

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LAURA SCARPATTO RAMOS

SUBSÍDIOS PRELIMINARES NA UTILIZAÇÃO DE CASCOS COM DEGRAUS

Joinville

2023

LAURA SCARPATTO RAMOS

SUBSÍDIOS PRELIMINARES NA UTILIZAÇÃO DE DEGRAUS EM CASCOS
PLANANTES

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto.

Joinville

2023

LAURA SCARPATTO RAMOS

SUBSÍDIOS PRELIMINARES NA UTILIZAÇÃO DE DEGRAUS EM CASCOS
PLANANTES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 30 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Orientador(a)/Presidente

Dr. André Luís Condino Fugarra
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Me. Luiz Eduardo Bueno Minioli
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

RESUMO

O mercado náutico vem crescendo de forma significativa no cenário brasileiro, o que promoveu também a procura por insumos para a construção e manutenção de embarcações. Apesar desse contexto favorável à construção naval, existem ainda dificuldades acerca do projeto de uma embarcação, sendo que os projetistas navais vêm propondo modificações geométricas nos projetos de embarcações a fim de gerar ainda mais eficiência aos cascos planantes. Algumas dessas alterações geométricas tornam é a inclusão de um degrau no casco, o que faz com que a área molhada da embarcação seja diminuída, gerando uma menor resistência ao avanço e permitindo que a embarcação navegue a velocidades mais altas. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar os estudos existentes acerca do tema de degraus em cascos planantes a fim de verificar qual a configuração ideal dos degraus, de forma a promover a maior eficiência em uma embarcação. Para tal, esse trabalho é baseado em pesquisa bibliográfica a partir de artigos científicos, livros, revistas, teses de doutorado e trabalhos de conclusão de curso. Ao fim da pesquisa, verificou-se que o uso de degraus se torna mais efetivo e benéfico em altas velocidades e em embarcações maiores, a partir de 30 pés, e, além disso, é possível verificar um aumento de 5% a 15% na velocidade de planeio de uma embarcação com a utilização de degraus, tendo um menor ângulo de trim e reduzindo assim a resistência ao avanço e o arrasto.

Palavras chave: Cascos com degrau. Eficiência de cascos com degraus. Cascos planantes.

ABSTRACT

The nautical market has been growing significantly in the Brazilian scenario, which has also promoted the demand for inputs for the construction and maintenance of vessels. Despite this favorable context for shipbuilding, there are still difficulties about the design of a vessel, and naval designers have been proposing geometric changes in vessel designs in order to generate even more efficiency to planing hulls. Some of these geometric changes is the inclusion of a step in the hull, which makes the wetted area of the ship smaller, generating less resistance to advancement and allowing the ship to sail at higher speeds. Thus, this work aims to analyze the existing studies on the subject of steps in planing hulls in order to verify which is the ideal configuration of the steps, in order to promote the highest efficiency in a vessel. To accomplish this goal, this work is based on bibliographic research from scientific articles, books, magazines, PhD thesis and other thesis. At the end of the research, it was found that the use of steps becomes more effective and beneficial at high speeds and in larger vessels, from 30 feet, and, moreover, it is possible to verify an increase of 5% to 15% in the glide speed of a vessel with the use of steps, having a smaller trim angle and thus reducing the resistance and drag.

Key words: Stepped hulls. Efficiency of stepped hulls. Planing hulls.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista de um casco com dois degraus.....	10
Figura 2 - Formação de ondas em uma placa plana sem ângulo de deadrise	20
Figura 3 – Fórmula do arrasto deduzida por Savitsky	211
Figura 4 – Gráficos da variação da razão entre arrasto e sustentação pela velocidade	22
Figura 5 – Coeficiente de sustentação por Savitsky.....	23
Figura 6 – Coeficiente de sustentação para superfícies com ângulo de deadrise.....	23
Figura 7 – Entrada de ar pelo degrau.....	26
Figura 8 - Casco com dois degraus.....	27
Figura 9 - Regimes de planeio de cascos planantes.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

F_n – Número de Froude

V – Velocidade

g – Aceleração da gravidade

b – Boca

L – Comprimento do casco

LCG – Centro de gravidade do navio

C_b – Coeficiente de bloco

C_v – Coeficiente de velocidade

C_f – Coeficiente de fricção

C_p – Coeficiente prismático

λ – Razão comprimento-boca molhada

D – Arrasto

Δ – Deslocamento

T – Ângulo de trim

β – ângulo de deadrise

ρ – Densidade

D – Comprimento da geometria

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Objetivo geral	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	11
2. METODOLOGIA	12
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 NÚMERO DE FROUDE.....	13
3.2 NÚMERO DE REYNOLDS	14
3.3 RESISTÊNCIA AO AVANÇO	15
2.2.1 Resistência friccional (atrito)	15
2.2.2 Resistência viscosa de pressão	16
2.2.3 Resistência de onda	16
2.2.4 Estimativa de resistência	16
2.3 TEORIA DA PLACA PLANA DE SAVITSKY	18
2.3.1 Sustentação em placas planas	18
2.3.1.1 <i>Sem ângulo de deadrise</i>	18
2.3.1.2 <i>Com ângulo de deadrise</i>	20
2.3.2 Arrasto em placas planas	20
2.3.3 Razão arrasto e sustentação de placas planas (D/Δ)	21
4. CASCOS PLANANTES COM DEGRAUS	25
4.1 COMO FUNCIONAM OS CASCOS PLANANTES COM DEGRAUS	25
4.2 PERFORMANCE.....	27
4.2.1 NÚMERO IDEAL DE DEGRAUS	28
4.2.2 LOCALIZAÇÃO DOS DEGRAUS	29
4.2.3 ÂNGULO DE DEADRISE, ÂNGULO E ALTURA IDEAL DO DEGRAU	30
3.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	31
5. CASCOS PLANANTES SEM DEGRAUS	33
6. COMPARAÇÕES E DISCUSSÕES ENTRE OS TIPOS DE CASCOS PLANANTES 34	
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
8. CONCLUSÕES	37

REFERÊNCIAS.....	39
-------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

O mercado náutico vem crescendo de forma significativa no cenário brasileiro, de forma que no ano de 2021, o setor teve um aumento de cerca de 10% nas vendas em relação ao ano anterior e de 20% se comparado a 2019. Esse crescimento, alavancado pela pandemia de Covid-19, fez com que o Brasil ultrapassasse o mercado estadunidense nas vendas do setor e promovesse também a procura por insumos para a construção e manutenção de embarcações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CONSTRUTORES DE BARCOS - ACOBAR 2021; DURAN, 2021; FAVARO, 2021).

Apesar desse contexto favorável à construção naval, os arquitetos navais se deparam com dificuldades consideráveis no momento de projetar uma embarcação, pois o equilíbrio entre alcance, velocidade e a carga transportada comercialmente é um grande obstáculo para projetos com máxima eficiência (GARLAND, 2010). Ao objetivar uma embarcação de alta performance em termos de estabilidade e navegabilidade e eficiência, o formato do casco é um dos principais quesitos a ser considerado, tendo o casco planante o formato ideal para cumprir esta tarefa (SAVITSKY; GORE, 1979).

O casco planante foi desenvolvido para superar as limitações hidrodinâmicas dos cascos deslocantes (SAVITSKY; GORE, 1979), cascos esses que, ao invés plainar sob a superfície da água, deslocam o volume de água ao navegar. De acordo com Garland (2010), os cascos deslocantes que tentam operar a altas velocidades têm grandes resistências ao avanço, o que faz com que as viagens sejam pouco práticas e econômicas, diferentemente dos cascos planantes, que tem a força de arrasto diminuída quando a velocidade a embarcação aumenta.

De forma a gerar ainda mais eficiência aos cascos planantes, os projetistas navais vêm propondo modificações geométricas relevantes nos projetos de embarcações. Algumas dessas alterações geométricas, por exemplo, tornam a área molhada da embarcação menor, o que gera uma menor resistência ao avanço e a embarcação pode navegar a velocidades mais altas. Nesse sentido, a inclusão de um degrau no casco é uma das modificações que pretendem reduzir a resistência

(DASHTIMANESH; ESFANDIARI; MANCINI, 2018). A Figura 1 mostra a vista de um casco com dois degraus.

Figura 1 – Vista de um casco com dois degraus



Fonte: Bilandi et al. (2019, p. 469).

Os cascos com degraus despertaram um enorme interesse nos últimos anos devido ao fato de serem mais rápidos e mais estáveis que os cascos sem degraus, além de apresentarem também maior estabilidade longitudinal em águas agitadas (BILANDI et al., 2019), porém, registros apontam que cascos com degraus existem desde o final do século XIX e que são usados desde 1910 em embarcações de alta velocidade (DASHTIMANESH et al., 2018). Esses degraus têm diversas configurações e arranjos, podendo variar a quantidade de degraus, a inclinação, a posição, a distância, a altura e o tamanho dos degraus.

As diferentes configurações geram diferentes performances nas embarcações. Segundo Bilandi et al. (2019), a altura e a posição dos degraus têm efeitos significativos no desempenho do casco, pois degraus próximos à popa transom podem diminuir apenas a resistência do casco, ao passo que degraus mais altos aumentam a ventilação. Outro exemplo citado por Bilandi et al. (2019) é que ao adicionar mais degraus na embarcação, sua estabilidade aumenta enquanto a resistência diminui.

Frente ao exposto, a fim de se compreender o funcionamento dos cascos com degraus, bem como estudar sua performance e devido a vasta gama de possibilidades acerca das composições dos degraus, propõe-se neste trabalho a análise dos estudos existentes acerca do tema de degraus em cascos planantes, de forma a verificar qual a configuração ideal dos degraus, para promover a maior eficiência em uma embarcação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a eficiência de degraus nos cascos planantes.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar a Teoria de Placa Plana de Savitsky para verificar o funcionamento do arrasto e da elevação de cascos planantes;
- Avaliar o número ideal de degraus no casco,
- Avaliar a localização ideal dos degraus,
- Avaliar a inclinação e a altura ideais do degrau;
- Verificar vantagens e desvantagens na utilização de degraus nos cascos;
- Comparar eficiências entre cascos com degraus e cascos sem degraus.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica, com referências em artigos científicos, livros, revistas, teses de doutorado e trabalhos de conclusão de curso, sendo esses textos em língua portuguesa e inglesa.

O material para análise foi encontrado a partir de temas relacionados ao desenvolvimento do trabalho, como resistência ao avanço, número de Froude, cascos planantes, cascos planantes com degraus, a Teoria de Placa Plana de Savitsky, teoria da camada limite, bem como temas mais específicos como a localização, altura, número e ângulo dos degraus presentes nas embarcações.

Os artigos aqui utilizados foram obtidos a partir de meio eletrônico, seja por meio de base de dados, como repositório da UFSC, Scielo, ScienceDirect e Google Acadêmico, de forma que se abrangeu diferentes autores com diferentes abordagens, estudos e experimentos, obtendo assim dados e referências diversificadas.

Para as pesquisas, utilizou-se algumas palavras chaves para que a busca fosse mais eficaz, tais como: cascos com degraus, cascos planantes, stepped hulls, eficiência, steps on hulls.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico acerca do tema abordado neste trabalho. A fundamentação teórica está subdividida entre o número de Froude, número de Reynolds, a resistência ao avanço e a Teoria da Placa Plana de Savitsky. Em relação ao número de Froude, os assuntos tratados serão a sua definição e sua aplicação no âmbito naval. Quanto à resistência ao avanço, serão abordadas as estimativas de resistência e a resistência friccional, a resistência viscosa de pressão e a resistência de onda. Sobre a Teoria da Placa Plana de Savitsky, discorrer-se-á sobre sua definição e relação de seus conceitos com o arrasto e a elevação de cascos planantes.

3.1 NÚMERO DE FROUDE

William Froude (1810-1879) foi um engenheiro naval inglês que influenciou o projeto de embarcações, sendo o pioneiro na utilização de modelos em escala reduzida em tanques de prova para o estudo da resistência ao avanço de embarcações. Froude também verificou em seus estudos que corpos geometricamente semelhantes e em velocidades equivalentes podem ter a sua resistência residual em escala por um fator de força de origem gravitacional (PICANÇO, 1999).

Segundo Savitsky e Gore (1979), o número de Froude F_n pode ser expresso pela razão entre a velocidade e o comprimento da embarcação (Equação 1)

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

onde V é a velocidade, g é a aceleração da gravidade e L o comprimento. O número de Froude é um parâmetro adimensional de escoamentos de superfícies livres

e pode ser visto também como a relação entre a força inercial e a força gravitacional (ÇENGEL, 2007).

Ainda de acordo com Savitsky e Gore (1979), o F_n define a razão entre o comprimento da onda feita pelo casco e o comprimento do casco. Razões de velocidade e comprimento baixas representam ondas pequenas que exercem pouco efeito no casco e dessa forma, o arrasto será predominantemente de origem viscosa. Com o $F_n = 0.40$, o comprimento de onda será igual ao comprimento do casco e grandes aumentos no arrasto serão encontrados.

O número de Froude também associa a importância relativa das pressões dinâmicas e hidrostáticas que atuam sobre o casco. Nos cascos planantes, o seu formato é desenvolvido para que haja uma pressão hidrodinâmica positiva, permitindo que a embarcação navegue cada vez mais alto em cima da onda que o próprio casco está gerando (SAVITSKY; GORE, 1979).

3.2 NÚMERO DE REYNOLDS

De acordo com Çengel (2007), Osborne Reynolds descobriu que o regime do escoamento depende principalmente da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido. Essa relação é chamada de número de Reynolds e ele é dado pela equação (Equação 2)

$$Re = \frac{\rho V_m D}{\mu}$$

onde V_m é a velocidade média do escoamento, D é o comprimento da geometria, μ é a viscosidade cinemática do fluido e ρ é a densidade do fluido.

Ainda segundo Çengel (2007), com números de Reynolds grandes, as forças inerciais são grandes com relação às forças viscosas e, portanto, as forças viscosas não podem evitar as flutuações aleatórias e rápidas do fluido. Com números de Reynolds pequenos ou moderados, porém, as forças viscosas são suficientemente grandes para suprimir essas flutuações e manter o fluido “alinhado”. Assim, o escoamento é turbulento no primeiro caso e laminar no segundo.

Tanto o número de Froude e o número de Reynolds são parâmetros importantes no momento do cálculo da resistência ao avanço, uma vez que, ao se

tratar de resistência friccional, utiliza-se o número de Reynolds e o número de Froude pode ser associado a resistência de ondas da embarcação.

3.3 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

A força que se opõe ao movimento do navio pode ser chamada de resistência ao avanço. Conforme afirmam Molland, Turnock e Hudson (2011), ao observar a movimentação de um navio na água, é possível perceber duas características no fluxo do fluido: um padrão de ondas que se move com o casco e uma região de fluxo turbulento que se acumula ao longo do comprimento do casco e que se estende como uma esteira ao final do casco. Essas duas características absorvem energia do casco e conseqüentemente constituem uma força de resistência no casco da embarcação.

A resistência ao avanço pode ser dividida entre resistência friccional, resistência de pressão viscosa e resistência de onda. De acordo com Bertram (2000), o conceito de decomposição da resistência ajuda na concepção da forma do casco, pois assim o projetista pode compreender a influência dos componentes individuais da resistência. Além disso, Molland, Turnock e Hudson (2011) afirmam que esses parâmetros são utilizados também para escalar a resistência ao avanço de um modelo para uma embarcação em tamanho real.

2.2.1 Resistência friccional (atrito)

A resistência friccional, também chamada de resistência de atrito, existe devido à viscosidade, que está diretamente relacionada às partículas de água que se agarram ao navio à medida que se movimenta. A uma curta distância do navio, as partículas de água já sofrem a influência da velocidade de um fluxo exterior quase invíscido. Uma região é formada entre a superfície do navio e o fluxo exterior chamada de camada limite. As mudanças rápidas de velocidade na direção normal da camada limite causam altas tensões de cisalhamento, que causam uma força friccional (BERTRAM, 2000).

2.2.2 Resistência viscosa de pressão

A resistência viscosa de pressão é originada por diferenças de pressão que atuam no casco devido à efeitos viscosos do escoamento. Em um escoamento ideal, a pressão exercida na popa da embarcação seria igual à exercida na proa, porém, na prática, os efeitos viscosos irão reduzir a pressão exercida na popa. Parte dessa resistência à pressão viscosa se dá pela geração de vórtices ao redor do casco e a outra parte ocorre pelo aumento da espessura da camada limite (TRINDADE, 2012). De acordo com Molland, Turnock e Hudson (2011), as perdas de energia na camada limite, os vórtices e a separação do fluxo também impedem um aumento na estagnação, como previsto na teoria do fluido ideal.

2.2.3 Resistência de onda

Trindade (2012) afirma que ao avançar na superfície da água, uma embarcação é rodeada e seguida por uma formação undosa. Enquanto a velocidade é baixa, essa formação é quase imperceptível, porém, à medida que a velocidade aumenta, torna-se visível e toma dimensões crescentes conforme a velocidade. Segundo Bertram (2000), esta formação undosa é também chamada de sistema de ondas e contribui para a resistência total ao avanço da embarcação.

2.2.4 Estimativa de resistência

Existem vários métodos para se estimar a resistência ao avanço de uma embarcação, do mesmo modo que existem variáveis utilizadas e que auxiliam nesta estimativa, como a velocidade, deslocamento, comprimento e boca, ângulo de deadrise e o centro de gravidade do navio, LCG. Alguns métodos existentes para estimar a eficiência são séries sistemáticas, equações prismáticas e métodos numéricos. Esses métodos são baseados nos mesmos dados, experimentos e observações dos testes em modelos em escala reduzida de embarcações (KUKNER; YASA, 2011).

As variáveis utilizadas na estimativa demonstram dimensões e não são capazes de especificar a forma do casco da embarcação, porém, existem informações abundantes acerca da forma dos cascos e assim, é possível escolher o melhor método

de estimativa de resistência a partir da forma conhecida do casco. Além disso, cascos com formas semelhantes, com dimensões e intervalos de velocidades parecidos, podem ter estimativas de resistência muito próximas (KUKNER; YASA, 2011).

As séries sistemáticas, de acordo com Hille (2017), são estudos padronizados que tentam estabelecer resultados experimentais confiáveis para um conjunto de cascos semelhantes e ser então utilizados em embarcações de tamanho real. A Série 60 provavelmente é a mais clássica dessas séries e foi conduzida em um dos maiores tanques de reboque do mundo, nos Estados Unidos da América (EUA), foi desenvolvida por meio de 40 organizações e seu o parâmetro principal foi o coeficiente de bloco C_b variando entre 0,60 e 0,85 (TODD 1963 APUD HILLE 2017).

A maioria dos cascos planantes podem ser vistos como tendo uma forma prismática, pois durante o regime planante as seções a meia nau do casco são menos afiladas do que na proa e na popa da embarcação, com valores de coeficiente prismático C_p mais baixos. As principais variáveis nos métodos prismáticos são a boca, o deadrise, LCG e o peso do casco. Nesses métodos, o comprimento e a forma do casco não podem ser levados em consideração nos cálculos. Outra vantagem dos cascos prismáticos é que a resistência ao avanço pode ser considerada como a tangente do ângulo de trim e o peso do casco mais o atrito do arrasto (KUKNER; YASA, 2011).

Existem três métodos prismáticos de prever a estimativa da resistência ao avanço, que são o método de Savitsky, método de Shuford e o método de Lyubomirov. A diferença entre os resultados de resistência ao avanço obtidos entre esses métodos geralmente é de menos de 10%, porém o método de Savitsky oferece a estimativa mais alta (KUKNER; YASA, 2011).

Por fim, os métodos numéricos podem ser úteis na fase de concepção preliminar da estimativa da resistência. Pelos métodos numéricos terem sido desenvolvidos a partir de testes em modelos, os resultados obtidos não são sempre precisos e por esta razão, os projetistas devem atentar ao fato de até que ponto o método está coerente com a sua base de dados. Atualmente, os métodos numéricos mais utilizados são: Séries de regressão da Academia Naval dos EUA, Séries de Regressão 62/65 de Hubble e de Radojicic e a Regressão Japonesa (KUKNER; YASA, 2011).

2.3 TEORIA DA PLACA PLANA DE SAVITSKY

Publicada em 1964 por Daniel Savitsky, a Teoria da Placa Plana de Savitsky é uma abordagem empírica que versa sobre os parâmetros relacionados ao comportamento de uma embarcação planante na água, como a elevação do planeio, o arrasto, a área molhada, a distribuição de pressão, as forças de impacto, a forma da esteira, a formação de pulverização e a estabilidade dinâmica.

A teoria é baseada na relação entre a força de arrasto e a pressão exercida pelo fluido no casco, e permite, a partir das medições da pressão exercida pelo fluido na superfície da embarcação, estimar a força de arrasto. Para isso, Savitsky faz seus estudos em uma placa plana e indica que o comportamento na água de uma embarcação planante se assemelha ao da placa, conduzindo o estudo de uma placa plana sem ângulo de deadrise e o estudo de uma placa plana com angulação em formato "V".

Savitsky (1964) ainda utiliza alguns coeficientes de planeio que são baseados no número de Froude, como por exemplo, o coeficiente de fricção C_f e o coeficiente de velocidade C_v . O autor afirma que a dimensão responsável por adimensionalizar os coeficientes é a boca, e não o comprimento, pois em uma embarcação planante, a área molhada varia de acordo com o trim, a velocidade e o carregamento da embarcação, enquanto a boca permanece constante.

2.3.1 Sustentação em placas planas

2.3.1.1 Sem ângulo de deadrise

De acordo com Savitsky (1964), a elevação de uma superfície plana, com calado e trim constantes, pode ser atribuída a dois efeitos diferentes: a reação dinâmica do fluido contra a superfície e a contribuição da flutuação para a sustentação que está associada com as pressões estáticas para um determinado calado e trim, que representa o efeito da gravidade.

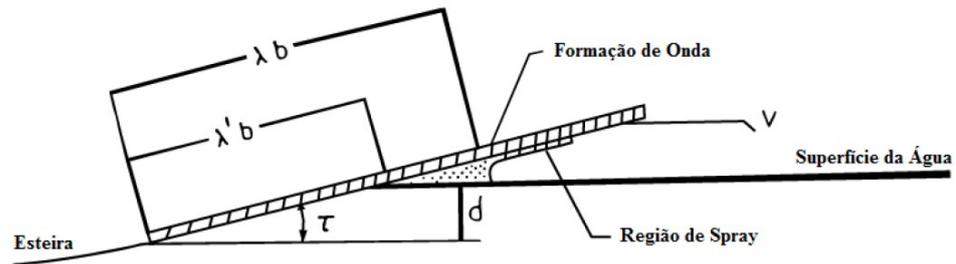
Em baixas velocidades, a parcela da flutuação predomina. Ao passo que a velocidade aumenta, o efeito dinâmico também aumenta, fazendo com que o carregamento que a superfície plana consegue suportar seja diminuído, porém, conforme a velocidade continua a aumentar, a capacidade de carga da embarcação

volta a aumentar. Em altas velocidades, encontra-se o regime de planeio da embarcação, no qual os efeitos dinâmicos são predominantes. (SAVITSKY, 1964).

Para a compreensão desses fenômenos, Savitsky (1964) descreve como se formam as ondas em uma placa plana sem ângulo de deadrise, como mostrado na Figura 2. Em suas considerações, o autor afirma que o comprimento λ da área molhada torna-se maior que o comprimento da água não perturbada λ_1 , pois a água se ergue na frente da placa devido ao ângulo de trim obtido com o movimento.

Essa região entre a área molhada e a área não perturbada é chamada de spray root e a linha de pressão de estagnação se dá próxima à essa região, sendo que quando os ângulos de trim são baixos, a linha de estagnação praticamente coincide com o spray root e conforme o ângulo de trim aumenta, a linha de estagnação distancia-se da região de spray. (SAVITSKY, 1964).

Figura 2 - Formação de ondas em uma placa plana sem ângulo de deadrise



Fonte: Savitsky (1964, p.3)

Ainda segundo Savitsky (1964), em superfícies com baixos valores de λ , o fluido está predominantemente na região longitudinal e a sustentação é proporcional ao ângulo de trim. Quando as superfícies tem pequenas áreas, porém um λ infinito, o deslocamento do fluido é transversal e proporcional ao ângulo de trim ao quadrado.

2.3.1.2 Com ângulo de deadrise

De acordo com Savitsky (1964), ao aumentar-se o ângulo de deadrise, diminui-se a sustentação das placas em regime de planeio. Essa redução dá-se devido a redução da pressão de estagnação na área molhada da placa, pois conforme o ângulo de deadrise aumenta, o ângulo entre a linha de estagnação e a quilha diminui, fazendo com que o desempenho da pressão de estagnação seja comprometido, reduzindo assim a sustentação.

2.3.2 Arrasto em placas planas

O arrasto hidrodinâmico de uma placa planante sem ângulo de deadrise é composto pelo arrasto da pressão agindo na direção normal em relação ao fundo da placa e pelo arrasto viscoso atuando na direção tangencial em relação ao fundo em ambas as regiões de pressão e spray, afirma Savitsky (1964).

Com essa afirmação e com algumas deduções, Savitsky (1964) foi capaz de empiricamente desenvolver uma equação que estima a força de arrasto de uma placa plana, levando em consideração a velocidade da placa, a viscosidade da água, densidade da água, o coeficiente de forma, a largura, o deadrise e o trim. Com o

modelo desenvolvido por Savitsky é possível não só determinar o arrasto da placa, mas também obter a velocidade máxima de operação da embarcação.

Savitsky propõe uma fórmula para o arrasto, apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Fórmula do arrasto deduzida por Savitsky

$$D = \Delta \tan \tau + \frac{\rho V_1^2 C_f \lambda b^2}{2 \cos \beta \cos \tau}$$

Fonte: Savitsky (1964, p.83).

Onde,

b - boca da placa,

Δ – deslocamento;

τ – ângulo de trim;

ρ – densidade;

V_1 – velocidade no fundo superfície;

λ – razão comprimento-boca molhada;

β – ângulo de *deadrise*;

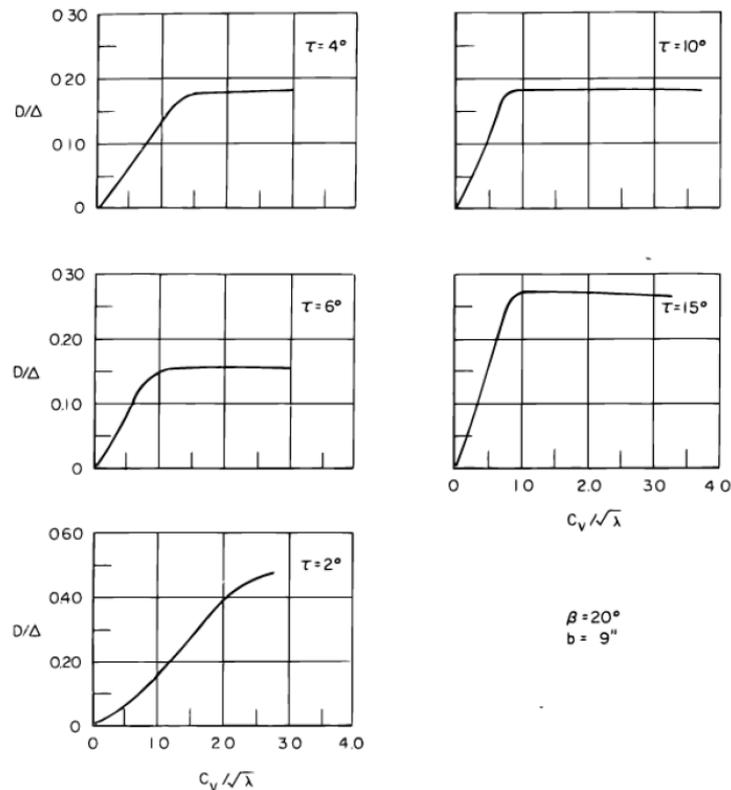
C_f – coeficiente de Fricção Turbulento de Schoenherr.

Ao se tratar de placas planas com ângulo de *deadrise*, os efeitos são análogos aos percebidos em placas sem o ângulo de *deadrise*, alterando-se apenas o coeficiente de sustentação.

2.3.3 Razão arrasto e sustentação de placas planas (D/ Δ)

Segundo Savitsky (1964), a maior vantagem em analisar a razão entre arrasto e sustentação é verificar a variação dessa razão em relação a velocidade, a área molhada e o ângulo de trim. Para fazer essa análise, Savitsky plotou uma série de gráficos com diferentes ângulos de trim, a partir de um modelo de placa plana de 9 polegadas de boca e 20° graus de *deadrise*, série esta que pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Gráficos da variação da razão entre arrasto e sustentação pela velocidade



Fonte: Savitsky (1964, p. 86)

Savitsky (1964) utilizou no eixo das abscissas uma variação do coeficiente de velocidade, que pode ser lido como o Número de Froude. Dessa forma, é possível analisar que quando estão na mesma faixa de valores de λ e C_v , as curvas dos gráficos de D/Δ se assemelham em diferentes valores de trim. Observa-se também que quanto maior o valor de T , maior é a tendência da curva se manter constante e há um aumento na razão D/Δ para todos os valores de trim, o que demonstra claramente que o trim afeta diretamente o arrasto. Além disso, para $T > 2$ e $C_v/\lambda^{1/2} > 1$, a razão arrasto e sustentação pode ser considerada constante para qualquer valor de velocidade.

Ainda de acordo com Savitsky (1964), essas variações de D/Δ devem-se também pelas variações do fluido na superfície da placa. Com valores de $C_v > 2$, há uma separação do fluido das quinas e da popa transom. Para $C_v < 1$ e a um determinado ângulo de trim, o grau de separação da popa transom tornou-se uma função da razão entre comprimento e boca molhada, de forma que quanto menor essa razão, maior o grau de separação. Assim, ao aumentar-se o grau de separação na transom, maior também a força de arrasto e a razão D/Δ .

Assim, para Savitsky (1964), o regime de planeio se inicia com essa separação entre fluido e popa transom e quinas, de forma que, o planeio de uma placa plana ocorre quando a razão entre arrasto e sustentação a determinado trim é constante. O autor formula o coeficiente de sustentação, sendo que o método utilizado foi calculado em um artigo anterior do autor, publicado em 1954. O resultado dessa análise forneceu a equação que pode ser observada na Figura 5.

Figura 5 – Coeficiente de sustentação por Savitsky

$$C_L = \tau^{1.1} \left[0.0120\lambda^{1/2} + \frac{0.0055\lambda^{5/2}}{C_v^2} \right]$$

Fonte: Savitsky (1964, p.79).

Sendo T dado em graus e essa equação é aplicável para $0,60 \leq C_v \leq 13,00$, $2^\circ \leq T \leq 15^\circ$ e $\lambda \leq 4$. Savitsky (1964) deduz também uma fórmula para o coeficiente de sustentação para superfícies com ângulo de deadrise, apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Coeficiente de sustentação para superfícies com ângulo de deadrise

$$C_{L\beta} = C_{L_0} - 0.0065\beta C_{L_0}^{0.60}$$

Fonte: Savitsky (1964, p.82)

Sendo que,

$C_{L\beta}$ – coeficiente de sustentação para superfícies com ângulo de deadrise;

β – ângulo de deadrise;

C_{L_0} – coeficiente de sustentação para placa plana operando para mesmos valores de T, λ e C_v .

Ainda no que tange a elevação, o trim, a velocidade e o coeficiente de forma da embarcação, é importante destacar que à medida que a velocidade da embarcação aumenta, o casco tende a planar na superfície da água, reduzindo assim a área molhada e aumentando a elevação. Ao ajustar o ângulo do trim, de forma a aumentá-

lo, faz com que a proa se eleve e isso pode reduzir o arrasto e aumentar a velocidade, enquanto que ao baixar a proa pode influenciar na estabilidade da embarcação.

4. CASCOS PLANANTES COM DEGRAUS

De Marco et al (2017) define os cascos planantes com degraus como cascos que possuem uma descontinuidade transversal acentuada localizada no fundo do casco, geralmente em forma de V, com o vértice em direção à popa da embarcação e com grandes aberturas nos lados que servem para a entrada de ar e, de acordo com Sajedi e Ghadimi (2020), soluções desejáveis para estabilizar uma embarcação são aquelas que não aumentam o arrasto. Assim, ao criar-se degraus, diminui-se a área molhada da superfície, o que leva a uma redução da resistência ao avanço.

Ainda de acordo com De Marco et al. (2017), os cascos com degraus são caracterizados por uma razão D/Δ baixa em altas velocidades e por uma redução da área molhada devido à separação do fluxo de água que ocorre no local do degrau, que volta a se encontrar na popa.

Esses cascos têm pouca variação no ângulo de trim e aumentam o controle do comportamento longitudinal da embarcação. De Marco et al. (2017) até exemplifica que para um casco com apenas um degrau, cria-se uma elevação extra na popa devido a linha de estagnação e que essa força de elevação mantém o ângulo de trim quase que constante com o número de Froude, a uma alta velocidade.

4.1 COMO FUNCIONAM OS CASCOS PLANANTES COM DEGRAUS

O funcionamento dos cascos planantes com degraus pode ser explicado pelo conceito da separação da camada limite. Segundo Freire (1990), quando um fluido se movimenta e escoar sobre uma superfície sólida, o fluido que está imediatamente em contato com a parede da superfície se adere a ela.

De acordo com Çengel (2007), esse fluido em movimento para totalmente na superfície e assume velocidade zero (nula) em relação à superfície, de forma que o fluido em contato direto com essa superfície gruda na superfície devido aos efeitos viscosos e não há escorregamento, criando uma camada que desacelera a camada de fluido adjacente e é denominada camada limite. Já o fenômeno de estagnação do fluido é chamado de condição de não-escorregamento.

A camada de fluido adjacente a uma superfície tem a mesma velocidade que a superfície na qual está em contato, porém, uma das consequências da condição de

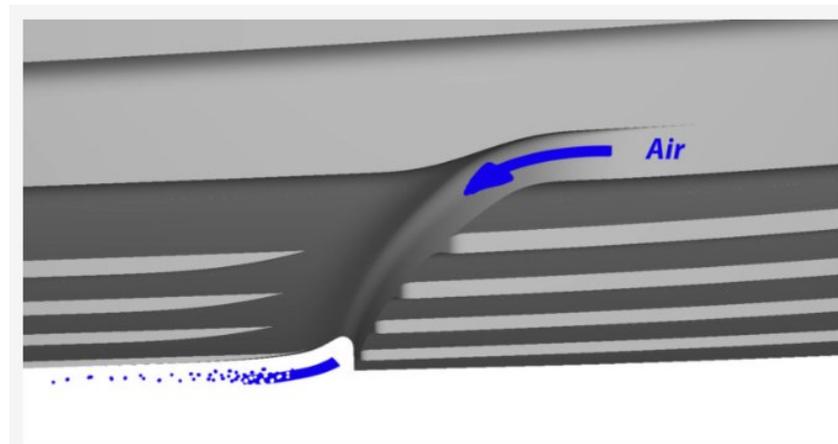
não-escorregamento é que todos os perfis de velocidade devem ser nulos em relação à superfície e, além disso, outra consequência do fenômeno de não-escorregamento é o arrasto na superfície. (ÇENGEL, 2007).

Ao ser forçado a mover-se sobre uma superfície curva com uma velocidade suficientemente alta, a camada limite não consegue mais permanecer em contato com a superfície e, em determinado momento, ela separa-se da superfície, fenômeno esse chamado de separação da camada limite, afirma Çengel (2007).

Enquanto uma embarcação navega, forma-se uma camada limite de água na superfície do casco, que tende a ser maior e mais espessa em cascos tradicionais. Nos cascos com degraus, por existir uma descontinuidade, a camada limite se rompe ao encontrar o degrau e cria-se ali então uma área de separação.

Essa separação do fluxo de água no degrau cria um vácuo que aspira o ar, fazendo com que o ar aspirado para dentro do degrau misture-se com a água, criando uma mistura de água ventilada pelo ar que continua a fluir para trás do degrau, criando uma elevação e diminuição do contato entre casco e a linha d'água. A Figura 7 apresenta a entrada de ar pelo degrau.

Figura 7 – Entrada de ar pelo degrau



Fonte: Ferrari (2022).

Enquanto que a baixas velocidades todo o fundo do casco está na água, a velocidades mais elevadas a aderência da água ao casco é quebrada pelo degrau e a água arejada à ré do degrau reduz a resistência do casco.

De acordo com Russel (2016), a elevação hidrodinâmica gerada pelos degraus é influenciada pela superfície e o ângulo de trim e a cada degrau presente

numa embarcação, cria-se duas superfícies de planeio que ajudam a manter o ângulo de trim constante para se obter uma elevação mais eficiente. Naturalmente, nos degraus existe uma menor área em contato com a água, o que gera menos resistência e isso traduz-se em mais velocidade.

Fazendo um paralelo também com a Teoria da Placa Plana de Savitsky (1964), é possível verificar que a elevação da uma embarcação se dá quando a razão entre o arrasto e a sustentação a determinado trim é constante e dessa forma, com a presença dos degraus, é possível afirmar que a embarcação terá uma inclinação menor e mais eficiente, pois as superfícies de planeio criadas pelos degraus auxiliam a manter o ângulo de trim constante.

Outra conclusão é que segundo Savitsky (1964), a força de sustentação é função da velocidade, assim, o menor arrasto conseguido com os degraus, além de reduzir a resistência friccional e viscosa, aumenta a velocidade e por consequência a força de sustentação. A Figura 8 apresenta uma embarcação com dois degraus.

Figura 8 – Casco com dois degraus



Fonte: Ferrari (2022).

4.2 PERFORMANCE

Para Russell (2016), a performance dos degraus pode ser determinada baseada na força de elevação em cada degrau, no arrasto em cada degrau, no arrasto de pulverização em cada degrau, no comprimento do vazio não molhado a ré do

degrau, na largura molhada no degrau, no comprimento molhado, no centro de pressão da força de elevação do degrau e no ângulo de trim do casco.

Nesta seção, a performance dos cascos com degraus será discutida em relação à estabilidade e rendimento, levando-se em consideração o número ideal de degraus, a localização ideal dos degraus e sua inclinação.

4.2.1 NÚMERO IDEAL DE DEGRAUS

O número ideal de degraus numa embarcação pode variar de acordo com o comprimento da embarcação, a utilização pretendida e a velocidade, bem como sua manobrabilidade e estabilidade.

De acordo com Stephens (2022) em sua análise numérica referente à cascos com degraus, é evidente que o número de degraus tem impacto nos níveis de ventilação numérica, uma vez que o fluxo de fluido contém maiores quantidades de ventilação física, de forma que, quanto mais degraus, mais ventilação no casco.

Porém, não há ainda dados relevantes e substanciais referentes a quantidade ideal de degraus que uma embarcação deve possuir para atingir determinada eficiência. O que se pode afirmar é que a quantidade mais comum e presente na bibliografia atual varia entre um e dois degraus, sendo que grande parte dos estudos acerca do tema utilizam essas quantidades de degraus em embarcações de escala reduzida, construídas para testes de performance.

Dashtimanesh et. al (2020), por exemplo, versa sobre uma simulação numérica a respeito dos “Efeitos da configuração dos degraus no desempenho hidrodinâmico de uma e placas planas com um ou dois degraus”, que discute diferentes localizações e alturas dos degraus. Sajedi e Ghadimi (2020) também discutem sobre os efeitos de dois degraus na estabilidade e performance de um monocasco em seu estudo “Investigação experimental do efeito de dois degraus no desempenho e na estabilidade longitudinal estabilidade longitudinal de uma embarcação monocasco de alta velocidade”.

De Marco et. al (2017) em sua “Análise hidrodinâmica experimental e numérica de um casco planante com degrau” utiliza um modelo com apenas um

degrau, assim como Cucinotta et. al (2021) em seu artigo “O efeito das quilhas longitudinais num casco planante com degrau de cavidade de ar”.

4.2.2 LOCALIZAÇÃO DOS DEGRAUS

A localização dos degraus é a variável mais estudada e a que se mostra ser a variável determinante na eficiência dos degraus, como exemplifica Sajedi e Ghadimi (2020), ao afirmar que ao aumentar-se a distância longitudinal do degrau em relação à popa transom, a resistência aumenta e o trim diminui.

Em seu estudo, Sajedi e Ghadimi (2020) testaram vários modelos em escala reduzida de cascos com um degrau e nos casos em que os cascos que tinham a menor distância do degrau em relação a popa transom tornaram-se instáveis a aproximadamente 19 nós. Essa instabilidade é justificada pelo aumento do trim nesses casos e à falta de uma área de superfície molhada suficiente.

Sajedi e Ghadimi (2020) concluem ao final do seu estudo que os ângulos de trim aumentam conforme aumenta-se a distância entre os degraus e a popa transom, além de que a região mais estável da embarcação é aquela que não sofre o efeito de *porpoising* (fenômeno que causa a elevação e o declive da proa da embarcação de forma contínua e repetitiva) e, ao validar seu estudo com métodos numéricos, os autores afirmam que a distância ótima dos degraus em relação à popa transom deve ser de 19 a 50% do comprimento da embarcação.

Dashtimanesh et. al (2020) em seu estudo afirma que para cascos com um degrau, o menor arrasto foi observado com o degrau posicionado a 80% do comprimento total da embarcação em relação à popa. No caso de dois degraus, quando o primeiro degrau avança, a relação D/L diminui, mas para o segundo degrau, essa relação é menor em 45% do comprimento total, sendo que os autores ainda afirmam que o posicionamento do segundo degrau tem um efeito importante no comportamento do casco.

Assim como Sajedi e Ghadimi (2020) afirmam, Najafi et. al (2019) também conclui em seu estudo que conforme a distância longitudinal entre um degrau e a popa aumenta, aumenta-se também a resistência da embarcação. Além disso, ao contrário do que se esperava, afirmam os autores, a proporcionalidade da distância longitudinal

e a altura do degrau teve um impacto mais significativo na eficiência hidrodinâmica da embarcação do que a elevação da popa e do ângulo de trim.

4.2.3 ÂNGULO DE DEADRISE, ÂNGULO E ALTURA IDEAL DO DEGRAU

Outra variável importante na performance dos cascos com degraus é o ângulo de deadrise, pois, como afirmou Savitsky (1964), ao aumentar-se o ângulo de deadrise, diminui-se a sustentação das placas em regime de planeio, o mesmo que acontece com embarcações planantes.

De acordo com Najafi et. al (2019), a resistência de uma embarcação aumenta conforme o ângulo de deadrise também aumenta. A razão disso pode estar relacionada com o fato de o casco se afundar mais com o aumento do ângulo de inclinação, porém, no geral, um ângulo de deadrise menor, pode resultar numa maior elevação e numa área molhada reduzida, e isso causará uma diminuição no arrasto da embarcação.

Por exemplo, em seus estudos, Najafi et. al (2019) percebeu que em velocidades acima de 8 m/s, obteve-se mais arrasto no ângulo de $\beta = 20^\circ$ em comparação com $\beta = 30^\circ$, o que se deve devido à posição e altura inadequadas do degrau utilizado.

Assim como o ângulo de deadrise, a altura do degrau tem um papel fundamental no desempenho da embarcação. Ainda de acordo com Najafi et. al (2019), com um número de Froude $Fn < 3$ (antes de planar), a resistência de uma embarcação aumenta com o incremento de um degrau, especialmente se o degrau for muito alto, como por exemplo, 30 mm.

Porém, após a embarcação planar (com $Fn > 3$), a embarcação com um degrau apresenta uma diminuição na resistência, e nesse caso, pode-se afirmar que a resistência diminuiu com o aumento da altura do degrau. (NAJAFI ET. AL, 2019).

Em uma outra análise, para Russell (2016), a altura do degrau deve ser considerada de forma que não gere ângulos de trim muito baixos, pois uma altura muito alta para o degrau pode gerar um ângulo demasiadamente elevado, causando assim um arrasto adicional. A orientação do autor é projetar um ângulo de degrau

inferior à metade do ângulo ideal da embarcação, como por exemplo, se o ângulo de trim ideal é de 4° , o ângulo do degrau deve ser de no máximo 2° .

Já para Dashtimanesh et. al (2020), a altura ideal do degrau deve ser de 2% do comprimento total da embarcação em embarcação com um único degrau, pois é a altura que gera a menor relação D/L. Para embarcações com dois degraus, os autores afirmam que o arrasto diminuiu à medida que a altura do degrau aumenta de 5% para 10% do comprimento total da embarcação e que em alturas maiores que 10%, a relação D/L aumenta também, uma vez que o arrasto de pressão é dominante nesse caso.

Para Stephens (2022), a altura ideal do degrau é de 1,65% a 1,90% do comprimento total da embarcação e o comprimento ideal do degrau é de 32,5% a 35,5% do comprimento total da embarcação, considerando uma embarcação navegando com F_n num intervalo de 1,14 a 4. Segundo o autor, a variável que mais impacta na resistência é a altura do degrau, pois é o parâmetro que controla a quantidade de ar ventilado que entra em contato com a superfície do casco, e por conseguinte, controla também a área molhada da embarcação.

3.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

De acordo com Jennings (2022), os degraus podem reduzir a elevação da proa quando se acelera para atingir o regime de planeio da embarcação. Um único degrau proporciona duas superfícies de planeio (dois pontos de pressão) e nos cascos com mais de dois degraus, o autor afirma que a elevação deva ser ainda mais eficiente. O autor ainda afirma que existe um aumento de velocidade entre 5% e 15% nos cascos com degraus.

Porém, segundo Jennings (2022), os cascos com degraus não produzem benefícios de performance e desempenho a todas as velocidades. De fato, a velocidades mais baixas, os degraus podem ter o efeito contrário e aumentar a resistência ao avanço do casco, causando mais arrasto. Entretanto, encontrar a velocidade ideal pode se tornar difícil e geralmente a faixa de velocidades é pequena, sendo possível observar reais vantagens apenas a aproximadamente 52 nós.

Além disso, as embarcações com degraus são projetos caros e que exigem uma engenharia avançada para que os conceitos sejam concebidos de forma a

melhorar o desempenho da embarcação numa faixa de velocidades que seja vantajosa, pois para cada casco, é preciso projetar o comprimento da superfície de planeio de cada degrau, com sua respectiva profundidade e angulação. (JENNINGS, 2022).

5. CASCOS PLANANTES SEM DEGRAUS

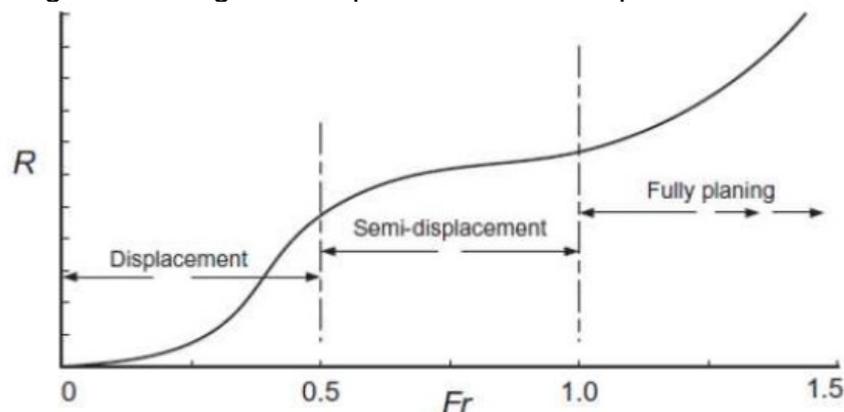
Segundo Iervolino (2015), as embarcações de planeio são embarcações leves, de casco com fundo chato ou em formato de “V” e que devido ao ângulo de ataque em relação à superfície da água, promove a sustentação hidrodinâmica a certa velocidade.

Assim como os cascos planantes com degraus, o funcionamento dos cascos planantes sem degraus pode ser explicado pela Teoria da Placa Plana de Savitsky (1964), ou seja, a embarcação desliza e plana sobre a superfície da água, ao invés de deslocá-la, se comportando assim como uma placa plana.

Para planar, o casco deve obter um ângulo de incidência adequado em relação ao fluxo de água, sendo aparado pela proa para gerar elevação. À medida que a elevação gerada se aproxima do peso do barco, o casco eleva-se da água e começa a planar e assim, ao passo que a velocidade da embarcação aumenta no modo de deslocamento, a proa se eleva e a popa se abaixa.

Além disso, os cascos planantes, sejam eles com ou sem degraus, passam por três diferentes estágios durante desde o início da navegação até o planeio. A partir do repouso até baixas velocidades, as embarcações encontram-se em um regime deslocante. Ao aumentar-se a velocidade, o regime passa a ser semi planante, momento no qual a proa começa a se elevar. Após esse período, a embarcação entra no regime de planeio, com $F_n = 1,0$, atingindo assim maior estabilidade e redução de trim. A Figura 9 apresenta esses três regimes, segundo Molland (2011).

Figura 9 – Regimes de planeio de cascos planantes



Fonte: Molland (2011).

6. COMPARAÇÕES E DISCUSSÕES ENTRE OS TIPOS DE CASCOS PLANANTES

Como visto nas seções anteriores, existem diferenças e semelhanças entre os dois tipos de cascos planantes, sendo o advento do degrau a diferença mais significativa.

Os cascos sem degraus têm uma superfície de fundo contínua e lisa da proa à popa. Mantém uma forma consistente ao longo de todo o comprimento do casco e têm o design tradicional e mais comum utilizado em embarcações. Esses cascos apresentam boa estabilidade devido à sua superfície contínua, tornando-os adequados para várias condições de mar e a ausência de degraus reduz a probabilidade de alterações súbitas no desempenho, resultando em características de manobrabilidade mais previsíveis.

Já os cascos com degraus possuem um design diferenciado, cujo degrau é visto como uma descontinuidade na superfície do casco, localizados perto da popa geralmente. Os degraus são pequenas saliências horizontais no casco que interrompem o fluxo da água ao longo do fundo do casco, sendo que o objetivo desses degraus é introduzir ar no fluxo de água, reduzindo a área da superfície molhada e assim, reduzir o arrasto da embarcação.

Tratando-se de performance em relação ao ângulo de trim, resistência ao avanço e elevação, Sajedi e Ghadimi (2020) afirmam em seu estudo que o ângulo de trim de um casco com dois degraus é menor do que em um casco sem degraus, além de que no regime de pré-planeio a resistência ao avanço do casco com dois degraus é menor do que a do casco sem degraus.

Porém, após o planeio, esse cenário se modifica e o casco com degraus apresenta maior resistência, isso porque a elevação do casco nesse caso foi menor. Por fim, os autores concluem que a presença de degraus na embarcação resulta numa maior estabilidade e evita o efeito de *porpoising*. (SAJEDI E GHADIMI, 2020).

De acordo com Jennings (2022), em uma embarcação sem degraus, altera-se a superfície de planeio com o auxílio do ajuste do trim, que conseqüentemente alavanca a embarcação, fazendo com que a proa se eleve. Nesse processo, apenas um ponto de pressão localizado na popa é utilizado, porém isso gera um gasto de energia considerável para elevar a proa, pois o hélice não estará maximizando sua

energia em propulsionar a embarcação, mas sim em elevar a proa. Esse cenário muda ao adicionar-se um ou dois pontos de pressão localizados mais centralmente, ou seja, com a adição de degraus, pois isso fará com que a proa seja elevada com o mínimo de energia necessário, permitindo que o hélice propulsione a embarcação para frente de forma mais eficaz.

Ao inserir um degrau no casco, cria-se uma superfície de planeio à frente do degrau, da mesma forma que a quebra do fluxo de água cria um ponto de pressão na popa. Com essa segunda área de pressão mais à frente do casco, o casco se eleva e se mantém numa posição mais nivelada, deslizando mais facilmente com o ângulo de trim adequado a todas as velocidades. (JENNINGS, 2022).

Ainda segundo Jennings (2022), dificilmente é justificável a utilização de degraus em embarcações menores que 25 pés. Embarcações entre 26 e 30 pés podem ser beneficiadas, mas a partir de 30 pés os degraus tornam-se realmente eficientes e benéficos para a performance do barco, sendo que o autor recomenda a utilização de dois degraus apenas para barcos de 30 pés ou mais.

Em termos de redução de resistência e arrasto, Stephens (2022) afirma que em todos os casos estudados de cascos com degraus em sua tese de doutorado, foi possível determinar uma configuração de degrau que reduziu a resistência ao avanço se comparado a cascos sem degraus. O desempenho de um casco com apenas um degrau foi melhorado entre 2,12% e 35,86% para um intervalo de velocidades e houve uma redução de 5,61% em cascos com degrau duplo para uma única velocidade.

Para Stephens (2022), a fim de melhorar o desempenho hidrodinâmico de um casco com degraus, o projetista deve focar na redução da área molhada do casco, de forma a reduzir a resistência. Além disso, em todos os casos estudados pelo autor, houve uma variação na performance desempenhada pelos cascos, sendo que várias combinações de cascos com degraus apresentaram desempenhos piores dos que os cascos sem degraus.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do vasto conjunto de dados relativos ao estudo de cascos com degraus revelou que apenas a inserção do degrau numa embarcação não gera uma maior eficiência ou um aumento na velocidade, juntamente com um menor gasto de energia e combustível, ou seja, o desempenho hidrodinâmico de uma embarcação não é simplesmente aprimorado somente com a presença dos degraus.

É importante equilibrar os fatores e as configurações dos degraus, sendo essa talvez a maior dificuldade que o projetista pode encontrar no momento de idealizar uma embarcação com degraus, uma vez que esses cascos possuem também uma geometria mais complexa e um processo de fabricação mais dispendioso e caro do que o processo de construção de uma embarcação sem degraus.

Além disso, a distribuição do peso, o material do casco, o comprimento da embarcação e a sua finalidade e uso pretendido são fatores que também devem ser levados em consideração no momento de justificar ou não a utilização de degraus.

O uso de degraus torna-se mais efetivo e benéfico em altas velocidades e embarcações maiores, a partir de 30 pés. É possível verificar um aumento de 5% a 15% na velocidade de planeio de uma embarcação com a utilização de degraus, para lanchas de corrida offshore.

Ainda a partir das análises feitas nesse estudo, é possível afirmar que qualquer alteração na configuração dos degraus, seja na altura, no ângulo ou na localização do degrau, haverá uma alteração no desempenho da embarcação como um todo, porém, é inegável que a presença de degraus faz com que a embarcação tenha um menor ângulo de trim, de forma a reduzir a resistência ao avanço e o arrasto.

8. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar a eficiência de degraus em cascos planantes por meio de uma pesquisa bibliográfica acerca dos estudos e teses existentes sobre o tema. Para cumprir tal objetivo, alguns questionamentos foram levantados e buscou-se respostas para que um melhor entendimento do funcionamento de cascos com degraus fosse alcançado.

Dessa forma, buscou-se compreender a Teoria da Placa Plana de Savitsky, teoria a qual explica o planeio de embarcações e que deu a base para a argumentação nesse trabalho, uma vez que a teoria versa sobre a elevação de uma embarcação, sua relação com o arrasto, a variação dessa razão em relação a velocidade, a área molhada e o ângulo de trim e em como todos esses fatores se correlacionam.

Além disso, dentro das inúmeras configurações e designs de embarcações com degraus, avaliou-se o número ideal de degraus, a localização ideal, a inclinação, o ângulo de deadrise e a altura do degrau.

Nas análises feitas, percebeu-se que ainda não há um consenso sobre o número ideal de degraus que uma embarcação deve possuir, porém, as quantidades mais comumente encontradas são de um a dois degraus, sendo que para embarcações com menos de 30 pés, recomenda-se o uso de apenas um degrau.

A localização ideal do degrau pode variar de 19% a 80% do comprimento total da embarcação, a depender do estudo conduzido. Porém, geralmente os degraus se encontram mais próximos da popa.

No que diz respeito à inclinação do degrau, seu ângulo e seu ângulo de deadrise, percebeu-se que a resistência de uma embarcação aumenta conforme o ângulo de deadrise também aumenta, e a altura do degrau deve ser considerada de forma que não gere ângulos de trim muito baixos, pois uma altura muito alta para o degrau pode gerar um ângulo muito elevado, causando arrasto adicional.

Ao verificar as vantagens e desvantagens na utilização de degraus nas embarcações, é possível afirmar que para determinadas finalidades, os degraus são benéficas e vantajosas inserções. Os casos são embarcações com mais de 25 pés, embarcações que naveguem a altas velocidades sendo que a velocidade da embarcação pode sofrer um acréscimo de 5% a 15% com a presença de degraus, entretanto, essas embarcações são projetos caros e dispendiosos, pois são projetos

complexos que devem equilibrar todas as variáveis de forma a realmente proporcionar um aumento na eficiência do casco.

Ainda a partir das análises feitas nesse estudo, é possível afirmar que qualquer alteração na configuração dos degraus, seja na altura, no ângulo ou na localização do degrau, haverá uma alteração no desempenho da embarcação como um todo, porém, é inegável que a presença de degraus faz com que a embarcação tenha um menor ângulo de trim, de forma a reduzir a resistência ao avanço e o arrasto.

Para trabalhos futuros, sugere-se a pesquisa por mais tópicos pertinentes ao assunto, além de um possível experimento com um modelo em escala reduzida. Sugere-se também a busca por materiais que versam sobre o número ideal de degraus, a fim de responder a esse questionamento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CONSTRUTORES DE BARCOS - ACOBAR. **Com estimativa de faturamento de R\$ 840 milhões do setor náutico para 2021, São Paulo Boat Show confirma 24a edição em novembro.** Disponível em: <http://www.acobar.org.br/com-estimativa-de-faturamento-de-r-840-milhoes-do-setor-nautico-para-2021-sao-paulo-boat-show-confirma-24a-edicao-em-novembro/>. Acesso em: 25 fev. 2022.

BERTRAM, V. **Practical ship hydrodynamics.** Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

BILANDI *et al.* Calm-water performance of a boat with two swept steps at high-speeds: Laboratory measurements and mathematical modeling. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY 4.0 AND SMART MANUFACTURING Anais [...]*. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920306041>. Acesso em: 25. fev. 2022.

DASHTIMANESH, A.; ESFANDIARI, A.; MANCINI, S. 2017. Performance prediction of two-stepped planing hulls using morphing mesh approach. **Journal of Ship Production and Design**, v. 34, n. 3, p. 1-13, ago. 2018.

DASHTMANESH *et al.* 2019. Effects of step configuration on hydrodynamic performance of one and doubled-stepped planing flat plates: A numerical simulation. **Journal of Engineering for the Maritime Environment**, v. 234. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1475090219851917>. Acesso em: 16. abr. 2023.

DE MARCO *et al.* Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull, 2017. **Ocean Research** v 64, p. 135-154.

DURAN, Pedro. **Com barcos-casa e compartilhados, mercado náutico cresce 20% em plena pandemia.** 2020. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/com-barcos-casa-e-compartilhados-mercado-nautico-cresce-20-em-plena-pandemia/>. Acesso em: 25 fev. 2022.

FAVARO, Cristian. **Boa maré deve elevar faturamento do setor náutico no país a R\$ 840 milhões em 2021, alta de 10% frente a 2020.** 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2021/11/04/boa-mare-deve-elevar-faturamento-do-setor-nautico-no-pais-a-r-840-milhoes-em-2021-alta-de-10percent-frente-a-2020.ghtml>. Acesso em: 25 fev. 2022.

FERRARI, Gregorio. **Stepped hulls: pros and cons according to the hull gurus.** 2022. Disponível em: <https://barcheamotore.com/stepped-hulls/?lang=en>. Acesso em: 05 jul. 2023.

FREIRE, A. P. S., 1990. Teoria da Camada Limite. **Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos**. Disponível em: https://www.nidf.ufrj.br/wp-content/uploads/2019/05/CursoCamadaLimite_APSF2.pdf. Acesso em: 25. abr. 2023.

GARLAND, William R. Stepped planing hull investigation. **Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319056982_Performance_Prediction_of_Two-Stepped_Planing_Hulls_Using_Morphing_Mesh_Approach., p. 1-11. jan. 2011. Acesso em: 23 fev. 2022.

IERVOLINO, L. A. **Estudo de resistência ao avanço de uma embarcação de planeio de 26 pés: abordagem computacional baseada em CFD**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

JENNINGS, B. 2022. The Definitive Guide to Stepped Hulls. **BoatBlurb**. Disponível em: <https://www.boatblurb.com/post/the-definitive-guide-to-stepped-hulls>. Acesso em: 25 mai. 2023.

KUKNER, A.; YASA, A. M. High Speed Planning Hulls Resistance Prediction Methods and Comparasion. *In: Proceedings of the FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NAVAL ARCHITECTURER AND MARITIME VOLUME*. Outubro de 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/235698864_High_Speed_Planning_Hulls_Resistance_Prediction_Methods_and_Comparasion. Acesso em: 22. fev. 2022.

MOLLAND, A.F.; TURNOCK, S.R.; HUDSON, D.A. Ship resistance and propulsion: pratical estimation of ship propulsive power. 2. ed. New York: Cambridge, 2011.

NAJAFI *et al.* The hydrodynamic resistance of stepped planing hulls under different geometrical and physical conditions. 2019. **Scientific Journals Zeszyty Naukowe**. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2020/3580491/>. Acesso em: 04. abr. 2023.

PICANÇO, H. P. **Resistência ao avanço**: uma aplicação de dinâmica dos fluidos computacional. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

RUSSEL, J. 2016. AR© develops advanced Step design analysis technique for Vee hull and Tunnel hull powerboat performance optimization. **AeroMarine Research**. Disponível em: <https://aeromarineresearch.com/steps.html#Complex>. Acesso em: 25. mar. 2023.

SAJEDI, S. M.; GHADIMI, P., 2020. Experimental investigation of the effect of two steps on the performance and longitudinal stability of a mono-hull high-speed craft. **Congent Engineering** v. 7. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2020.1790980>. Acesso em: 04. Mar. 2023.

SAJEDI, S. M.; GHADIMI, P., 2020. Experimental and Numerical Investigation of Stepped Planing Hulls in Finding an Optimized Step Location and Analysis of Its Porpoising Phenomenon. **Mathematical Problems in Engineering**. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2020/3580491/>. Acesso em: 04. abr. 2023.

SAVITSKY, D.; GORE, J. L. Reevaluation of the planing hull form. **Journal of Hydronautics** v 14, n. 1, p. 1-17, 1979.

SAVITSKY, D. **Hydrodynamic Design of Planing Hulls**. *Marine Technology*, 1964.

STEPHENS, Angus Gray. **Improving the hydrodynamic performance of stepped hulls through enhanced analysis techniques**. 2022. 296 f. Tese (Doutorado) - Curso de Department Of Naval Architecture, Ocean And Marine Engineering, University Of Strathclyde, Glasgow, 2022. Disponível em: <https://stax.strath.ac.uk/concern/theses/tt44pn29s>. Acesso em: 17 mai 2023.

TRINDADE, Jorge. Hidrodinâmica e Propulsão. *In: Hidrodinâmica e propulsão*. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/430400549/Hidrodinamica-e-Propulsao>. Acesso em: 26 fev. 2022.

ÇENGEL, Yunus A. **MECÂNICA DOS FLUIDOS**. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2007. Disponível em: https://www.academia.edu/41726589/MEC%C3%82NICA_DOS_FLUIDOS. Acesso em: 06 mar. 2023.