



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIS CARLOS FABRÍCIO FILHO

**ESTUDO DE UMA FORMA DE CASCO COM MENOR RESISTÊNCIA DE
FORMAÇÃO DE ONDAS PARA NÚMERO DE FROUDE ABAIXO DE 0,26**

Recife

2018

LUIS CARLOS FABRÍCIO FILHO

**ESTUDO DE UMA FORMA DE CASCO COM MENOR RESISTÊNCIA DE
FORMAÇÃO DE ONDAS PARA NÚMERO DE FROUDE ABAIXO DE 0,26**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do grau de engenheiro mecânico, no curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Orientador: Prof^o. Dr. Armando Hideki Shinohara

Coorientador: Prof^o. Dr. Tadao Yamano

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- F126e Fabrício Filho, Luis Carlos.
Estudo de uma forma de casco com menor resistência de formação de ondas para número de Froude abaixo de 0,26 / Luis Carlos Fabrício Filho - 2018.
67 folhas, il., tabs., abr., sigl. e símb.
- Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara.
Coorientador: Prof. Dr. Tadao Yamano.
- TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.
Inclui Referências.
1. Engenharia Mecânica. 2. Forma do casco. 3. Menor resistência de formação de ondas. 4. Economia de energia. 5. Número de Froude. I. Shinohara, Armando Hideki (Orientador). II. Yamano, Tadao (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-482

LUIS CARLOS FABRÍCIO FILHO

ESTUDO DE UMA FORMA DE CASCO COM MENOR RESISTÊNCIA DE FORMAÇÃO DE ONDAS PARA NÚMERO DE FROUDE ABAIXO DE 0,26

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do grau de engenheiro mecânico, no curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Armando Hideki Shinohara (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Tadao Yamano (Co-orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Tiago Leite Rolim (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng^o. Michel Pacheco de Andrade (Examinador Externo)
Estaleiro Atlântico Sul

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Deus, por sua divina providência e auxílio em todo tempo, e por me permitir concluir este curso de graduação, pois creio que Ele é quem permite as realizações humanas.

Demonstro adiante meus agradecimentos às pessoas que foram fundamentais para mim no tempo desta graduação e, em particular, para a realização deste trabalho.

A meu pai, minha mãe e minhas irmãs, pelo carinho, apoio e motivação sempre.

Aos meus amigos, pela companhia e cooperação.

Ao professor Armando H. Shinohara, pelas oportunidades a mim proporcionadas, orientação e suporte.

Ao professor Yamano, pela disposição em dedicar seu tempo para compartilhar seu conhecimento, pela orientação e suporte.

Aos demais que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e estiveram ao meu lado durante o tempo deste curso.

Muito obrigado a vocês! どうもありがとうございました!

RESUMO

Um total de dez modelos foram confeccionados para um navio cargueiro de 134,5 m de comprimento e capacidade volumétrica de 354 mil pés cúbicos (10 milhões de litros) que estava sendo produzido em uma empresa de construção naval japonesa. Esses modelos foram testados e tiveram os resultados analisados. Os resultados de dois deles mostram que a resistência de formação de ondas de um é consideravelmente mais baixa que a do outro para números de Froude abaixo de 0,26. Isso corresponde a uma economia de 7% de energia pelo uso do modelo com baixa resistência, com o navio trafegando a 17,7 nós (32,7 km/h). Em um ano, estima-se que a diferença de consumo de óleo combustível devido à economia desses 7% varie, em valor, de 1,5 a 3,1 milhões de reais. No entanto, até então não havia sido esclarecida a razão pela qual ocorra uma diferença dessa magnitude na resistência de ondas desses modelos. Com o objetivo de esclarecer a causa desta diferença, foi realizado um estudo teórico, o qual é relatado nesta monografia. Como resultado, descobriu-se que, a despeito de os modelos terem todo o corpo de proa diferentes entre si, a diferença na forma de apenas uma determinada parte do corpo proa é responsável por praticamente toda essa diferença na resistência de formação de ondas.

Palavras-chave: Forma do casco. Menor resistência de formação de ondas. Economia de energia. Número de Froude.

ABSTRACT

A total of ten models were made for a 134.5-meter-long and 354,000-cubic-foot-volume-capacity (10 million liters) cargo ship that was being produced in a Japanese shipbuilding company. These models were tested and had their results analyzed. The results of two of them show that the wave-making resistance of one is considerably lower than that of the other at Froude numbers below 0.26. This corresponds to an energy saving of 7% by the usage of the low resistance model, with the ship traveling at 17.7 knots (32.7 km/h). In one year, it is estimated that the difference in fuel oil consumption due to these 7% economy varies, in value, from 1.5 to 3.1 millions of Brazilian Reais. However, until then it had not been clarified why a difference of this magnitude occurs in the wave resistance of these models. In order to clarify the cause of this difference, a theoretical study was conducted, which is documented in this monograph. As a result, it has been found that, although the models have the whole fore body different from each other, the difference in the form of only one certain part of the fore body is responsible for practically all that difference in wave-making resistance.

Keywords: Hull form. Lower wave-making resistance. Energy saving. Froude number.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Equilíbrio de forças ($T = R$) num navio a velocidade constante.....	15
Figura 2 –	Modelos usados por W. Froude de 12 pés (3,66 m).....	20
Figura 3 –	Padrão de ondas de Kelvin.....	24
Figura 4 –	Padrão de ondas de um navio.....	25
Figura 5 –	Sistema de coordenadas.....	27
Figura 6 –	Definição de θ	28
Figura 7 –	Relações de densidades de singularidades (fontes) para proa bulbosa.....	30
Figura 8 –	Efeito da imersão na resistência de formação de ondas.....	30
Figura 9 –	O primeiro dos três navios reais, para os quais a forma do casco do Modelo N° 1 foi adotada, em sua prova de mar oficial em setembro de 1969.....	32
Figura 10 –	Comparação das curvas da área de seção.....	34
Figura 11 –	Comparação das curvas de LWL.....	34
Figura 12 –	Comparação da meia-boca imaginária da LWL em PV.....	35
Figura 13 –	Comparação das seções imaginárias em PV.....	35
Figura 14 –	Comparação de perfis de proa.....	35
Figura 15 –	Comparação dos resultados dos testes de resistência.....	36
Figura 16 –	Comparação das curvas de EHP.....	36
Figura 17 –	Sistema de coordenadas xyz.....	38
Figura 18 –	Domínio de $\sigma(x,z)$	39
Figura 19 –	Posição da fonte de linha.....	40
Figura 20 –	Simplificação da forma de uma seção.....	41
Figura 21 –	Cinco pontos na curva da área de seção e na curva da LWL a serem usados para aproximação polinomial.....	43
Figura 22 –	Comparação da aproximação polinomial com curva real....	44
Figura 23 –	Integrando $[s^*(\theta)]^2 + [c^*(\theta)]^2$ em $F_n = 0,25$ (para o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5, para o corpo de proa completo).....	47
Figura 24 –	Linha média do integrando $[s^*(\theta)]^2 + [c^*(\theta)]^2$ em $F_n = 0,25$ nas proximidades de $\pi/2$, Modelo N° 1.....	48

Figura 25 –	Coeficiente de resistência de formação de ondas r_w calculado para o Modelo N° 1.....	48
Figura 26 –	Coeficiente de resistência de formação de ondas r_w calculado para o Modelo N° 5.....	49
Figura 27 –	Comparação dos resultados calculados com os resultados dos testes.....	50
Figura 28 –	Comparação do coeficiente de resistência de formação de ondas calculado r_w devido à "curva de área de seção".....	51
Figura 29 –	Comparação do coeficiente de resistência de formação de ondas calculado r_w devido à "forma de seção".....	52
Figura 30 –	Comparação do coeficiente de resistência de formação de ondas calculado r_w devido à "chapa telha".....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Detalhes principais dos cascos do Modelo N ^o 1 e do Modelo N ^o 5	33
Tabela 2 –	Velocidades do navio em escala real para $F_n = 0,25$	37
Tabela 3 –	Coeficientes a_{2n} e l_{2n} para o Modelo N ^o 1 e o Modelo N ^o 5	43
Tabela 4 –	Dados necessários para o cálculo	45
Tabela 5 –	Comparação das curvas de área de seção e das curvas da LWL na chapa telha	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHP	break horsepower
EHP	effective horsepower
LWL	load waterline
MARIN	Maritime Research Institute Netherlands
NSMB	Netherlands Ship Model Basin
ONU	Organização Das Nações Unidas
PR	perpendicular de ré
PV	perpendicular de vante

LISTA DE SÍMBOLOS

∇	volume deslocado
B	boca
BL	bottom line
c	quantidade com dimensão de força
$C(\theta)$	amplitude de ondas elementares (cossenoides)
C_b	coeficiente de bloco
C_{max}	coeficiente da área da seção mestra
CO_2	dióxido de carbono
C_p	coeficiente prismático
d	calado de projeto
fe	chapa telha (do inglês, <i>fore end</i>)
F_n	número de Froude
g	aceleração da gravidade
k	fator de forma
L	comprimento
ℓ	comprimento de entrada (ver 5.1.2)
l_{cb}	comprimento do centro de carena
ℓ_e	ver definição em 5.1.3
L_{pp}	comprimento entre perpendiculares
N^0	número
pés ³	pés cúbicos
R	resistência
Re	número de Reynolds
r_{fm}	coeficiente de resistência de atrito do modelo
r_r	coeficiente de resistência residual
r_w	coeficiente de resistência de formação de ondas
R_w	resistência de formação de ondas
S	área de superfície molhada
$S(\theta)$	amplitude de ondas elementares (senoidais)
sa	área de seção (do inglês, <i>sectional area</i>)
sf	forma de seção (do inglês, <i>section form</i>)

T	propulsão
V	velocidade do navio (em m/s)
V'	velocidade do navio (em nós)
x,y,z	eixos do sistema de coordenadas cartesiano ortogonal
ε	ver definição em 5.2.2
ε_{ls}	ver definição em 5.1.3
θ	ver definição em 5.1.2
ξ, η, ζ	eixos do sistema de coordenadas adimensional (ver 5.1.2)
ρ	densidade da água
σ	distribuição de singularidades
τ	d/l (ver 5.1.2)
χ	g/V^2 (ver 5.1.2)
χ^0	$l\chi$ (ver 5.1.2)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contexto e Situação.....	15
1.2	Problema.....	16
1.3	Objetivo Geral	17
1.4	Objetivos Específicos.....	17
1.5	Justificativa.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	O Problema da Resistência.....	19
2.1.1	A necessidade do estudo do problema da resistência...	19
2.1.2	Testes de modelos.....	20
2.1.3	Séries sistemáticas de testes.....	21
2.2	Tipos de Resistência.....	22
2.2.1	Corpos submersos.....	23
2.2.2	Navios em superfície.....	24
2.3	Formação de Ondas.....	24
2.3.1	Sistemas de ondas do navio.....	24
2.4	Teoria Linear da Resistência de Formação de Ondas.....	25
2.5	Equações para Calcular Resistência de Formação de Ondas.....	27
2.5.1	Resistência de formação de ondas.....	27
2.5.2	Relação entre forma do casco e densidade de singularidade $\sigma(x,z)$.....	28
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	Teoria a Ser Usada Neste Estudo.....	31
3.2	Simplificação e Expressão Numérica de Formas de Casco.	31
3.3	Método de Cálculo Numérico.....	31
3.4	Programa de Computador.....	31
4	FORMAS DOS CASCOS E RESULTADOS DOS TESTES DOS MODELOS A SEREM ESTUDADOS.....	32
4.1	Formas dos Cascos.....	32
4.2	Resultados dos Testes dos Modelos.....	36

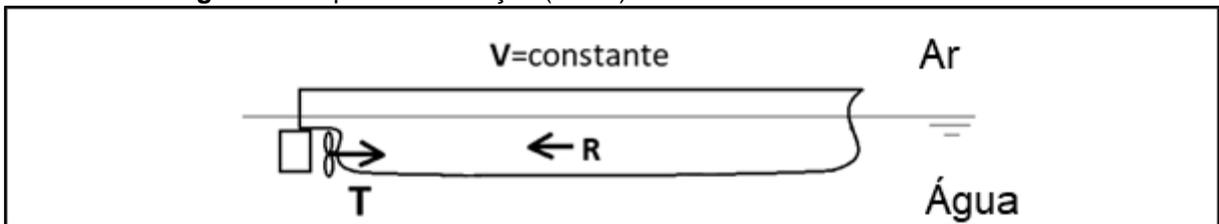
5	CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE FORMAÇÃO DE ONDAS.....	38
5.1	Sistema de Coordenadas e Equações para o Cálculo	38
5.1.1	Sistema de coordenadas.....	38
5.1.2	Equações para o cálculo da resistência de formação de ondas.....	38
5.1.3	Relação entre distribuição de singularidade e forma de casco.....	39
5.2	Expressão Numérica da Forma do Corpo de Proa	41
5.2.1	Simplificação de uma forma de seção do corpo de proa	41
5.2.2	Aproximação polinomial da curva de área de seção e da curva da LWL.....	42
5.3	Cálculo da Resistência de Formação de Ondas.....	44
5.3.1	Dados necessários para o cálculo.....	44
5.3.2	Equações para $S(\theta)$ e $C(\theta)$.....	45
5.3.3	Cálculo numérico de $S(\theta)$, $C(\theta)$ e R_w.....	47
5.4	Resultados dos Cálculos.....	48
6	DISCUSSÃO.....	50
6.1	Validação dos Resultados Teóricos Calculados.....	50
6.2	A Causa da Grande Diferença de Resistência de Formação de Ondas entre o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5.....	51
7	CONCLUSÕES.....	53
	REFERÊNCIAS.....	54
	APÊNDICE A – DIFERENÇA NO VALOR PAGO POR ÓLEO COMBUSTÍVEL DEVIDO A 7% DE DIFERENÇA EM BHP.....	56
	ANEXO A – A STUDY ON A HULL FORM WITH LOWER WAVE-MAKING RESISTANCE AT FROUDE NUMBER LOWER THAN 0.26.....	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Situação

Ao trafegarem sobre a superfície das águas, os navios enfrentam resistência ao avanço (força que se opõe ao movimento de um corpo em meios fluidos) exercida pela água e pelo ar. Como a densidade do ar é cerca de 1/800 da densidade da água, a resistência imposta pela água é bem mais acentuada. Para mover-se à velocidade constante, a propulsão T do navio deve se equiparar à resistência R (ver Figura 1).

Figura 1 – Equilíbrio de forças ($T = R$) num navio a velocidade constante.



Fonte: Autor.

Dessa forma, se a resistência ao avanço é grande, a propulsão também deve ser, o que implica na necessidade de um motor mais potente. Isso se traduz em maiores gastos com combustível e maiores emissões de poluentes atmosféricos. Por esses motivos, é interessante reduzir ao máximo a resistência ao avanço na fase de projeto.

Acerca da poluição atmosférica, Cames *et al* (2015) propõem metas para mitigação da emissão de CO₂ pelos meios de transporte aéreo e marítimo. De acordo com o artigo, estima-se que, sob as condições atuais, em 2050, a parcela de emissão dos transportes marítimos seja de 17%. Sobre o uso de meios de transporte marítimos, de acordo com a ONU:

Com mais de 80 por cento do comércio global em volume e mais de 70 por cento do seu valor transportado a bordo de navios e movimentado por portos marítimos em todo o mundo, a importância do transporte marítimo para o comércio e o desenvolvimento não pode ser subestimada. (ONU, 2017, p. x, tradução nossa)

Considerada imperativa a necessidade de reduzir emissões atmosféricas, bem como gastos com combustível, e levando em conta o extensivo uso de transporte marítimo, é de suma importância entender o que faz um projeto hidrodinâmico de navio

produzir uma menor resistência. Para lidar com esse problema, é fundamental entender como a forma do casco se relaciona com a resistência imposta pela água.

1.2 Problema

Um total de dez navios-modelo foram preparados para um navio cargueiro refrigerado com capacidade de 354 mil pés³. Eles foram testados em Wageningen, Holanda, no então NSMB (hoje, MARIN), 50 anos atrás. Dentre os modelos submetidos a testes, foram testados o Modelo N° 1 (que é o modelo padrão, ou forma parental) e o Modelo N° 5 (uma variação do Modelo N° 1, modificado no corpo de proa apenas).

Os resultados dos testes mostram que o Modelo N° 5 possui uma resistência menor que o Modelo N° 1 (ver Seção 4.2). Em termos de potência efetiva do motor (EHP), para $F_n = 0,25$ (correspondente à velocidade de $9,1 \text{ m/s} = 17,7 \text{ nós} = 32,7 \text{ km/h}$ para o navio em escala real), a diferença entre o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5 é de 7%.

A diferença de 7% em potência do motor principal corresponde a uma diferença no preço do óleo combustível em um ano que varia de 1,5 a 3,1 milhões de reais para o navio com motor principal com potência de trabalho 10.700 BHP. A faixa de preços leva em conta a flutuação do preço do óleo combustível com o tempo. Para um navio maior, por exemplo, o navio porta-contêineres 5.250 TEU com motor principal com potência de trabalho 52.740 BHP, os valores passam a variar de 5,7 a 11,4 milhões de reais por ano. Estes valores mostram que os 7% da diferença de potência do motor principal causam uma grande diferença na economia de navegação do navio. A estimativa desses valores está registrada no Apêndice A.

Embora os resultados dos testes informem claramente que a forma do corpo de proa do Modelo N° 5 é preferível em termos de performance (por produzir uma menor resistência numa gama de número de Froude menor que 0,26), eles por si só não permitem derivar qualquer explicação para o motivo de isso ocorrer.

Tendo em vista a falta de clareza a respeito da relação entre a forma do casco e a resistência dos modelos, o presente trabalho se propõe responder a questão: qual a relação entre forma de casco e resistência? Com essa pergunta, busca-se entender como se dá essa relação, a qual não é elucidada a partir dos resultados dos testes apenas.

A estratégia adotada para lidar com esse problema consiste no uso e aplicação da *teoria linear de resistência de formação de ondas* para os dois modelos, a fim de calcular as resistências de ondas das formas deles. A partir dos resultados que serão obtidos, espera-se encontrar evidências que fundamentem o estabelecimento de uma relação entre forma e resistência.

1.3 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral analisar a influência da forma de casco na resistência de formação de ondas para os dois modelos, baseado na *teoria linear de resistência de formação de ondas*, a fim de descobrir qual parâmetro da forma do casco exerce maior influência na resistência desse tipo de navio.

1.4 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral deste trabalho, os objetivos específicos são os seguintes:

- Determinar parâmetros importantes e representativos das formas de casco (do corpo de proa, em especial).
- Descrever as formas de casco (corpo de proa) em termos desses parâmetros, de forma a obter formas simplificadas que produzam resultados semelhantes em resistência.
- Calcular a resistência de formação de ondas para uma gama números de Froude, para as formas simplificadas.
- Comparar resultados calculados de resistência com os resultados dos testes, analisando o comportamento dos parâmetros escolhidos na produção de resistência.

1.5 Justificativa

A importância desse estudo não se limita à discussão desses dois navios-modelo, mas se dá principalmente pela potencial aplicação desse resultado em projetos de navios semelhantes ao estudado. O entendimento da relação entre forma de casco e

performance é essencial para o que o engenheiro concentre melhor os esforços naquilo que é mais crucial no projeto, ao identificar o que é mais importante e o que é menos importante.

A metodologia aplicada neste trabalho pode ser estendida a casos análogos (o uso da teoria linear, por exemplo, se mostrará bastante útil neste trabalho e poderá servir para outros casos). Ainda, de forma filosoficamente mais abrangente, o espírito deste trabalho, de buscar entender relações de causa e efeito, pode ser generalizado a qualquer outra área do saber humano. Como subproduto, as soluções, quando encontradas, trarão resultados pragmáticos recompensadores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O Problema da Resistência

2.1.1 A necessidade do estudo do problema da resistência

A experiência cotidiana mostra que é necessário exercer uma determinada força sobre um sólido para que ele se mova a uma certa velocidade em um meio fluido: ou seja, ao se mover neste meio, o sólido encontra resistência. O conceito intuitivo de resistência provavelmente passou a existir tão logo navios passaram a ser construídos. Os construtores, desde a Antiguidade, provavelmente percebiam que certas formas eram mais favoráveis à navegação que outras, embora não soubessem explicar o motivo (LAP, 1958, p. 1).

Ao longo de milhares de anos, a construção naval se desenvolvia de forma bastante lenta. Podia-se fazer experimentos com navios em escala real sem muitas preocupações. Com a Revolução Industrial, o cotidiano do Ocidente passou a exigir rapidez em diversas áreas, e o setor naval não ficou de fora. O uso de propulsores e do aço permitiu a construção de novos tipos de navios, com maiores velocidades e tamanhos (e também mais caros), com os quais os projetistas não tinham experiência (LAP, 1958, p. 1).

Após várias tentativas de construção, observou-se que algumas formas não permitiam que a velocidade desejada fosse alcançada para a potência instalada e, em outros casos, a velocidade podia ser alcançada em uma fração da potência instalada. Isso motivou o desenvolvimento de um método que permitisse determinar de antemão a potência instalada que um certo navio deveria ter para alcançar uma certa velocidade (LAP, 1958, p. 2).

No curso do século XIX, então, muitos cientistas notáveis voltaram sua atenção para esse problema. Na busca por soluções, muitos deles se voltaram para a preparação testes de modelos. Acontece que, naquela época, carecia-se de entendimento do fenômeno físico do escoamento num navio em movimento, o que fez com que testes de modelos fossem desacreditados pelos estaleiros da época (LAP, 1958, p. 2).

2.1.2 Testes de modelos

Esse problema veio a ter suas primeiras soluções com o arquiteto naval inglês William Froude, o pioneiro das técnicas experimentais de investigação de formas de casco e propulsores, após conseguir obter explicações fundamentais do fenômeno discutido na seção anterior. Ele conseguiu apoio do Almirantado Britânico (instituição que antigamente foi responsável pela Marinha Real Britânica), o que resultou na construção do primeiro tanque de experimentos de modelos do mundo em Torquay, por volta de 1870 Na Figura 2, vê-se um exemplo de dois modelos usados por W. Froude em seus estudos. O método desenvolvido por Froude é ainda hoje usado nos testes de modelos (LAP, 1958, p. 2).

Figura 2 – Modelos usados por W. Froude de 12 pés (3,66 m).¹



Fonte: Wikipédia.

Um dos experimentos feitos com modelos é chamado teste de resistência. Se feito num tanque de provas, o experimento ocorre da seguinte maneira: um modelo é guiado através da água e ao longo do tanque com a ajuda de um carrinho rebocador ou um fio comprido. A força necessária para mover o modelo a uma certa velocidade pode ser medida. A partir de experimentos como esse, com auxílio do método proposto por Froude, é possível calcular a resistência do navio correspondente ao modelo testado (LAP, 1958, p.2).

¹ disponíveis no *Science Museum*, Londres.

Um fato talvez mais importante sobre testes de modelos é a possibilidade de se fazer testes comparativos com diferentes modelos projetados para um mesmo navio. Isso torna possível aos projetistas, com o uso do método de Froude, testar vários modelos até chegar à forma que melhor satisfaça os critérios de resistência (LAP, 1958, p. 2).

2.1.3 Séries sistemáticas de testes

W. Froude descobriu que a resistência depende da forma do casco, da velocidade e das propriedades do fluido, como expresso em (1) (LAP, 1958, p. 3).

$$R = f(\text{forma, velocidade, propriedades do fluido}) \quad (1)$$

As propriedades do fluido são a massa específica ρ e a viscosidade cinemática ν . A influência da velocidade pode ser facilmente comprovada fazendo-se experimentos a várias velocidades. A variação sistemática da forma do casco é o mais complicado, pela quantidade enorme de parâmetros envolvidos. É praticamente inviável relacionar todos os parâmetros da forma do casco, porque o número deles excessivamente grande (LAP, 1958, p. 3).

Contudo, alguns parâmetros têm uma importância maior do que outros. Os parâmetros mais importantes serão elencados a seguir (LAP, 1958, p. 3):

- (1) As razões L/B e B/d .
- (2) A distribuição do deslocamento ao longo do comprimento, que pode ser representado pelas curvas de áreas de seção.
- (3) A forma das seções, que pode ser representado pela curva da LWL e pelo ângulo de entrada da LWL

Levando em consideração todos esses parâmetros, a equação da resistência em (1) pode ser reescrita como segue:

$$R = c \cdot f \left\{ L/B, B/d, \text{área de seção, forma de seção}, \frac{V}{\sqrt{gL}}, \frac{\rho VL}{\nu} \right\} \quad (2)$$

Onde c é uma quantidade com dimensão de força que assume a forma $c = \frac{1}{2}\rho V^2 S$ (S é a área de superfície molhada). As quantidades adimensionais $\frac{V}{\sqrt{gL}}$ e $\frac{\rho VL}{\nu}$ representam, respectivamente, a dependência da velocidade e das propriedades do fluido (são: o número de Froude $F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ e o número de Reynolds $Re = \frac{\rho VL}{\nu}$).

É convencional usar um coeficiente de resistência adimensional no estudo de testes de modelos. Desconsiderando a viscosidade do fluido, o coeficiente de resistência é dado pela seguinte forma:

$$r = \frac{R}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} = f\{L/B, B/d, \text{área de seção, forma de seção}, F_n\} \quad (3)$$

A equação (3) apresenta a resistência como sendo função de parâmetros da forma do casco e do número de Froude. O número de Froude representa a razão entre as forças inerciais (devidas ao fluido pelo movimento do navio) e a ação do campo gravitacional (que controla a amplitude das ondas). Esse número adimensional é uma ótima ferramenta para se estudar modelos em escala, já que, para o mesmo número de Froude, o padrão de ondas formado pelo navio e pelo modelo são proporcionais e se tornam iguais se o padrão for adimensionalizado.

2.2 Tipos de Resistência

A resistência de um navio a uma certa velocidade (ou seja, para um certo número de Froude) é calculada como sendo igual à força necessária para movê-lo, àquela velocidade, sobre a superfície de águas calmas. A potência necessária para vencer a resistência é denominada potência efetiva (do inglês, *effective horse power*, EHP), e é dada por:

$$EHP = \frac{RV'}{148} \quad (4)$$

Com EHP [hp], R [kgf] e V' [nós]. A resistência pode ser convenientemente separada em componentes. Para efeito de simplificação, costuma-se separar a

resistência total em águas calmas em quatro componentes principais (VAN MANEN, 1988, p.2):

- (1) Resistência de atrito, devido ao movimento do casco através do fluido viscoso.
- (2) Resistência de formação de ondas, devido à energia que deve ser continuamente fornecida pelo navio ao sistema de ondas criado na superfície da água.
- (3) Resistência de forma (ou de formação de vórtices), devido à energia dissipada pelos vórtices gerados pela forma do casco ou por apêndices.
- (4) Resistência do ar, experimentada pela parte do navio acima da água (em contato com o ar)

As componentes (2) e (3) são reunidas sob o nome *resistência residual*.

2.2.1 Corpos submersos

Um corpo em movimento uniforme na direção horizontal submerso em um fluido ideal e infinito é o caso mais simples de resistência. Como o fluido é infinito, não havendo superfície livre, não há resistência de formação de ondas. Por ser um fluido ideal, não há resistência de atrito nem de forma (não há vórtices sendo gerados). A pressão atuante é normal à toda a superfície do corpo (não há forças cisalhantes, devido à ausência de viscosidade). As forças na parte frontal se cancelam com as forças na parte traseira. Neste caso, o corpo não sofre resistência. Tal caso é conhecido como paradoxo de d'Alembert (VAN MANEN, 1988, p.3).

Num fluido real, a presença da camada limite altera a distribuição de pressões na parte traseira, diminuindo as componentes de força traseira que empurram o corpo para frente. Na parte dianteira, a distribuição muda um pouco menos, permanecendo próximo ao caso ideal. Passa a haver, então, uma força resultante atuando no sentido oposto ao movimento, conhecida como *arrasto de forma* ou *arrasto de pressão viscosa*. Além dessa força, o corpo também experimenta resistência de atrito e de forma (ou vórtice). (VAN MANEN, 1988, p.3).

2.2.2 Navios em superfície

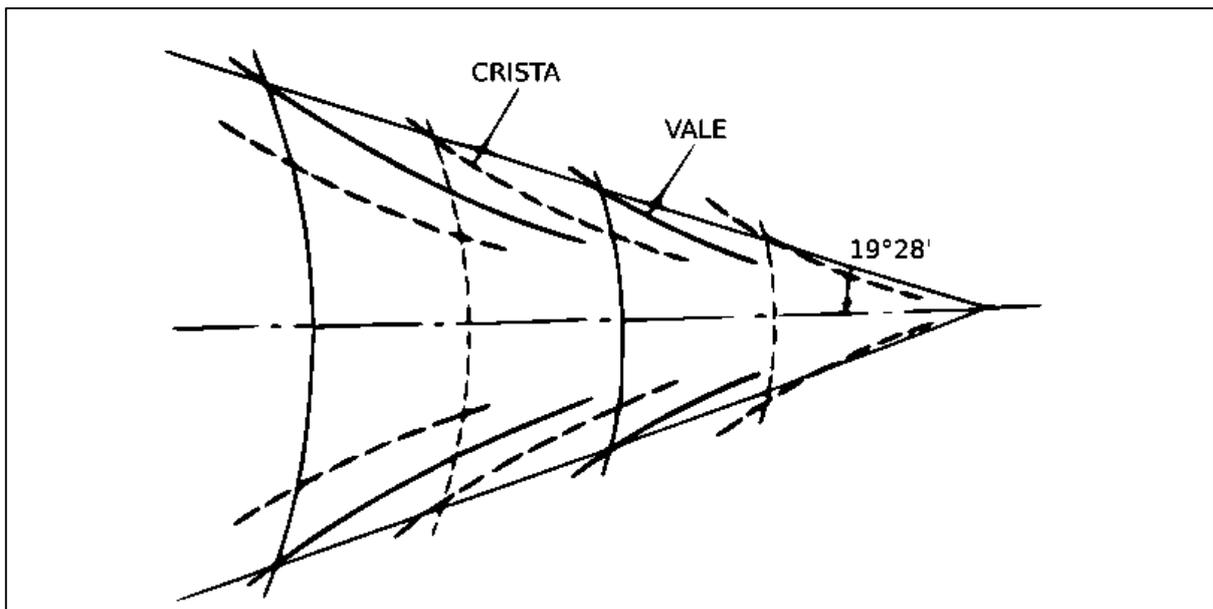
Por estarem na superfície, os navios experimentam, além de todas as forças descritas no parágrafo anterior, uma componente a mais. A perturbação da superfície das águas devido ao movimento do navio, formando ondas, influencia na distribuição de pressões no casco. Na proa, há uma pressão atuante maior e na popa, o aumento da pressão é sempre menor que num corpo submerso. A resistência adicional corresponde à transferência de energia para o sistema de ondas. Por esse motivo, essa componente é chamada resistência de formação de ondas (VAN MANEN, 1988, p.3).

2.3 Formação de Ondas

2.3.1 Sistemas de ondas do navio

São atribuídas a Lord Kelvin as primeiras considerações a respeito do sistema de ondas do navio. Ele observou que para um ponto de pressão movendo-se a velocidade uniforme, em linha reta, na superfície da água, ondas geradas pelo ponto se combinavam para formar um padrão específico. Este padrão consiste num sistema de ondas transversais seguindo atrás do ponto, junto com uma série de ondas divergentes radiadas do ponto. O sistema completo é limitado por duas retas que partem do ponto e fazem um ângulo de $19^{\circ}28'$ de cada lado da linha do movimento, conforme mostrado na Figura 3 (VAN MANEN, 1988, p. 16).

Figura 3 – Padrão de ondas de Kelvin.



Fonte: Adaptado de VAN MANEN, 1988, p. 16.

O padrão de Kelvin ilustra e explica muitas das características do sistema de ondas de um navio (ver Figura 4). (VAN MANEN, 1988, p. 16).

Figura 4 – Padrão de ondas de um navio.



Fonte: VAN MANEN, 1988, p. 16.

2.4 Teoria Linear da Resistência de Formação de Ondas

O projeto da forma do casco passou, depois de Froude, a ser bastante dependente dos testes experimentais. Mesmo não sendo possível dispensar o experimentalismo para usar um método exclusivamente teórico, os tratamentos teóricos podem fornecer informações de grande valia a respeito do fenômeno. A combinação de uma abordagem teórica com investigações puramente empíricas pode guiar o projetista na direção da otimização do seu projeto (LAP, 1958, p.5).

A Teoria Linear de Resistência de Formação de Ondas teve sua primeira formulação por Michell (MICHELL, 1898, p.106-123) e foi desenvolvida por autores como Havelock e Lunde (HAVELOCK, 1932, 1934, 1924; LUNDE, 1951). Ela tem grande utilidade no projeto de navios finos com número de Froude maior, nos quais a

resistência de formação de ondas representa a maior parcela da resistência total (YAMANO, 2018, p.22).

Na vanguarda do projeto da forma de cascos está a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, em inglês, *Computational Fluid Dynamics*). CFD resolve diretamente as equações de movimento de um fluido (equação de Euler ou Navier-Stokes) através de realização numérica. Fatores não-lineares são, inclusive, levados em consideração, o que permite a obtenção de dados mais precisos do que uma abordagem linear, como a da Teoria Linear de Resistência de Formação de Ondas (YAMANO, 2018, p.22).

Apesar da vantagem da precisão, CFD não é uma teoria, mas um método numérico e, portanto, não apresenta, por si só, a relação entre resultados (por exemplo, resistência) e parâmetros de entrada (por exemplo, forma do casco). Assim, CFD pode ser considerado um método similar a testes de modelos, que fornece um resultado preciso, sem, contudo, explicar a relação entre resistência e forma de casco (YAMANO, 2018, p.22).

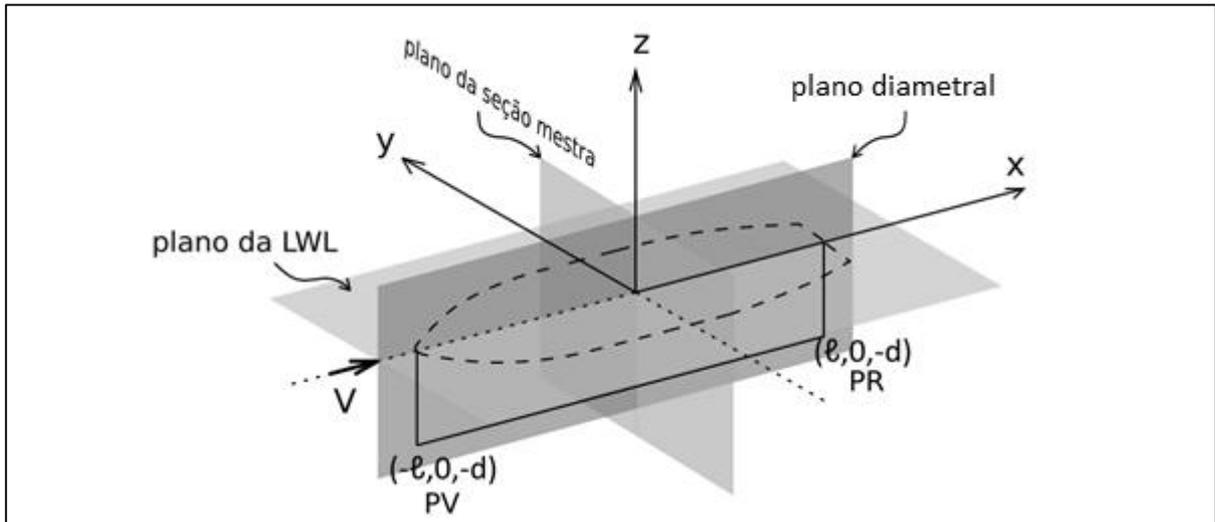
A Teoria Linear, por outro lado, embora não forneça resultados tão precisos quanto CFD, mostra a relação entre a forma de casco e a resistência de formação de ondas, o que é bastante útil para auxiliar engenheiros no projeto (YAMANO, 2018, p.22).

2.5 Equações para Calcular Resistência de Formação de Ondas

2.5.1 Resistência de formação de ondas

Considere-se o sistema de coordenadas da Figura 5.

Figura 5 – Sistema de coordenadas.



Fonte: Autor.

A origem do sistema de coordenadas xyz está na interseção do plano da LWL, do plano diametral do casco e do plano de seção mestra. Os símbolos usados na Figura 6 são os seguintes:

eixo x: na interseção do plano diametral e do plano da LWL, na direção do fluxo de água

eixo y: na interseção do plano de seção mestra e do plano da LWL, e na direção de boreste

eixo z: na interseção do plano diametral e do plano da seção mestra, e na direção ascendente

l (m): comprimento de entrada

b (m) = $B/2$: meia-boca

d (m): calado

V (m/s): velocidade do navio (considerado que o sistema se move junto com o navio, esta é a velocidade do fluxo de água)

A equação da resistência de formação de ondas é dada por (5) (YAMANO, 2018, p.23).

$$R_w = \pi \rho V^2 \int_0^{\pi/2} [\{S(\theta)\}^2 + \{C(\theta)\}^2] \cos^3 \theta d\theta \quad (5)$$

Com:

$$\left. \begin{matrix} S(\theta) \\ C(\theta) \end{matrix} \right\} = \frac{4V\chi^2}{g} \sec^3 \theta \int_{-\ell}^0 \int_{-T}^0 \sigma(x,z) e^{z\chi \sec^2 \theta} \frac{\sin}{\cos} (\chi x \sec \theta) dz dx \quad (6)$$

Nas equações (5) e (6):

R_w [kgf]: resistência de formação de ondas

ρ [kgf · s²/m⁴]: densidade da água

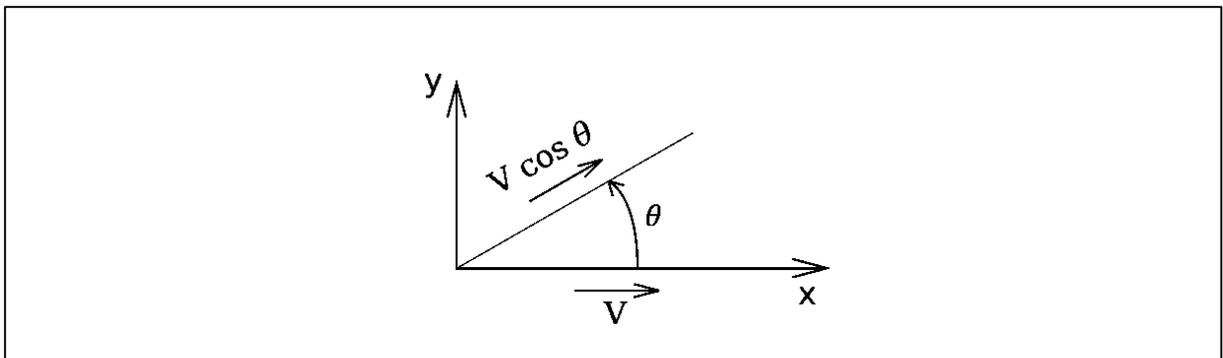
$S(\theta)$ e $C(\theta)$ são funções de amplitude de onda elementar avançando na direção θ (ver definição de θ na Figura 6)

g [m/s²]: aceleração da gravidade

$\chi = g/V^2$

$\sigma(x,z)$: densidade da distribuição de fontes no plano diametral do casco

Figura 6 – Definição de θ .



Fonte: Autor.

2.5.2 Relação entre forma do casco e densidade de singularidade $\sigma(x,z)$

A relação entre forma de casco e densidade de singularidade² $\sigma(x,z)$ em (6) pode ser expressa conforme as três próximas alíneas (YAMANO, 2018, p.25-27):

a) casco principal: densidade de singularidade com distribuição dada por (7)

² Singularidade pode ser do tipo fonte, sumidouro ou doublet (que é um par fonte-sumidouro)

$$\sigma(x, z) = \frac{V}{2\pi} \frac{\partial y(x, z)}{\partial x} \quad (7)$$

Onde:

$y(x, z)$: meia-boca do casco como função de x e z

b) proa bulbosa: para os três seguintes casos:

(i) Roda de proa com boca $2b$ (Figura 7(i)): fonte linear com densidade

$$\sigma(-l, z) = \frac{V}{2\pi} b, \quad -d \leq z \leq 0 \quad (8)$$

(ii) Bulbo com forma similar a um cilindro longitudinal com raio r_s e cabeça arredondada (Figura 7(ii)): fonte pontual com densidade

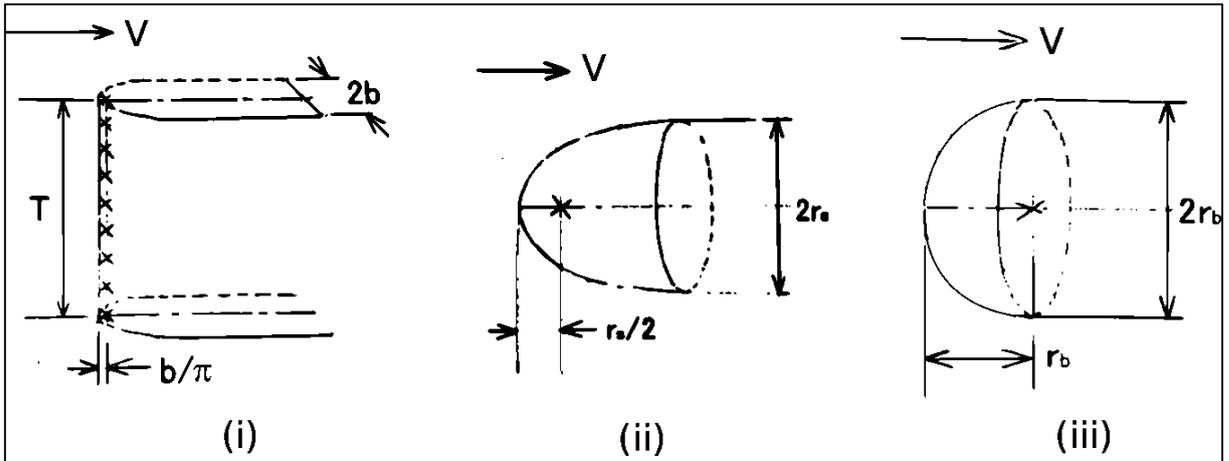
$$\sigma(-1 - x_s, z_s) = \frac{V}{4} r_s^2 \quad (9)$$

(iii) Bulbo com formato de bola de raio r_b (Figura 7(iii)): fonte do tipo doublet com densidade

$$\sigma(-1 - x_b, z_b) = \frac{V}{2} r_b^3 \quad (10)$$

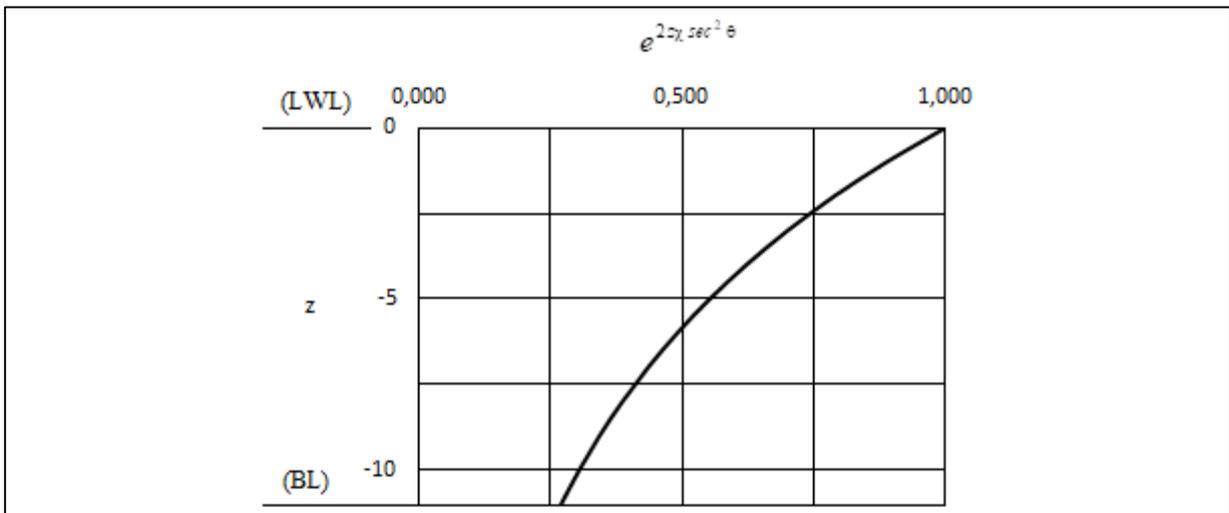
(iv) efeito da imersão na resistência de geração de ondas: em (6), o termo $e^{z\chi \sec^2 \theta}$ mostra o efeito da imersão. Na equação da resistência, (5), este termo se torna $e^{2z\chi \sec^2 \theta}$. Para exemplificar, considere-se um navio com calado $d = 11$ m, $V' = 25$ nós ($V = 12,86$ m/s). Para esses valores, com aceleração da gravidade $g = 9,8$ m/s² e $\theta = 0$, $\chi = g/V^2 = 0,05926$. O gráfico da Figura 8 mostra o efeito à LWL ($z = 0$) é o maior, cai para aproximadamente a metade a $z = \frac{1}{2}(-d)$ e para cerca de 1/3 no fundo ($z = -d$) (YAMANO, 2018, p.27).

Figura 7 – Relações de densidades de singularidades (fontes) para proa bulbosa.



Fonte: Adaptado de YAMANO, 2018, p. 27.

Figura 8 – Efeito da imersão na resistência de formação de ondas.



Fonte: Autor.

3 METODOLOGIA

3.1 Teoria a Ser Usada Neste Estudo

Conforme será explicado no final da seção 4.2, a diferença na resistência residual entre o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5 é considerada a diferença na resistência de formação de ondas entre eles. A estratégia, então, consiste em fazer uso da teoria linear da resistência de formação de ondas (Havelock; 1932) a fim de calcular r_w para ambos os modelos para uma gama de números de Froude abaixo de 0,26.

Um bom ponto do uso da teoria linear reside na possibilidade de entender qual parte da forma do corpo de proa mais produz resistência de formação de ondas. Por outro lado, os resultados teóricos podem não ser tão precisos, o que torna necessária a validação destes resultados, que será feita pela comparação das diferenças dos resultados teóricos com as diferenças dos resultados experimentais dos testes dos modelos de que já se dispõe.

3.2 Simplificação e Expressão Numérica de Formas de Casco

O casco real tem uma forma um tanto complexa para ser representada nas equações do cálculo teórico. Então, utiliza-se de formas simplificadas, nas quais são mantidos três parâmetros importantes: curva de área de seção, curva da LWL e forma da chapa telha. Além disso, para a conveniência do cálculo, esses parâmetros são expressos por aproximação polinomial.

3.3 Método de Cálculo Numérico

No cálculo da resistência de formação de ondas, o método de Simpson é usado para integrar funções que se mostram muito complicadas para serem tratadas analiticamente. Em algumas partes, as funções oscilam com alta frequência, o que exige cuidado especial na integração numérica.

3.4 Programa de Computador

Usa-se um programa de computador preparado no software GNU Octave para calcular os coeficientes de resistência de formação de ondas do Modelo N° 1 e do Modelo N° 5 para $0,21 \leq F_n \leq 0,26$.

4 FORMAS DOS CASCOS E RESULTADOS DOS TESTES DOS MODELOS A SEREM ESTUDADOS

4.1 Formas dos Cascos

Os detalhes principais dos cascos (em escala real) do Modelo N° 1 e do Modelo N° 5 são mostrados na Tabela 1. O navio é do tipo esbelto de alta velocidade com número de Froude projetado de 0,292 e C_p de 0,574. A forma do casco do Modelo N° 1 foi adotada para três navios reais. A foto de um dos navios é mostrada na Figura 9.

Figura 9 – O primeiro dos três navios reais, para os quais a forma do casco do Modelo N° 1 foi adotada, em sua prova de mar oficial em setembro de 1969.



Fonte: YAMANO, 2007.

Tabela 1 – Detalhes principais dos cascos do Modelo N° 1 e do Modelo N° 5³.

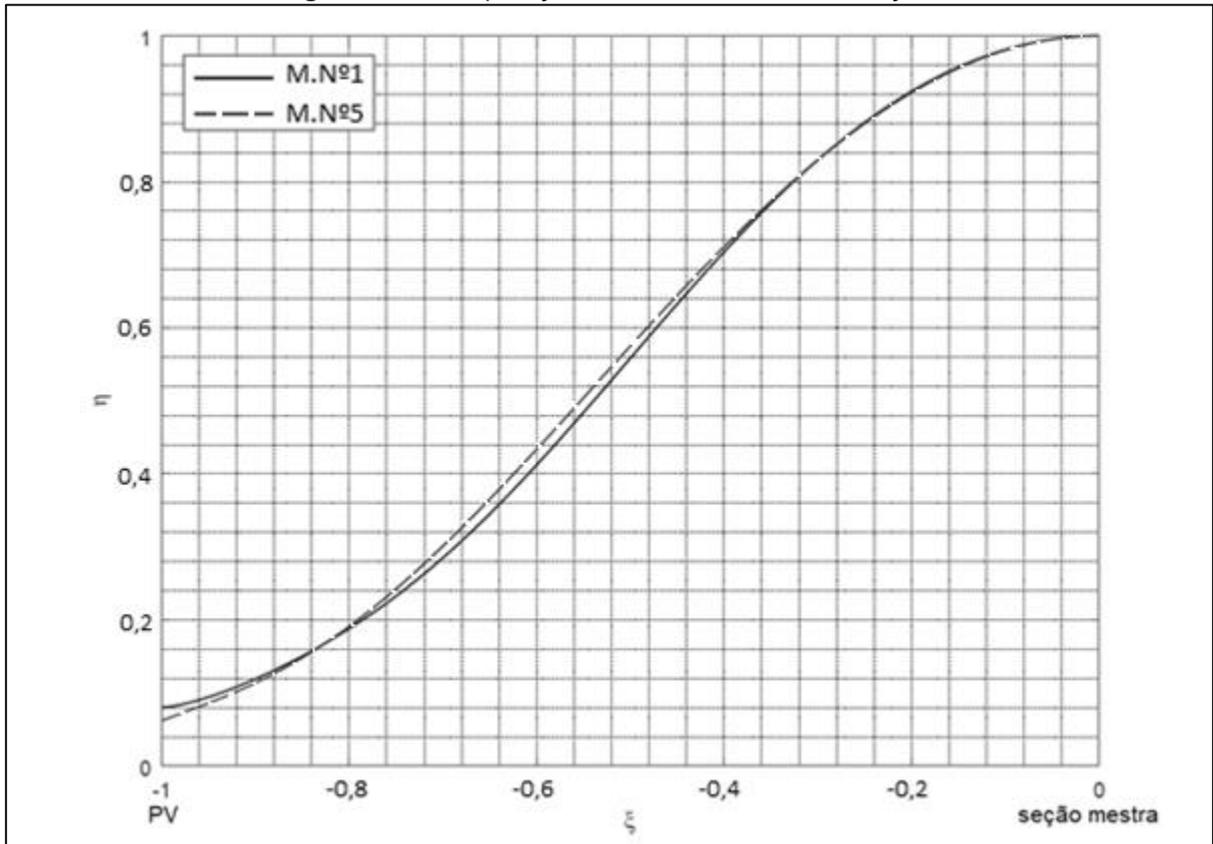
Parâmetro	Modelo N° 1	Modelo N° 5
Tipo do navio	Cargueiro refrigerado de 354,000 pés ³	
L_{pp} (m)		134.5
B (m)		20.40
d (m)		6.370
∇ (m ³)	9649.2	9692.1
S (m ²)	3125.1	3131.0
L/B		6.593
B/d		3.203
C_b	0.5523	0.5547
C_p	0.5740	0.5765
C_{max}		0.9623
l_{cb} (% L_{pp})	1.880	1.749
$S/2\nabla^{2/3}$	3.445	3.444

Fonte: Autor

A mesma forma do corpo de popa é adotada para ambos os modelos. A diferença entre eles reside apenas na forma do corpo de proa. A comparação das curvas de área de seção do corpo de proa entre os dois modelos é mostrada na Figura 10. A das LWL do corpo de proa, na Figura 11. Em relação à forma da chapa telha, a comparação das meias-bocas das LWL imaginárias entre os dois modelos é mostrada na Figura 12; a das seções imaginárias em PV, na Figura 13, e os perfis de proa na Figura 14.

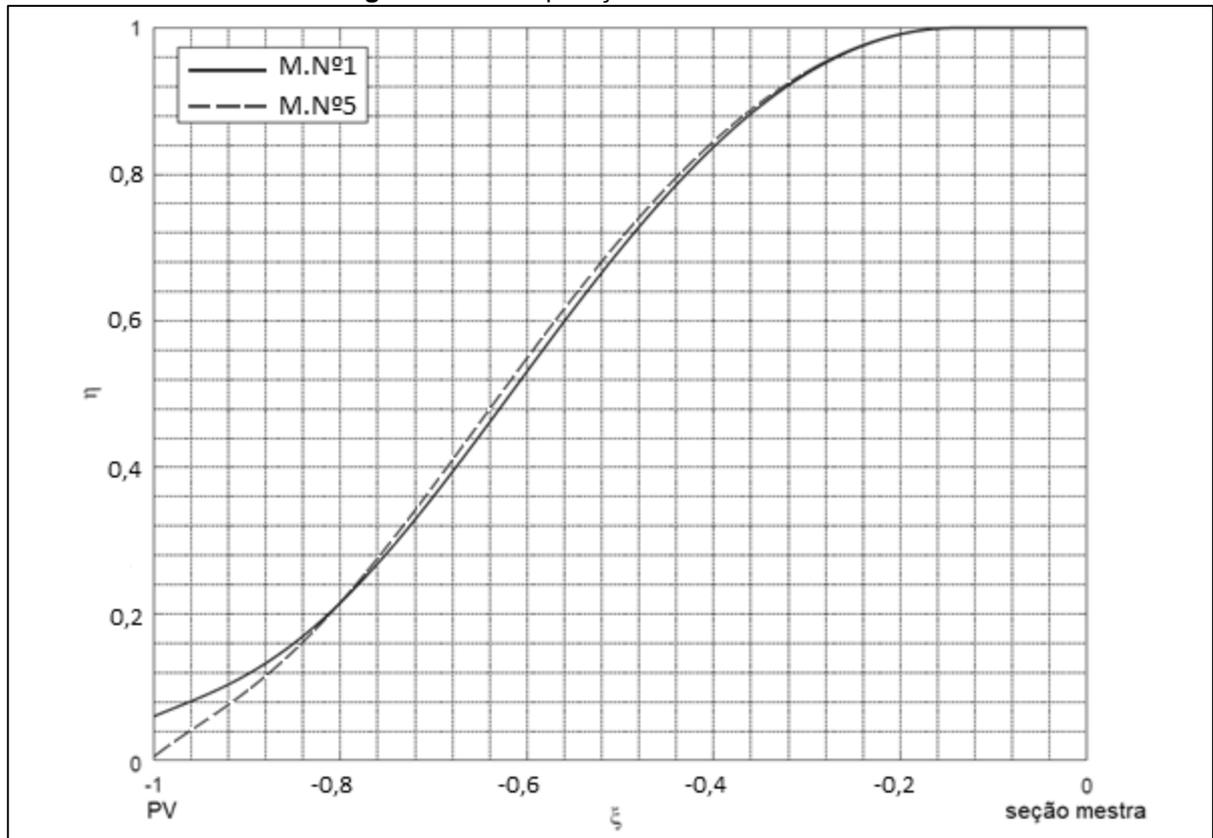
³ escala dos modelos = 1/19: L_{pp} = 7,079 m

Figura 10 – Comparação das curvas da área de seção.



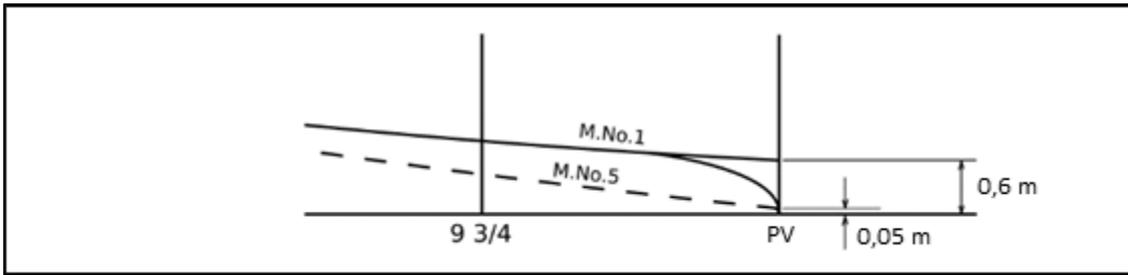
Fonte: Autor.

Figura 11 – Comparação das curvas de LWL



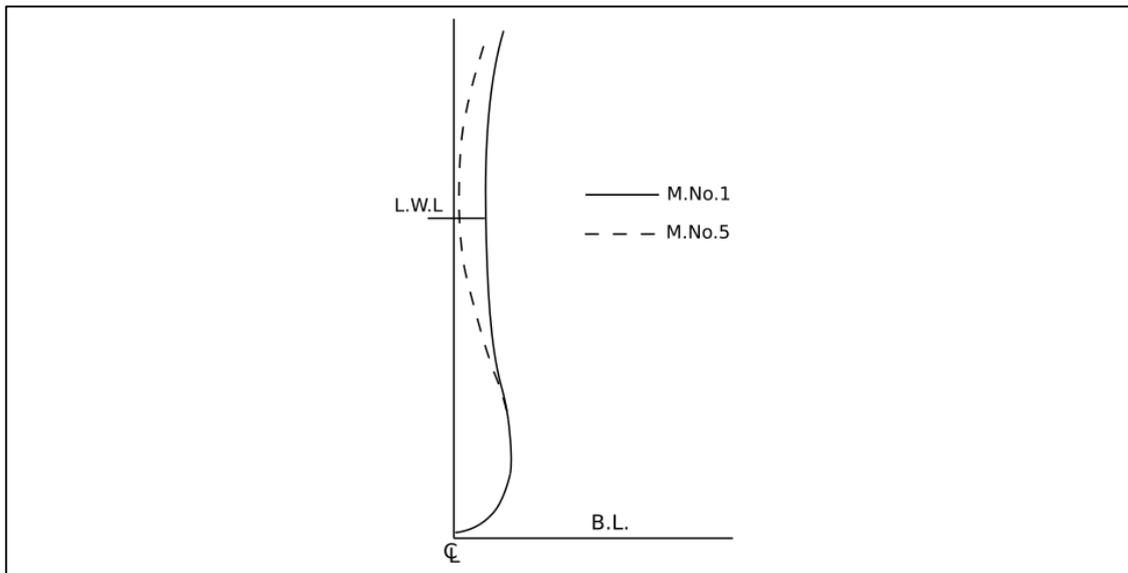
Fonte: Autor.

Figura 12 – Comparação da meia-boca imaginária da LWL em PV.



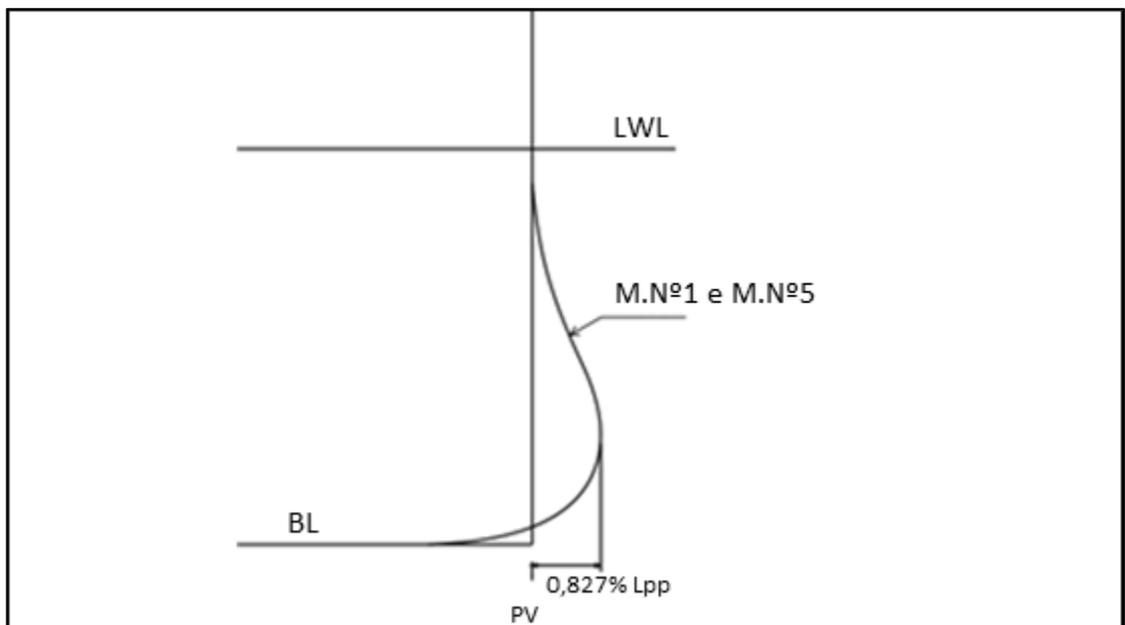
Fonte: Autor.

Figura 13 – Comparação das seções imaginárias em PV.



Fonte: Autor.

Figura 14 – Comparação de perfis de proa.

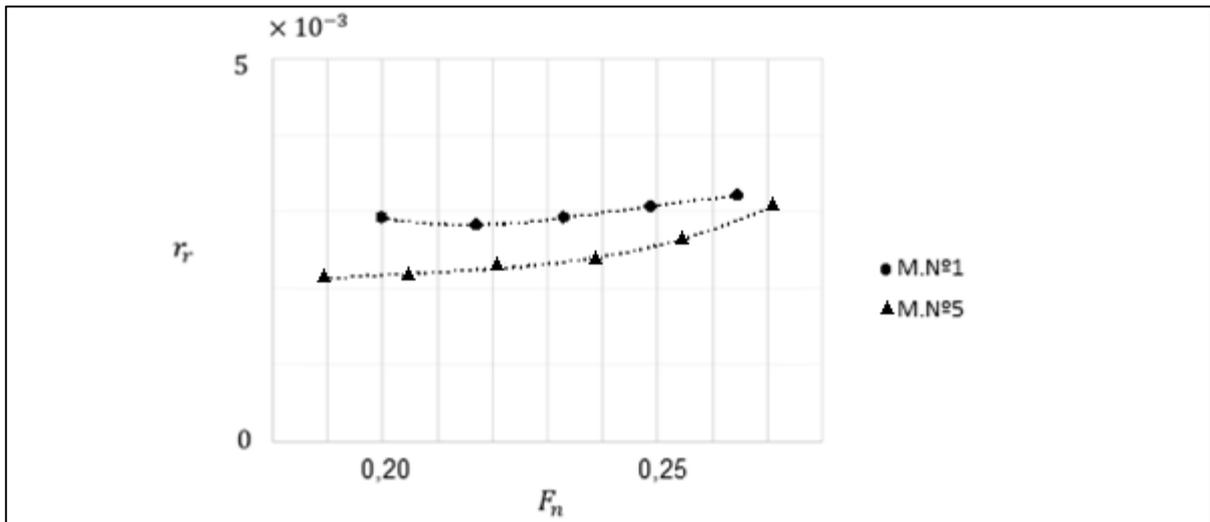


Fonte: Autor.

4.2 Resultados dos Testes dos Modelos

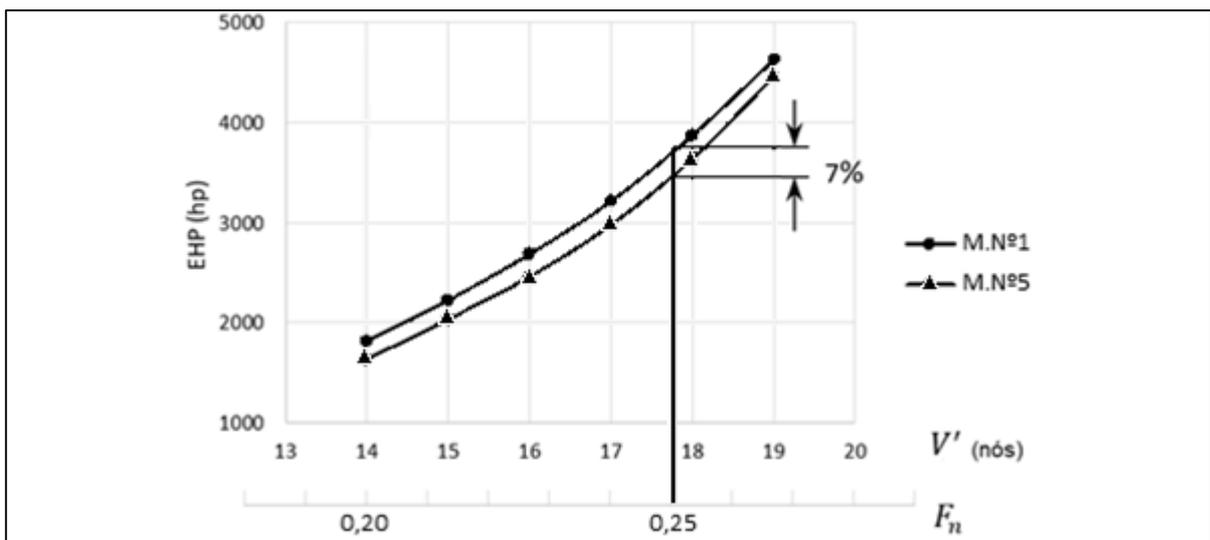
A comparação dos resultados dos testes de resistência do Modelo N° 1 e do Modelo N° 5 realizados no NSMB (MARIN atualmente – Wageningen, Holanda) são mostrados na Figura 15. A comparação das curvas de EHP derivadas dos resultados dos testes é mostrada na Figura 16, para $0,21 \leq F_n \leq 0,26$.

Figura 15 – Comparação dos resultados dos testes de resistência.



Fonte: Autor.

Figura 16 – Comparação das curvas de EHP.



Fonte: Autor.

Os resultados mostram que o Modelo N° 5 apresenta uma resistência residual consideravelmente menor que o Modelo N° 1. Para o navio em escala real, as curvas

de EHP também mostra o Modelo N° 5 como tendo menor EHP, na gama de F_n em questão. Para $F_n = 0,25$ (ver Tabela 2), o EHP do Modelo N° 5 é inferior em 7% em relação ao do Modelo N° 1.

Tabela 2 – Velocidades do navio em escala real para $F_n = 0,25$.

L_{pp} (m)	V_s (m/s)	V_s' (nós)
134,5	9,1	17,7

Fonte: Autor.

O coeficiente de resistência residual r_r pode ser expresso pela equação (1)

$$r_r = r_w + k \cdot r_{fm} \quad (11)$$

Onde:

r_w : coeficiente de resistência de formação de ondas

k : fator de forma

r_{fm} : coeficiente de resistência de atrito do modelo

O fator de forma k é o mesmo entre os dois modelos, porque a forma do corpo de popa é o mesmo. O coeficiente de resistência de atrito r_{fm} também é o mesmo, porque os detalhes principais dos cascos são os mesmos, como mostrado na Tabela 1.

Definindo:

$\Delta r_r = (r_r)_{ModeloN^{\circ}1} - (r_r)_{ModeloN^{\circ}5}$: diferença do coeficiente de resistência residual do Modelo N° 1 e do Modelo N° 5

$\Delta r_w = (r_w)_{ModeloN^{\circ}1} - (r_w)_{ModeloN^{\circ}5}$: diferença do coeficiente de resistência de formação de ondas do Modelo N° 1 e do Modelo N° 5

Tem-se que:

$$\Delta r_r = \Delta r_w \quad (12)$$

Ou seja, a grande diferença em r_r , ou seja, Δr_r , vista na Figura 15 pode ser considerado a diferença no coeficiente de resistência de formação de ondas r_w .

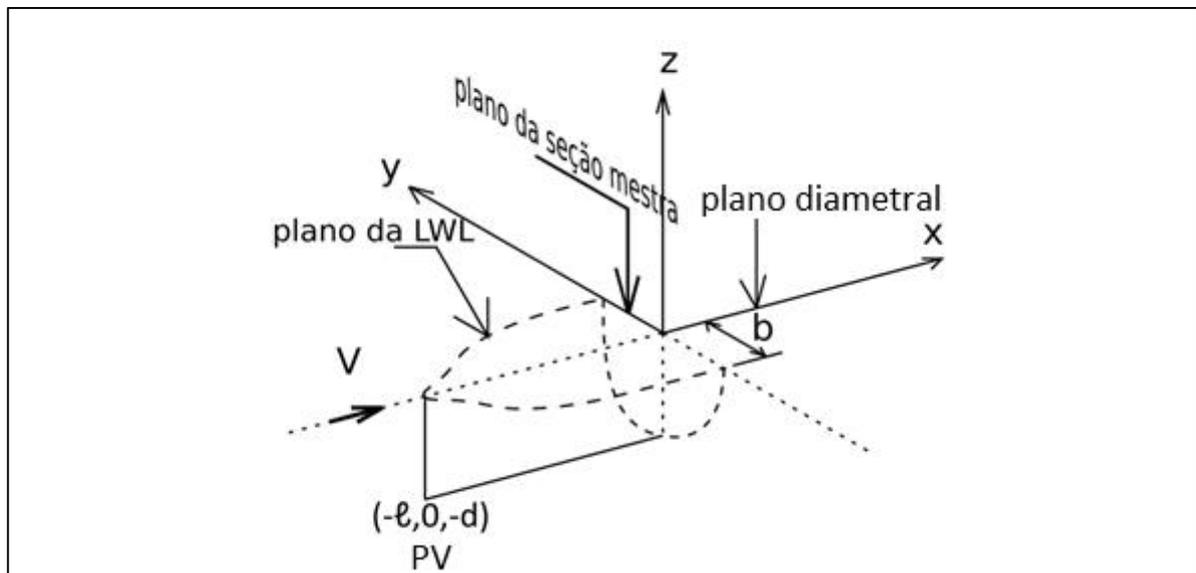
5 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE FORMAÇÃO DE ONDAS

5.1 Sistema de Coordenadas e Equações para o Cálculo

5.1.1 Sistema de coordenadas

O sistema de coordenadas adotado é ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Sistema de coordenadas xyz.



Fonte: Autor.

A origem do sistema de coordenadas adotado é a mesma da Figura 5 (a única diferença entre a Figura 5 e a Figura 17 é que nesta última apenas o corpo de proa é mostrado, porque apenas sobre ele a resistência será calculada).

5.1.2 Equações para o cálculo da resistência de formação de ondas

De acordo com a Teoria Linear, a resistência de formação de ondas devido ao corpo de proa pode ser calculada pelas equações (5) e (6), para os limites de integração

$$\begin{cases} -\ell \leq x \leq 0, & (\text{corpo de proa}) \\ -d \leq z \leq 0, & (\text{de BL à LWL}) \\ 0 \leq \theta \leq \pi/2 \end{cases}$$

Para a conveniência do cálculo, x , y e z são transformados em coordenadas adimensionais ξ , η e ζ pela seguinte transformação:

$$\begin{cases} \xi = \frac{x}{l} \\ \eta = \frac{y}{b} \\ \zeta = \frac{z}{l} \end{cases}$$

Com o sistema de coordenadas $\xi\eta\zeta$, (6) se torna (13):

$$\left. \begin{matrix} S(\theta) \\ C(\theta) \end{matrix} \right\} = \frac{4V\chi_0^2}{g} \sec^3 \theta \int_{-1}^0 \int_{-\tau}^0 \sigma(\xi, \zeta) e^{\zeta\chi_0 \sec^2 \theta} \frac{\sin(\chi_0 \xi \sec \theta)}{\cos(\chi_0 \xi \sec \theta)} d\zeta d\xi \quad (13)$$

Onde:

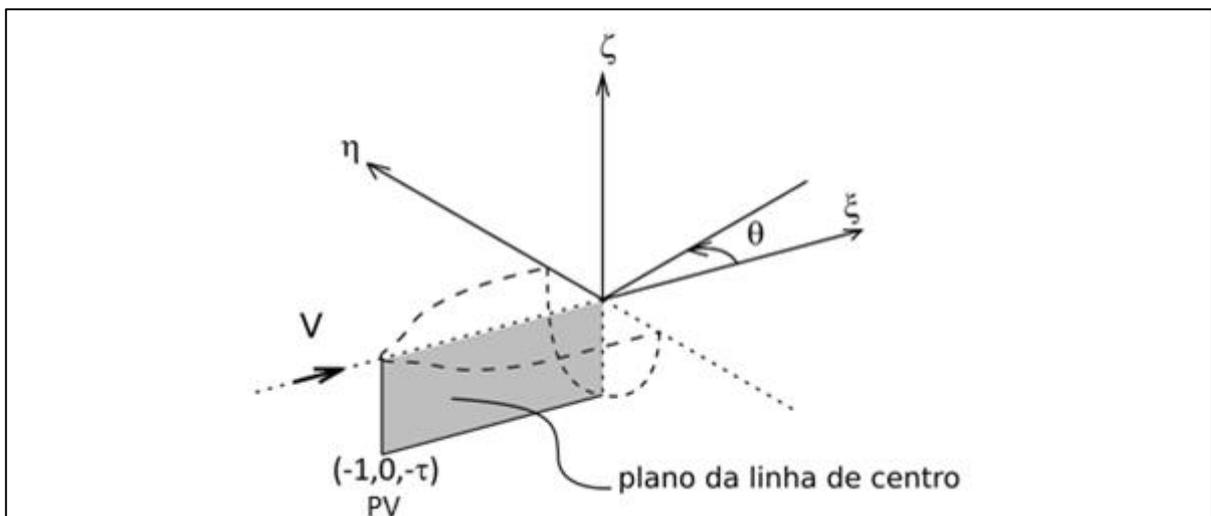
$$\tau = d/l$$

$$\chi_0 = l\chi$$

5.1.3 Relação entre distribuição de singularidade e forma de casco

Em (13), $\sigma(\xi, \zeta)$ corresponde a uma distribuição de singularidades sobre o plano de linha de centro do casco ($-1 \leq \xi \leq 0$, $\eta = 0$, $-\tau \leq \zeta \leq 0$). Ver Figura 18.

Figura 18 – Domínio de $\sigma(\xi, \zeta)$.



Fonte: Autor.

A relação entre a densidade de singularidade e a forma do casco é discutida a seguir:

(1) Casco principal

A parte lateral do casco, com exceção da chapa telha, será denominada casco principal. O casco principal é expresso com a distribuição de singularidades do tipo fonte (por se tratar do corpo de proa) com domínio na região $(-1 \leq \xi \leq 0, -\tau \leq \zeta \leq 0, \eta = 0)$, contida no plano diametral do casco. A distribuição de fontes tem a forma da equação (14):

$$\sigma(\xi, \zeta) = \frac{b}{\ell} \frac{V}{2\pi} \frac{\partial \eta(\xi, \zeta)}{\partial \xi} \quad (14)$$

Onde:

$$\eta(\xi, \zeta) = y(x, z)/b$$

(2) Forma da chapa telha

A forma da chapa telha é expressa com uma fonte linear com distribuição dada pela equação (15) (ver caso (i), em b), 2.5.2), com domínio no segmento de reta $(\xi = -1 + \varepsilon_{ls}, \eta = 0, -\tau \leq \zeta \leq 0)$.

$$\sigma(-1 + \varepsilon_{ls}, \zeta) = \frac{V}{2\pi} b \eta(-1, \zeta) \quad (15)$$

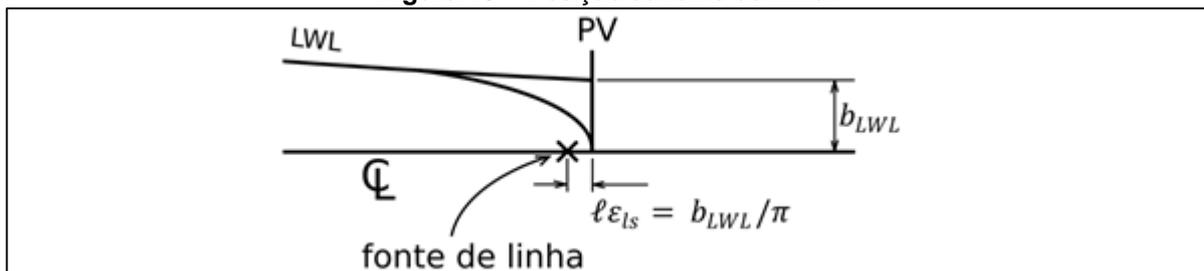
Onde:

$$\varepsilon_{ls} = b_{LWL}/\pi \ell$$

$$b_{LWL} = b \eta(-1, 0): \text{meia-boca imaginária da chapa telha à altura da LWL}$$

A posição desta fonte de linha (um pouco à ré da PV) é ilustrada na Figura 19.

Figura 19 – Posição da fonte de linha.



Fonte: Autor.

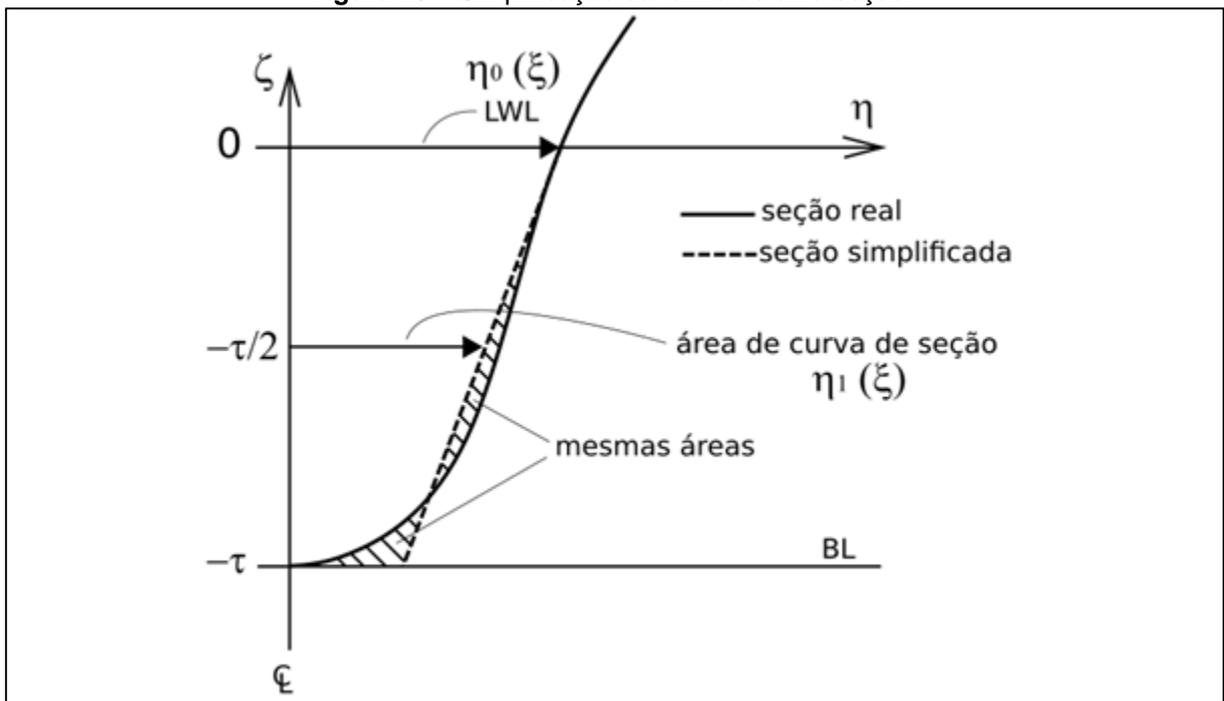
5.2 Expressão Numérica da Forma do Corpo de Proa

Para calcular a resistência de formação de ondas devido a uma forma de casco, é conveniente expressar a forma do casco com expressões numéricas. A seguir, explica-se como as formas do casco do Modelo N° 1 e do Modelo N° 5 foram expressas numericamente.

5.2.1 Simplificação de uma forma de seção do corpo de proa

A Figura 20 ilustra a simplificação de uma forma de seção transversal. Na figura, a seção real é representada com uma linha contínua e a seção simplificada com uma linha reta tracejada. A seção real é simplificada por um trapézio com o mesmo calado, mesma área e mesma boca à altura da LWL.

Figura 20 – Simplificação da forma de uma seção.



Fonte: Autor.

A ideia básica para essa simplificação é a seguinte:

1. Os parâmetros importantes da forma do corpo de proa que afetam a resistência de formação de ondas são: curva de área de seção, LWL e forma da chapa telha.
2. Na simplificação da forma do corpo de proa, portanto, esses três parâmetros importantes são mantidos iguais aos reais.

Definindo:

Curva de área de seção: $\eta = \eta_1(\xi)$

Curva da LWL: $\eta = \eta_0(\xi)$

A meia-boca adimensional da forma do casco simplificada $\eta(\xi, \zeta)$ pode ser expressa pela equação (16):

$$\eta(\xi, \zeta) = \eta_1(\xi) + \left[1 + \frac{2\zeta}{\tau}\right] [\eta_0(\xi) - \eta_1(\xi)] \quad (16)$$

5.2.2 Aproximação polinomial da curva de área de seção e da curva da LWL

A curva da área de seção e a curva da LWL são aproximadas com os seguintes polinômios:

Curva de área de seção (17):

$$\eta_1(\xi) = 1 - \sum_{n=1}^5 a_{2n} \xi^{2n}, \text{ para } -1 \leq \xi \leq 0 \quad (17)$$

Curva da LWL (18):

$$\eta_0(\xi) = \begin{cases} 1 - \sum_{n=1}^5 l_{2n} (\xi + 1 - \varepsilon)^{2n}, & \text{para } -1 \leq \xi \leq -1 + \varepsilon \\ 1, & \text{para } -1 + \varepsilon \leq \xi \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

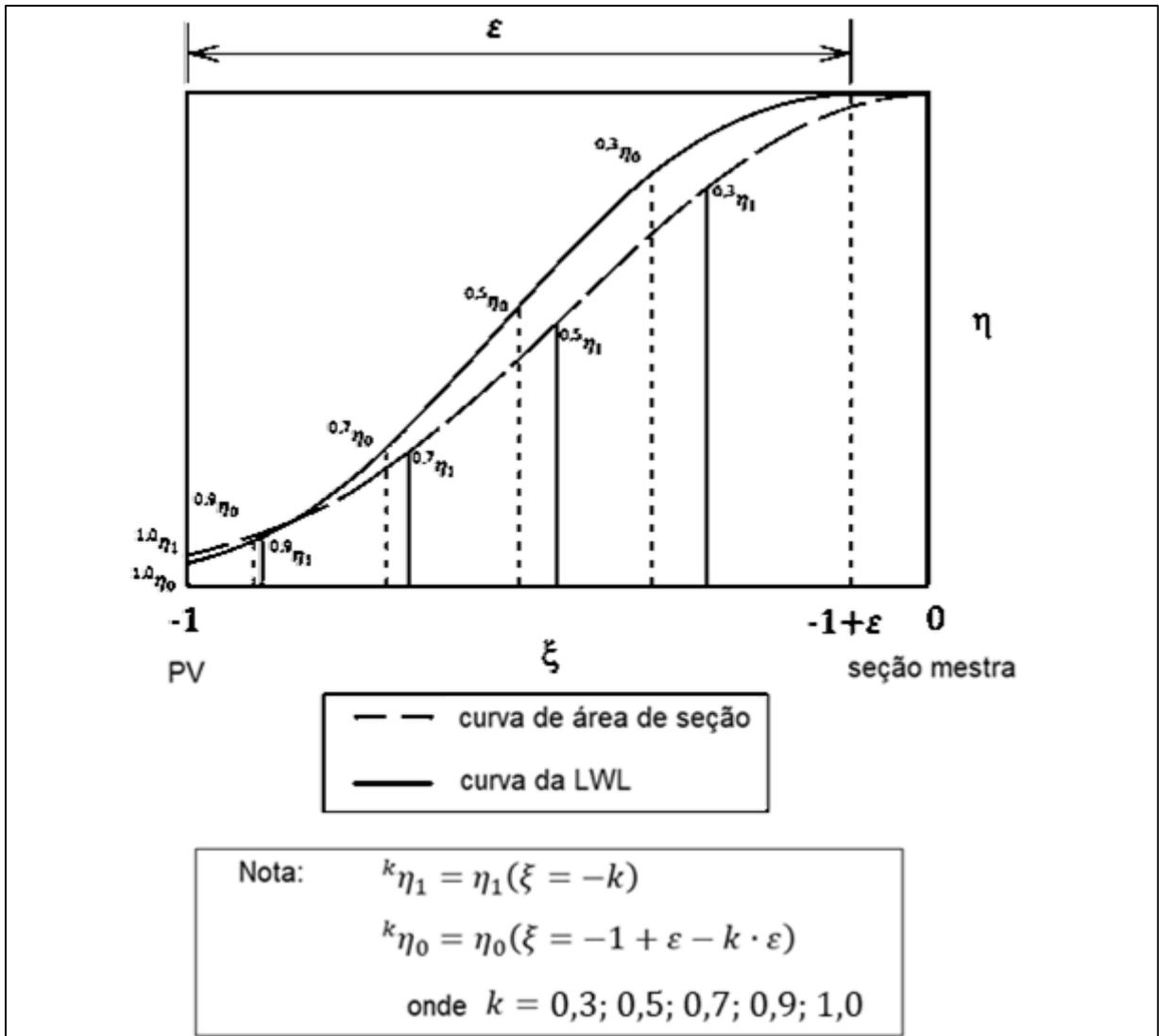
Onde:

$\varepsilon = \ell_e/\ell$ (ver Figura 21)

ℓ_e : comprimento de entrada da LWL

As constantes a_{2n} ou l_{2n} nas equações (17) e (18) são determinadas fornecendo dados em cinco pontos em cada curva, como mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Cinco pontos na curva da área de seção e na curva da LWL a serem usados para aproximação polinomial.



Fonte: Autor.

Os coeficientes a_{2n} e l_{2n} obtidos são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes a_{2n} e l_{2n} para o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5.

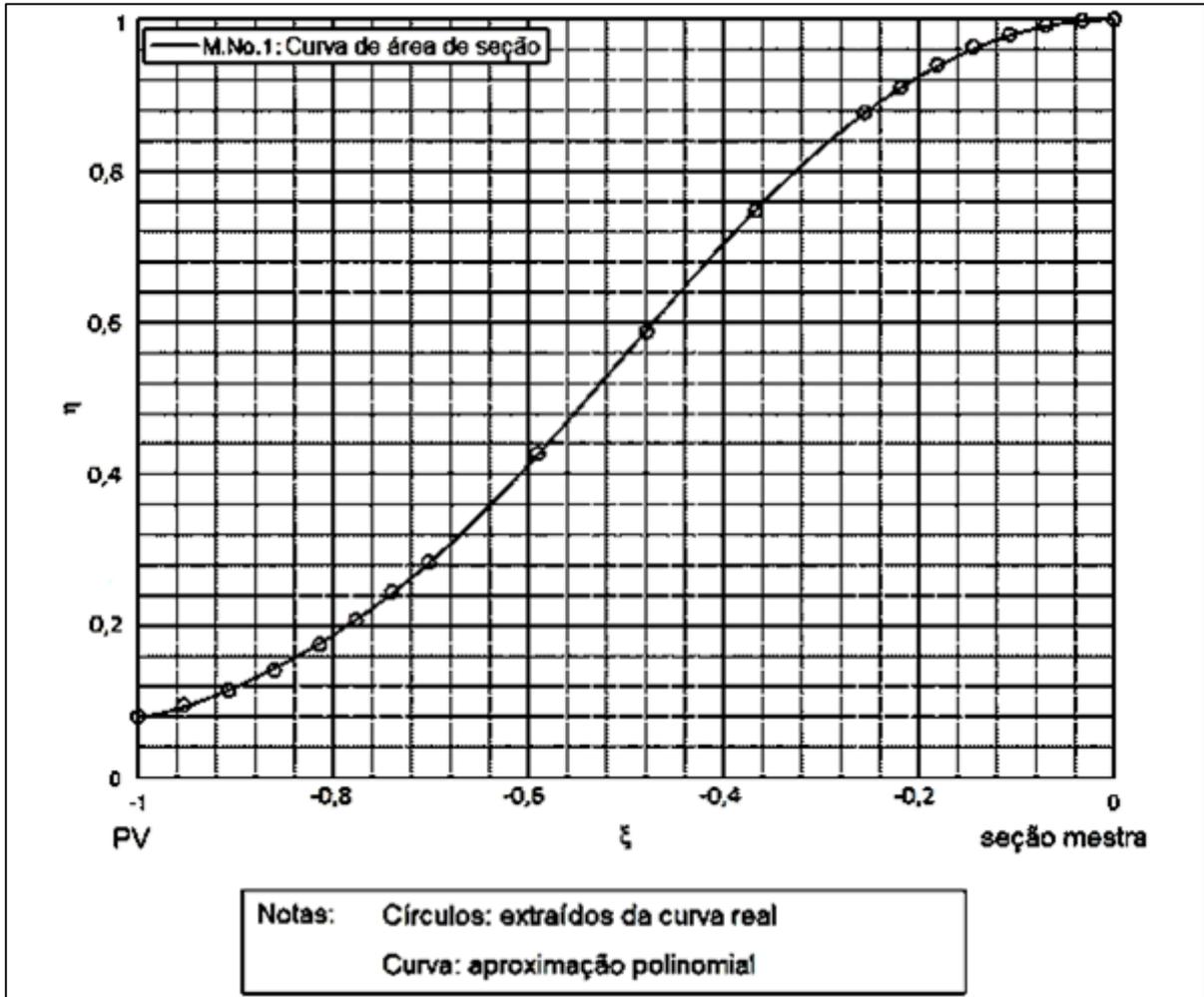
Coeficientes	Modelo N°1	Modelo N° 5
a_2	1,89083	1,99835
a_4	0,34511	-1,23348
a_6	-4,50592	0,21471
a_8	4,95368	-0,27614
a_{10}	-1,76369	0,23455
l_2	2,42152	2,32415
l_4	-0,48278	-0,86884
l_6	-3,38140	-0,41627
l_8	2,75993	-1,92704
l_{10}	-0,21450	2,21952

Fonte: Autor.

Um exemplo de comparação entre curva real e curva aproximada com polinômio é mostrado na Figura 22.

A Figura 22 mostra uma boa concordância da aproximação com a curva real.

Figura 22 – Comparação da aproximação polinomial com curva real.



Fonte: Autor.

5.3 Cálculo da Resistência de Formação de Ondas

5.3.1 Dados necessários para o cálculo

Os dados necessários para o cálculo estão listados abaixo:

- Parâmetros da forma de casco (Tabela 4).
- Coeficientes a_{2n} e l_{2n} , para expressar numericamente a curva de área de seção e a curva da LWL (Tabela 3).
- Parâmetros para definir a forma da chapa telha (Tabela 5).

Tabela 4 – Dados necessários para o cálculo.

Parameter	Modelo N° 1	Modelo N° 5
L_{pp} (m), comprimento entre perpendiculares	134,5	
$\ell = L_{pp} \cdot 0,5374$ (m), comprimento de entrada da curva de área de seção	72,28	
ℓ_e (m), comprimento de entrada da LWL	62,54	
d (m), calado	6,370	
$\varepsilon = \ell_e/\ell$	0,8653	
$b = B/2$ (m), meia-boca	10,20	
$\beta = b/\ell$	0,1411	
$\tau = d/\ell$	0,08813	
g (m/s ²), aceleração da gravidade	9,81	
ρ (kgf·s ² /m ⁴), densidade da água fresca a 15°C	101,87	
∇ (m ³), volume deslocado	9649,2	9692,1

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Comparação das curvas de área de seção e das curvas da LWL na chapa telha.

	Razão imaginária (A/A_{max}) em PV: $\eta(-1)$	b_{LWL}/b : $\eta_0(-1)$
Modelo N° 1	0.08	0.06
Modelo N° 5	0.062	0.005

Fonte: Autor.

5.3.2 Equações para $S(\theta)$ e $C(\theta)$

$S(\theta)$ e $C(\theta)$ são calculados separadamente para cada um dos três parâmetros do corpo de proa:

(1) $S(\theta)$ e $C(\theta)$ para curva de área de seção

O sufixo “sa” significa “área de seção” (em inglês, *sectional area*).

$$\left. \begin{array}{l} S_{sa}(\theta) \\ C_{sa}(\theta) \end{array} \right\} = \frac{2\chi_0^2 b}{\pi} \sec^3 \theta \int_{-\tau}^0 e^{\zeta \chi_0 \sec^2 \theta} d\zeta \int_{-1}^0 \frac{d\eta_1(\xi)}{d\xi} \frac{\sin(\chi_0 \xi \sec \theta)}{\cos} d\xi \quad (19)$$

A equação (19) vem do primeiro termo do lado direito da equação (16), e equação (14) aplicada em (13).

(2) $S(\theta)$ e $C(\theta)$ para forma de seção

O sufixo “sf” significa “forma de seção” (em inglês, *section form*).

$$\left. \begin{array}{l} S_{sf}(\theta) \\ C_{sf}(\theta) \end{array} \right\} = \frac{2\chi_0^2 b}{\pi} \sec^3 \theta \int_{-\tau}^0 \left(1 + \frac{2\zeta}{\tau}\right) e^{\zeta \chi_0 \sec^2 \theta} d\zeta \int_{-1}^0 \frac{d\{\eta_0(\xi) - \eta_1(\xi)\}}{d\xi} \frac{\sin(\chi_0 \xi \sec \theta)}{\cos} d\xi \quad (20)$$

A equação (20) vem do segundo termo do lado direito da equação (16), e equação (14) aplicada em (13).

(3) $S(\theta)$ e $C(\theta)$ para forma da chapa telha

O sufixo “fe” significa “chapa telha” (em inglês, *fore end*).

$$\left. \begin{array}{l} S_{fe}(\theta) \\ C_{fe}(\theta) \end{array} \right\} = \frac{2\chi_0^2 b}{\pi} \sec^3 \theta \int_{-1}^0 \eta(-1, \zeta) e^{\zeta \chi_0 \sec^2 \theta} d\zeta \frac{\sin}{\cos} \{(-1 + \varepsilon_{ls}) \chi_0 \sec \theta\} \quad (21)$$

A equação (21) vem da equação (16) com $\xi = -1$, e equação (15) aplicada em (13).

(4) $S(\theta)$ e $C(\theta)$ para o corpo de proa completo

Quando calculamos a resistência de formação de ondas devido ao corpo de proa completo, soma-se os $S(\theta)$, $C(\theta)$ para cada um dos três parâmetros como mostrado na equação (22).

Sufixo “t” significa “total”.

$$\left. \begin{array}{l} S_t(\theta) \\ C_t(\theta) \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} C_{sa}(\theta) \\ C_{sa}(\theta) \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} C_{sf}(\theta) \\ C_{sf}(\theta) \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} C_{fe}(\theta) \\ C_{fe}(\theta) \end{array} \right\} \quad (22)$$

$S_t(\theta)$ e $C_t(\theta)$ somados são introduzidos na equação (5) para se obter R_w devido ao corpo de proa completo. Semelhantemente, nos casos anteriores, $S(\theta)$ e $C(\theta)$ para os parâmetros em separado são também introduzidos, um a um, na equação (5) para se obter R_w devido às partes em separado.

5.3.3 Cálculo numérico de $S(\theta)$, $C(\theta)$ e R_w

A equação (5) para calcular a resistência de formação de ondas pode ser reescrita como na equação (23):

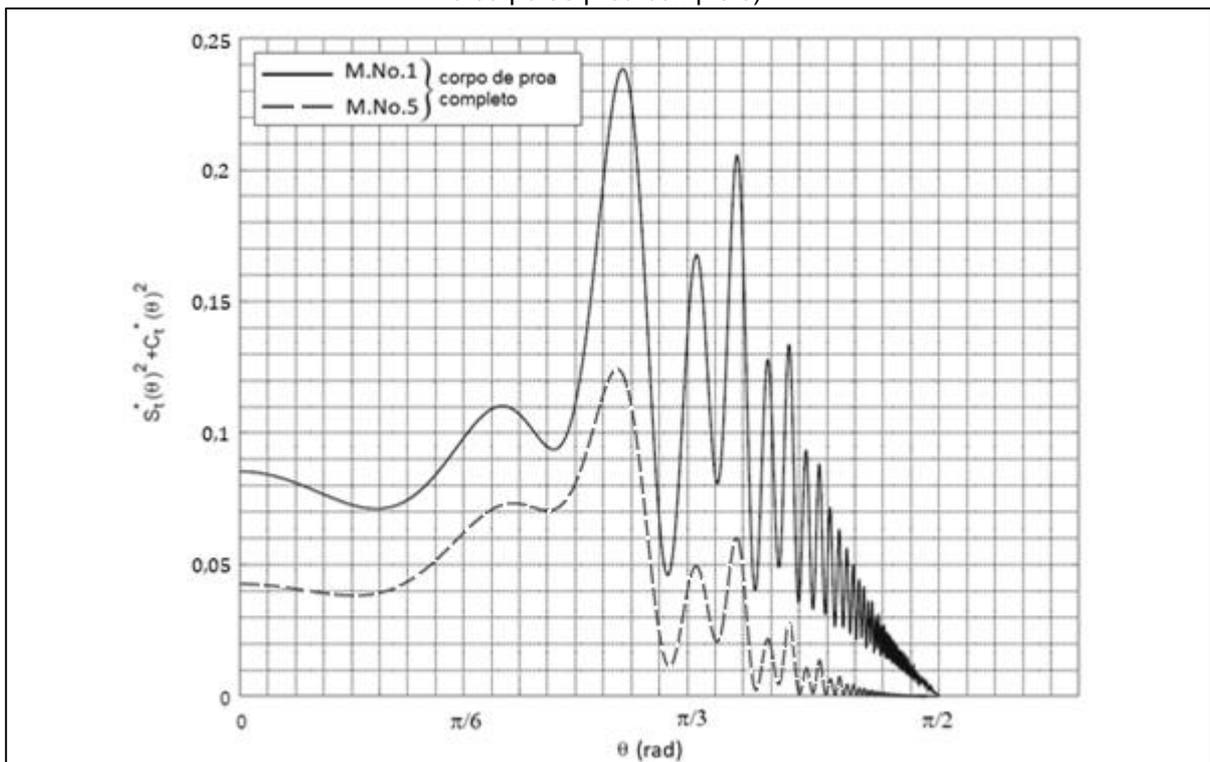
$$R_w = \pi \rho V^2 \int_0^{\pi/2} \left[\{S^*(\theta)\}^2 + \{C^*(\theta)\}^2 \right] d\theta \quad (23)$$

Onde:

$$\left. \begin{array}{l} S^*(\theta) \\ C^*(\theta) \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} S(\theta) \\ C(\theta) \end{array} \right\} \{\cos \theta\}^{3/2} \quad (24)$$

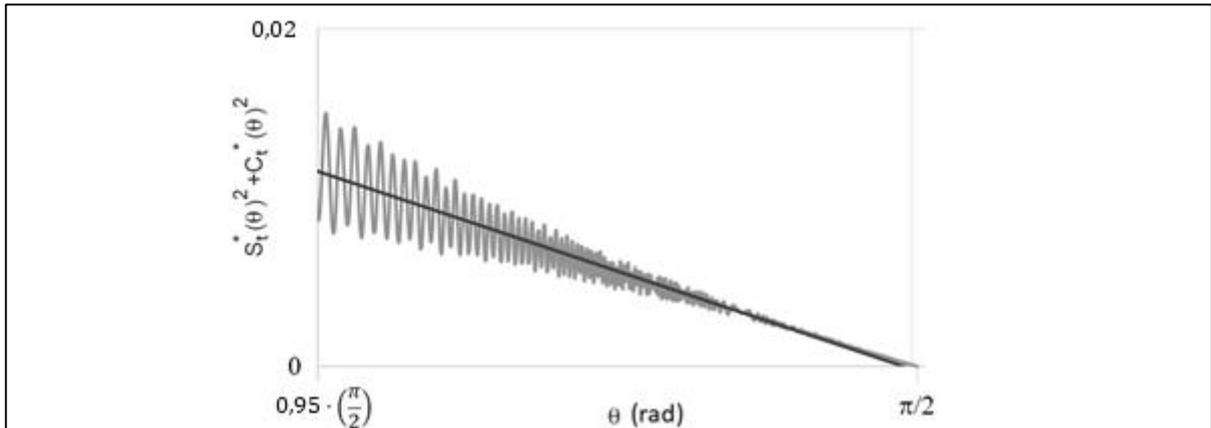
O integrando da equação (23) $\left[\{S^*(\theta)\}^2 + \{C^*(\theta)\}^2 \right]$ oscila com alta frequência quando θ tende a $\pi/2$. Um exemplo é mostrado na Figura 23. Para esta faixa de θ , uma linha média foi desenhada como mostrado na Figura 24, e a área sob a linha média foi usada como a integral dessa parte. No intervalo restante, usou-se a equação de Simpson com passo $(\pi/2)/10^4$ para a integração.

Figura 23 – Integrando $\left[\{S^*(\theta)\}^2 + \{C^*(\theta)\}^2 \right]$ em $F_n = 0,25$ (para o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5, para o corpo de proa completo).



Fonte: Autor.

Figura 24 – Linha média do integrando $\left[\{S^*(\theta)\}^2 + \{C^*(\theta)\}^2 \right]$ em $F_n = 0,25$ nas proximidades de $\pi/2$, Modelo N° 1.



Fonte: Autor.

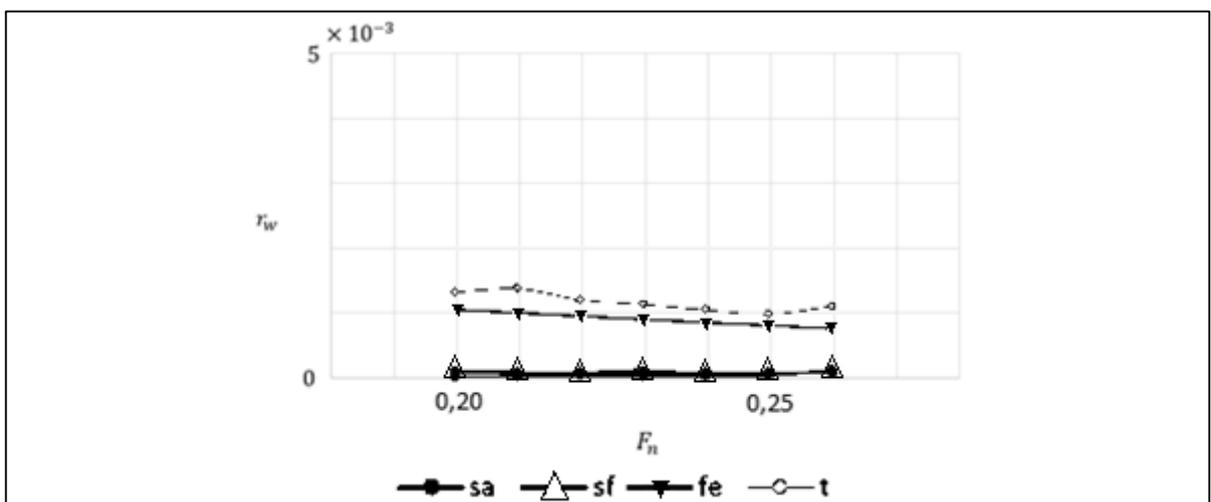
5.4 Resultados dos Cálculos

A Figura 25 e a Figura 26 mostram os coeficientes de resistência de formação de onda r_w calculados para o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5, respectivamente. Os gráficos estão na forma F_n versus r_w .

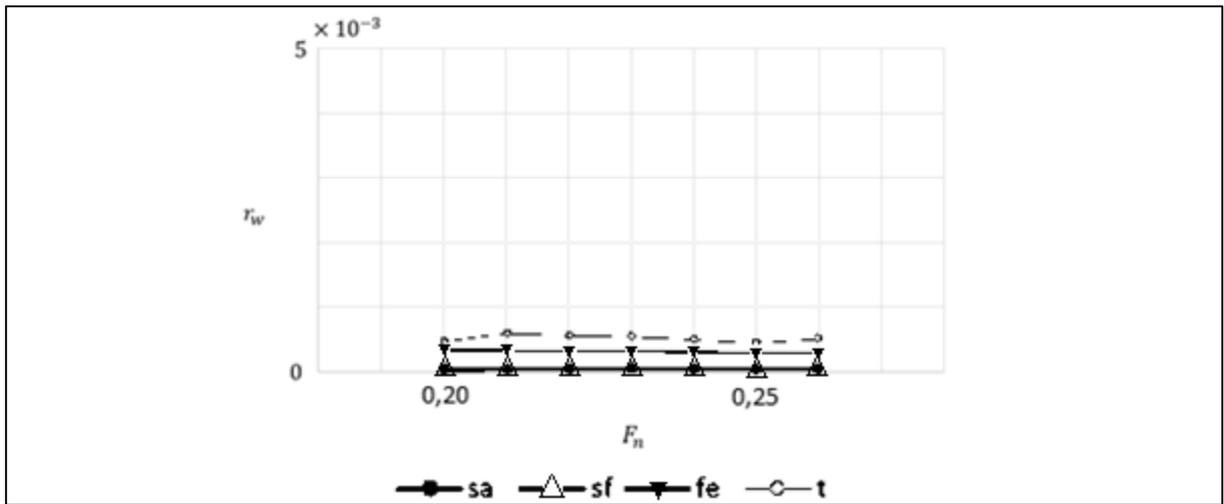
Em cada figura, os quatro r_w seguintes são mostrados:

1. r_w devido à "curva de área de seção: sa"
2. r_w devido à "forma de seção: sf"
3. r_w devido à "chapa telha: fe"
4. r_w devido a "corpo de proa completo: t"

Figura 25 – Coeficiente de resistência de formação de ondas r_w calculado para o Modelo N° 1.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Coeficiente de resistência de formação de ondas r_w calculado para o Modelo N° 5.

Fonte: Autor

6 DISCUSSÃO

6.1 Validação dos Resultados Teóricos Calculados

O alvo do presente estudo é a grande diferença no coeficiente de resistência residual entre o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5 apontado nos testes desses modelos:

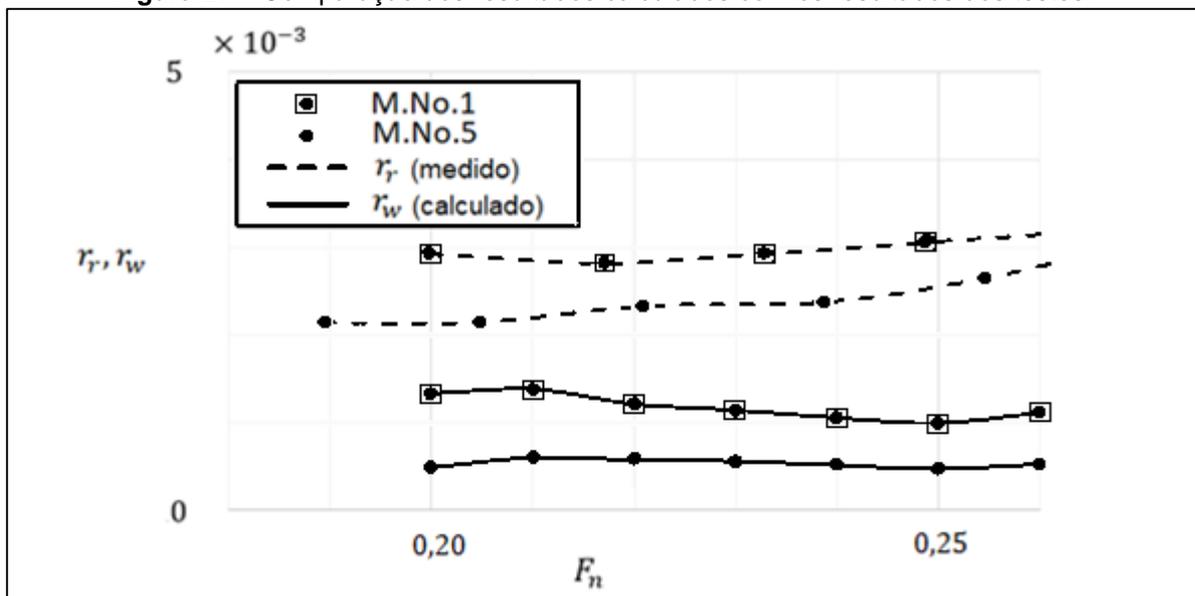
$(\Delta r_r)_{(\text{resultados do teste})}$.

Pode-se ver claramente a diferença na Figura 27.

Como já explicado na seção 4.2, essa diferença corresponde à diferença no coeficiente de resistência de formação de ondas. Assim, podemos comparar $(\Delta r_r)_{(\text{resultados do teste})}$ com a diferença no coeficiente de resistência de formação de ondas calculado: $(\Delta r_w)_{\text{calculado}}$.

A partir da Figura 27, observa-se que o $(\Delta r_w)_{\text{calculado}}$ é bastante próxima de $(\Delta r_r)_{(\text{resultados do teste})}$ não apenas qualitativamente, mas também quantitativamente. Isso permite concluir que a aplicação da teoria linear conforme usada no presente estudo produziu resultados suficientemente razoáveis.

Figura 27 – Comparação dos resultados calculados com os resultados dos testes.



Fonte: Autor.

6.2 A Causa da Grande Diferença de Resistência de Formação de Ondas entre o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5

A fim de investigar o conteúdo da grande diferença $(\Delta r_r)_{(\text{resultados do teste})}$, os três r_w seguintes foram comparados entre o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5 (Figura 28, Figura 29 e Figura 30).

- (1) r_w calculado devido à "curva de área de seção "
- (2) r_w calculado devido à "forma de seção"
- (3) r_w calculado devido à "chapa telha"

Das figuras, percebe-se que

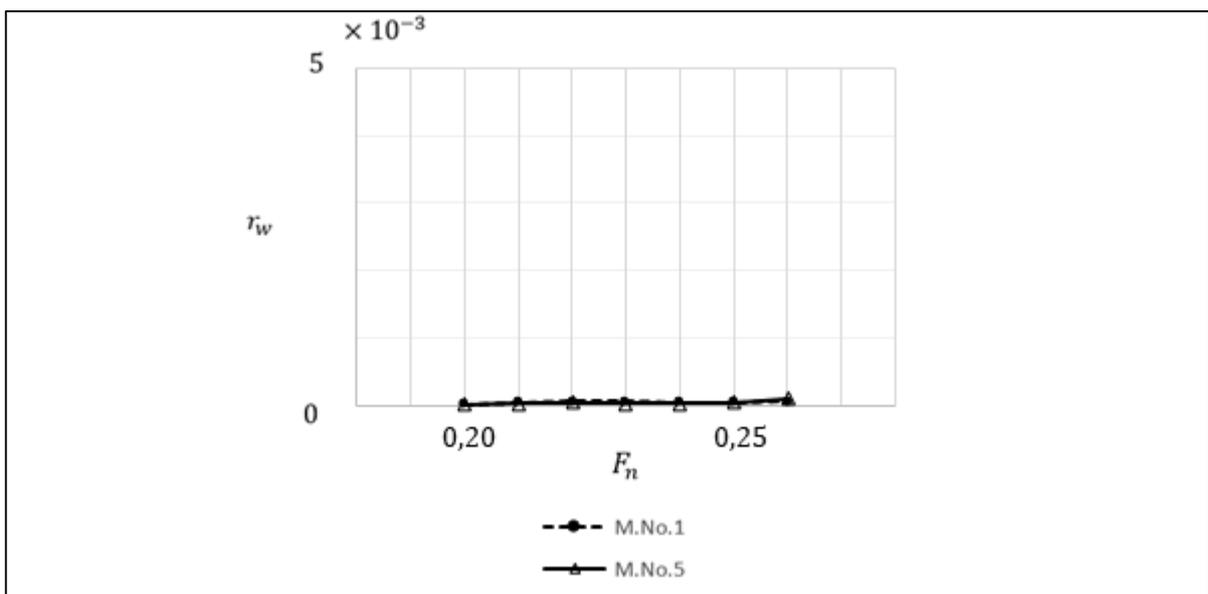
-As diferenças de 1 e 2 são bastante pequenas

-Por outro lado, a diferença em 3 é acentuadamente grande

Isso aponta que a grande diferença nos coeficientes de resistência residual obtidos pelos testes do Modelo N° 1 e do Modelo N° 5, $(\Delta r_r)_{(\text{resultados do teste})}$, é causada pela diferença na forma da chapa telha.

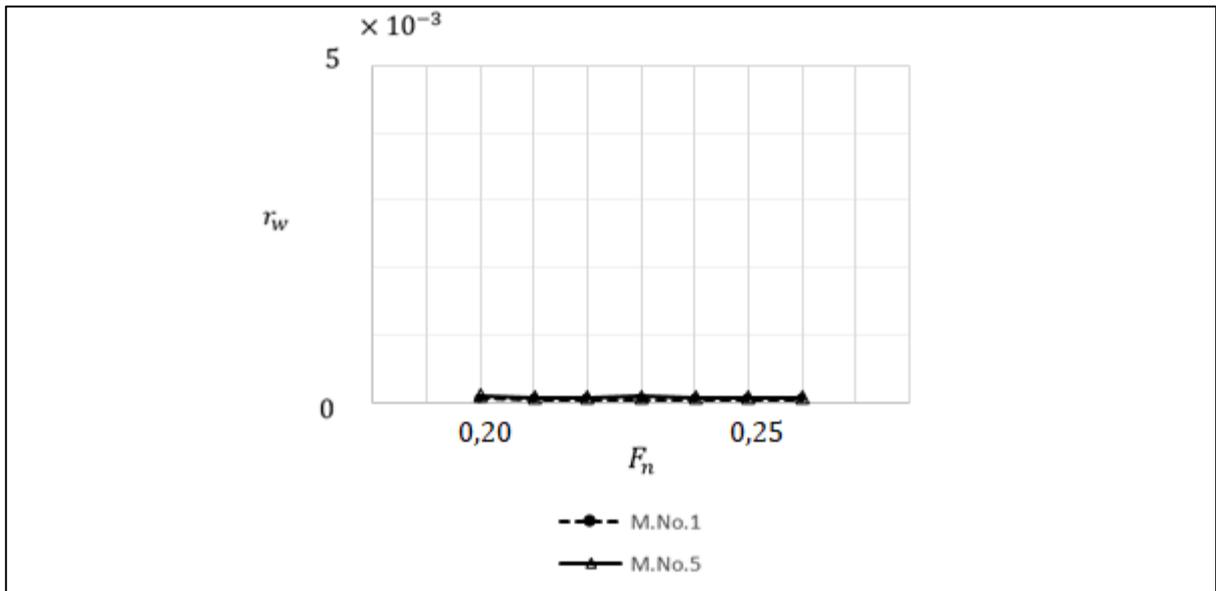
A diferença da forma da chapa telha é mostrada na Figura 12, Figura 13 e Figura 14, e na Tabela 5. A principal diferença está na boca da chapa telha à altura da LWL e logo abaixo dela.

Figura 28 – Comparação do coeficiente de resistência de formação de ondas calculado r_w devido à "curva de área de seção".



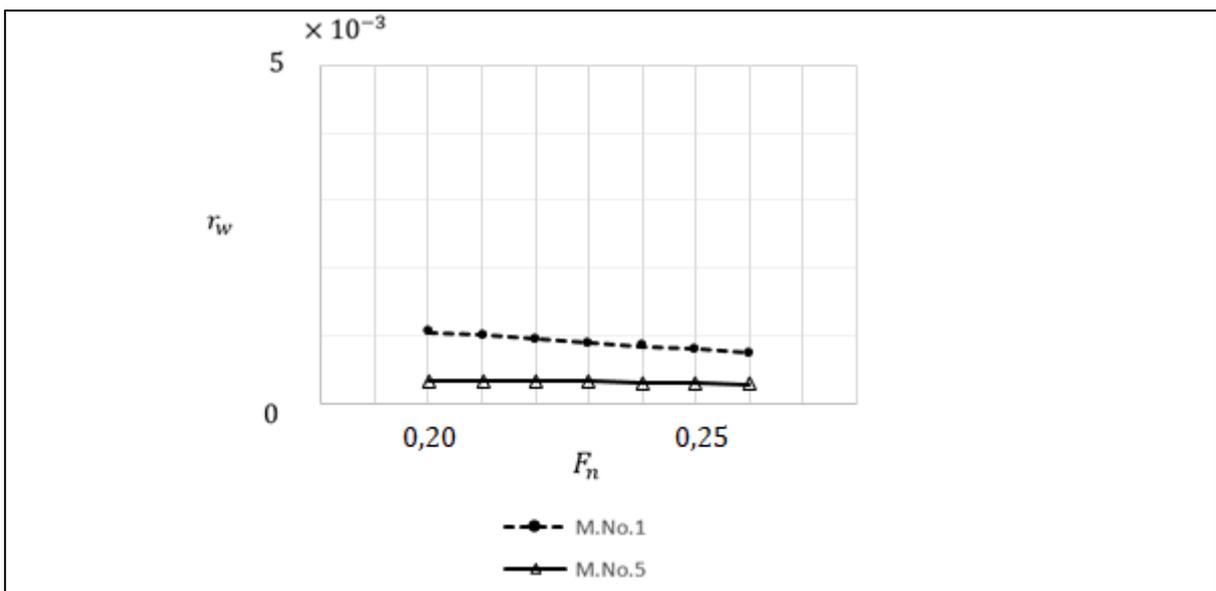
Fonte: Autor.

Figura 29 – Comparação do coeficiente de resistência de formação de ondas calculado r_w devido à "forma de seção".



Fonte: Autor.

Figura 30 – Comparação do coeficiente de resistência de formação de ondas calculado r_w devido à "chapa telha".



Fonte: Autor.

7 CONCLUSÕES

As conclusões obtidas a partir do presente estudo foram as seguintes:

- (1) Os resultados teóricos calculados pela teoria linear de resistência de formação de ondas linear foram validados para a faixa de F_n em questão.
- (2) Evidenciou-se que a grande diferença na resistência residual entre o Modelo N° 1 e o Modelo N° 5 para F_n abaixo de 0,26 é causada pela diferença na forma da chapa telha.
- (3) A diferença da forma da chapa telha traduz-se em grande parte pela diferença na largura da chapa telha à altura da LWL e logo abaixo dela.

REFERÊNCIAS

CAMES, M.; GRAICHEN, J.; SIEMONS, A.; COOK, V. **Emission Reduction Targets for International Aviation and Shipping**. Study for the ENVI Committee. Brussels: European Union, 2015

HAVELOCK, T. H. **The Theory of Wave Resistance**. Proceedings Royal Society. Vol. 138, A, p. 339-348. Agosto 1932.

_____. **The Calculation of Wave Resistance**. Proceedings Royal Society, p. 514-521, 1934.

_____. **Wave Patterns and Wave Resistance**. TINA, p. 430-446, 1924

LAP, A.J.W. **Fundamentals of Ship Resistance and Propulsion: (Course Held Before "The Netherlands Society of Engineers and Shipbuilders")**. Pt.1. Netherlands ship model basin, N.S.M.B. 1958.

LUNDE, J.K. **On the Linearized Theory of Wave Resistance for Displacement Ships in Steady and Accelerated Motion**. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, p.25-85, 1951.

MICHELL, J.H. **Wave-Resistance of a Ship**. Philosophical Magazine, vol. 45, Ser. 5, p. 106-123. 1898.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Review of Maritime Transport 2017**. Geneve, 2017.

VAN MANEN, J. D.; VAN OOSSANEN, P. **Principles of Naval Architecture, Vol. 2**. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. EUA. Novembro 1988.

WIKIPÉDIA. Desenvolvido pela Wikimedia Foundation, Flórida, 2018. Apresenta conteúdo enciclopédico. **Ship Model Basin**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ship_model_basin&oldid=858009249>. Acesso em: 19 nov. 2018.

YAMANO, T. **Stem forms for fine ships: ease of construction or improved propulsive performance.** Proc. 6th IMDC (International Marine Design Conference), p. 361-375. Junho 1997.

_____. **Reviews of My Research Work.** Hyogo University of Teacher Education. 110 slides. 04 de Março de 2007.

_____. **Hydrodynamics design of a ship: DWG. 3-1 Class (3).** 05 de abril de 2018. 7 p. Notas de Aula.

APÊNDICE A – DIFERENÇA NO VALOR PAGO POR ÓLEO COMBUSTÍVEL DEVIDO A 7% DE DIFERENÇA EM BHP

	Unidade	Navio A ¹		Navio B ²	
Potência de trabalho (BHP)	hp	10.700		52.740	
Potência de trabalho (BHP) x 7%	hp	749		3691,8	
Taxa Consumo de óleo combustível ³	g/hp/hora	166,5		124,5	
Horas por dia	hora/dia	24		24	
Dias por ano	dias/ano	300		300	
Toneladas por ano para 7% BHP	t/ano	898		3309	
Preço do combustível	iene/t	50 mil	100 mil	50 mil	100 mil
Preço do combustível	R\$/t	1,7 mil	3,4 mil	1,7 mil	3,4 mil
Preço pago por ano por 7% BHP	iene/ano	44,9 mi	89,8 mi	165,5 mi	330,9 mi
Preço pago por ano por 7% BHP	R\$/ano	1,5 mi	3,1 mi	5,7 mi	11,4 mi

Fonte: Autor.

¹ Navio A: Navio cargueiro refrigerado estudado neste trabalho

² Navio B: Navio porta-contêiner 5.250 TEU

³ poder calorífico assumido para o óleo combustível: 9800 kcal/kg

ANEXO A – A STUDY ON A HULL FORM WITH LOWER WAVE-MAKING RESISTANCE AT FROUDE NUMBER LOWER THAN 0.26



27º Congresso Internacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore

Rio de Janeiro/RJ, 23-25 de outubro de 2018

A Study on a Hull Form with Lower Wave-Making Resistance at Froude Number Lower than 0.26

Luis Carlos Fabrício Filho, UFPE/DEMEC, Recife-PE/Brazil, luis.fabricio0.lfc@gmail.com

Miguel Angel Celis Carbajal, UFPE/DEMEC, Recife-PE/Brazil, celismac@gmail.com

Armando Hideki Shinohara, UFPE/DEMEC, Recife-PE/Brazil, shinohara@ufpe.br

Tadao Yamano, UFPE/DEMEC, Recife-PE/Brazil, yamanotadao@yahoo.co.jp

Abstract

We have a resistance test result on two model ships different from each other at fore body form. The wave-making resistance of one of the two model ships is considerably lower compared with that of the other one at the Froude number lower than 0.26. However, the reason why such a large difference in wave-making resistance came out has not yet been clarified. So, a theoretical study on the cause of the difference was conducted. As a result, it has been clarified that the difference in the form of a certain part of fore body mainly causes such difference in wave-making resistance.

1. Introduction

The two model ships, M.No.1 and M.No.5, for a 354,000 ft³ refrigerated cargo ship were tested in 1968 at NSMB (MARIN at present). The results showed that M.No.5 has a residual resistance considerably lower than that of M.No.1 at Froude number below 0.26. As a result, the data of the hull form and the model test results of M.No.5 have been often used for hull form design or ship speed-power curve estimation for other ships with design Froude number from 0.22 to 0.26 such as container ships or pure car carriers.

However, the reason why M.No.5 has such a lower residual resistance has not yet been completely clarified. This is precisely our motivation for the present study.

So, we try to clarify the reason in our study. We believe that if we could succeed in our study, the data of M.No.5 would be more useful for design of hull forms for other ships with design Froude number from 0.22 to 0.26.

2. Objectives

The objective of our study is to clarify the cause of such a large difference in residual resistance

between M.No.1 and M.No.5, more concretely, to clarify what part of the hull form difference causes such a difference.

3. Methodologies

(1) Theory to be used for our study

As will be explained later, the above described residual resistance difference between M.No.1 and M.No.5 is considered the difference in wave-making resistance. So, we use the linear wave-making resistance theory (Havelock, 1932; 1934) to tackle our present issue.

A good point of using the linear theory is that we can understand which part of the fore body affects most to wave-making resistance by the theory. The reliability of the theory will be evaluated by comparing the calculation results with the model test results.

(2) Simplification and numerical expression of hull form

The actual hull form has a rather complex form for calculation. So, we simplify the hull form. However, we leave the following three important parameters in the simplified form: sectional area curve, LWL and fore end form.

Further, for the convenience of calculation, the three parameters are approximated with polynomials.

(3) Numerical calculation method

In the calculation of wave-making resistance, Simpson's equation is used to integrate functions that are too complicated to be treated analytically. Regarding the high frequency parts, however, we have to integrate them with a special care.

(4) Software

A computer program in GNU Octave software is used to calculate the wave-making resistance.

4. Hull forms and model test results to be studied

4.1. Hull forms

The principal hull particulars of M. No. 1 and M. No. 5 are shown in Table 1 in full-scale. They are model ships of a 354,000 ft³ refrigerated cargo ship. The ship is a high-speed fine ship with design Froude number of 0.292 and C_p of 0.574. The hull form of M.No.1 has been adopted to three actual ships. The photo of one of the ships is shown in Figure 1.

Table 1: Hull particulars of M. No. 1 and M. No. 5

Parameter	M.No.1	M.No.5
Ship kind	354,000 ft ³ refrigerated cargo ship	
L_{pp} (m), length between perpendiculars	134.5	
B (m), breadth	20.40	
d (m), design draft	6.370	
∇ (m ³), displacement volume	9649.2	9692.1
S (m ²), wetted surface area	3125.1	3131.0
L/B	6.593	
B/d	3.203	
C_{b0} , block coefficient	0.5523	0.5547
C_p , prismatic coefficient	0.5740	0.5765
C_{max} : fullest section area coefficient	0.9623	
L_{cb} (% L_{pp})	1.880	1.749
$S/2\sigma^{2/3}$	3.445	3.444

Remarks:

1) Scale of M.No.1 and M.No.5 = 1/19:

$L_{pp} = 7.079$ m



Figure 1: The first one of the three actual ships, where M. No. 1 hull form has been adopted, on her official sea trial in September 1969.

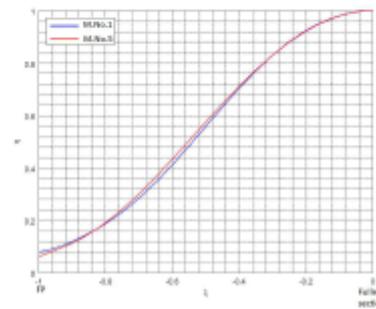


Figure 2: Comparison of sectional area curves

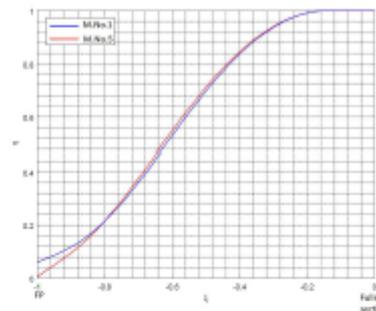


Figure 3: Comparison of LWL curves

The same aft body form is adopted for the two model ships. Only the fore body form is different between the two model ships.

The comparison of the fore body sectional area curves between the two model ships is shown in Figure 2 and that of the fore body LWLs in Figure 3. Regarding the fore end form, the comparison of the imaginary half breadths of LWL fore end between

the two model ships is shown in Figure 4, that of imaginary sections at FP in Figure 5 and that of bow profiles in Figure 6.

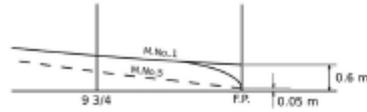


Figure 4: Comparison of imaginary half breadths of LWL at FP

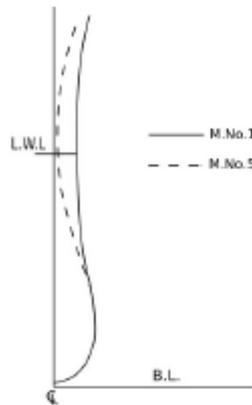


Figure 5: Comparison of imaginary FP sections

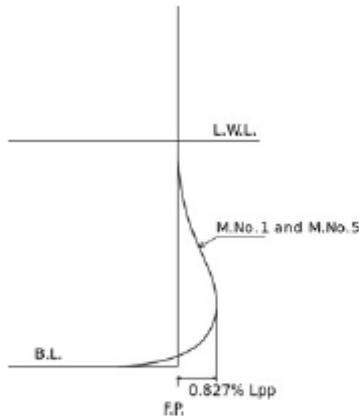


Figure 6: Comparison of bow profiles

4.2. Model test results

The model tests of M.No.1 and M.No.5 were conducted in 1966, at NSMB (MARIN at present) in Wageningen, the Netherlands.

The resistance test results are shown in Figure 7 and that of EHP curves derived from the results in Figure 8, at Froude number from 0.20 to 0.27.

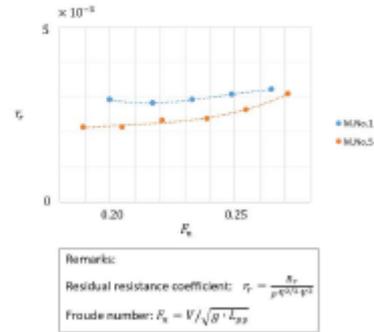


Figure 7: Comparison of resistance test results

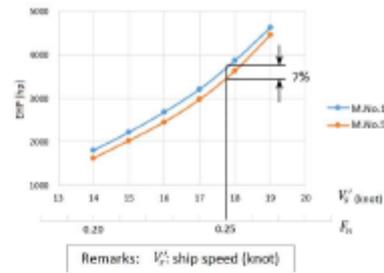


Figure 8: Comparison of EHP curves

The results show that M.No.5 presents a considerably lower residual resistance, as well as has lower EHP, at the Froude number range compared with M. No. 1. At Froude number 0.25 (ref to Table 2), EHP of M.No.5 is lower by 7% than that of M.No.1.

L_{pp} (m)	V_s (m/s)	V_s' (knot)
134.5	9.1	17.7

Residual resistance coefficient r_r can be expressed with equation (1)

$$r_r = r_w + k \cdot r_{fm} \quad (1)$$

Where

r_w : wave-making resistance coefficient

k : form factor

r_{fm} : frictional resistance coefficient of model ship

The form factor k is same between the two model ships, because the aft body form is same. The frictional resistance coefficient is also same, because the principal hull particulars are same, as shown in Table 1.

Therefore, if we define:

Δr_r : difference of residual resistance coefficient between M.No.1 and M.No.5

Δr_w : difference of wave-making resistance coefficient between M.No.1 and M.No.5

We can write:

$$\Delta r_r = \Delta r_w \quad (2)$$

That is, the large difference in r_r seen in Figure 7 can be considered the difference in wave-making resistance coefficient r_w .

5. Calculation of wave-making resistance

5.1. Coordinate system and calculation equations

(1) Coordinate system

The adopted coordinate system is explained in Figure 9.

The origin of xyz coordinate system is on the LWL plane, the hull center line plane and the fullest section plane. The symbols used in Figure 9 are as follows:

x axis: in the hull center line plane and LWL plane, and towards the water flow direction

y axis: in the fullest section plane and LWL plane, and towards the starboard direction

z axis: in the hull center line plane and fullest section plane, and towards the upward direction

l (m): entrance length (FP – fullest section)

b (m) = $B/2$: half breadth

d (m): draft

V (m/s): ship speed (water flow speed)

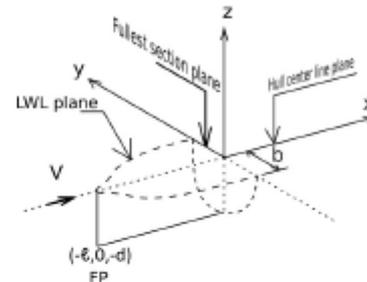


Figure 9: xyz coordinate system

(2) Equations to calculate wave-making resistance

According to the linear wave-making resistance theory (Havelock, 1924; Lunde, 1951; Yamano, 1997), the wave-making resistance due to the fore body can be calculated by equation (3).

$$R_w = \pi \rho V^2 \int_0^{\pi/2} [(S(\theta))^2 + (C(\theta))^2] \cos^3 \theta \, d\theta \quad (3)$$

where

R_w (kgf): wave-making resistance

ρ (kgf · s²/m⁴): water density

$S(\theta)$, $C(\theta)$: amplitude functions: elementary wave heights advancing towards the direction θ . The definition of θ is shown in Figure 10.

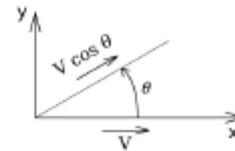


Figure 10: Definition of θ

$S(\theta)$ and $C(\theta)$ are given by equations (4) and (5), respectively:

$$S(\theta) = \frac{4V\chi^2}{g} \sec^3 \theta \int_{-l}^0 \int_{-d}^0 \sigma(x, z) e^{i\chi x \sec \theta} \sin(\chi x \sec \theta) \, dz \, dx \quad (4)$$

$$C(\theta) = \frac{4V\chi^2}{g} \sec^3 \theta \int_{-l}^0 \int_{-d}^0 \sigma(x, z) e^{i\chi x \sec \theta} \cos(\chi x \sec \theta) \, dz \, dx \quad (5)$$

Where

g (m/s²): gravity acceleration

$\chi = g/V^2$

For the convenience of the calculation, x , y and z are transformed into non-dimensional coordinates:
 $\xi = x/\ell$, $\eta = y/b$, $\zeta = z/\ell$.

With the coordinate system $\xi\eta\zeta$, equations (4) and (5) turn to equations (6) and (7):

$$S(\theta) = \frac{4\ell^2 \sigma^2}{\theta} \sec^2 \theta \int_{-1}^0 \int_{-\tau}^0 \sigma(\xi, \zeta) e^{i\chi_0 \sec^2 \theta} \sin(\chi_0 \xi \sec \theta) d\zeta d\xi \quad (6)$$

$$C(\theta) = \frac{4\ell^2 \sigma^2}{\theta} \sec^2 \theta \int_{-1}^0 \int_{-\tau}^0 \sigma(\xi, \zeta) e^{i\chi_0 \sec^2 \theta} \cos(\chi_0 \xi \sec \theta) d\zeta d\xi \quad (7)$$

where

$$\tau = d/\ell$$

$$\chi_0 = \ell \chi$$

(3) Relations between singularity distribution and hull form

The $\sigma(\xi, \zeta)$ in equations (6) and (7) are the density of singularity distributed over the hull center line plane ($-1 \leq \xi \leq 0$, $-\tau \leq \zeta \leq 0$, $\eta = 0$).

The relation between singularity density and hull form is discussed below:

1) Main hull

The main hull except the fore end part, that is, hull side part, is expressed with the source distribution with the density

$$\sigma(\xi, \zeta) = \frac{b}{\ell} \frac{\partial \eta(\xi, \zeta)}{\partial \zeta} \quad (8)$$

distributed over hull center line plane ($-1 \leq \xi \leq 0$, $-\tau \leq \zeta \leq 0$, $\eta = 0$).

where

$$\eta(\xi, \zeta) = y(x, z)/b$$

$y(x, z)$: hull half breadth

2) Fore end part

The fore end part is expressed with a line source with the density

$$\sigma(-1 + \varepsilon_{ls}, \zeta) = \frac{b}{2\ell} b\eta(-1, \zeta) \quad (9)$$

distributed on a vertical straight line positioned a little after FP in the hull center line plane ($\xi = -1 + \varepsilon_{ls}$, $-\tau \leq \zeta \leq 0$, $\eta = 0$).

Where

$$\varepsilon_{ls} = b_{LWL}/\pi \ell$$

$b_{LWL} = b\eta(-1, 0)$: LWL fore end imaginary half breadth

Figure 11 shows the line source position.

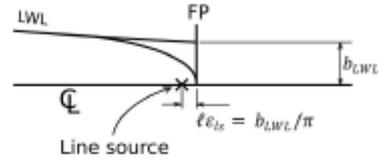


Figure 11: Line source position.

5.2. Numerical expression of fore body form

To calculate the wave-making resistance due to a hull form, it is convenient for us to express the hull form with numerical equations. In the following, it is explained how the hull forms of M. No. 1 and M. No. 5 have been numerically expressed.

(1) Simplification of fore body section form

Figure 12 illustrates the simplification of a transverse section form. In the figure, the actual section is represented with a continuous curve and the simplified section with a dashed straight line.

The actual section is simplified by a trapezoid with same draft, same area and same LWL breadth.

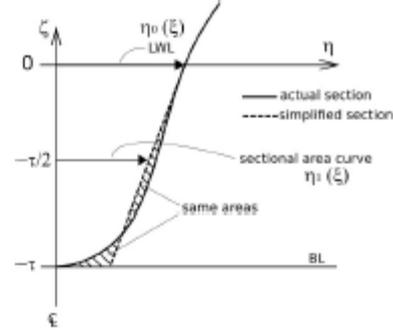


Figure 12: Simplification of a section form

Our basic idea for this simplification is as follows:

1. The important parameters of a fore body hull form which affect its wave-making resistance are the following three: sectional area curve, LWL and fore end form.

2. So, in the simplification of the fore body hull form, these three important parameters are kept the same as the actual ones.

If we write

$$\text{Sectional area curve: } \eta = \eta_1(\xi)$$

$$\text{LWL curve: } \eta = \eta_0(\xi)$$

The non-dimensional half breadth of the simplified hull form $\eta(\xi, \zeta)$ can be expressed with equation (10):

For the convenience of the calculation, x , y and z are transformed into non-dimensional coordinates:
 $\xi = x/\ell$, $\eta = y/b$, $\zeta = z/\ell$.

With the coordinate system $\xi\eta\zeta$, equations (4) and (5) turn to equations (6) and (7):

$$S(\theta) = \frac{4\ell^2 g^2}{\theta} \sec^2 \theta \int_{-1}^0 \int_{-\tau}^0 \sigma(\xi, \zeta) e^{i\chi_0 \xi \sec \theta} \sin(\chi_0 \xi \sec \theta) d\zeta d\xi \quad (6)$$

$$C(\theta) = \frac{4\ell^2 g^2}{\theta} \sec^2 \theta \int_{-1}^0 \int_{-\tau}^0 \sigma(\xi, \zeta) e^{i\chi_0 \xi \sec \theta} \cos(\chi_0 \xi \sec \theta) d\zeta d\xi \quad (7)$$

where

$$\tau = d/\ell$$

$$\chi_0 = \ell \chi$$

(3) Relations between singularity distribution and hull form

The $\sigma(\xi, \zeta)$ in equations (6) and (7) are the density of singularity distributed over the hull center line plane ($-1 \leq \xi \leq 0$, $-\tau \leq \zeta \leq 0$, $\eta = 0$).

The relation between singularity density and hull form is discussed below:

1) Main hull

The main hull except the fore end part, that is, hull side part, is expressed with the source distribution with the density

$$\sigma(\xi, \zeta) = \frac{b}{\ell} \frac{v}{2\pi} \frac{\partial \eta(\xi, \zeta)}{\partial \zeta} \quad (8)$$

distributed over hull center line plane ($-1 \leq \xi \leq 0$, $-\tau \leq \zeta \leq 0$, $\eta = 0$).

where

$$\eta(\xi, \zeta) = y(x, z)/b$$

$y(x, z)$: hull half breadth

2) Fore end part

The fore end part is expressed with a line source with the density

$$\sigma(-1 + \varepsilon_{ix}, \zeta) = \frac{v}{2\pi} b \eta(-1, \zeta) \quad (9)$$

distributed on a vertical straight line positioned a little after FP in the hull center line plane ($\xi = -1 + \varepsilon_{ix}$, $-\tau \leq \zeta \leq 0$, $\eta = 0$).

Where

$$\varepsilon_{ix} = b_{LWL}/\pi \ell$$

$b_{LWL} = b \eta(-1, 0)$: LWL fore end imaginary half breadth

Figure 11 shows the line source position.

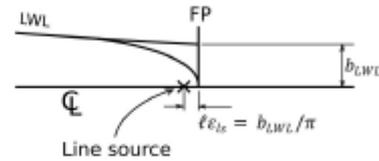


Figure 11: Line source position.

5.2. Numerical expression of fore body form

To calculate the wave-making resistance due to a hull form, it is convenient for us to express the hull form with numerical equations. In the following, it is explained how the hull forms of M. No. 1 and M. No. 5 have been numerically expressed.

(1) Simplification of fore body section form

Figure 12 illustrates the simplification of a transverse section form. In the figure, the actual section is represented with a continuous curve and the simplified section with a dashed straight line.

The actual section is simplified by a trapezoid with same draft, same area and same LWL breadth.

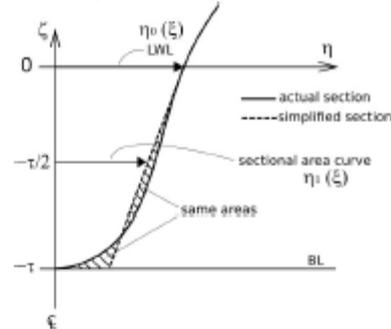


Figure 12: Simplification of a section form

Our basic idea for this simplification is as follows:

1. The important parameters of a fore body hull form which affect its wave-making resistance are the following three: sectional area curve, LWL and fore end form.

2. So, in the simplification of the fore body hull form, these three important parameters are kept the same as the actual ones.

If we write

Sectional area curve: $\eta = \eta_1(\xi)$

LWL curve: $\eta = \eta_0(\xi)$

The non-dimensional half breadth of the simplified hull form $\eta(\xi, \zeta)$ can be expressed with equation (10):

$$\eta(\xi, \zeta) = \eta_1(\xi) + \left[1 + \frac{2\zeta}{\ell}\right] [\eta_0(\xi) - \eta_1(\xi)] \quad (10)$$

(2) Polynomial approximation of sectional area curve and LWL

We approximate the sectional area curve and the LWL with the following polynomials:

Sectional area curve:

$$\eta_1(\xi) = 1 - \sum_{n=1}^5 a_{2n} \xi^{2n}, \text{ for } -1 \leq \xi \leq 0 \quad (11)$$

LWL curve:

$$\eta_0(\xi) = \begin{cases} 1 - \sum_{n=1}^5 l_{2n} (\xi + 1 - \epsilon)^{2n}, & \text{for } -1 \leq \xi < -1 + \epsilon \\ 1, & \text{for } -1 + \epsilon \leq \xi \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

Where

$\epsilon = \ell_e / \ell$ (ref to Figure 13)

ℓ_e : entrance length of LWL

The constants a_{2n} or l_{2n} in equations (11) and (12) are determined by giving data at five points on each curve as shown in Figure 13.

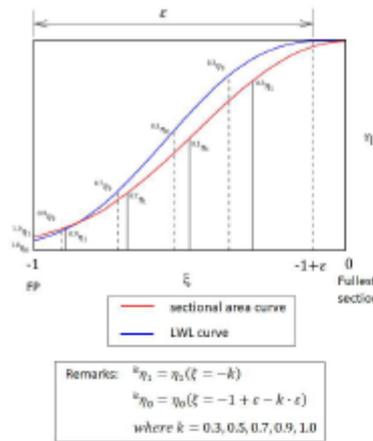


Figure 13: Five points in the sectional area curve and in the LWL curve to be used for polynomial approximation.

Table 3: Constants a_{2n} and l_{2n} for M.No.1 and M.No.5

Coefficients	M.No.1	M.No.5
a_2	1.89083	1.99835
a_4	0.34511	-1.23348
a_6	-4.50592	0.21471
a_8	4.95368	-0.27614
a_{10}	-1.76369	0.23455
l_2	2.42152	2.32415
l_4	-0.48278	-0.86884
l_6	-3.38140	-0.41627
l_8	2.75993	-1.92704
l_{10}	-0.21450	2.21952

The obtained a_{2n} and l_{2n} are shown in Table 3.

An example of comparison between the actual curve and the approximate curve with polynomial is shown in Figure 14.

Figure 14 shows a good agreement of the approximation with the actual curve.

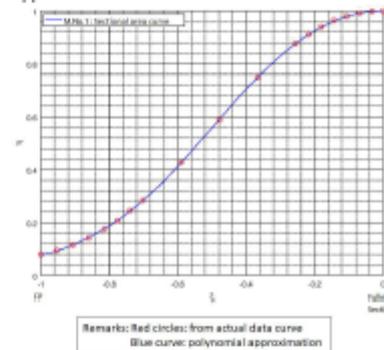


Figure 14: Comparison of polynomial approximation with actual curve.

5.3. Calculation of wave-making resistance

(1) Data necessary for calculation

The data necessary for calculation are listed below:

- Hull form parameters shown in Table 4
- Coefficients a_{2n} and l_{2n} , to numerically express the forms of sectional area curve and LWL curve, shown in Table 3.
- Parameters to define fore end form shown in Table 5.

Table 4: Data necessary for calculation

Parameter	M.No.1	M.No.5
L_{pp} (m), length between perpendiculars	134.5	
$\ell = L_{pp} \cdot 0.5374$ (m), entrance length of sectional area curve	72.28	
ℓ_e (m), entrance length of LWL	62.54	
d (m), draft	6.370	
$\varepsilon = \ell_e / \ell$	0.8653	
$b = B/2$ (m), half breadth	10.20	
$\beta = b/\ell$	0.1411	
$\tau = d/\ell$	0.08813	
g (m/s ²), gravity acceleration	9.81	
ρ (kgf·s ² /m ⁴), fresh water density at 15°C	101.87	
∇ (m ³), displacement volume	9649.2	9692.1

Table 5: Comparison of fore ends of sectional area curve and LWL

	Imaginary (A/A_{max}) at FP: $\eta_1(-1)$	b_{LWL}/b : $\eta_0(-1)$
M.No.1	0.08	0.06
M.No.5	0.062	0.005

(2) Equations for $S(\theta)$, $C(\theta)$

We calculate $S(\theta)$ and $C(\theta)$ by each of the three parameters of the fore body, separately:

- 1) $S(\theta)$, $C(\theta)$ by sectional area curve
Suffix "sa" means "sectional area curve".

$$S_{sa}, C_{sa}(\theta) = \frac{2\beta b}{\pi} \sec^3 \theta \int_{-\tau}^0 e^{\chi_0 \sec^2 \theta} d\zeta \int_{-1}^0 \frac{d\eta_1(\zeta)}{d\zeta} \sin, \cos(\chi_0 \zeta \sec \theta) d\zeta \quad (13)$$

This equation (13) comes from the first term of equation (10), equations (8), (6) and (7).

- 2) $S(\theta)$, $C(\theta)$ by section form
Suffix "sf" means "section form".

$$S_{sf}, C_{sf}(\theta) = \frac{2\beta b}{\pi} \sec^3 \theta \int_{-\tau}^0 \left(1 + \frac{2\zeta}{\tau}\right) e^{\chi_0 \sec^2 \theta} d\zeta \int_{-1}^0 \frac{d(\eta_0(\zeta) - \eta_1(\zeta))}{d\zeta} \sin, \cos(\chi_0 \zeta \sec \theta) d\zeta \quad (14)$$

This equation (14) comes from the second term of equation (10), equations (8), (6) and (7).

- 3) $S(\theta)$, $C(\theta)$ by fore end
Suffix "fe" means "fore end".

$$S_{fe}, C_{fe}(\theta) = \frac{2\beta b}{\pi} \sec^3 \theta \int_{-\tau}^0 \eta(-1, \zeta) e^{\chi_0 \sec^2 \theta} d\zeta \sin, \cos\{(-1 + \varepsilon_b) \chi_0 \sec \theta\} \quad (15)$$

This equation (15) comes from equation (10) at $\xi = -1$, equations (9), (6) and (7).

- 4) $S(\theta)$, $C(\theta)$ by fore body total
When we calculate the wave-making resistance due to the fore body total, $S, C(\theta)$ by each of the three parameters are summed as shown in equation (16). The summed S, C are input into equation (3). Suffix "t" means "total".

$$S_t, C_t(\theta) = S_{sa}, C_{sa}(\theta) + S_{sf}, C_{sf}(\theta) + S_{fe}, C_{fe}(\theta) \quad (16)$$

- (3) Numerical calculation of $S(\theta)$, $C(\theta)$ and R_w
The equation to calculate wave-making resistance (3) can be described as equation (17):

$$R_w = \pi \rho V^2 \int_0^{\pi/2} [(S'(\theta))^2 + (C'(\theta))^2] d\theta \quad (17)$$

where

$$S'(\theta), C'(\theta) = (S(\theta), C(\theta)) \cdot \{\cos(\theta)\}^{3/2} \quad (18)$$

The integrand of equation (17) $[(S'(\theta))^2 + (C'(\theta))^2]$ fluctuates with high frequency at the θ near $\pi/2$. An example is shown in Figure 15. At that θ range, a mean line was drawn as shown in Figure 16, and the mean line was used for the integration. At the other range, Simpson's equation with interval $(\pi/2)/10^4$ was used for the integration.

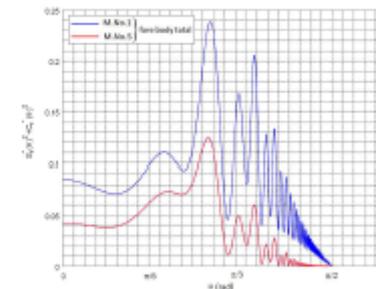


Figure 15: Integrand $[(S'(\theta))^2 + (C'(\theta))^2]$ at $F_n = 0.25$.

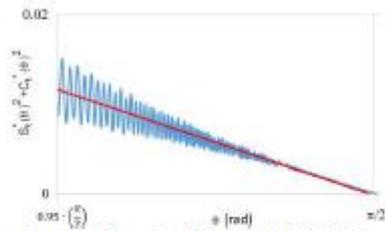


Figure 16: Mean line of integrand $[S_1(\theta)]^2 + [C_1(\theta)]^2$ at $F_{11} = 0.25$ near $\pi/2$, of M.No.1.

5.4. Results of calculation

Figures 17 and 18 show the calculated wave-making resistance coefficients for M. No. 1 and M. No. 5 in the form $\bar{R}_w - r_{iw}$.

In each figure, the following four r_{iw} are shown:

1. r_{iw} due to "sectional area curve: sa"
2. r_{iw} due to "section form: sf"
3. r_{iw} due to "fore end: fe"
4. r_{iw} due to "fore body total: t"

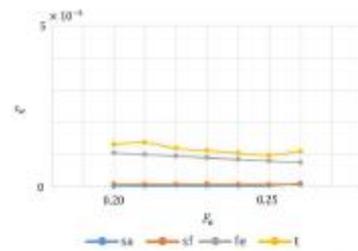


Figure 17: Calculated wave-making resistance coefficient r_{iw} for M.No.1.

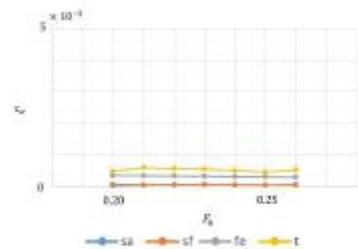


Figure 18: Calculated wave-making resistance coefficient r_{iw} for M.No.5.

6. Discussion

6.1. Reliability of theoretical calculation results

The target of our present study is the large difference in the residual resistance coefficient obtained by model tests between M.No.1 and M.No.5: $(\Delta r_w)_{test\ results}$.

We can see the difference clearly in Figure 19.

As already explained in section 4.2, the difference is that in the wave-making resistance coefficient. So, we can compare the difference with the difference in calculated wave-making resistance coefficient: $(\Delta r_w)_{calculated}$.

From Figure 19, we know that the $(\Delta r_w)_{calculated}$ is almost equal to the $(\Delta r_w)_{test\ results}$ not only qualitatively but also quantitatively.

From the result, we can conclude that the linear wave-making resistance theory we have adopted for our present study is reliable enough.

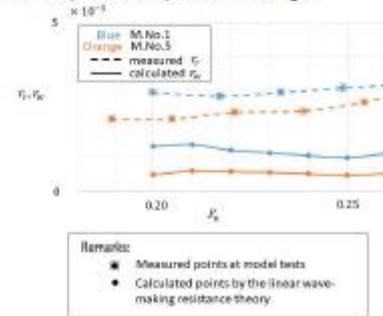


Figure 19: Comparison of calculated results with test results.

6.2. Cause of large wave-making resistance difference between M. No. 1 and M. No. 5

To investigate the contents of the large difference $(\Delta r_w)_{test\ results}$, we compare the following three r_{iw} between M.No.1 and M.No.5 in Figures 20, 21 and 22.

1. Calculated r_{iw} due to "sectional area curve"
2. Calculated r_{iw} due to "section form"
3. Calculated r_{iw} due to "fore end"

From the Figures, we can know that

- The differences in 1 and 2 are very small
- On the other hand, the difference in 3 is very large

From the result, we can realize that the large difference in the residual resistance coefficients obtained by model tests between M.No.1 and M.No.5: $(\Delta R_r)_{test\ results}$ is caused by the difference of fore end form.

The difference of the fore end form is shown in Figures 4, 5 and 6, and Table 5. The main difference is in the fore end breadth of water line at LWL and below it.

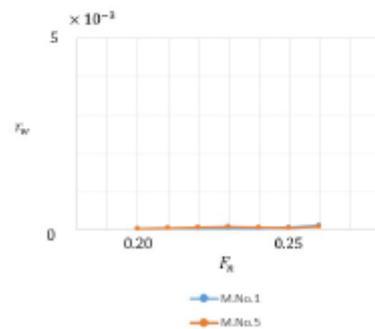


Figure 20: Comparison of calculated wave-making resistance coefficient r_w due to "sectional area curve"

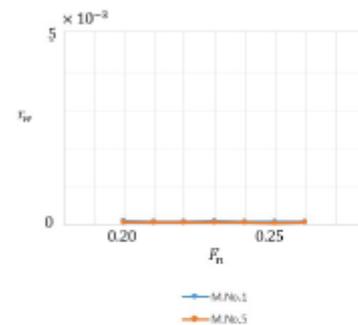


Figure 21: Comparison of calculated wave-making resistance coefficient r_w due to "section form"

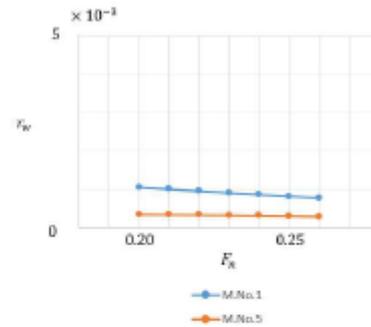


Figure 22: Comparison of calculated wave-making resistance coefficient r_w due to "fore end"

7. Conclusions

The objective of our study was to clarify the reason why the wave-making resistance of M.No.5 is so lower compared with that of M.No.1 at Froude number lower than 0.26.

For the objective:

First, we have decided to use the linear wave-making resistance theory for our study.

Second, we have numerically expressed the hull forms for the convenience of calculation.

Third, we have evaluated the reliability of our theoretical calculation results by comparing them with the model test results.

Fourth, we have studied which parameter of the fore body form has caused such a large difference in the wave-making resistance between M.No.1 and M.No.5 at Froude number below 0.26, using the theory.

The followings are our conclusions:

(1) It has been confirmed that our results of calculation by the linear wave-making resistance theory is reliable enough for our present purpose.

(2) It has been clarified that the large difference in residual resistance between M.No.1 and M.No.5 at Froude number below 0.26 is caused by the difference in fore end form.

(3) Difference of the fore end form means mainly the difference in the fore end breadth of waterlines on and near LWL.

8. Acknowledgements

We would like to thank Prof. Anísio Brasileiro de Freitas Dourado, Rector of UFPE; Prof. Ernani Carvalho, Pro-Rector of Propeq, UFPE; Prof. Cesar Henrique Gonzalez, Coordinator of Graduate

Program of Mechanical Engineering-PPGEM/UFPE; Prof. Flávio Augusto Bueno Figueiredo, Chief of Department of Mechanical Engineering for their supports of and generosity for our conducting the study described in this paper at Graduate Program of UFPE. The author L.C.Fabrizio Filho acknowledges the financial support from PROAES/UFPE.

9. References

HAVELOCK, T.H. The Calculation of Wave Resistance. Proc. Roy. Soc., pages 514-521, 1934.

HAVELOCK, T.H. The Theory of Wave Resistance. Proc. Roy. Soc., pages 339-348, 1932.

HAVELOCK, T.H. Wave Patterns and Wave Resistance. TINA, pages 430-446, 1924.

LUNDE, J.K. On the Linearized Theory of Wave Resistance for Displacement Ships in Steady and Accelerated Motion. T. SNAME., pages 25-85, 1951.

YAMANO, T. Stem forms for fine ships: ease of construction or improved propulsive performance. Proc. 6th International Marine Design Conference, Newcastle, pages 361-375, 1997.