétrica referente a variação do calado das embarcações estudadas. Nessas figuras, a sigla Dwl (*design waterline*) se refere a medida do calado utilizado para o cálculo da curva.

Figura 29 – Resistência ao avanço à diferentes calados: Embarcação (A).



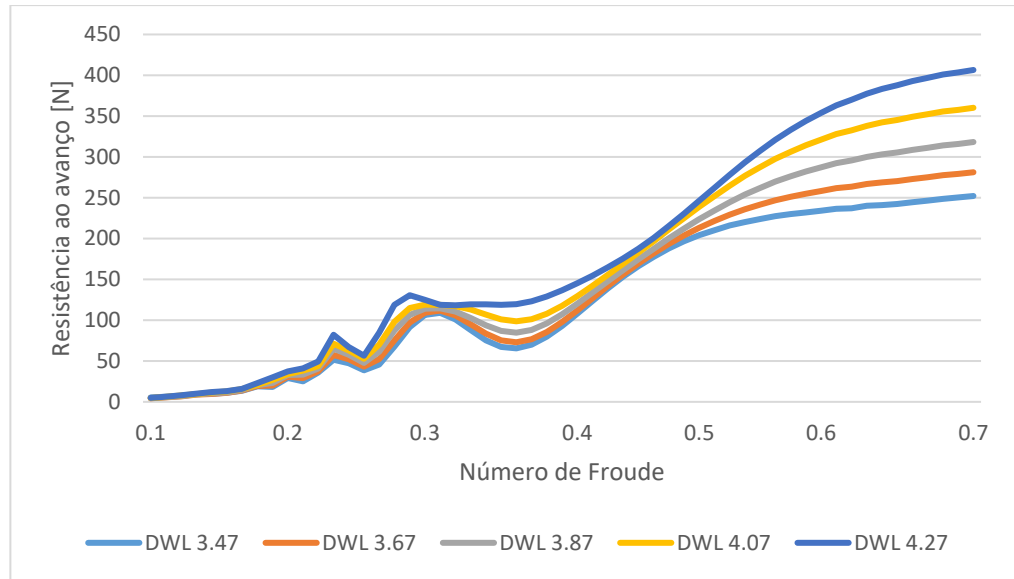
Fonte: O autor (2024).

Figura 30 – Resistência ao avanço à diferentes calados: Embarcação (B).



Fonte: O autor (2024).

Figura 31 – Resistência ao avanço à diferentes calados: Embarcação (C).



Fonte: O autor (2024).

Conforme pode ser observado, as maiores diferenças na resistência ao avanço ocorrem nos números de Froude mais elevados. Essa diferença pode ser entendida por meio da Equação 4, na qual é possível observar que as diferenças no calado afetam a superfície molhada, a qual altera significativamente a resistência ao avanço de forma da embarcação.

No entanto, conforme já discutido, é pouco provável que essas embarcações alcancem velocidades associadas a números de Froude acima de 0,5, diminuindo o impacto de tais resultados no projeto.

4.1.4.1 Coeficiente de resistência viscosa e friccional

Calculado pelo método proposto por ITTC (1957), discutido na seção 2.1.1.3, o coeficiente de resistência friccional se manteve constante entre os intervalos estudados. Para estudos futuros, recomenda-se incluir também o comprimento da embarcação na análise paramétrica realizada, pois essa grandeza impacta tanto no cálculo do coeficiente de resistência friccional, quando na área molhada do casco.

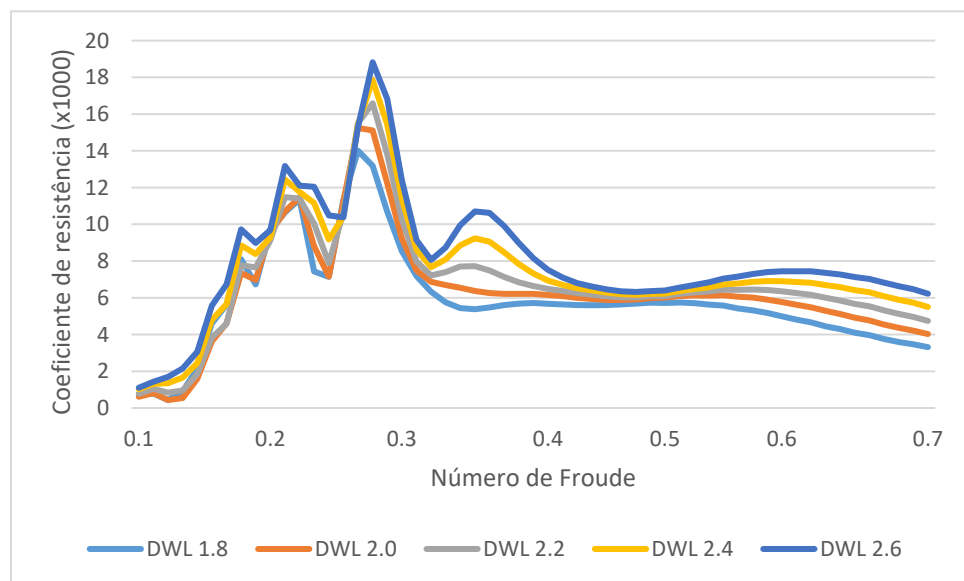
Conforme pode ser visto nos gráficos mostrados no apêndice C, o coeficiente de resistência viscosa sofre um aumento irrisório com o aumento do calado.

Para entender a mudança no coeficiente de resistência viscosa, foi realizada uma análise referente ao comportamento do fator de interferência viscosa e do fator de forma. Em virtude dos cálculos mostrados no apêndice D, conclui-se que ambos variam em função do calado, aumentando com o aumento do calado.

4.1.4.2 Coeficiente de resistência de onda e seu fator de interferência

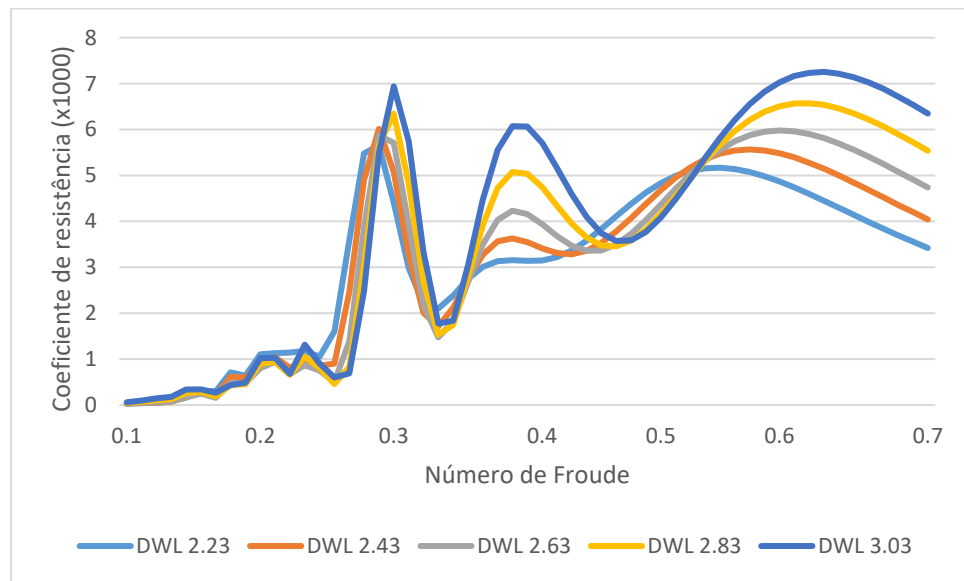
Dado que os coeficientes de resistência viscosa e friccional praticamente não variam, as diferenças presentes no coeficiente de resistência ao avanço das embarcações estudadas podem ser explicadas em função da variação dos coeficientes de resistência de ondas, tal como pode ser visto nas Figuras 32, 33 e 34.

Figura 32 – Coeficiente de resistência de onda à diferentes calados:
Embarcação (A).



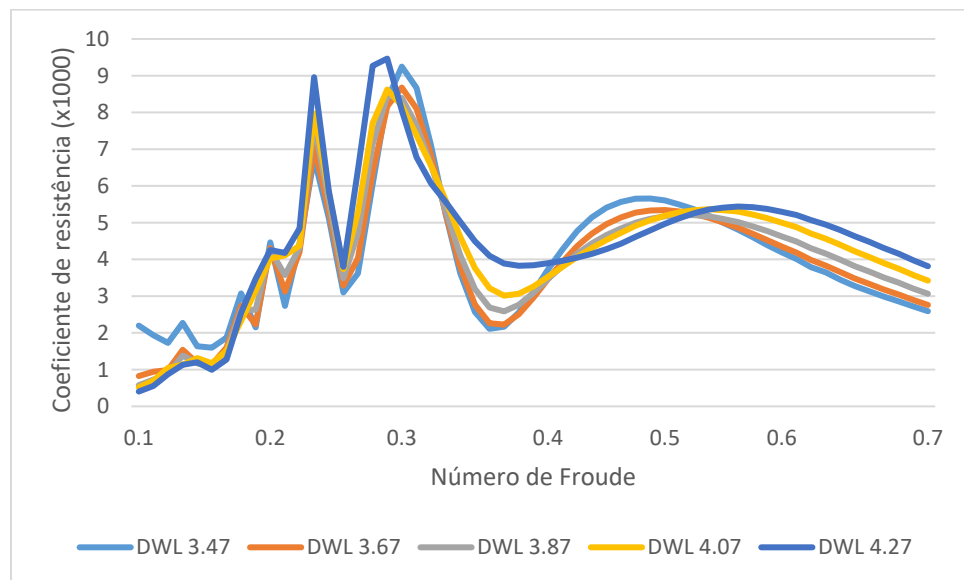
Fonte: O autor (2024).

Figura 33 – Coeficiente de resistência de onda à diferentes calados:
Embarcação (B).



Fonte: O autor (2024).

Figura 34 – Coeficiente de resistência de onda à diferentes calados:
Embarcação (C).



Fonte: O autor (2024).

Conforme pode ser observado, a diminuição do calado afeta de maneira positiva o coeficiente de resistência de ondas. De acordo com Vossers (1962), com a diminuição do calado, as ondas produzidas pela embarcação têm uma amplitude menor, resultando em uma menor resistência de ondas.

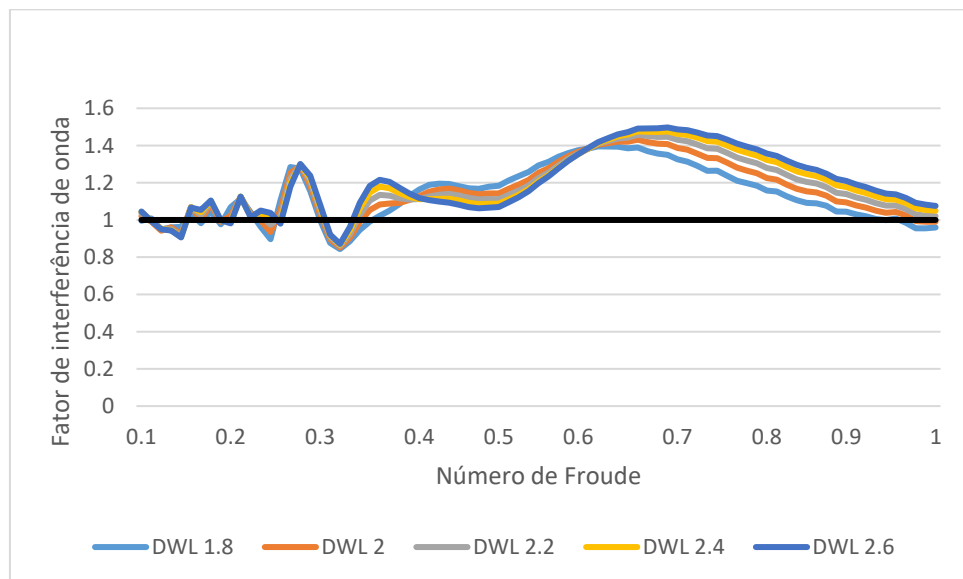
Para as embarcações (A) e (B) as diferenças no coeficiente de resistência de ondas referente aos números de Froude mais elevados alcançam valores de até 45%.

Já a embarcação (C), que tem um maior calado de projeto do que as embarcações (A) e (B), sofre uma menor influência, apresentando diferenças de aproximadamente 30% para números de Froude mais elevados.

Os resultados referentes ao estudo paramétrico da influência do calado no fator de interferência de ondas são mostrados nas Figuras 35, 36 e 37. Onde é possível observar que o fator de interferência de ondas responde de maneira similar nas três embarcações estudadas.

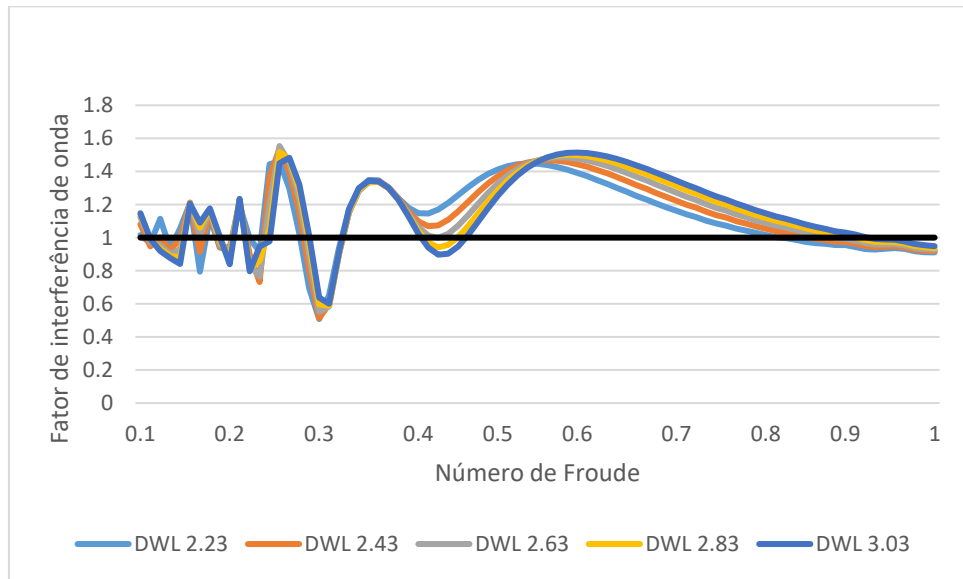
Qualitativamente é possível afirmar que a variação do calado resulta em variações menores no fator de interferência de ondas, para altos números de Froude, do que a variação da distância entre cascos.

Figura 35 – Fator de interferência de onda à diferentes calados: Embarcação (A).



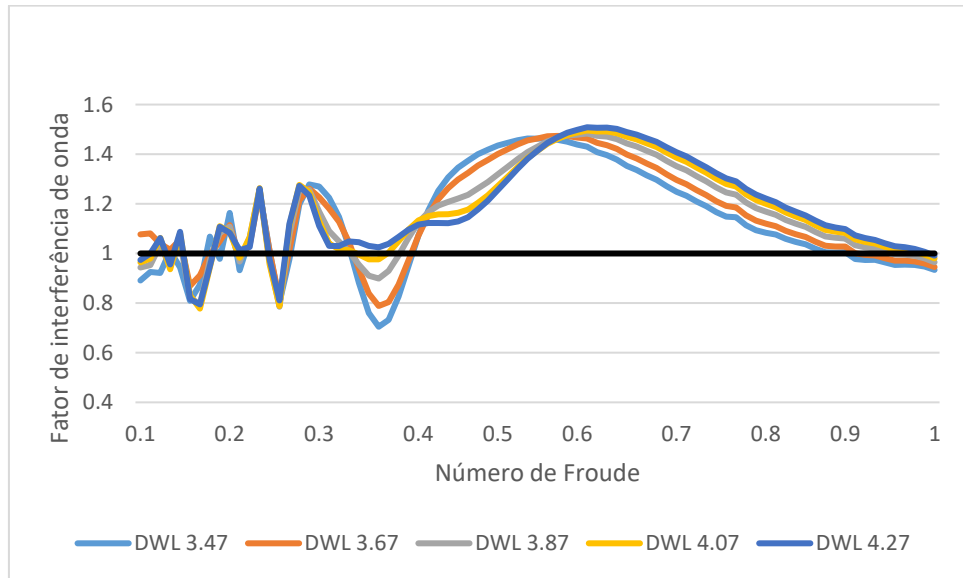
Fonte: O autor (2024).

Figura 36 – Fator de interferência de onda à diferentes calados: Embarcação (B).



Fonte: O autor (2024).

Figura 37 – Fator de interferência de onda à diferentes calados: Embarcação (C).



Fonte: O autor (2024).

5 CONCLUSÃO

A dificuldade na realização de ensaios experimentais e os altos custos associados a esses ensaios motivam o desenvolvimento de formas alternativas para estimar a resistência ao avanço de embarcações.

Nesse cenário, o presente trabalho utilizou modelos empíricos, a teoria do corpo esbelto e a fluidodinâmica computacional para estimar a curva da resistência ao avanço das três embarcações catamarã selecionadas para este estudo, obtendo cada uma das parcelas separadamente.

Comparando os resultados obtidos para as embarcações catamarã com aqueles obtidos analisando cada casco isoladamente, foram identificados os fatores de interferência viscosa e de ondas presentes nas embarcações estudadas.

A análise paramétrica da distância entre os cascos mostrou que:

- A variação da resistência ao avanço do catamarã apresentou alta dependência da distância entre os cascos;
- Existe uma velocidade crítica a partir da qual o fator de interferência de ondas pode ser ignorado;
- O aumento da distância entre os cascos resulta em velocidades críticas menores;
- Em geral, quando mais próximos os cascos, maior a interferência nos sistemas de ondas, podendo ser uma interferência construtiva (que aumenta a resistência de ondas da embarcação) ou destrutiva (que reduz a resistência de ondas da embarcação);
- O fator de interferência viscosa é independente da distância entre os cascos.

Sobre a variação paramétrica do calado:

- Quanto menor o calado, menor é o fator de interferência de ondas observado;

- Em baixas velocidades, diferentes medidas no calado podem produzir fatores de interferência de onda irregulares;
- O fator de forma e o fator de interferência viscosa também variam com a variação do calado;
- O coeficiente de resistência viscosa apresenta uma diferença constante entre os calados;
- Devido a influência na área molhada, o impacto na resistência ao avanço do calado é superior ao impacto da distância entre os cascos.

Por fim, conclui-se que a distância entre os cascos deve ser aquela para a qual a velocidade de serviço seja superior a velocidade crítica, resultando em um fator de interferência de onda igual a 1.

No entanto, nos casos em que a velocidade de serviço está distante da velocidade crítica, deve-se buscar ajustar a distância entre cascos de forma a obter a maior interferência destrutiva entre os sistemas de ondas gerados por cada casco, permitindo que a embarcação navegue na velocidade de serviço com a menor resistência de ondas possível.

Caso o projeto permita, um menor calado sempre resultará em uma menor resistência ao avanço. No entanto, destaca-se que as embarcações estudadas já possuem o menor calado possível para o projeto, sendo necessário a remodelagem dos cascos para permitir um menor calado.

Para verificar a possibilidade da redução da resistência ao avanço sem a modificação dos parâmetros já estudados, recomenda-se que trabalhos futuros estudem configurações do tipo SWATH, a adição de hidrofólios ou a adição de bulbos.

REFERÊNCIAS

BENTLEY SYSTEMS. **Maxsurf Resistance: User Manual**. MAXSURF CONNECT EDITION V23. 2020. Documento eletrônico disponibilizado no ambiente Maxsurf Resistance.

ROSS, J.M. **Computer-based tools**. In: LAMB, T. Ship Design and Construction. Volumes 1 and 2. Estados Unidos da America: Sheridan Books. 2003.

DUBROVSKY, V.A. Multi-Hulls: Some New Options as the Result of Science Development. **Brodogradnja**. Zagreb. 2010.

INSEL, M. **An Investigation into the Resistance Components of High-Speed Displacement Catamarans**. University of southampton, 1990.

MARTÍNEZ, M. M. **Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos**. 2016. Disponível em: <https://repositorio.upct.es/xmlui/handle/10317/5760>. Acesso em: 18 abr. 2024.

INSEL, M. & MOLLAND, A. F. **An Investigation into the Resistance Components of High-Speed Displacement Catamarans**. The Royal Institution of Naval Architects, 1991.

PESCE, C.P. **Estudo do comportamento de corpos flutuantes em ondas: um enfoque variacional e aplicações da teoria do corpo esbelto**. Escola politécnica da universidade de São Paulo, 1988.

WANG, Q. **An analytical solution for two slender bodies of revolution translating in very close proximity**. Cambridge University Press, 2007.

MOLLAND, A. F.; WELLICOME, J. F.; COUSER, P. R. **An improved method for the theoretical prediction of the wave resistance of transom-stern hulls using a slender body approach**. University of Southampton, 1999.

VOSSERS, G. **Some Applications of The Slender Body Theory in Ship Hydrodynamics**. Wageningen: H. Veenman & Zonen N. V. 1962

ARAUJO, M.F. **Estimativa do fator e da resistência ao avanço de embarcações através da dinâmica dos fluidos computacional**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo, 2014.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Springer, 2002.

MOLLAND, A. F.; WELLICOME, J. F.; COUSER, P. R. **Resistance Experiments on a Systematic Series of High-Speed Displacement Catamaran Forms: Variation**

of Length-Displacement Ratio and Breadth-Fraught Ratio. Ship Science Report 71. mar. 1994.

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de Máquinas Marítimas.** Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, 2012.

BERTRAM, V. **Practical Ship Hydrodynamics.** Butterworth-Heinemann. Grã Bretanha, 2000

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S.R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion.** University of Southampton. Cambridge University Press. Cambridge, 2011.

USNA, U. S. N. A. **Resistance and Powering of Ships.** Disponível em: <https://www.usna.edu/NAOE/academics/en400.php>. Acesso em: 23 abr. 2024.

VERSTEEG, H. K; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method.** 2. ed. Prentice Hall, 2007.

MOLLAND, A. F. **The maritime engineering: a guide to ship design, construction and operation.** Elsevier, 2008.

LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture, Vol 2.** The society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.

Holtrop, J. e Mennen, G.G.J.. **An approximate power prediction method.** International Ship building Progress. 1982.

APÊNDICE A – Cálculo da resistência ao avanço em diferentes malhas

Figura A1 – Resistencia ao avanço nas diferentes malhas para a embarcação (C)

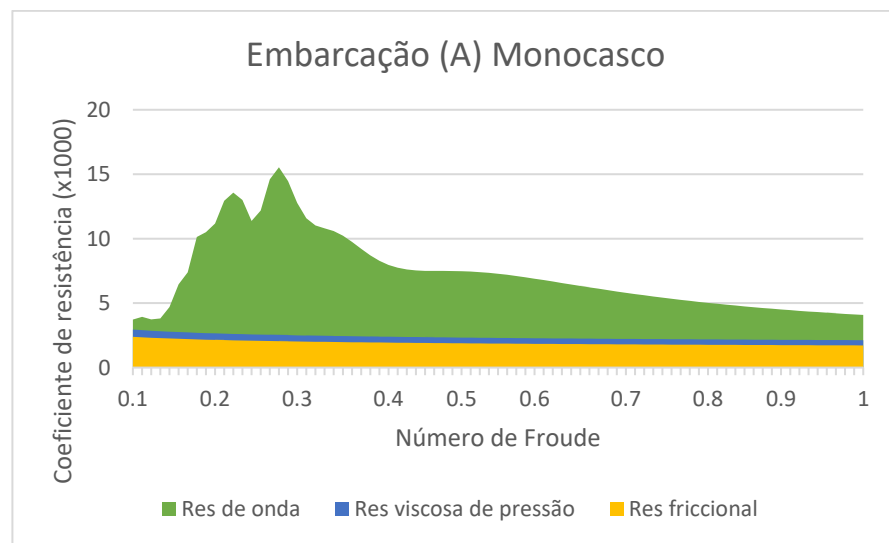
Velocidade	Res avanço malha 20	Res avanço malha 41	Res avanço malha 81	Res avanço malha 601	Res avanço malha 1801
0.48125	0.081225	0.081225	0.081225	0.081225	0.081225
0.9625	0.291641	0.29165	0.291645	0.291637	0.291655
1.44375	0.618844	0.618888	0.618644	0.618811	0.618844
1.925	1.05943	1.059764	1.060199	1.060247	1.060326
2.40625	1.617937	1.619455	1.610493	1.610933	1.610982
2.8875	2.308227	2.312164	2.363179	2.310419	2.310076
3.36875	3.139321	3.214011	3.293145	3.184847	3.184734
3.85	4.146584	4.527527	4.461685	4.348476	4.346111
4.33125	5.341341	5.995814	5.532414	5.489192	5.48509
4.8125	6.901444	7.832291	7.462867	7.268919	7.274438
5.29375	10.042803	10.105924	9.147455	9.153198	9.166617
5.775	11.279099	11.887486	11.398185	11.067367	11.050968
6.25625	15.393538	16.550961	15.668609	15.148892	15.106161
6.7375	23.991728	21.720118	19.223432	19.113552	19.121026
7.21875	22.781851	21.759519	22.381625	22.514792	22.524951
7.7	35.498264	32.519635	31.25216	30.794848	30.722162
8.18125	30.016283	31.6424	33.274808	33.125536	33.133577
8.6625	53.371587	46.860587	43.892279	44.012452	43.972614
9.14375	74.655732	68.762034	66.21271	65.821198	65.679391
9.625	50.054898	50.270961	52.340863	51.801435	51.756847
10.10625	51.190009	51.165647	50.999351	50.925512	50.900556
10.5875	86.626999	81.325608	75.732338	76.013925	75.922625
11.06875	116.507201	107.678821	101.424965	101.54414	101.404512
11.55	123.620833	115.230817	113.188305	112.915129	112.783093
12.03125	117.296655	112.09717	114.776826	114.247118	114.160267
12.5125	107.181435	105.51012	110.510627	109.995213	109.962891
12.99375	96.632213	97.208618	101.832181	101.512216	101.522371
13.475	88.247352	89.301404	91.88866	91.784785	91.810061
13.956249	85.127193	85.435482	85.48009	85.52507	85.536243
14.437499	88.676879	87.663459	85.512193	85.621162	85.598867
14.918749	97.931721	95.518781	92.085942	92.18757	92.128065
15.399999	110.664399	107.094183	103.428166	103.491608	103.404033
15.881249	124.66133	120.300678	117.332156	117.345818	117.246286
16.362499	138.712702	133.944949	132.350394	132.317243	132.22241
16.843749	152.480727	147.607175	147.74002	147.666093	147.588644
17.324999	165.543987	160.791388	162.673388	162.579099	162.52731
17.806249	178.474925	174.015666	177.500576	177.395936	177.372185
18.287499	191.01946	186.997266	191.793344	191.689446	191.691474
18.768749	203.326124	199.739992	205.445762	205.351326	205.375242
19.249999	215.4899	212.393946	218.645182	218.577205	218.619209
19.731249	227.252535	224.618163	231.138278	231.088766	231.14197
20	238.12324	235.876684	242.322868	242.301354	242.361205

Fonte: O autor (2024).

APÊNDICE B – Composição da resistência dos cascos em isolamento

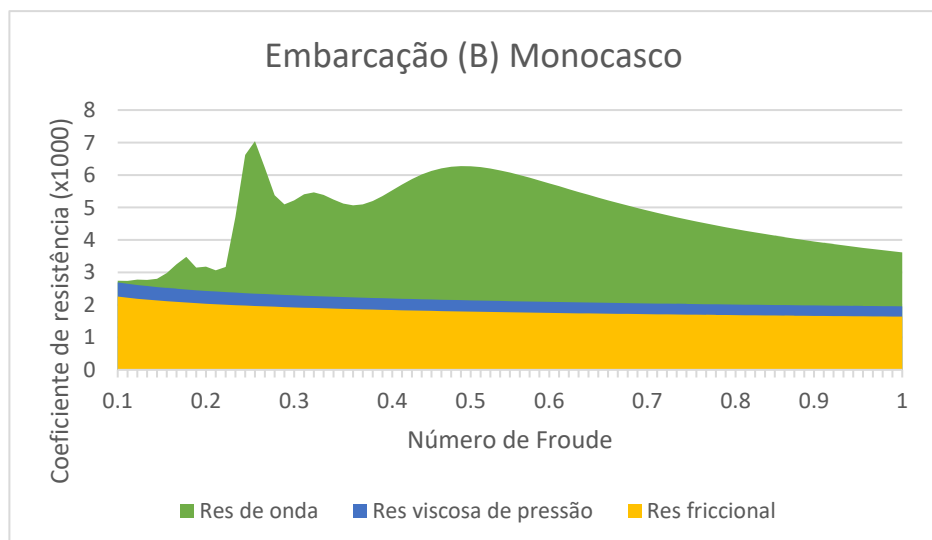
Os gráficos da composição da resistência ao avanço realizado para os cascos das embarcações em isolamento são aqui demonstrados. De acordo com Insel & Molland (1991), a similaridade encontrada entre os componentes do casco isolado com os componentes da embarcação catamarã são esperados.

Figura B1 – Componentes do coeficiente de resistência de avanço da embarcação (A) com seu casco em isolamento.



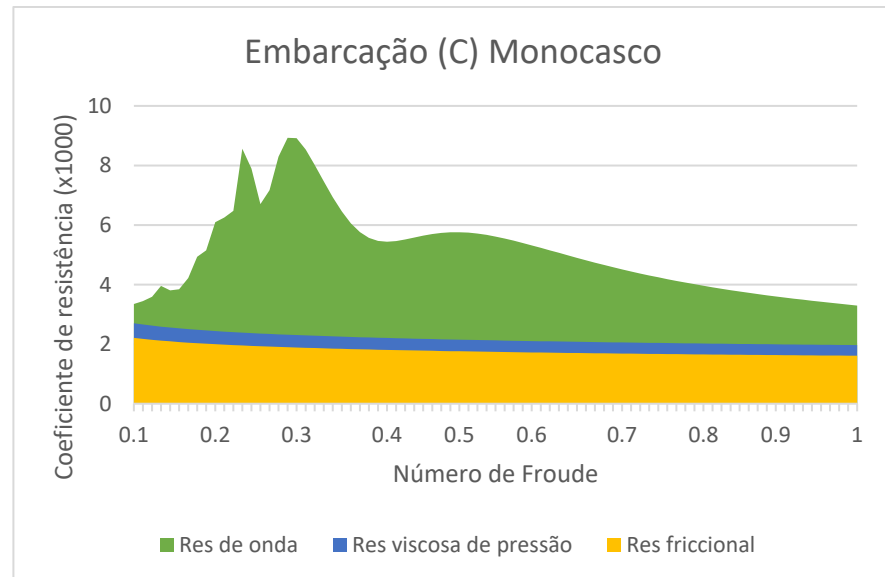
Fonte: O autor (2024).

Figura B2 – Componentes do coeficiente de resistência de avanço da embarcação (B) com seu casco em isolamento.



Fonte: O autor (2024).

Figura B3 – Componentes do coeficiente de resistência de avanço da embarcação (C) com seu casco em isolamento.

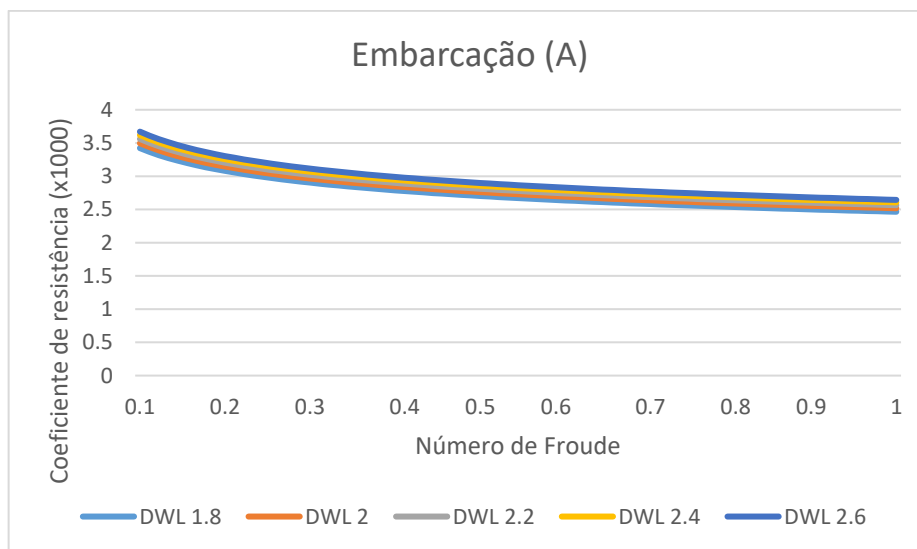


Fonte: O autor (2024).

APÊNDICE C – Variação do coeficiente de resistência viscosa em função do calado

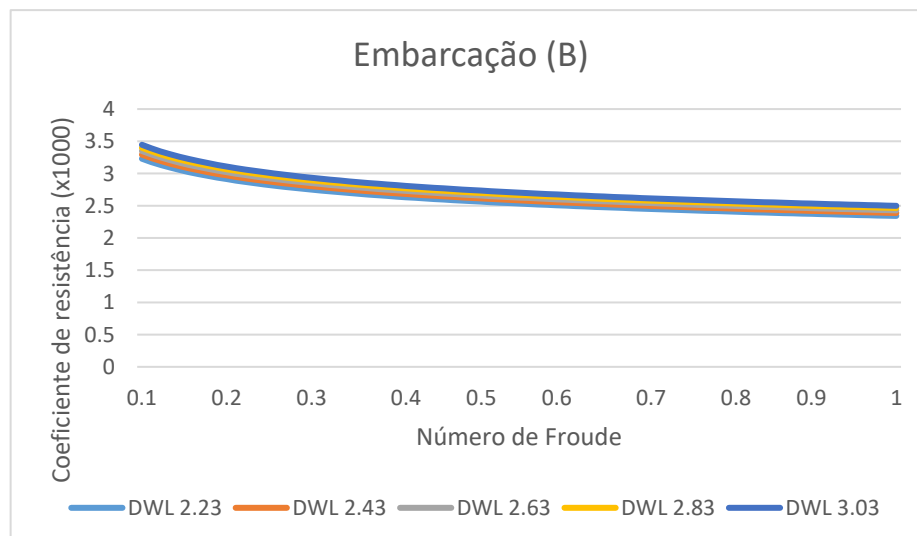
Os coeficientes de resistência viscosa são aqui demonstrados. Apesar das pequenas diferenças encontradas entre suas curvas é possível dizer que quanto menor o calado menor o coeficiente de resistência viscosa.

Figura C1 – Coeficiente de resistência viscosa em função do calado da embarcação (A).



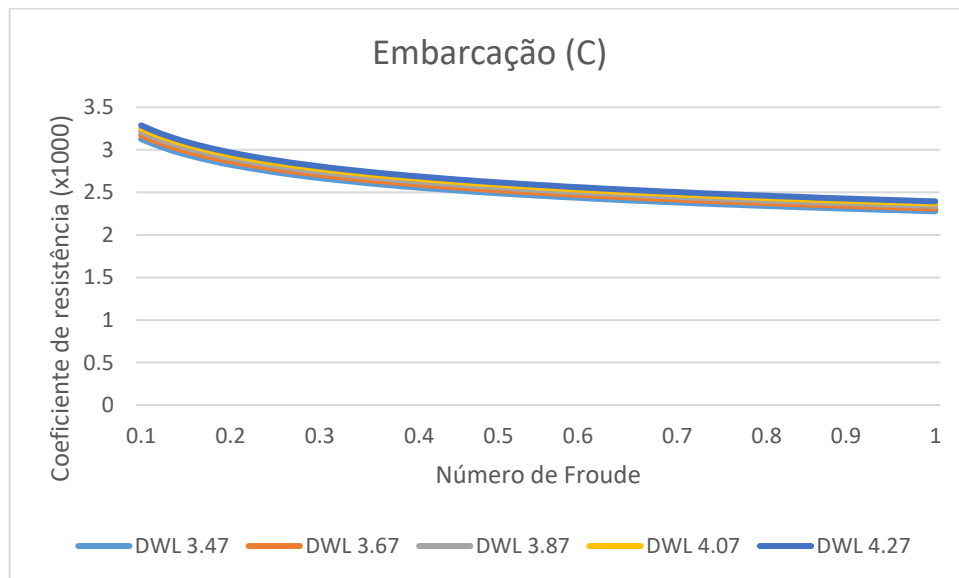
Fonte: O autor (2024).

Figura C2 – Coeficiente de resistência viscosa em função do calado da embarcação (B).



Fonte: O autor (2024).

Figura C3 – Coeficiente de resistência viscosa em função do calado da embarcação (C).



Fonte: O autor (2024).

APÊNDICE D – Cálculo do fator de forma e fator de interferência viscosa em relação ao calado.

Os fatores de forma e os fatores de interferência viscosa são aqui calculados para as três embarcações, comparadas entre si, para entender o funcionamento desses parâmetros em função do calado.

Embarcação (A):

Fator de forma do casco isolado:

(Calado 1.8m)	$(1 + k) = 1,236$
(Calado 2.0m)	$(1 + k) = 1,260$
(Calado 2.2m)	$(1 + k) = 1,282$
(Calado 2.4m)	$(1 + k) = 1,304$
(Calado 2.6m)	$(1 + k) = 1,325$

Fator de forma do catamarã:

(Calado 1.8m)	$(1 + \beta k) = 1,435$
(Calado 2.0m)	$(1 + \beta k) = 1,466$
(Calado 2.2m)	$(1 + \beta k) = 1,493$
(Calado 2.4m)	$(1 + \beta k) = 1,517$
(Calado 2.6m)	$(1 + \beta k) = 1,539$

Então:

(Calado 1.8m)	$k = 0,236, e \beta = 1,84$
(Calado 2.0m)	$k = 0,260, e \beta = 1,79$
(Calado 2.2m)	$k = 0,282, e \beta = 1,75$
(Calado 2.4m)	$k = 0,304, e \beta = 1,70$
(Calado 2.6m)	$k = 0,325, e \beta = 1,65$

Embarcação (B):

Fator de forma do casco isolado:

(Calado 2.23m)	$(1 + k) = 1,193$
(Calado 2.43m)	$(1 + k) = 1,206$
(Calado 2.63m)	$(1 + k) = 1,218$
(Calado 2.83m)	$(1 + k) = 1,229$
(Calado 3.03m)	$(1 + k) = 1,239$

Fator de forma do catamarã:

(Calado 2.23m)	$(1 + \beta k) = 1,416$
(Calado 2.43m)	$(1 + \beta k) = 1,444$
(Calado 2.63m)	$(1 + \beta k) = 1,469$
(Calado 2.83m)	$(1 + \beta k) = 1,491$
(Calado 3.03m)	$(1 + \beta k) = 1,511$

Então:

(Calado 2.23m)	$k = 0,193, e \beta = 2,15$
(Calado 2.43m)	$k = 0,206, e \beta = 2,15$
(Calado 2.63m)	$k = 0,218, e \beta = 2,15$
(Calado 2.83m)	$k = 0,229, e \beta = 2,14$
(Calado 3.03m)	$k = 0,239, e \beta = 2,13$

Embarcação (C):

Fator de forma do casco isolado:

(Calado 3.47m)	$(1 + k) = 1,221$
(Calado 3.67m)	$(1 + k) = 1,233$
(Calado 3.87m)	$(1 + k) = 1,243$
(Calado 4.07m)	$(1 + k) = 1,253$
(Calado 4.27m)	$(1 + k) = 1,263$

Fator de forma do catamarã:

(Calado 3.47m)	$(1 + \beta k) = 1,414$
(Calado 3.67m)	$(1 + \beta k) = 1,434$
(Calado 3.87m)	$(1 + \beta k) = 1,453$
(Calado 4.07m)	$(1 + \beta k) = 1,470$
(Calado 4.27m)	$(1 + \beta k) = 1,486$

Então:

(Calado 3.47m)	$k = 0,221, e \beta = 1,87$
(Calado 3.67m)	$k = 0,233, e \beta = 1,86$
(Calado 3.87m)	$k = 0,243, e \beta = 1,86$
(Calado 4.07m)	$k = 0,253, e \beta = 1,86$
(Calado 4.27m)	$k = 0,263, e \beta = 1,85$

Por meio da análise no cálculo das três embarcações é possível observar uma tendência no fator de interferência viscosa, o seu valor diminui enquanto o fator de forma aumenta. Nas embarcações (B) e (C) o fator de interferência viscosa tem uma variação muito menor se comparado a embarcação (A).