

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

DEAN CARLO ZIMMERMANN

**INFLUÊNCIA DO BULBO NO COMPORTAMENTO DE MAR DE UM CASCO DA
SÉRIE 60 EM ONDAS DE PROA**

Joinville, 2015

DEAN CARLO ZIMMERMANN

**INFLUÊNCIA DO BULBO NO COMPORTAMENTO DE MAR DE UM CASCO DA
SÉRIE 60 EM ONDAS DE PROA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville, 2015

AGRADECIMENTOS

*Agradeço a todos que contribuíram no decorrer
desta jornada de 6 anos da minha graduação,
em especial:*

A Deus, a quem devo minha vida.

*A minha família que sempre me apoiou
nos estudos e nas escolhas tomadas.*

*Ao orientador Professor Thiago Pontin Tancredi
que teve papel fundamental na elaboração deste
trabalho.*

Aos meus colegas pelo companheirismo.

RESUMO

O estudo do comportamento no mar é parte integrante no projeto de um navio. Através dele o conforto da tripulação, a segurança e o desempenho operacional são avaliados. O bulbo geralmente usado para diminuir a resistência ao avanço do casco, pode também ser utilizado para aprimorar no comportamento no mar. Assim, o presente trabalho procura avaliar a influência da inclusão do bulbo no comportamento no mar de um casco da estudada e conhecida Série 60 com coeficiente de bloco de 0,7, a qual originalmente não possuía proa bulbosa. Assim sendo, o objetivo do trabalho é inferir como a adição de um bulbo altera a resposta dinâmica em heave e pitch em ondas de proa para um casco dessa série. Os bulbos foram modelados e inseridos através do programa Rhinoceros com o auxílio do plug-in Orca 3D. Os bulbos possuem dimensões nas quais foram adimensionalizados com relação as dimensões do casco estudado, criando-se então parâmetros nos quais várias formas de bulbos puderam ser comparadas. Para obter-se a resposta dinâmica de cada geometria estudada, usou-se o solver de difração, antigamente denominado AQWA, onde procurou-se usar a melhor malha para cada caso na execução das simulações. Cada casco teve então seu RAO (Responde Amplitude Operator) avaliado para três números de Froude: 0, 0,15 e 0,25. Finalmente, o que notou-se foi que o bulbo alterou a resposta dos dois movimentos estudados. Porém, para o caso de *pitch* a influência foi maior e observou-se foi um amortecimento da amplitude do movimento para frequências nas quais a amplitude do movimento era alta sem a adição do bulbo, bem como um deslocamento da frequência natural em algumas condições. Enquanto para *heave*, a alteração limitou-se a deslocar a frequência natural para alguns casos e não observou-se nenhum amortecimento nesse movimento.

Palavras Chave: Série 60, resposta dinâmica, bulbo e comportamento no mar.

ABSTRACT

Seakeeping study is an important part of ship design process which main design requisites as crew comfort, operational security and performance are evaluated. A ship bulb, which is usually used for improvement in ship's propulsion performance, also can be designed to improve ship's seakeeping. So, this work tries to infer a Series 60, with a block coefficient of 0.7, hull seakeeping performance by adding various types of bulbs forms and dimensions. The main objective is to evaluate how a bulb with controlled parameters may shift the Response Amplitude Operator of this hull. The RAO of the Series 60 hull was computed in *heave* and *pitch* motions for head waves. To create the bulbs models, add them to the hull and take its dimensions, Rhinoceros 4 with the Orca 3D plugin software were used. Bulbs sizes were dimensionalized with Series 60 hull dimensions creating then parameters which various bulbs forms could be compared. To compute each RAO that each hull has when a bulb were inserted, a diffraction solver named AQWA was utilized where the best mesh for each bulb insert was used to perform the simulation. Then through AQWA each new hull created had its RAO computed for three Froude's number: 0, 0.15 and 0.25 in scale model. Finally, what can be stated is that a bulb can modify the dynamic response of the hull studied for both motions, but *pitch* response was the most affected by the bulb addition. It can be noted in some cases is a shifting in the natural frequency of the hull as well as a damp for some frequencies where amplitudes were high for the bare hull. While damping in *heave* was not observed, only shifting in the highest amplitudes were detected.

Key words: RAO, Series 60, seakeeping and bulb.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro de Mar	19
Figura 2 - Graus de Liberdade de um Navio	21
Figura 3 - Espectro de Resposta.....	24
Figura 4 - Geometria do Bulbo	26
Figura 5 - Fluxograma do Desenvolvimento do Trabalho.....	32
Figura 6 - Parâmetros Principais para Forma da Série 60.	38
Figura 7 - Casco Série 60 Renderizado.	39
Figura 8 - Resultados para Vários Tamanhos de Malha: RAO em <i>Heave</i> , $F_n=0$	43
Figura 9 - Resultado para <i>Heave</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0$	45
Figura 10 - Resultado para <i>Heave</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,05$	45
Figura 11 - Resultado para <i>Heave</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,1$	46
Figura 12 – Resultado para <i>Heave</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,15$	46
Figura 13 - Resultado para <i>Heave</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,2$	47
Figura 14 – Resultado para <i>Heave</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,25$	47
Figura 15 - Resultado para <i>Pitch</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0$	48
Figura 16 - Resultado para <i>Pitch</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,05$	49
Figura 17 - Resultado para <i>Pitch</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,10$	49
Figura 18 - Resultado para <i>Pitch</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,15$	50
Figura 19 - Resultado para <i>Pitch</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n =$ $0,20$	50
Figura 20 - Resultado para <i>Pitch</i> e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,25$	51

Figura 21 - Formas de Bulbo.....	53
Figura 22 - Forma do Bulbo 1.....	53
Figura 23 - Forma do Bulbo 2.....	54
Figura 24 - Forma do Bulbo 3.....	55
Figura 25 - Formas de Bulbo 4.....	55
Figura 26 - Variação do Comprimento dos Bulbos.....	57
Figura 27 - Variação da Boca dos Bulbos.....	58
Figura 28 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 1 A-D, $F_n=0$	60
Figura 29 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 1 A-D, $F_n=0$	61
Figura 30 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 1 A-D, $F_n=0.15$	61
Figura 31 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 1 A-D, $F_n=0.15$	62
Figura 32 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 1 A-D, $F_n=0.25$	62
Figura 33 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 1 E-H, $F_n=0.25$	63
Figura 34 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 1 E-H, $F_n=0$	64
Figura 35 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 1 E-H, $F_n=0$	65
Figura 36 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 1 E-H, $F_n=0.15$	65
Figura 37 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 1 E-H, $F_n=0.15$	66
Figura 38 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 1 E-H, $F_n=0.25$	66
Figura 39 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 1 E-H, $F_n=0.25$	67
Figura 40 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 1 I-L, $F_n=0$	69
Figura 41 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 1 I-L, $F_n=0$	69
Figura 42 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 1 I-L, $F_n=0.15$	70
Figura 43 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 1 I-L, $F_n=0.15$	70
Figura 44 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 1 I-L, $F_n=0.25$	71
Figura 45 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 1 I-L, $F_n=0.25$	71
Figura 46 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 2 A-D, $F_n=0$	73
Figura 47 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 2 A-D, $F_n=0$	73
Figura 48 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 2 A-D, $F_n=0.15$	74
Figura 49 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 2 A-D, $F_n=0.15$	74
Figura 50 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 2 A-D, $F_n=0.25$	75
Figura 51 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 2 A-D, $F_n=0.25$	75
Figura 52 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 2 E-H, $F_n=0$	77
Figura 53 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 2 E-H, $F_n=0$	77
Figura 54 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 2 E-H, $F_n=0.15$	78

Figura 55 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 2 E-H, $F_n=0.15$	78
Figura 56 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 2 E-H, $F_n=0.25$	79
Figura 57 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 2 E-H, $F_n=0.25$	79
Figura 58 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 3 A-D, $F_n=0$	81
Figura 59 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 3 A-D, $F_n=0$	81
Figura 60 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 3 A-D, $F_n=0,15$	82
Figura 61 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 3 A-D $F_n=0,15$	82
Figura 62 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 3 A-D, $F_n=0,25$	83
Figura 63 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 3 A-D, $F_n=0,25$	83
Figura 64 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 4 A-D, $F_n=0$	85
Figura 65 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 4 A-D, $F_n=0$	85
Figura 66 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 4 A-D, $F_n=0.15$	86
Figura 67 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 4 A-D, $F_n=0.15$	86
Figura 68 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 4 A-D, $F_n=0.25$	87
Figura 69 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 4 A-D, $F_n=0.25$	87
Figura 70 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 4 E-H, $F_n=0$	89
Figura 71 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 4 E-H, $F_n=0$	89
Figura 72 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 4 E-H, $F_n=0,15$	90
Figura 73 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 4 E-H, $F_n=0,15$	90
Figura 74 - Resultados para <i>Heave</i> Bulbo 4 E-H, $F_n=0,25$	91
Figura 75 - Resultados para <i>Pitch</i> Bulbo 4 E-H, $F_n=0,25$	91
Figura 76 - Análise do Parâmetro de Comprimento em <i>Heave</i> , $F_n=0$	93
Figura 77 - Análise do Parâmetro de Comprimento em <i>Pitch</i> - Bulbo 4-H	94
Figura 78 - Análise do Parâmetro de Comprimento em <i>Pitch</i> - Bulbo 1-L.....	95
Figura 79 - Análise do Parâmetro de Volume em <i>Heave</i> , $F_n=0$	96
Figura 80 - Análise do Parâmetro de Volume em <i>Pitch</i> , $F_n=0$	97
Figura 81 - Comparação ente a variação de calado e bulbos em <i>Heave</i> , $F_n=0$	98
Figura 82 - Comparação ente a variação de calado e bulbos em <i>Heave</i> , $F_n=0,25$...98	
Figura 83 - Comparação ente a variação de calado e bulbos em <i>Pitch</i> , $F_n=0$	99
Figura 84 - Comparação ente a variação de calado e bulbos em <i>Pitch</i> , $F_n=0,25$	99
Figura 85- Análise do Parâmetro de Boca em <i>Heave</i> , $F_n=0$	100
Figura 86 - Análise do Parâmetro de Boca em <i>Heave</i> , $F_n=0,15$	101
Figura 87 - Análise do Parâmetro de Boca em <i>Heave</i> , $F_n=0,25$	101
Figura 88 - Análise do Parâmetro de Boca em <i>Pitch</i> , $F_n=0$	102

Figura 89 - Análise do Parâmetro de Boca em <i>Pitch</i> , $F_n=0,15$	103
Figura 90 - Análise do Parâmetro de Boca em <i>Pitch</i> , $F_n=0,25$	103
Figura 91 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Heave</i> , $F_n=0$	104
Figura 92 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Heave</i> , $F_n=0,15$	105
Figura 93 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Heave</i> , $F_n=0,25$	105
Figura 94 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Pitch</i> , $F_n=0$	106
Figura 95 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Pitch</i> , $F_n=0,15$	107
Figura 96 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Pitch</i> , $F_n=0,25$	107
Figura 97 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Heave</i> , $F_n=0$	108
Figura 98 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Heave</i> , $F_n=0,15$	109
Figura 99 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Heave</i> , $F_n=0,25$	109
Figura 100 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Pitch</i> , $F_n=0$	110
Figura 101 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Pitch</i> , $F_n=0,15$	111
Figura 102 - Análise do Parâmetro de Calado em <i>Pitch</i> , $F_n=0,25$	111
Figura 103 - Análise da Forma de Bulbo em <i>Heave</i> , $F_n=0$	113
Figura 104 - Análise da Forma de Bulbo em <i>Heave</i> , $F_n=0,25$	113
Figura 105 - Análise da Forma de Bulbo em <i>Pitch</i> , $F_n=0$	114
Figura 106 - Análise da Forma de Bulbo em <i>Pitch</i> , $F_n=0,25$	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geometria do Bulbo	26
Tabela 2 - Adimensionalização dos parâmetros geométricos do bulbo.	27
Tabela 3 - Propriedades do cilindro consideradas na análise.	33
Tabela 4 – RAO de <i>heave</i> para movimento vertical do cilindro para diferentes malhas *	34
Tabela 5 - Geometria dos Cilindros Simulados	36
Tabela 6 - Massa Adicional dos Cilindros	37
Tabela 7 - Comparação entre Modelo Experimental e Modelo Computacional.....	40
Tabela 8 - Comparação com o Modelo Base (Todd 1963).....	41
Tabela 9 - Malhas Utilizadas na Simulação.....	42
Tabela 10 - Dimensões Iniciais dos Bulbos.....	57
Tabela 11 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 1 A-D.....	59
Tabela 12 – Parâmetros do Bulbo 1 A-D.....	60
Tabela 13 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 1 E-H.....	63
Tabela 14 - Parâmetros do Bulbo 1 E-F.....	64
Tabela 15 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 1 J-L.....	68
Tabela 16 - Parâmetros do Bulbo 1 I-L	68
Tabela 17 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 2 A-D.....	72
Tabela 18 - Parâmetros do Bulbo 2 A-D	72
Tabela 19 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 2 E-H.....	76
Tabela 20 - Parâmetros do Bulbo 2 E-H	76
Tabela 21 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 3 A-D.....	80
Tabela 22 - Parâmetros do Bulbo 3 A-D	80
Tabela 23 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 4 A-D.....	84
Tabela 24 - Parâmetros do Bulbo 4 A-D	84
Tabela 25 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 4 E-H.....	88
Tabela 26 - Parâmetros do Bulbo 4 E-H	88
Tabela 27 - Resumo da Influência dos Parâmetros do Bulbo	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

A_{BT}	Área da seção transversal do bulbo localizada na perpendicular de vante.
A_{MS}	Área da seção mestra da embarcação.
B_B	Máxima boca do bulbo na perpendicular de vante.
B_{MS}	Boca do navio na secção mestra.
C_{ABT}	Parâmetro de seção transversal do bulbo.
C_{BB}	Parâmetro de boca do bulbo.
C_{LPR}	Parâmetro de comprimento do bulbo.
C_{VPR}	Parâmetro do volume a vante do bulbo.
C_{VT}	Parâmetro do volume total do bulbo.
C_{ZB}	Parâmetro de calado do bulbo.
L	Comprimento do modelo.
L_{PP}	Comprimento entre Perpendiculares.
L_{PR}	Comprimento do bulbo a frente da perpendicular de vante.
S_z	Espectro de resposta do cruzamento espectral.
S_ζ	Espectro de reposto do mar.
T_{FP}	Calado da embarcação.
V_{PR}	Volume do bulbo a frente da perpendicular de vante.
V_{VT}	volume total do bulbo.
V_{WL}	deslocamento da embarcação.
$Y_{z\zeta}$	Espectro de resposta do casco para <i>heave</i> .
Z_B	Altura do ponto mais a vante do bulbo.
ζ_A	Amplitude da onda.
θ_A	Amplitude de <i>pitch</i> .
ρ_c	Densidade do cilindro.
ρ_w	Densidade da água.
ω_n	Frequência natural.

B/T	Razão de boca sobre o calado .
Fn	Número de Froude.
h	Profundidade local.
h_c	Altura do cilindro.
k	Número de onda.
L/B	Razão de comprimento sobre a boca.
L _{pp}	Comprimento entre perpendiculares.
η_3	Amplitude de reposta em <i>heave</i> .
η_5	Amplitude de reposta em <i>pitch</i> .
A	Área da seção do cilindro.
Δ	Massa de água deslocada pelo casco.
∇	Volume de água deslocado pelo casco.
λ	Comprimento de onda.
Θ	Meia nau do casco.
LCB	Distancia longitudinal do centro de carena.
B/H	Razão entre boca e calado.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Objetivo Geral	17
1.2. Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Série 60.....	18
2.2. Espectro de Mar	18
2.3. Comportamento de Mar	20
2.3.1. Massa Adicional Hidrodinâmica.....	21
2.3.2. Princípio da Superposição Linear	21
2.3.3. <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i>	22
2.3.4. Espectro de Resposta	22
2.4. Bulbo	24
2.5. Métodos Numéricos	27
2.5.1. Método de Faixas	29
2.5.2. Método dos Painéis	30
2.5.3. Comparação entre Métodos	30
2.6. Ferramenta Computacional	31
3. DESENVOLVIMENTO	32
3.1. Simulação de um Cilindro Oscilando na Vertical.....	33
3.1.1. Procedimento para Determinação da Frequência Natural.....	33
3.1.2. Determinação da Malha.....	34
3.1.3. Frequência Natural de <i>heave</i> de um Cilindro Vertical.....	35
3.2. Simulação computacional do casco da Série 60 original	37
3.2.1 Características do Modelo Estudado	38
3.2.2. Calibração das Características Inerciais do Modelo	41
3.2.4. Simulações	44

4. RESULTADOS	52
4.1. Geração das Formas dos Bulbos	52
4.1.1. Variação das formas dos Bulbos	57
4.2. Simulações.....	59
4.2.1. Resultados para Bulbo 1 A-D	59
4.2.2. Resultados para Bulbo 1 E-H	63
4.2.3. Resultados para Bulbo 1 I-L	67
4.2.4. Resultados para Bulbo 2 A-D	72
4.2.5. Resultados para Bulbo 2 E-H	76
4.2.6 Resultados para Bulbo 3 A-D	80
4.2.7. Resultados para Bulbo 4 A-D	84
2.4.8. Resultados para Bulbo 4 E-H	88
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	92
5.1. Parâmetro de Comprimento	92
5.2. Parâmetro de Volume	95
5.2.1. Análise da Variação de Calado.....	97
5.3. Parâmetro de Boca	100
5.4. Parâmetro do Calado	104
5.5. Parâmetro de Área de Seção.....	108
5.6. Forma do Bulbo.....	112
6. CONCLUSÃO	116
REFERÊNCIAS	118

1.INTRODUÇÃO

O projeto de um navio é um processo complexo, cujo desenvolvimento passa por várias etapas, em um procedimento ordenado, racional e iterativo. Entre essas diversas etapas está a avaliação do comportamento no mar da embarcação, também conhecida por análise de *seakeeping*.

A determinação do comportamento no mar é fundamental para assegurar o desempenho operacional do navio e o conforto da tripulação, pois está diretamente associado ao nível de movimento e aceleração existentes em diferentes pontos do navio, quando sujeitos a diferentes estados de mar.

Tradicionalmente, nas fases iniciais do projeto, o maior esforço é realizado no estudo da dinâmica da embarcação em águas calmas. No entanto, é possível e vantajoso considerar o comportamento em ondas desde a fase inicial do projeto.

De fato a maior parte dos navios navega durante grande parte do tempo em estados do mar que lhes induzem movimentos e esforços estruturais. Logo, navios com boas características de comportamento no mar são geralmente mais seguros e econômicos.

A interação entre o casco e as ondas podem gerar movimentos relativos de grande amplitude e acelerações a embarcação causando danos na estrutura ou em equipamentos a bordo. Além disso, outros problemas associados a esses movimentos são:

- *a saída do hélice da água, o que origina sobrecargas nos motores;*
- *acelerações que induzem esforços inerciais extras na carga e equipamentos, como por exemplo linhas de ancoragem;*
- *enjoo na tripulação (ou passageiros) degradando a sua capacidade para executar as tarefas e o conforto da viagem.*

Esses problemas podem ser identificados e corrigidos (ou pelo menos mitigados) durante o projeto do navio, idealmente durante a fase do projeto conceitual da embarcação.

O presente trabalho se insere neste contexto, pois avalia a influência da inclusão do bulbo no comportamento do mar de uma embarcação clássica, permitindo a engenheiros e projetistas mensurar o impacto dessa inclusão no comportamento no mar, ainda na fase conceitual do projeto de navios convencionais.

O bulbo é uma parte do casco localizada na proa do navio projetado para alterar o fluxo da água ao redor do casco criando ondas que alteram o campo de pressão, eventualmente, reduzindo a parcela de resistência de onda.

Porém, o bulbo também aumenta a superfície molhada do casco, aumentando assim a resistência friccional do casco. Entretanto, como em velocidades que estabelecem números de Froude superiores a 0,35, a resistência de ondas tem contribuição predominante na resistência total e é nesse intervalo que os benefícios do bulbo aparecem, Bertram e Schneekluth (1998).

A redução da resistência ao avanço do casco pode ser associada a um ganho de velocidade e/ou diminuição do consumo de combustível, Bertram e Schneekluth (1998).

Muitos trabalhos analisam a influência do bulbo na resistência ao avanço de embarcações convencionais. Assim, propõe-se no presente trabalho, a variação de alguns dos parâmetros que descrevem a geometria do bulbo a fim de prever a influência que essa variação tem nas repostas dinâmicas de *heave* (afundamento) e *pitch* (arfagem) da embarcação em ondas de proa.

Como a determinação do comportamento de embarcações no mar é um problema complexo para ser resolvido analiticamente, a utilização de modelos numéricos é uma abordagem comumente empregada.

Dentre as várias abordagens numéricas existentes, será utilizado o método dos painéis, o qual permite capturar melhor a influência da geometria ou tridimensionalidade do casco se comparado a outros métodos, como o método de faixas

Para a implementação do método dos painéis será utilizado o solver de difração, antigamente denominado AQWA, que atualmente está incorporado ao Workbench da Ansys. Essa escolha se pauta na robustez e facilidade de utilização da ferramenta.

É importante observar que o método de difração permite calcular as respostas lineares de corpos flutuantes oscilando sobre a influência de ondas regulares com e

sem velocidades de avanço, cuja utilização dos resultados baseia na Teoria Linear de Ondas.

Além dos artigos específicos disponíveis na literatura, esse trabalho tem sua fundamentação teórica, a qual será discutida no capítulo 2, baseada nos clássicos livros Faltinsen (1990) e Zubaly (1996). Enquanto Zubaly (1996) fornece uma visão mais geral sobre ondas e dinâmica de navios, Faltinsen (1990) é uma leitura mais aplicada; abordando desde os fundamentos até o cruzamento espectral.

1.1. Objetivo Geral

Inferir qualitativamente a influência das formas do bulbo nas respostas dinâmicas *heave* e *pitch* de um casco tipo da série 60 com coeficiente de bloco (C_b) de 0.7 em ondas de proa.

1.2. Objetivos Específicos

- Compreender os fenômenos envolvidos em uma estrutura que flutua quando, sobre a ação de ondas como massa adicional, ressonância e amortecimento.
- Estudar analiticamente a oscilação e obter o *Response Amplitude Operator* (RAO) para o movimento de *heave* de um cilindro.
- Simular o mesmo cilindro na ferramenta AQWA e comparar com os resultados analíticos a fim de verificar a adequabilidade da utilização do programa.
- Simular o casco proposto sem bulbo e comparar com os dados experimentais disponíveis na literatura.
- Desenvolver um procedimento que permita variação sistemática das formas do bulbo e que permita a fácil integração do bulbo modelado com o casco originalmente estudado.
- Realizar análises paramétricas considerando diferentes formas de bulbo
- Desenvolver uma métrica que permita comparar os diferentes resultados obtidos e que permite obter a influência das formas do bulbo no comportamento de *heave* e *pitch* de uma embarcação convencional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo serão descritas as teorias, métodos e ferramentas que foram utilizadas para o desenvolvimento do trabalho. Além das justificativas e comparações para a escolha dos métodos e do tipo de casco escolhido.

2.1. Série 60

Séries sistemáticas são estudos padronizados que visam estabelecer resultados experimentais confiáveis para um conjunto de cascos semelhantes, que podem então ser utilizados por engenheiros no projeto de novas embarcações.

O custo de elaboração de uma série sistemática pode ser significativamente alto, dependendo de quantas variações e de quantos parâmetros são analisados. Por essa razão, poucas são as séries sistemáticas existentes disponíveis na literatura.

De acordo com Todd (1963) os experimentos da série 60 foram iniciados em 1948 e foram conduzidos no David Taylor Model Basin, um dos maiores tanques de reboque do mundo, localizado nos Estados Unidos. Conforme o tempo passou, esforços foram feitos para que todos os resultados gerados nos experimentos fossem unificados em um único volume facilitando o uso e consulta. Os primeiros estudos descreviam um bom trabalho preliminar desenvolvido antes mesmo da série ganhar o nome que tem hoje.

Segundo Toda et al. (1988) a geometria da série foi concebida para prover informações sistemáticas no projeto de linha de cascos para navios mercantes com um único propulsor. Originalmente a série não possui bulbo de proa, sendo, portanto, perfeita para a proposta do presente trabalho, além de já ter sido amplamente estudada e analisada, tendo resultados confiáveis disponíveis na literatura.

2.2. Espectro de Mar

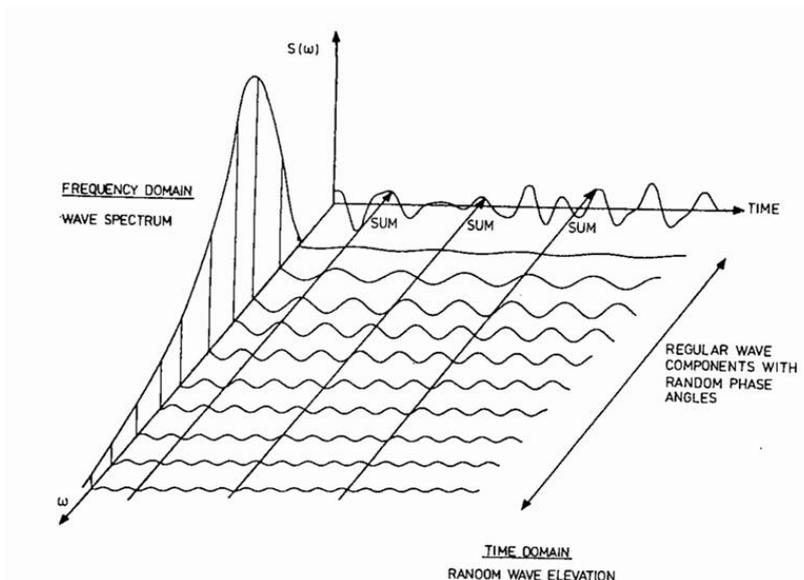
Com a definição do casco a ser estudado, é necessário entender o comportamento dinâmico de uma embarcação no mar. Assim faz-se indispensável entender como um mar irregular (“real”) pode ser descrito por meio de um modelo matemático que possa ser aplicado ao presente trabalho.

Segundo Zubaly (1996), o espectro de mar é um modelo matemático que representa uma ordem estatística para a superfície caótica do mar. Nesta teoria, a superfície do mar pode ser descrita como a soma de infinitas ondas regulares. Neste modelo, o espectro de mar é representado por um gráfico que identifica a quantidade de energia associada a cada uma das frequências possíveis para as ondas regulares.

A energia de uma onda regular pode ser expressa em função da amplitude da onda. Em uma condição de mar real, a energia total é a soma das energias associadas a cada componente de onda regular que está presente na condição de mar real.

Na Figura 1 é mostrado o processo de construção do gráfico do espectro de mar por meio da decomposição do mar real em ondas regulares.

Figura 1 – Espectro de Mar



Fonte: Faltinsen (1990)

A frequência de maior concentração de energia é chamada de “frequência de pico” e varia de acordo com as características da região onde é realizada a análise. Enquanto que a área sob a curva $S(\omega)$ representa a energia total daquele estado de mar, podendo ser diretamente associada à severidade da condição de mar.

2.3. Comportamento de Mar

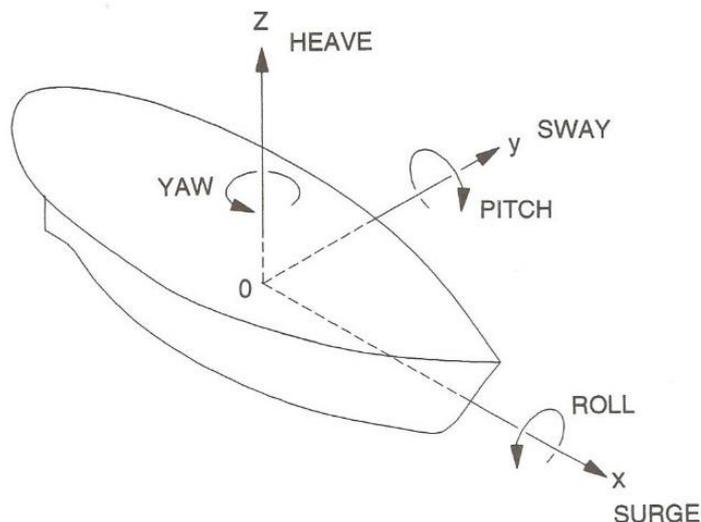
Por comportamento no mar entende-se o estudo de diversas características do movimento complexo que um navio ou sistema oceânico pode apresentar em decorrência de ter sido excitado por um mar irregular. Segundo Zubaly (1996) esses movimentos podem ser avaliados de três maneiras:

- *Teoria hidrodinâmica*
- *Ensaio de modelos em escala reduzida em tanques*
- *Medições dos movimentos do navio em escala real no mar*

Pesquisas nessas três áreas vêm contribuindo para a compreensão do comportamento de navios em ondas irregulares. De acordo com Bertram (2000) esse comportamento é considerado complexo, pois as embarcações possuem seis graus de liberdade para movimentar-se sendo três lineares e três angulares.

Os movimentos lineares são: *surge* (avanço), *sway* (deriva) e *heave* (afundamento) que são movimentos nos eixos longitudinal, transversal e vertical, respectivamente. Enquanto que os movimentos angulares são: *roll* (jogo), *pitch* (arfagem) e *yaw* (guinada) que são movimentos angulares no entorno dos mesmos três eixos, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Graus de Liberdade de um Navio



Fonte: Zubaly (1996).

2.3.1. Massa Adicional Hidrodinâmica

A massa adicional é um efeito que aparece em corpos, quando oscilam com aceleração em um fluido. As partículas fluídas são movimentadas quando um corpo translada ou rotaciona, fazendo assim surgir uma força adicional.

Esses efeitos inerciais aparecem devido a superfície do casco que interage com o fluido. As forças inerciais da água que rodeia o casco são proporcionais à aceleração da superfície do navio e envolve uma massa de água que é acelerada junto com a massa do navio. O valor da massa adicional hidrodinâmica pode ser, às vezes, até cem por cento da massa do corpo parcialmente submerso, por isso essa massa tem uma grande importância para o cálculo do RAO de um casco.

2.3.2. Princípio da Superposição Linear

Um das hipóteses mais importantes no estudo do comportamento no mar de embarcações é o princípio da superposição linear dos efeitos.

Um navio com uma velocidade uniforme ao encontrar ondas regulares, desenvolverá um movimento (resposta) regular. Zubaly (1996). Movimentos regulares resultantes da interação do casco com ondas regulares são condições que podem ser

modeladas por meio de equações que descrevem o movimento de corpos rígidos quando submetidos a forças periódicas.

Porém, o objetivo final do estudo dos movimentos de um navio é prever o comportamento que esse terá em condições reais de mar; como aquelas representadas por um espectro de mar. Assim é necessário estabelecer um procedimento para se determinar os movimentos de um navio sujeito a ondas irregulares com base na análise da interação do navio com ondas regulares. .

Essa relação é chamada de princípio da superposição linear. Assim, a resposta de um navio em mar real pode ser determinada a partir da sobreposição linear dos efeitos de cada componente de onda regular que forma o mar real. Esse princípio foi utilizado pela primeira vez no cálculo de movimento de embarcações por St. Denis e Pierson (1953).

Assim o problema de determinação do espectro de resposta de um navio sujeito a um mar real pode ser descrito como a composição de infinitos problemas de determinação da resposta de um navio

2.3.3. *Response Amplitude Operator (RAO)*

De acordo com Zubaly (1996), e conforme discutido na secção anterior, para se fazer uso do princípio da superposição linear, é necessário determinar a resposta do navio para ondas regulares. O conjunto dessas respostas constitui um gráfico normalmente chamado de *Response Amplitude Operator (RAO)*.

É importante observar que o RAO pode expressar a resposta do sistema em termos de deslocamento, velocidade, aceleração ou força em um dado grau de liberdade; cujo valor é calculado para uma onda regular de amplitude unitária. Assim, o presente trabalho se concentra na análise dos RAOs associados aos movimentos de *heave* e *pitch* da embarcação.

2.3.4. Espectro de Resposta

Enquanto o RAO representa a resposta do sistema ao ser excitado por uma onda regular, considerando-se diferentes frequências o Espectro de Resposta representa a resposta do sistema ao ser excitado por um mar irregular.

A representação do Espectro de Resposta segue o mesmo modelo da representação do Espectro de Mar, descrevendo a distribuição da energia do movimento do sistema ao ser excitado por um mar irregular.

O cálculo do espectro de resposta pode ser feito através da operação de convolução descrita pela equação:

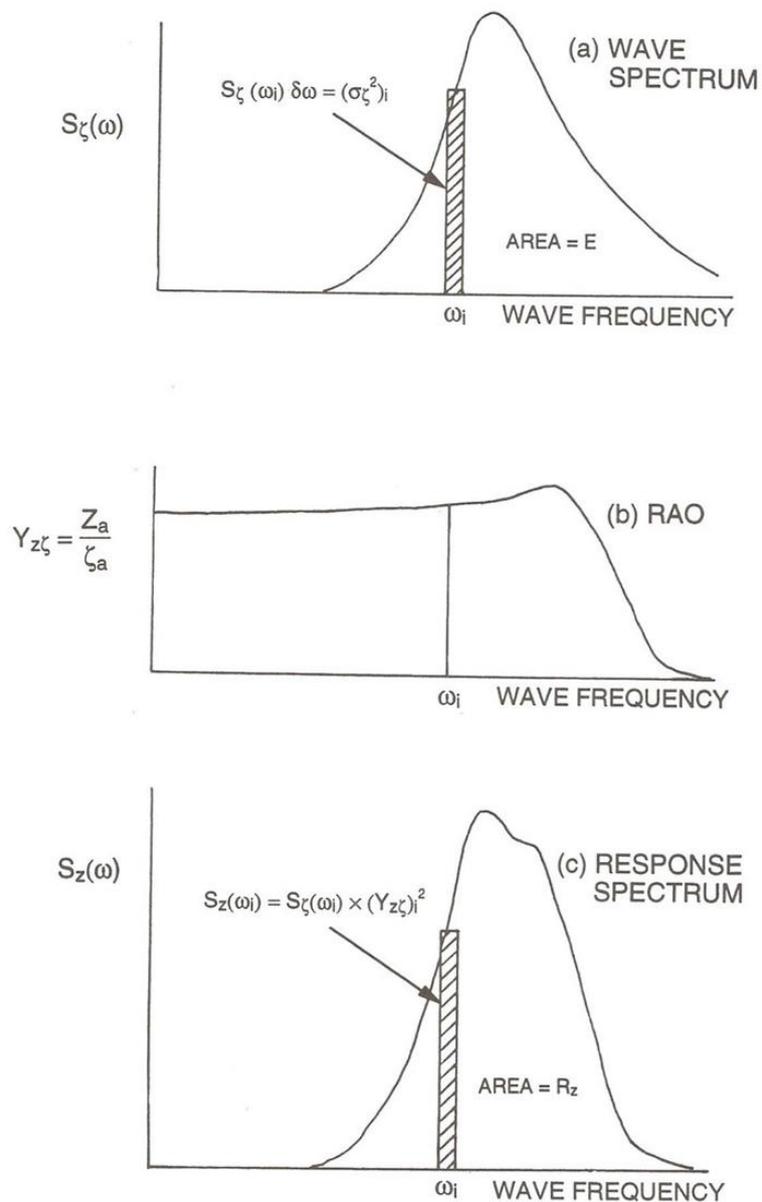
$$S_z(\omega_i) = S_\zeta(\omega_i) * (Y_{z\zeta})_i^2 \quad (1)$$

Onde $S_z(\omega_i)$ é o espectro de resposta, $S_\zeta(\omega_i)$ é o espectro de mar e $(Y_{z\zeta})_i^2$ é o quadrado do RAO, que nesse caso específico refere-se ao movimento de *heave*, denotado pela letra z.

O procedimento para o cálculo do espectro de resposta é mostrado na Figura 3. Cada componente de onda regular considerada no espectro de mar real é representado por um elemento de área com frequência ω_i . Assim, multiplicando o espectro de onda na ordenada de ω_i pelo quadrado do RAO mostrado na parte (b), obtém-se, por meio da equação (1), o ponto do espectro de resposta correspondente a frequência ω_i . Repetindo o procedimento para todo o intervalo de frequências obtém-se o espectro de resposta, representado na parte (c) da Figura 3.

É interessante observar que, por se tratar de uma operação de convolução, as mesmas propriedades estatísticas aplicáveis ao Espectro de Mar podem ser aplicadas ao Espectro de Resposta.

Figura 3 - Espectro de Resposta



Fonte: Zubaly (1996)

2.4. Bulbo

Entre os diversos trabalhos que discutem a influência do bulbo, Bertram e Schneekluth (1998) discute muitos dos fundamentos que balizam esse trabalho. Historicamente concebido para ser uma “arma” que permitiria abalroar outros navios, o bulbo de proa se tornou parte integrante da maioria dos navios mercantes de hoje.

Métodos experimentais comparativos mostraram que um navio que possui bulbo de proa requer, em geral, menos potência propulsiva para alcançar as velocidades de serviço usualmente empregadas.

Ainda segundo Bertram e Schneekluth (1998), dentre os diferentes efeitos causados pela inclusão do bulbo ao projeto do navio aqueles de maior interesse para este trabalho (associados ao comportamento no mar), são:

- *De um modo geral, o bulbo aumenta o amortecimento em movimentos de pitch, especialmente quando projetado com essa finalidade. Esse amortecimento é particularmente maior na área de ressonância quando o comprimento da onda é aproximadamente igual ao comprimento do navio.*
- *O navio pode operar sem redução de velocidades mesmo com mares mais severos. Isso deve-se ao fato de que bulbos com formas mais acentuadas no fundo melhoram o desempenho em condições de slamming.*
- *O consumo de combustível é aumentado com o bulbo em mares mais severos, apesar de operar de forma mais suave. Isso deve-se ao fato de que a energia dissipada no amortecimento do movimento deve ser retirada, indiretamente, do sistema propulsivo.*

Em linhas gerais, a redução da resistência de ondas sofrida pelo casco deve-se a interferência destrutiva existente entre as ondas geradas pelo casco e as ondas geradas pelo bulbo.

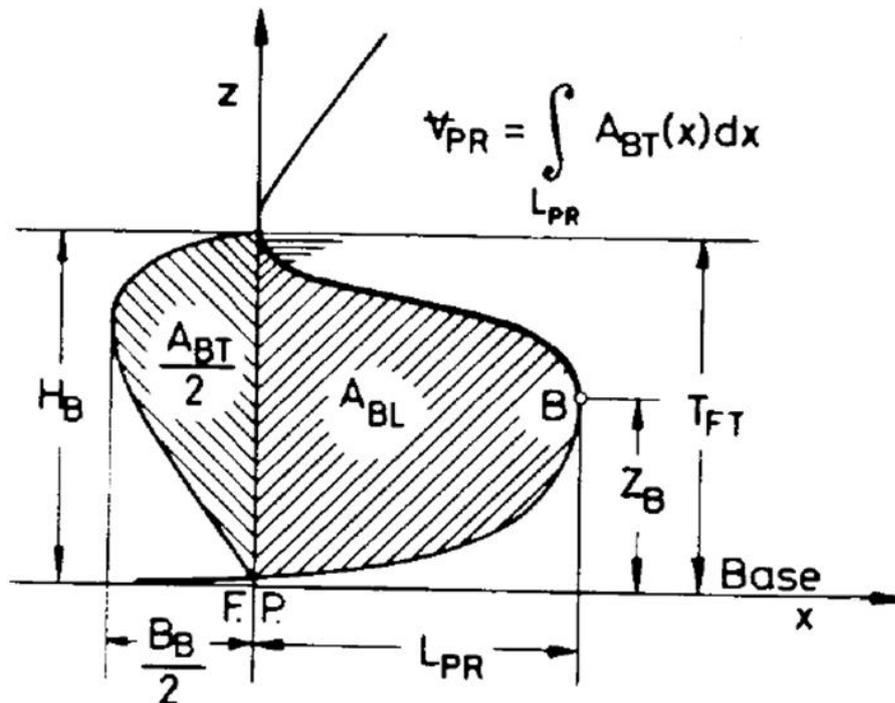
Conforme explica Kracht (1978), O bulbo gera uma onda que se forma a frente da onda gerada pela proa da embarcação. Essa distância no ponto de geração da onda faz com que ambas possam estar em anti-fase. Ou seja, quando o cavado da ondulação do bulbo coincide com a crista da onda da proa, elas são parcialmente anuladas, levando a uma redução na parcela de resistência de ondas gerada pelo navio.

Ainda segundo Kracht (1978), para uma representação correta das propriedades hidrodinâmicas do bulbo, é necessário sistematizar as diferentes formas de bulbos existentes. Assim, a forma do bulbo é dividida em seis parâmetros quantitativos que segundo o autor são suficientes para todos os casos práticos. Todos

esses parâmetros são normalizados pelas dimensões principais do navio no qual o bulbo é incluído. .

Na Figura 4 são mostrados os parâmetros geométricos utilizados na modelagem do bulbo. Na região à esquerda do eixo z são representados os parâmetros que descrevem a secção transversal do bulbo, enquanto que na região à direita são representados os parâmetros que descrevem a secção longitudinal.

Figura 4 - Geometria do Bulbo



Fonte: Kracht (1978)

A Tabela 1 descreve as siglas usada por Kracht (1978) na Figura 4.

Tabela 1 - Geometria do Bulbo

Sigla	Descrição
A_{BL}	Área lateral do Bulbo
$A_{BT}/2$	Área da seção na perpendicular de vante do Bulbo
$B_B/2$	Boca na perpendicular de vante do Bulbo
H_B	Calado do casco
L_{PR}	Comprimento a partir da perpendicular de vante do Bulbo
V_{PR}	Volume do Bulbo
Z_B	Calado do Bulbo

Fonte: Kracht (1978)

Conforme mencionado anteriormente, os parâmetros que descrevem a geometria do bulbo, apresentados na Figura 4 serão adimensionalizados pelos parâmetros que descrevem a geometria do casco do navio, segundo a Tabela 2.

Tabela 2 - Adimensionalização dos parâmetros geométricos do bulbo.

Parâmetro	Descrição	Adimensional
Parâmetro de boca	A máxima boca do bulbo B_B na perpendicular de vante, dividido pela boca do navio na secção mestra B_{MS} .	$C_{BB} = \frac{B_B}{B_{MS}}$
Parâmetro de comprimento	O comprimento além da perpendicular de vante L_{PR} normalizado pelo comprimento entre perpendiculares do navio L_{PP} .	$C_{LPR} = \frac{L_{PR}}{L_{PP}}$
Parâmetro de calado	A altura Z_B do ponto mais a vante do bulbo dividido pelo calado T_{FP} do navio.	$C_{ZB} = \frac{Z_B}{T_{FP}}$
Parâmetro de seção transversal	A área da seção transversal do bulbo localizada na perpendicular de vante A_{BT} dividida pela área da seção mestra da embarcação A_{MS} .	$C_{ABT} = \frac{A_{BT}}{A_{MS}}$
Parâmetro volumétrico	O volume do bulbo a frente da perpendicular de vante V_{PR} dividido pelo deslocamento do navio V_{WL} .	$C_{VPR} = \frac{V_{PR}}{V_{WL}}$
Parâmetro volume total	O volume total do bulbo dividido pelo deslocamento do navio.	$C_{VT} = \frac{V_{VT}}{V_{WL}}$

Fonte: Elaborado pelo autor com os baseado em Kratch (1978).

2.5. Métodos Numéricos

Na grande maioria dos casos, a resolução analítica do problema hidrodinâmico é por demais complexa e laboriosa para ser realizada. Por essa razão, a determinação do comportamento no mar é usualmente feita utilizando-se métodos numéricos.

O desenvolvimento de um método para a previsão das respostas dos navios em ondas inicia pela formulação do problema de condição de fronteira apropriada. Comumente é assumido que o fluido é ideal, o que quer dizer que ele é invíscido e irrotacional, de modo a utilizar a teoria dos escoamentos potenciais. Esta hipótese pode ser justificada porque o problema é essencialmente dependente de forças gravitacionais e as forças viscosas têm um papel de menor importância, Fonseca (2014).

Geralmente o escoamento é delineado pelas equações de Navier-Stokes, elas fazem uma representação do escoamento com densidade constante. Com exceção de casos simples, essas equações diferenciais não-lineares são complexas de resolver. Faz-se necessário a adição de simplificações a elas.

Assume-se então que existe uma função escalar que satisfaz a equação de continuidade em todo o domínio do fluido. Esta função é chamada de potencial de velocidade que existe assumindo as seguintes hipóteses: o fluido é homogêneo, incompressível e invíscido.

Mesmo variando de local para local, as variações da densidade da água do mar são muito pequenas e na prática ela é considerada constante. Além disso, água pode ser considerada incompressível pois o seu módulo de compressibilidade é muito elevado. No caso de um fluido homogêneo e incompressível a equação de conservação de massa reduz-se à equação de continuidade.

No caso geral, o escoamento é representado de forma vetorial. Para que o vetor de velocidade possa ser representado pelo gradiente de uma função escalar (o potencial de velocidade) é preciso que o escoamento não tenha vorticidade, ou seja, o fluido deve ser irrotacional. A vorticidade no fluido é alterada apenas pela ação da viscosidade, surgindo então o requisito de o fluido ser invíscido. Esta hipótese pode ser assumida pois a viscosidade da água é muito pequena e no problema de engenharia que está sendo formulado grande parte do escoamento permanece irrotacional. A equação da continuidade juntamente com as características de fluido invíscido e irrotacional conduzem à equação de Laplace.

O potencial de velocidade é determinado resolvendo o problema de condição de fronteira apropriado. De acordo com Volpini (2012) as condições de contorno utilizadas são:

- *A velocidade normal do fluido no fundo é nula;*
- *Na superfície livre uma partícula de fluido que está na superfície lá permanece e;*
- *A pressão atmosférica é considerada nula pois uma pressão constante não exerce força resultante no corpo.*

Com as condições cinemática e dinâmica aplicadas nas fronteiras, a superfície livre e do casco, o escoamento é governado pela equação de Laplace tridimensional.

Mesmo utilizando a hipótese de o fluido ser invíscido, incompressível e de que o movimento é irrotacional, para geometrias complexas (como a de cascos de navios), esse problema deve ser simplificado até ao ponto em que tenha solução numérica

possível com um esforço computacional aceitável. Existem diferentes técnicas para simplificar a resolução numérica do problema, cuja escolha depende das hipóteses e características do problema a ser analisado, Fonseca (2014).

Nesta seção serão descritos os dois métodos mais utilizados na literatura, discutindo as hipóteses existentes e justificando a escolha do método utilizado no trabalho.

2.5.1. Método de Faixas

De acordo com Moreno (2010), no método de faixas a solução do problema tridimensional é reduzida para a forma bidimensional, consistindo em dividir o navio em várias fatias (ou faixas), sobre as quais as forças hidrodinâmicas são calculadas. Por fim as forças hidrodinâmicas são então calculadas integrando-se as forças de cada uma das faixas ao longo do comprimento do navio.

Na análise das forças hidrodinâmicas em cada seção (ou faixa) do navio, é assumido que o escoamento ocorre apenas nas direções verticais e transversais. Ou seja, as ondas geradas propagam-se perpendicularmente ao eixo longitudinal do navio. Esta hipótese implica em assumir que:

- *O navio deve ser esbelto, tendo baixos valores para B/L ;*
- *O navio deve ter baixa velocidade de avanço;*
- *Comprimento das ondas relativamente pequeno em relação ao comprimento do navio.*

Fonseca (2004) destaca que esse método envolve poucos recursos computacionais e em grande parte dos casos práticos apresenta bons resultados. A razão disso é que grande parte dos casos são adequados às limitações da teoria das faixas; os navios são lentos, esbeltos e as repostas mais severas acontecem para frequências relativamente elevadas. Porém, esse método não é capaz de considerar os efeitos tridimensionais da difração (de ondas) em proas bojudas, além de não permitir a avaliação dos movimentos transversais do navio (*roll*).

2.5.2. Método dos Painéis

Diferentemente do Método de Faixas, o Método dos Painéis permite capturar a influência da tridimensionalidade dos cascos de navios e plataformas oceânicas, Fonseca (2004).

Similar ao Método dos Elementos Finitos, o Método dos Painéis divide a superfície do navio em elementos discretos (painéis). Em cada um destes elementos é definida uma distribuição de fontes e sumidouros, que satisfazem a equação de Laplace. Nesse caso, o potencial de velocidades é representado por uma distribuição de singularidades (fontes-dipolos) sobre a superfície molhada do corpo.

Embora originalmente tenha sido desenvolvido para análise de corpos sem velocidade de avanço, posteriormente foi aperfeiçoado distribuindo-se fontes de Rankine sobre a superfície do corpo e a superfície livre do fluido.

Ainda de acordo com Fonseca (2004), os efeitos tridimensionais da geometria do casco são considerados, pois o Método dos Painéis é capaz de analisar a influência que o escoamento de uma seção transversal tem sobre o escoamento das seções vizinhas.

Esse método foi desenvolvido quase que simultaneamente ao Método de Faixas, porém devido à sua grande demanda de recursos computacionais, sua utilização somente se popularizou na década de 80, (Moreno, 2010).

2.5.3. Comparação entre Métodos

Conforme descrito, ambos os métodos apresentados serviriam para a resolução do problema em questão. Porém, o método de faixas tem limitação quanto à velocidade de avanço e maior dificuldade em capturar os efeitos da tridimensionalidade do bulbo de proa. Assim, optou-se pela utilização do Método dos Painéis, pois se os efeitos de amortecimentos resultantes da presença do bulbo, oriundos de sua tridimensionalidade, não forem considerados o trabalho perde toda sua finalidade, Journé (1992).

2.6. Ferramenta Computacional

A ferramenta computacional utilizada para obter as respostas dinâmicas do modelo estudado foi o ANSYS/AQWA™, Ansys Corporation (2010).

Esse é um programa de engenharia robusto, cuja confiabilidade é reconhecida internacionalmente, sendo utilizado na investigação dos efeitos de onda, corrente e vento em estruturas marítimas fixas ou livres, o que inclui navios.

O programa utiliza o método de painéis para resolver o problema de difração e radiação de ondas existentes em estruturas flutuantes. Além disso, possui a capacidade de resolver problemas com velocidade de avanço, encaixando-se perfeitamente para os propósitos do estudo realizado.

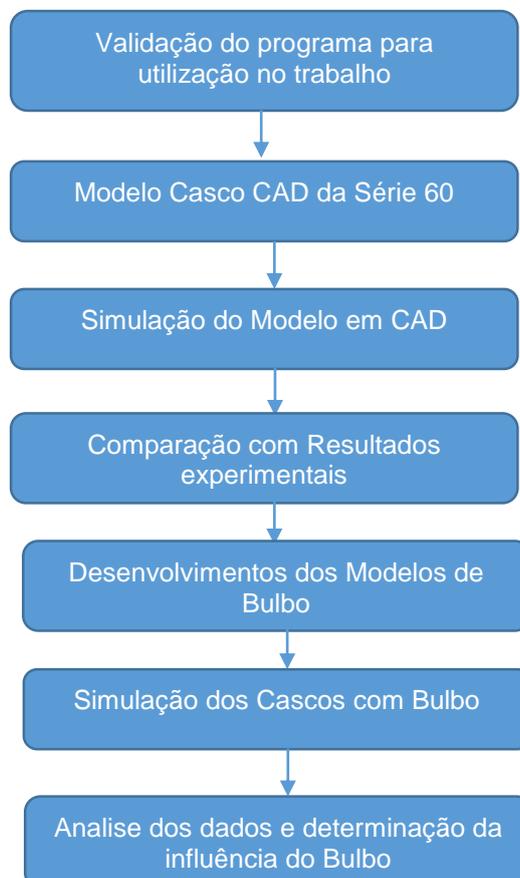
3. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção são apresentadas as principais etapas do desenvolvimento da pesquisa cuja proposta foi apresentada na introdução e na fundamentação teórica foi discutida no capítulo anterior.

Inicialmente é apresentado um estudo de validação da ferramenta computacional para a aplicação proposta, onde os resultados obtidos para a simulação computacional de um cilindro são confrontados com os resultados analíticos disponíveis na literatura.

A seguir são apresentados os resultados para a simulação computacional de um casco da Série 60, posteriormente eles são comparados com os resultados experimentais da literatura e que foram obtidos em ensaios com modelo em escala reduzida. A Figura 5 abaixo ilustra o procedimento utilizado no desenvolvimento do trabalho.

Figura 5 - Fluxograma do Desenvolvimento do Trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1. Simulação de um Cilindro Oscilando na Vertical

Para a validação do processo de simulação utilizado no trabalho, usou-se um modelo simples: um cilindro que oscila verticalmente, cujas dimensões e propriedades de massa são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades do cilindro consideradas na análise.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa	14,4e6	Kg
Raio	10	m
Altura	90	m

Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando o programa de simulação AQWA, determinou-se o RAO do cilindro para o movimento vertical, visando determinar a frequência natural de movimento do sistema nesse grau de liberdade.

3.1.1. Procedimento para Determinação da Frequência Natural

Apesar de ser facilmente determinável analiticamente, partiu-se do pressuposto que inicialmente, não se conhecia a frequência natural do cilindro para o movimento de *heave*. Assim foi desenvolvido um procedimento iterativo para a determinação dessa frequência utilizando-se simulações computacionais.

Nesse procedimento, inicialmente investiga-se uma ampla faixa de frequências, com baixa discretização entre os valores. Conforme os valores mais altos de RAO são determinados, as faixas de frequência são estreitadas no entorno desse valor, em um processo iterativo que converge para o máximo valor de RAO cuja frequência corresponde a frequência do sistema para o movimento de *heave*.

3.1.2. Determinação da Malha

É fato amplamente documentado na literatura que o resultado de um processo numérico, como o Método de Painéis, depende do grau de discretização da malha. Malhas com elementos menores convergem para resultados mais próximos ao do domínio contínuo, no entanto exigem mais tempo de processamento.

Para determinar a malha utilizada nas simulações para validação do cilindro, foi realizado um estudo de convergência, avaliando-se a influência do tamanho da malha na determinação da frequência natural do sistema.

No programa AQWA, a geração da malha é controlada por dois parâmetros: tamanho máximo do elemento e tolerância. Iniciou-se a abordagem por uma malha grosseira, e foi-se então refinando a mesma até atingir a convergência dos valores. A Tabela 4 mostra os resultados das simulações feitas para vários tamanhos de malha. Ao analisar os dados da Tabela 4, observa-se que as maiores respostas, destacadas em cinza, acontecem para a frequência de 0,068 a 0,070 Hz, Conforme refina-se a malha, a frequência de maior resposta estabiliza em 0,070 Hz.

Tabela 4 – RAO de *heave* para movimento vertical do cilindro para diferentes malhas *

Frequência (Hz)	Malha 10 : 3	Malha 7 : 1.5	Malha 4 : 1	Malha 3.5 : 1	Malha 3 : 0.8	Malha 2 : 0.5	Malha 1.5 : 0.3
0,065	4,382	3,710	3,249	3,203	3,170	3,105	3,087
0,066	5,700	4,571	3,861	3,792	3,743	3,648	3,622
0,067	8,367	6,067	4,827	4,715	4,636	4,484	4,441
0,068	46,611	20,347	10,615	10,040	9,655	8,960	8,775
0,069	13,026	34,012	27,787	24,476	22,445	19,101	18,284
0,070	6,781	10,813	23,133	26,301	29,132	35,831	37,993
0,071	4,473	6,055	9,042	9,593	10,046	11,082	11,428
0,072	3,281	4,112	5,399	5,604	5,767	6,121	6,234
0,073	2,556	3,065	3,773	3,879	3,961	4,135	4,189
0,074	1,722	1,965	2,270	2,312	2,344	2,412	2,432
0,075	1,461	1,643	1,863	1,893	1,916	1,963	1,978

* O primeiro número da identificação da malha refere-se ao tamanho do elemento [m] e o segundo número à tolerância [m]

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante observar que as variações observadas no cálculo do máximo valor de RAO não são importantes, visto que estão associadas à proximidade com o valor real da frequência natural e com o amortecimento do sistema. Do ponto de vista de

engenharia, esses valores têm pouca importância, sendo importantes apenas para a determinação da frequência natural do sistema.

Assim, determinou-se o maior tamanho de elemento para o qual a frequência alcança o valor de convergência, admitindo-se que uma precisão de 0.01 Hz no cálculo da frequência natural é suficiente para os objetivos do presente trabalho.

Uma vez determinada a discretização de malha adequada as análises, essa foi empregada em todas as simulações apresentadas nesta seção do trabalho.

3.1.3. Frequência Natural de *heave* de um Cilindro Vertical

Um resultado bastante conhecido na literatura é que a frequência natural de um sistema dinâmico oscilando em um certo grau de liberdade pode ser determinada por meio da seguinte equação:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Onde K é a rigidez do sistema no grau de liberdade considerado e m é a massa do sistema.

No caso de um cilindro oscilando na água, a força restauradora que surge ao se deslocar um corpo na vertical é proporcional a variação do empuxo decorrente da variação do volume submerso do corpo.

A rigidez do sistema, por sua vez, equivale a força restauradora por unidade de deslocamento aplicada. Assim, sabe-se, pelo princípio de Arquimedes, que o peso da água adicionalmente deslocada ao mover-se verticalmente com o cilindro vale $A\rho_w g x$, onde A representa a área de linha d'água do cilindro, ρ_w a massa específica da água, x o deslocamento vertical do cilindro e g a aceleração da gravidade.

A massa do cilindro, por sua vez, pode ser calculada por $A\rho_c h$, onde ρ_c representa a massa específica do cilindro e h a altura total do cilindro.

Conhecendo a força restauradora e a massa do sistema, pode-se aplicar a segunda lei de Newton de maneira a se obter a equação diferencial que governa o movimento de oscilação vertical do cilindro:

$$A\rho_c h\ddot{x} + A\rho_w g x = 0$$

$$\ddot{x} + \frac{A\rho_w g}{A\rho_c h} x = 0$$

A solução da equação diferencial que governa o movimento de oscilação implica em:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho_w g}{\rho_c h}}$$

Porém, nessa abordagem não está sendo considerada a massa adicional hidrodinâmica. Assim, efetuando simulações no AQWA, é possível obter a frequência natural de um cilindro que oscila verticalmente considerando a parcela de massa adicional.

Os resultados das simulações considerando diferentes variações para a altura e o diâmetro do cilindro são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Geometria dos Cilindros Simulados

Altura H [m]	Raio R [m]	H sub [m]	ω_n [rad/s]
140	8	69,9	0,358
110	9	55,2	0,402
90	10	44,7	0,439
70	11	36,9	0,471
60	12	31	0,508

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores das frequências naturais correspondem as frequências nas quais cada um dos cilindros apresentou a maior resposta de oscilação.

As diferenças entre os valores obtidos por meio do modelo analítico e os valores obtidos na simulação computacional devem-se a massa adicional negligenciada no modelo analítico. Para descobrir a massa adicional que cada geometria de cilindro possui, foi-se aumentando a massa utilizada no modelo analítico, simulando a massa hidrodinâmica associada ao movimento. Os resultados para esse procedimento são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa Adicional dos Cilindros

Raio do cilindro	8	9	10	11	12	m
Altura do cilindro	140	110	90	70	60	m
Massa do cilindro	1,44E+07	1,44E+07	1,44E+07	1,44E+07	1,44E+07	kg
Volume do cilindro	28149	27992	28274	26609	27143	m ³
Massa específica da água	1025	1025	1025	1025	1025	Kg/m ³
Massa específica do Cilindro	511,6	514,4	509,3	541,2	530,5	Kg/m ³
Freq. Nat. Eq. Newton	0,375	1,324	1,471	1,619	1,7657	rad/s
Massa Adicional	1,36E+06	1,43E+06	1,99E+06	2,82E+06	3,20E+06	Kg
Freq. Nat. Com Massa Adicional	0,358	0,402	0,439	0,471	0,508	rad/s
Massa Adicional / Massa	9%	10%	14%	20%	22%	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Pode-se observar que ao adicionar massa hidrodinâmica ao modelo analítico, obtém-se os mesmos resultados para a frequência natural encontrados na simulação computacional.

É importante observar que a massa adicional aumenta conforme aumenta a razão entre o raio e a altura do cilindro. Pois, ao se aumentar a área transversal do cilindro, aumenta a área de contato do corpo com as partículas de fluido localizadas no fundo do cilindro, as quais se movimentam em decorrência do movimento do cilindro, aumentando assim a massa de água que se desloca com ele.

3.2. Simulação computacional do casco da Série 60 original

A fim de realizar uma comparação do modelo computacional utilizado com os resultados experimentais descritos em Nakamura (1966), foi utilizado um modelo computacional em escala que já havia sido utilizado anteriormente em um trabalho com um programa diferente do usado nesse trabalho. A partir desse modelo foram realizadas simulações numéricas utilizando o programa AQWA. Nesta seção serão apresentadas as características do modelo computacional, as quais serão comparadas ao modelo ensaiado em tanque de provas. Por fim, os resultados das simulações computacionais são comparados com os resultados experimentais com o objetivo de validar o uso do modelo computacional.

3.2.1 Características do Modelo Estudado

De acordo com Todd (1963), a Série 60 foi desenvolvida através de uma pesquisa com 40 organizações, cujo consenso foi de que a série teria como parâmetro principal o coeficiente de bloco C_b , variando entre 0.60 e 0.85. Assim, para caracterizar um modelo como pertencente a Série 60, o casco deve ter os parâmetros descritos por Todd (1963) e apresentados na Figura 6,

Figura 6 - Parâmetros Principais para Forma da Série 60.

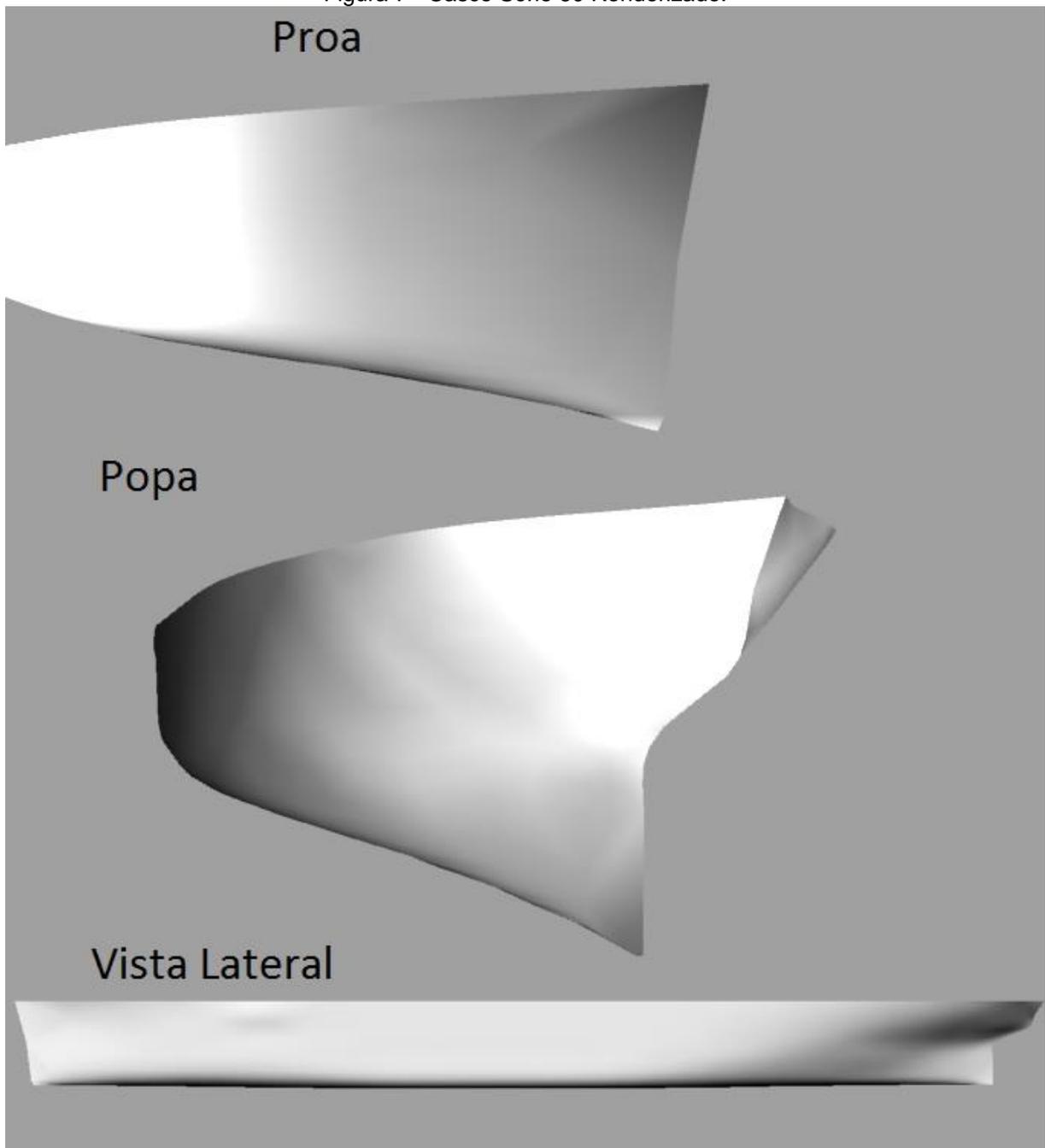
C_B	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
L/B	7,5	7,25	7	6,75	6,5
B/H	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
$\frac{\Delta}{\left(\frac{L_{pp}}{100}\right)^3}$	122	141,4	163,4	188,2	216,5
$\frac{L}{\frac{1}{\nabla^3}}$	6,125	5,869	5,593	5,335	5,092
LCB as percent of Lpp from Θ	1,5 aft	0,5 aft	0,5 fwd	1,5 fwd	2,5 fwd

Fonte: Todd (1963)

Baseados nesses parâmetros utilizou-se um modelo computacional da superfície de um casco pertencente a Série 60 e com as dimensões do modelo experimental usado por Nakamura (1966).

Os cálculos hidrostáticos do casco foram realizados no programa Rhinoceros com o auxílio do *plug-in* Orca 3D. A Figura 7 ilustra a o casco renderizado da Série 60.

Figura 7 - Casco Série 60 Renderizado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados para a geometria do modelo são mostrados na Tabela 7 e comparados com as dimensões do modelo utilizado por Nakamura (1966) em seus ensaios em tanque de reboque.

Tabela 7 - Comparação entre Modelo Experimental e Modelo Computacional.

Propriedade do Casco	Modelo Experimental	CAD	Variação
Coeficiente de Bloco	0,700	0,686	-2,00%
Comprimento entre Perpendiculares [m]	4,500	4,574	1,64%
Boca [m]	0,643	0,645	0,31%
Pontal [m]	0,409	0,385	-5,87%
Calado [m]	0,257	0,258	0,39%
Volume Deslocado [m ³]	0,521	0,520	-0,13%
Massa [Kg]	533,7	533,8	0,02%
Coeficiente Prismático	0,710	0,696	-1,97%
Coef. Seção Mestra	0,986	0,985	-0,10%
Coef. do Plano de Linha d'água	0,785	0,775	-1,27%
FB/Lpp	0,495	0,513	3,64%
L/B	6,998	7,091	1,33%
B/T	2,502	2,500	-0,08%
KG	0,225	0,225	0,00%
Kyy	0,250L	0,250L	

Fonte: Elaborado pelo Autor com base em Nakamura (1966)

Onde a razão FB/Lpp é a razão entre a distância entre o centro de carena até a perpendicular de vante dividido pelo comprimento entre perpendiculares, Kyy é o raio de giração do navio em torno do eixo y, como mostrado na Figura 2.

É importante observar que o raio de giração representa a distribuição de massa no entorno do eixo transversal da embarcação, e assim tem influência direta no movimento de *pitch*, embora não afete o movimento de *heave* da embarcação.

Na coluna de variação, a maior disparidade é o pontal, porém essa dimensão não é crítica para as simulações propostas neste trabalho já que os parâmetros importantes para o trabalho são o coeficiente de bloco e coeficiente prismático. Portanto, o modelo desenvolvido foi considerado adequado e será utilizado ao longo de todo o desenvolvimento apresentado.

Na Tabela 8, as dimensões e atributos de ambos os modelos (o utilizado para este trabalho e o ensaiado por Nakamura) foram comparados com os parâmetros citados por Todd (1963) a fim de inferir se o modelo proposto realmente se encaixa em uma forma de casco da Série 60 com coeficiente de bloco de 0,70.

Tabela 8 - Comparação com o Modelo Base (Todd 1963)

Parâmetros	Base (Todd, 1963)	Modelo (Nakamura, 1966)	Variação em relação a Base	Modelo CAD	Variação em relação a Base
Cb	0,7	0,700	0,000	0,686	-2,00%
L/B	7	6,998	0,000	7,091	1,31%
B/H	2,5	2,502	0,001	2,500	0,00%
$\Delta/(L/100)^3$	163,4	166,178	0,017	158,274	-3,14%
$L/\sqrt[3]{\Delta}$	5,593	5,593	0,000	5,688	1,70%
LCB como % de Lpp medido da Meia Nau	0,50%	0,50%		-1,30%	

Fonte: Todd (1963), Nakamura (1966) e autor.

Novamente observa-se que o modelo computacional utilizado apresentou resultados compatíveis, permitindo que fosse utilizado ao longo de todo o desenvolvimento apresentado.

3.2.2. Calibração das Características Inerciais do Modelo

Com o modelo computacional pronto para ser utilizado, o próximo passo é calibrar o modelo para que a distribuição de massa represente a dinâmica da embarcação. Assim, todas as simulações usaram os dados de distribuição de massa apresentados na Tabela 7.

A posição longitudinal do centro de massa foi considerada igual a posição longitudinal do centro de carena, enquanto que o raio de giração no eixo z, foi considerado igual ao raio de giração no eixo y. Por fim o raio de giração no eixo x foi considerado igual à 40% da boca da embarcação com um valor de 0,258 m

É importante observar que os raios de giração nos eixos x e z (Figura 2) praticamente não altera a resposta da embarcação nos movimentos de *heave* e *pitch*.

3.2.3. Efeitos da malha nas simulações

Os efeitos da discretização da malha nas simulações foram avaliados analisando os resultados do RAO de *heave* para diferentes tamanhos de elementos e tolerâncias. Esse procedimento visa determinar a discretização da malha que resulta no menor tempo computacional de simulação e que não compromete os resultados obtidos. Na Tabela 9 são mostradas as características das malhas analisadas.

Tabela 9 - Malhas Utilizadas na Simulação.

Malha	Tamanho	Tolerância
Malha 1	0,06	0,02
Malha 2	0,10	0,02
Malha 3	0,15	0,02
Malha 4	0,20	0,02
Malha 5	0,30	0,05

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Malhas com elementos maiores do que 0.30 metros não puderam ser analisadas, pois limitavam os valores das frequências que poderiam ser utilizadas nas análises. Na Figura 8 são mostrados os resultados obtidos através das simulações realizadas, para as diferentes discretizações de malha consideradas.

Nakamura demonstra os resultados do RAO para o casco da Série 60 nos eixos da ordenada para heave e pitch de duas maneiras. Para heave ele usa a razão η_3/ζ_a onde η_3 é a resposta do movimento de translação do casco no eixo z ao ser excitado por uma onda com amplitude ζ_a . É importante observar que essa razão não possui dimensão já que ambos estão em metros. Para pitch, ele usa a razão $\eta_5/k\zeta_a$ onde η_5 é a resposta rotacional que o casco tem ao ser excitado por uma onda de amplitude ζ_a . O número de onda k definido por $2\pi/\lambda$ é um artifício para que essa razão fique adimensional que não possui sentido físico. Essa razão tem unidade de radianos por radianos, ou seja, adimensional.

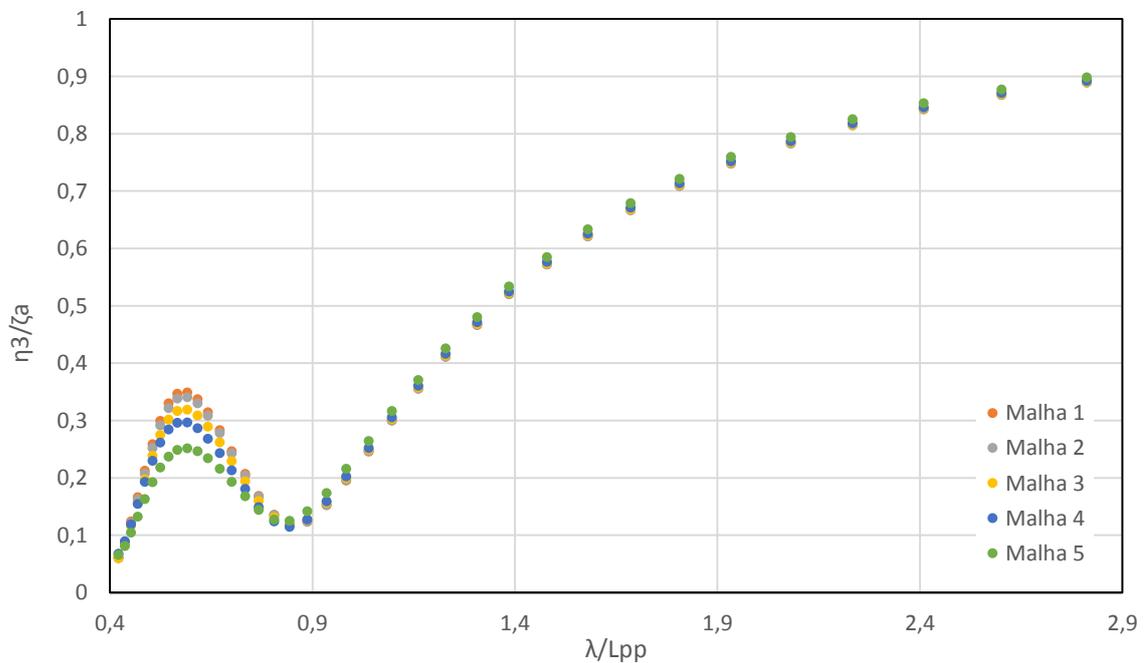
No eixo da abscissa Nakamura utiliza a razão λ/L_{pp} onde λ é o comprimento da onda no instante que ela incide sobre o casco e L_{pp} é o comprimento entre perpendiculares do casco. Através dessa razão podemos observar que tamanho tem a onda em relação ao casco e que resposta o casco tem no instante em que ela incide sobre o mesmo.

Através da relação de dispersão é possível entender que a medida que a razão λ/L_{pp} aumenta, a frequência que as ondas encontram o casco diminui. Finalmente, quando a razão λ/L_{pp} diminui a frequência com que as ondas encontram o casco aumentam, pois da relação de dispersão:

$$\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g}$$
$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2}$$

Assim, essa convenção usada por Nakamura e na engenharia naval para representar o RAO de cascos será utilizada em todo o trabalho para demonstrar o RAO dos cascos simulados.

Figura 8 - Resultados para Vários Tamanhos de Malha: RAO em *Heave*, $F_n=0$.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Malha 1 é a mais refinada e que portanto demanda maior tempo computacional. Escolheu-se a Malha 2 pois essa obteve resultados muito semelhantes aos da Malha 1 e com uma quantidade significativamente menor de tempo computacional. Assim, usou-se a Malha 2 para todas as simulações realizadas no desenvolvimento deste trabalho.

3.2.4. Simulações

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas simulações do modelo computacional para seis diferentes velocidades de avanço. Os dados experimentais apresentados foram extraídos das Figuras 2 e 4 do trabalho de Nakamura (1966).

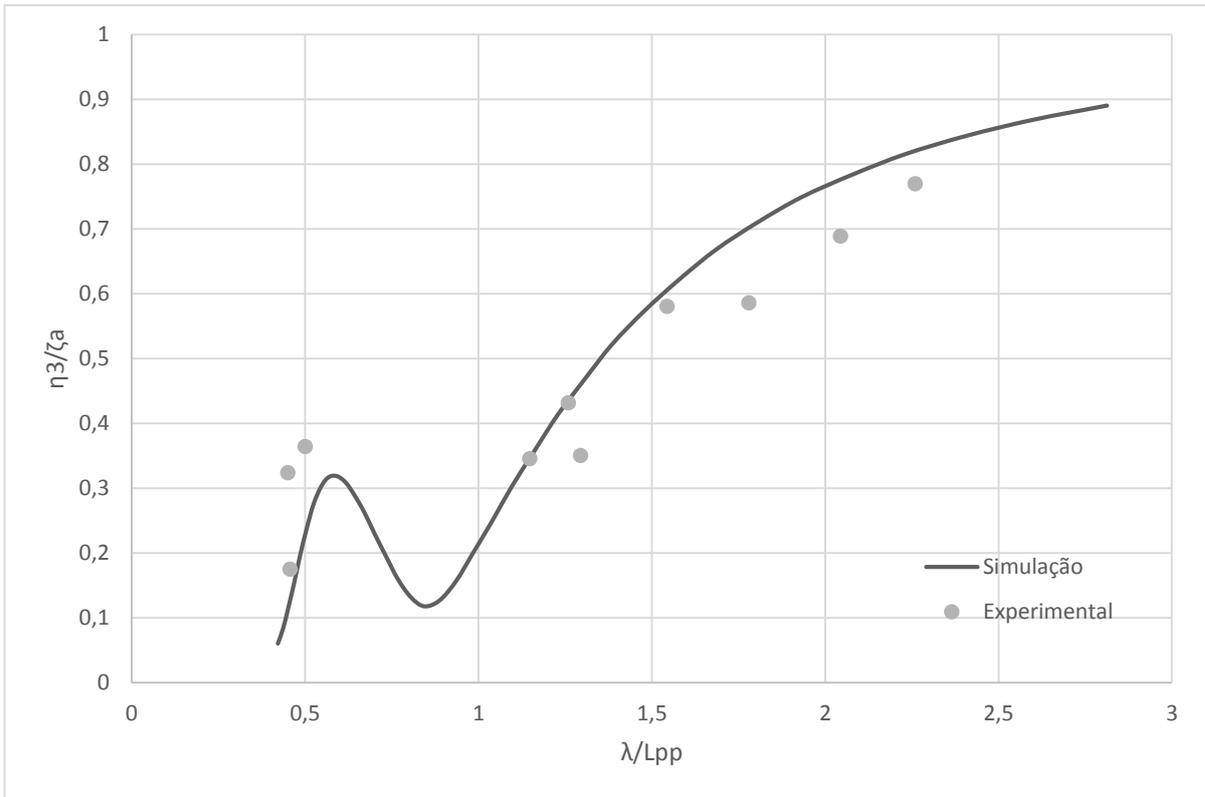
As frequências investigadas, tanto para *pitch* quanto para *heave*, foram de 0,34Hz até 0,9Hz com 37 valores intermediários. Esse intervalo foi escolhido de maneira que quando os resultados fossem transformados para a escala dos resultados apresentados em Nakamura (1966) eles estivessem compatíveis. Assim como descrito no trabalho de Nakamura (1966), as ondas investigadas pela simulação foram apenas ondas de proa.

É importante observar que os resultados obtidos na simulação foram convertidos para se ajustarem aos resultados experimentais de Nakamura (1966). Para se obter as escalas apresentadas no eixo x, foi usado a relação de dispersão de onda:

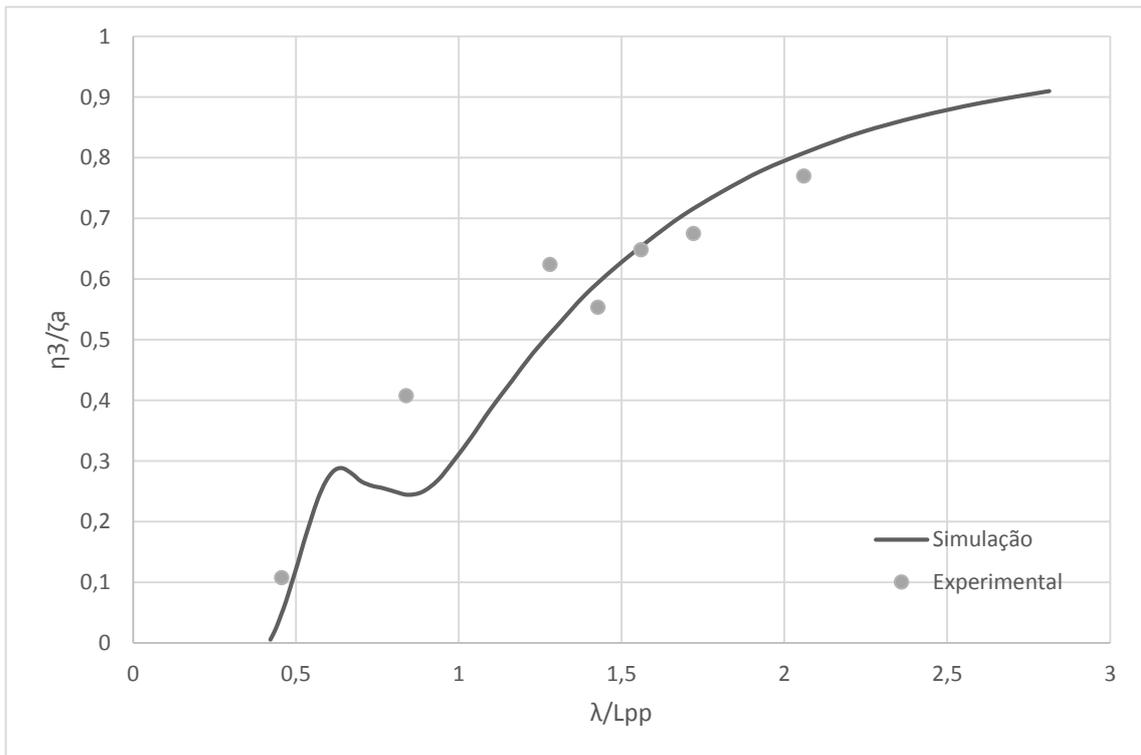
$$\omega_n^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right).$$

Onde h é a profundidade do tanque.

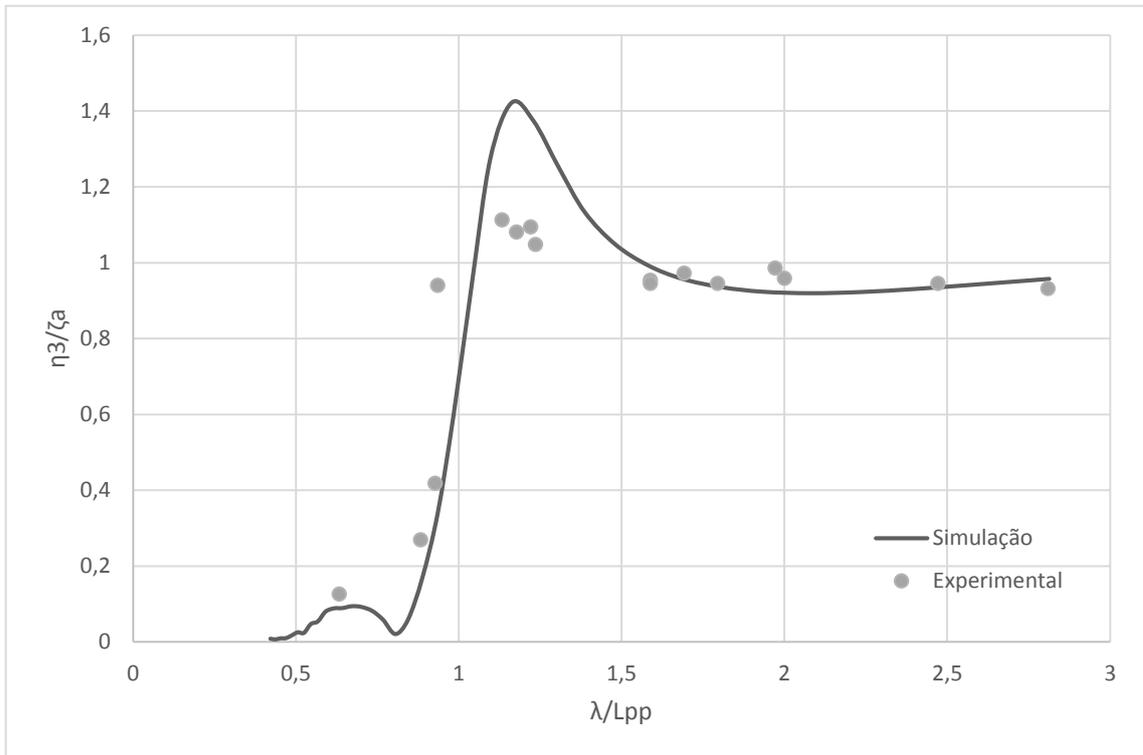
O efeito da profundidade foi considerado já que a profundidade usada no experimento foi de 3,69 m e a consideração para determinar se o navio está em águas rasas ou profundas é uma razão entre a profundidade e o comprimento de onda, que em geral é dado por $(\frac{2\pi h}{\lambda} \gg 1)$. Por essa razão o efeito da profundidade, apesar de muito pequeno (cerca de 5% na sua maior diferença), foi considerado. Nas Figura 9 até a Figura 14 são mostrados os resultados do RAO para o movimento em *heave*.

Figura 9 - Resultado para *Heave* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0$ 

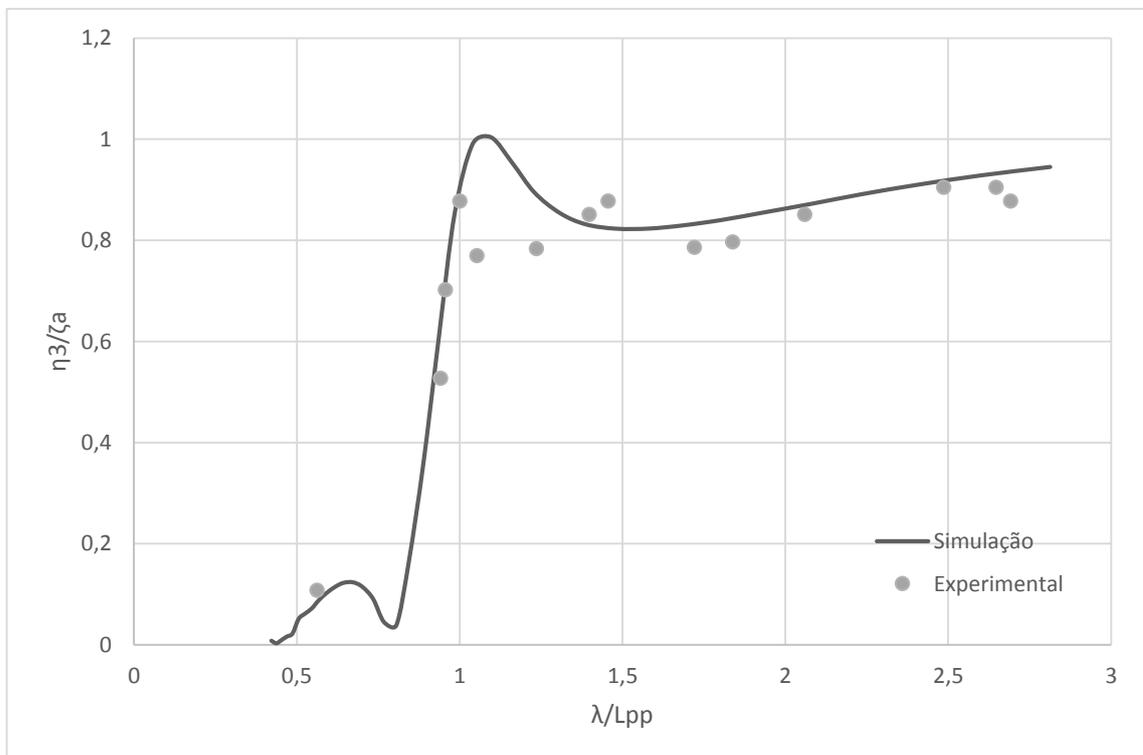
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 10 - Resultado para *Heave* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,05$ 

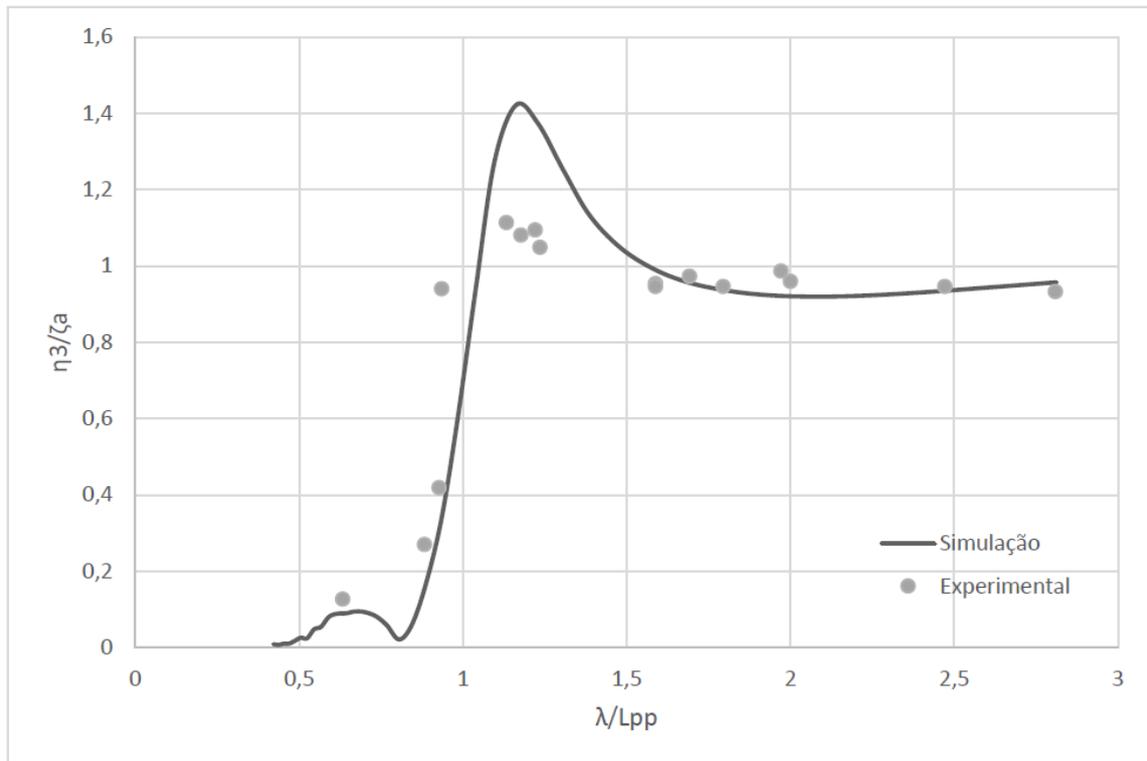
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 11 - Resultado para *Heave* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,1$ 

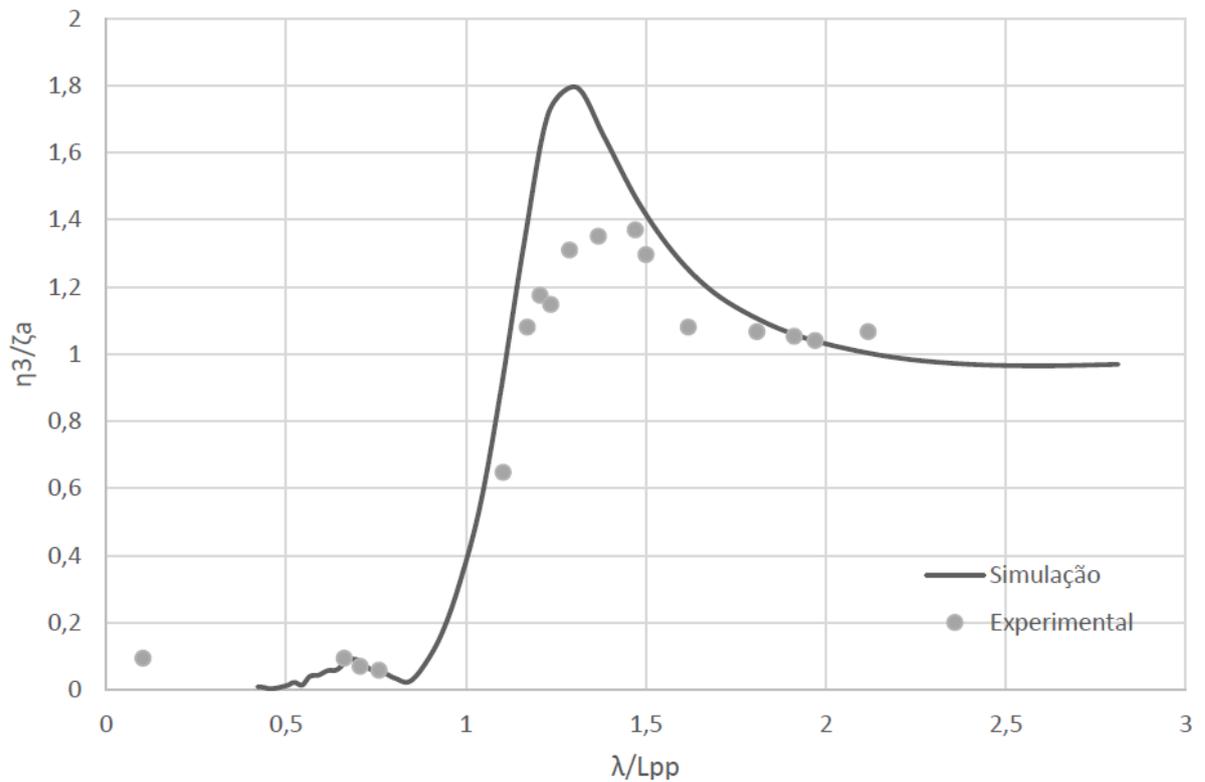
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 12 – Resultado para *Heave* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,15$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 13 - Resultado para *Heave* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,2$ 

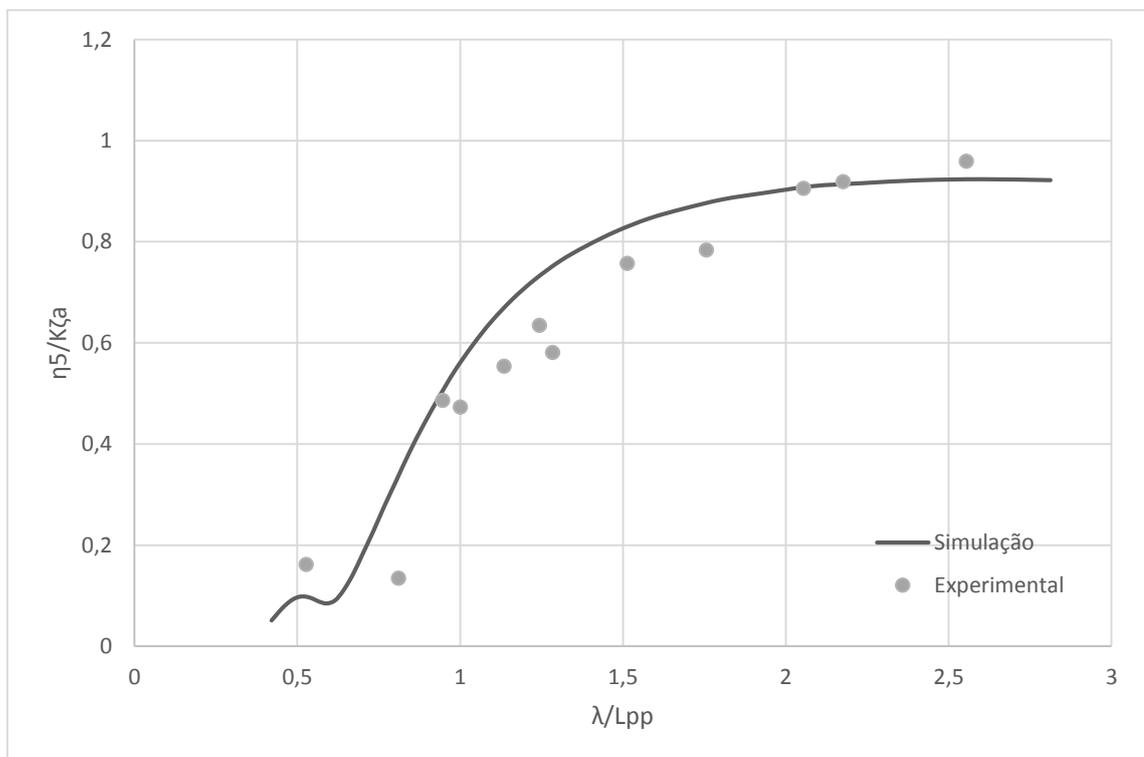
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 14 – Resultado para *Heave* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,25$ 

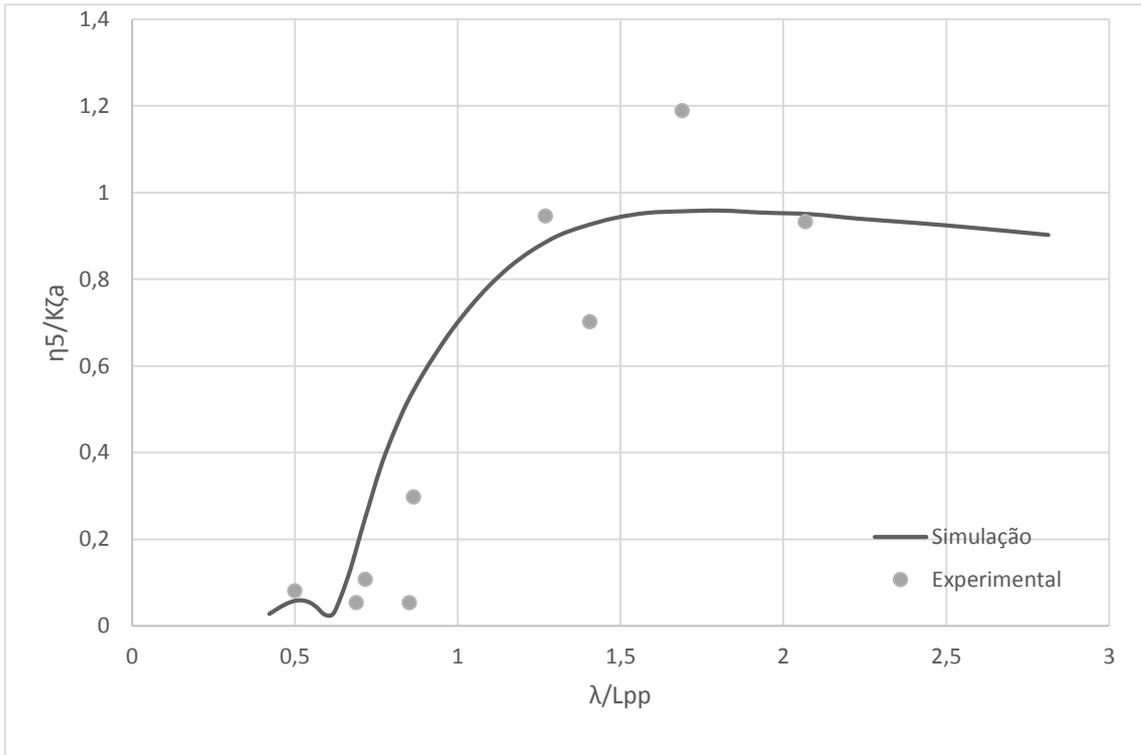
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em relação aos resultados para o movimento de *pitch*, o AQWA fornece os resultados na forma de graus/metro enquanto que no experimento de Nakamura, esse resultado é mostrado na forma adimensional $\theta_A/k\zeta_A$ onde θ_A é a amplitude do movimento em radianos, k é o número de onda em radianos por metro e ζ_A é a amplitude da onda em metros. Assim, para se obter o parâmetro usado por Nakamura, multiplicou-se o resultado obtido na simulação pelo comprimento de onda e dividiu-se por 360. Os resultados para o movimento de *pitch* são mostrados a partir da Figura 15 até a Figura 20.

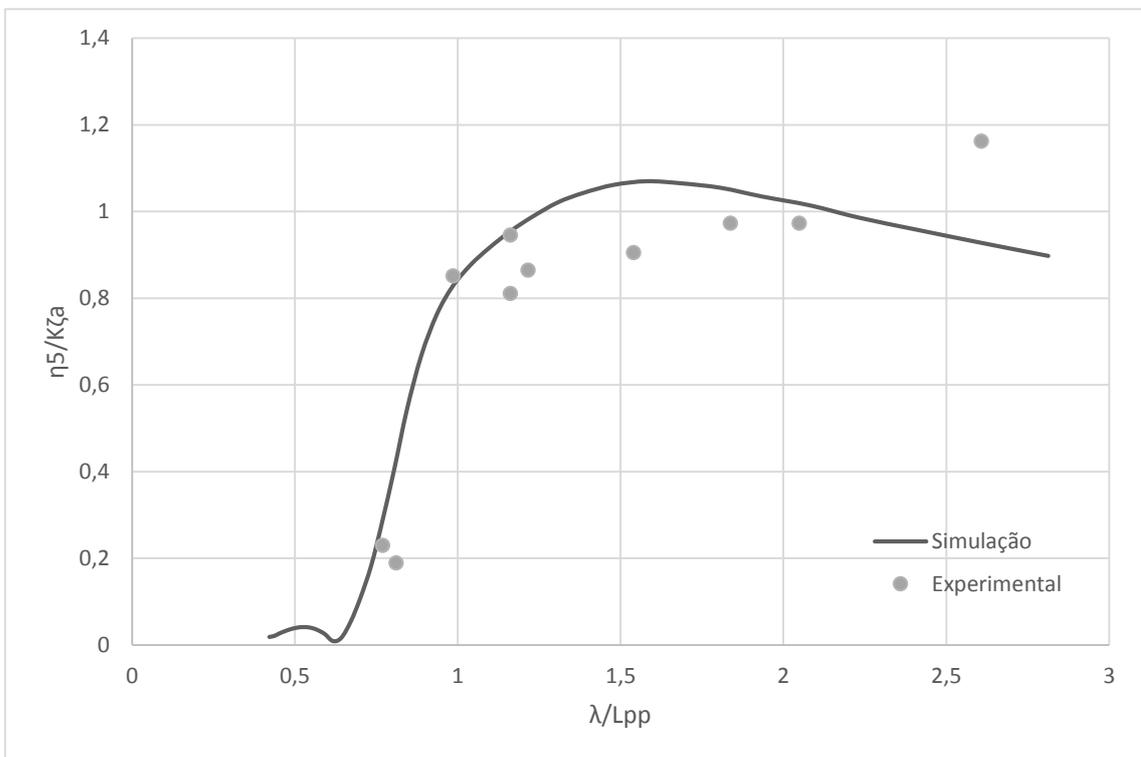
Figura 15 - Resultado para *Pitch* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0$



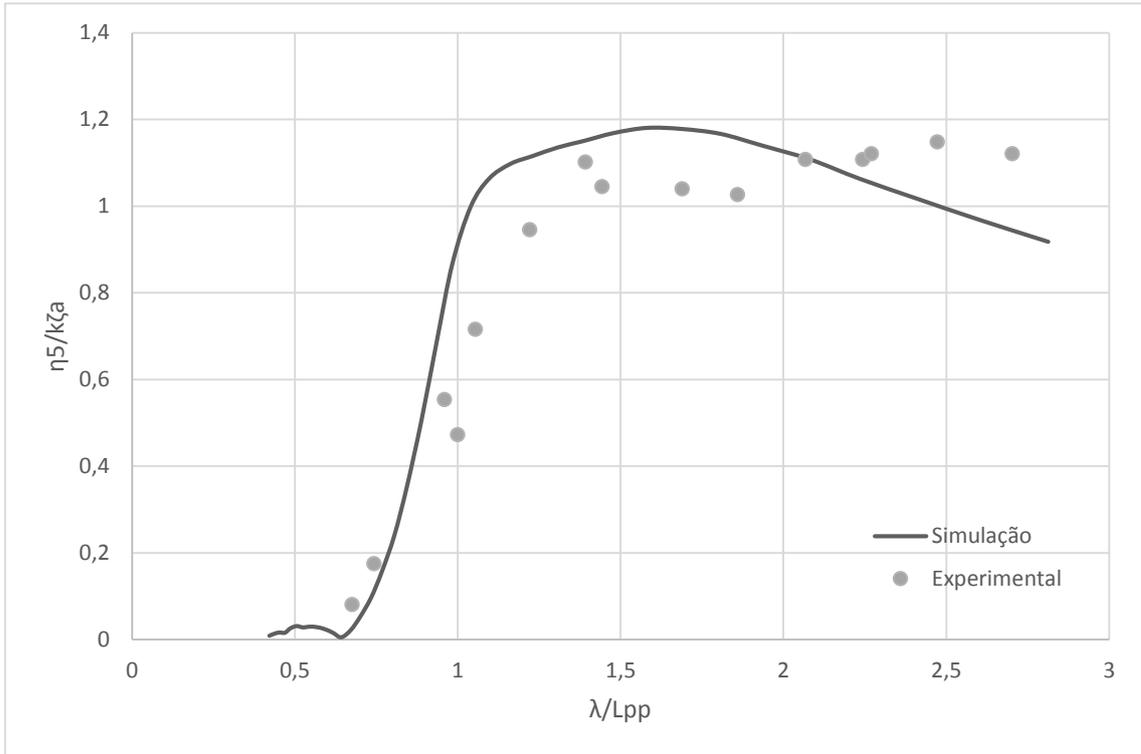
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 16 - Resultado para *Pitch* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,05$ 

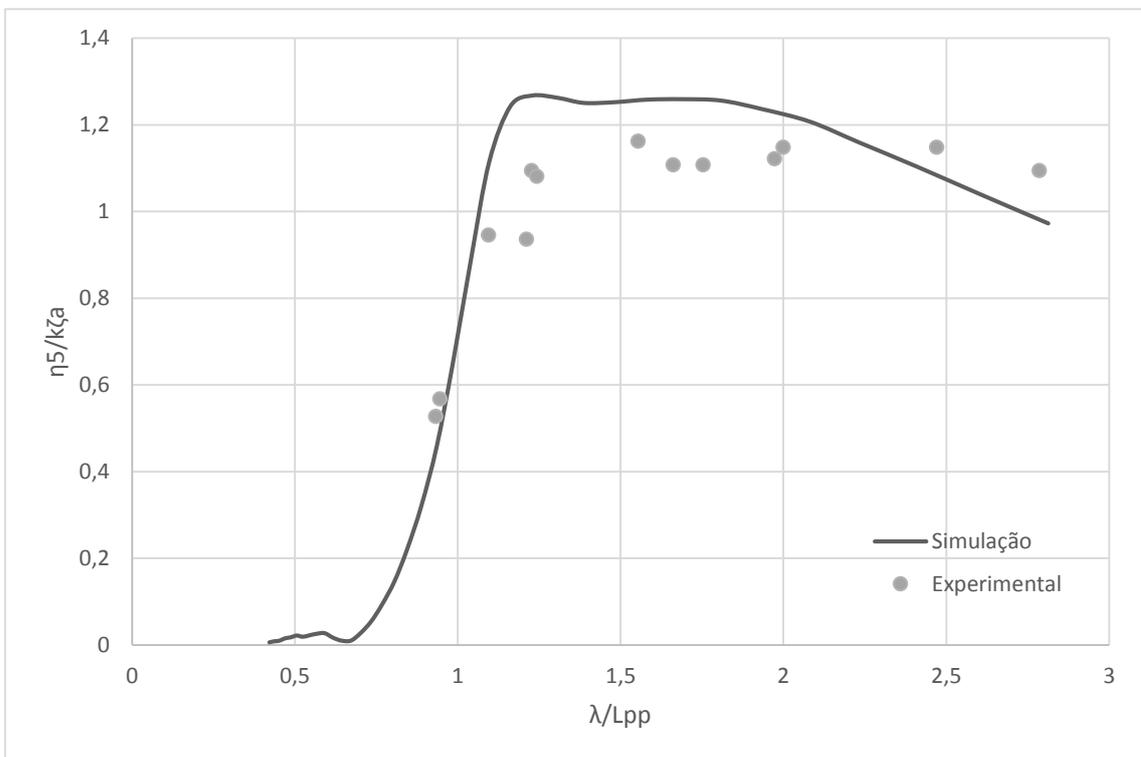
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 17 - Resultado para *Pitch* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,10$ 

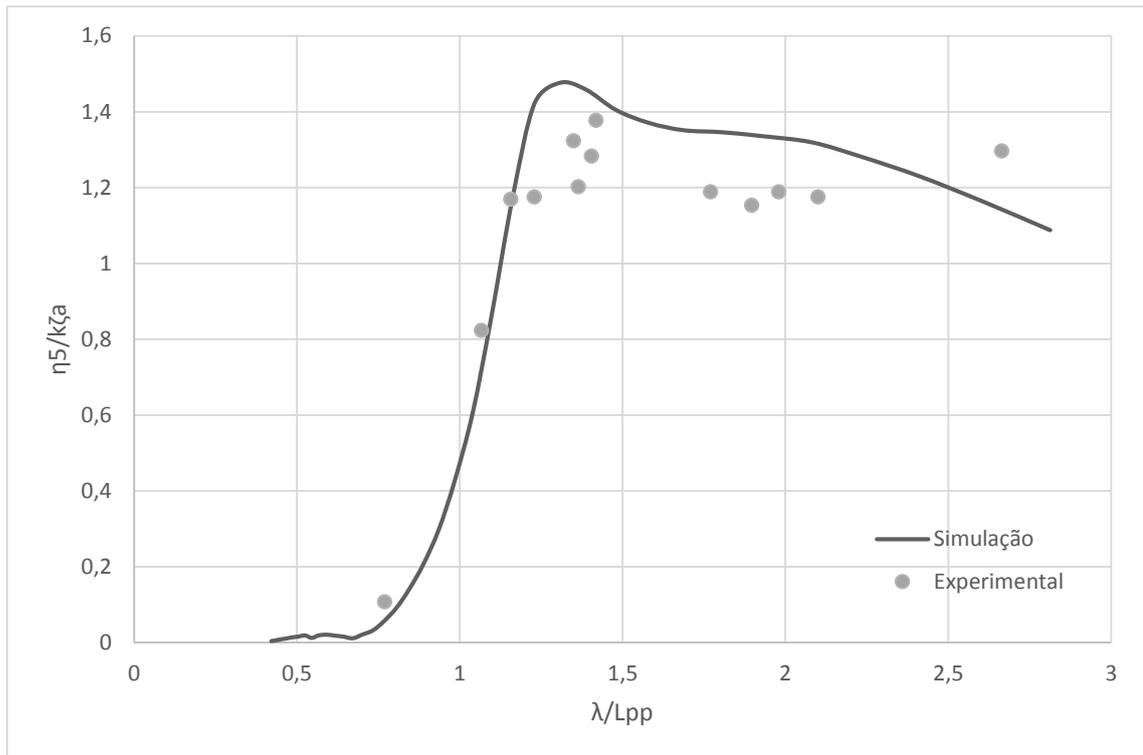
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 18 - Resultado para *Pitch* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,15$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 19 - Resultado para *Pitch* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n = 0,20$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 20 - Resultado para *Pitch* e Comparação com Modelo Experimental para $F_n=0,25$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados encontrados nas simulações foram considerados satisfatórios, visto que os efeitos de Morisson e de amortecimento viscoso são negligenciados na simulação.

4. RESULTADOS

Criar a métrica para as gerações de forma do bulbo e comparações dos resultados é uma importante parte do trabalho. É necessário que essas comparações sejam feitas de maneira que as mesmas variações no bulbo aplicado a outro casco tenham resultados aceitáveis. Os parâmetros criados por Kracht (1978) fornecem uma boa abordagem para a análise proposta.

Definir parâmetros do casco como L/B, B/T são importantes para que se obtenha os intervalos nos quais os parâmetros criados para o bulbo possam ser aplicados. Assim, os parâmetros do casco em CAD mostrados na Tabela 7 foram usados em todas as simulações propostas.

Todas as cinco medidas apresentadas foram feitas conforme descrito em Kracht (1978), ou seja, tomadas a partir da perpendicular de vante. Além dos parâmetros descritos por Kracht (1978), foi incluído um parâmetro que é o volume a mais que é adicionado ao casco devido ao bulbo, foi inserido a fim de analisar o aumento de deslocamento que o modelo sofreu.

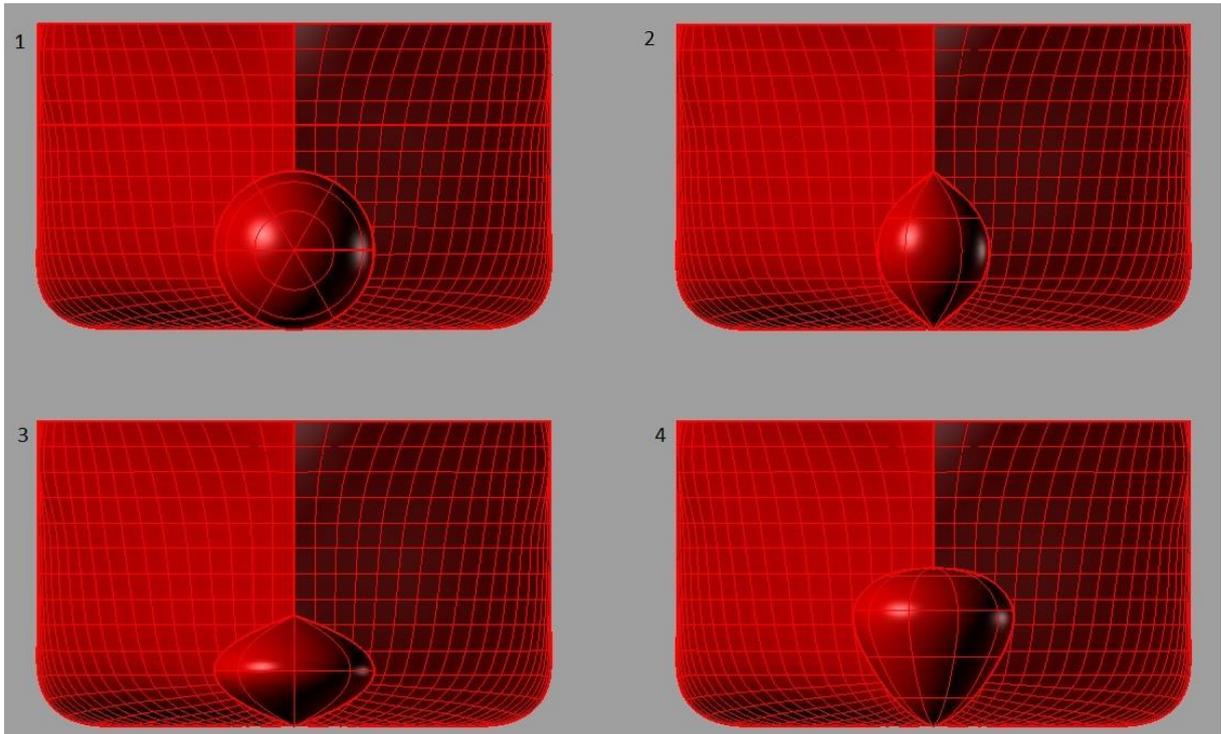
A seguir serão descritas as formas de bulbos utilizadas nas simulações, como essas formas foram variadas e os resultados das simulações obtidos para o casco com cada forma de bulbo desenvolvida.

4.1. Geração das Formas dos Bulbos

A Figura 21 mostra a seção, na perpendicular de vante, das quatro diferentes formas de bulbo utilizadas nas simulações. As seções foram criadas a partir de curvas com dimensões controladas permitindo assim o controle da geometria do bulbo.

Cada uma das formas foi extrudada a partir de sua seção, localizada na perpendicular de vante, até atingir o casco. Para criar a forma do bulbo a frente da perpendicular de vante, uma curva que forma a metade da seção do bulbo foi revolucionada em torno do eixo da perpendicular de vante. Dessa forma, todas as 4 geometrias estudadas foram geradas.

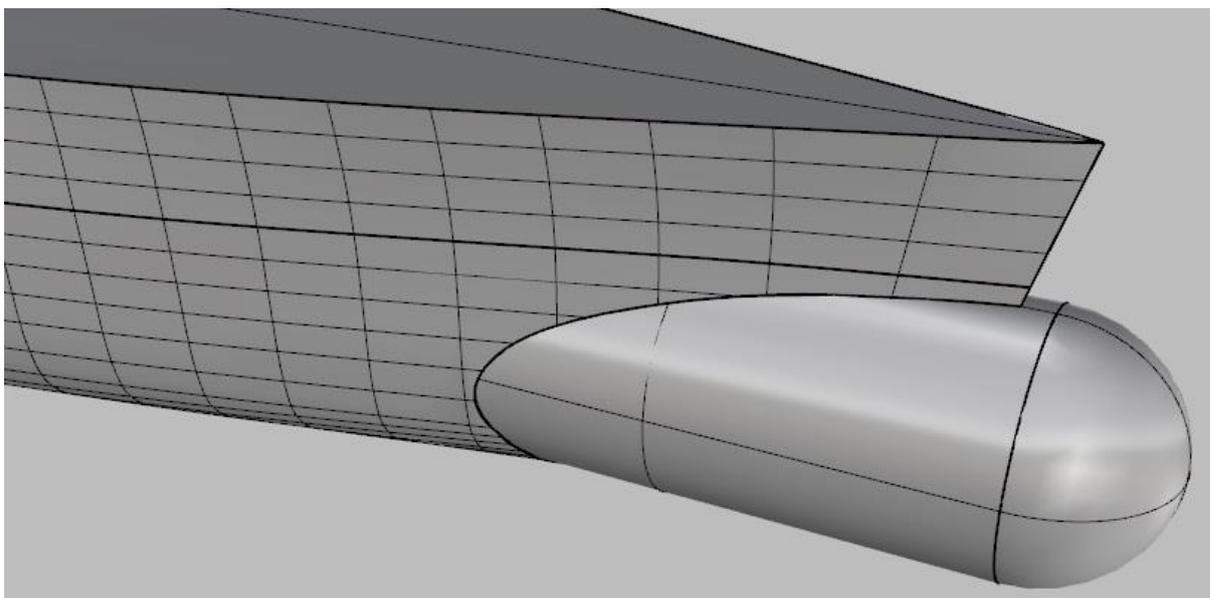
Figura 21 - Formas de Bulbo



Fonte: Elaborado pelo autor.

O bulbo 1, de forma circular, foi criado a partir da metade de uma esfera, o perfil usado então foi de um semicírculo. Na Figura 22 é mostrada a representação tridimensional da geometria do bulbo 1.

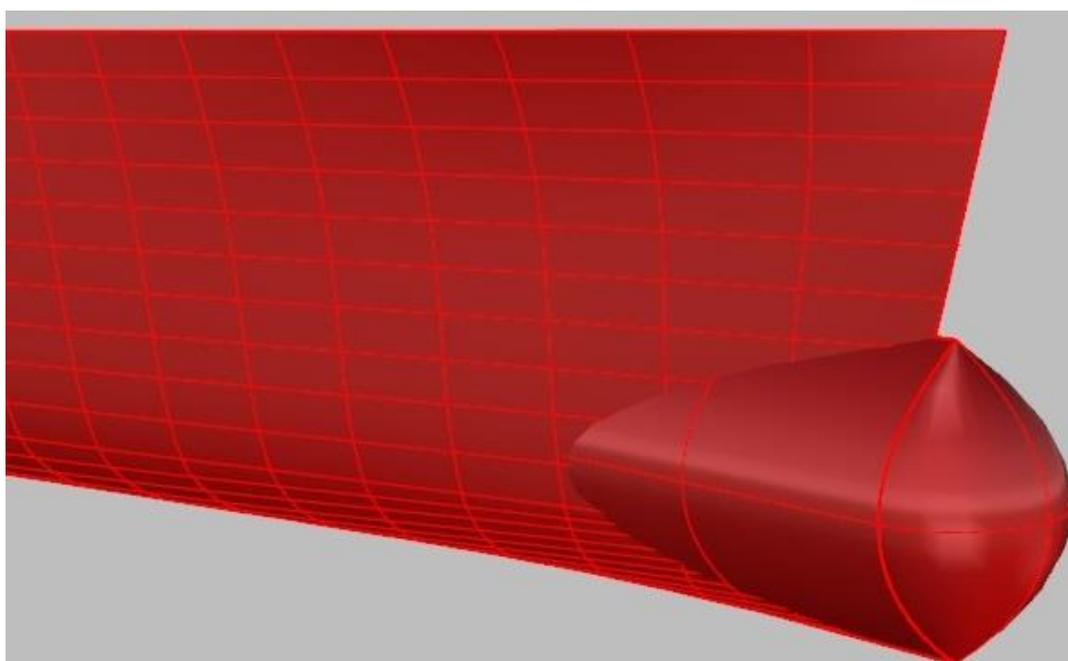
Figura 22 - Forma do Bulbo 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

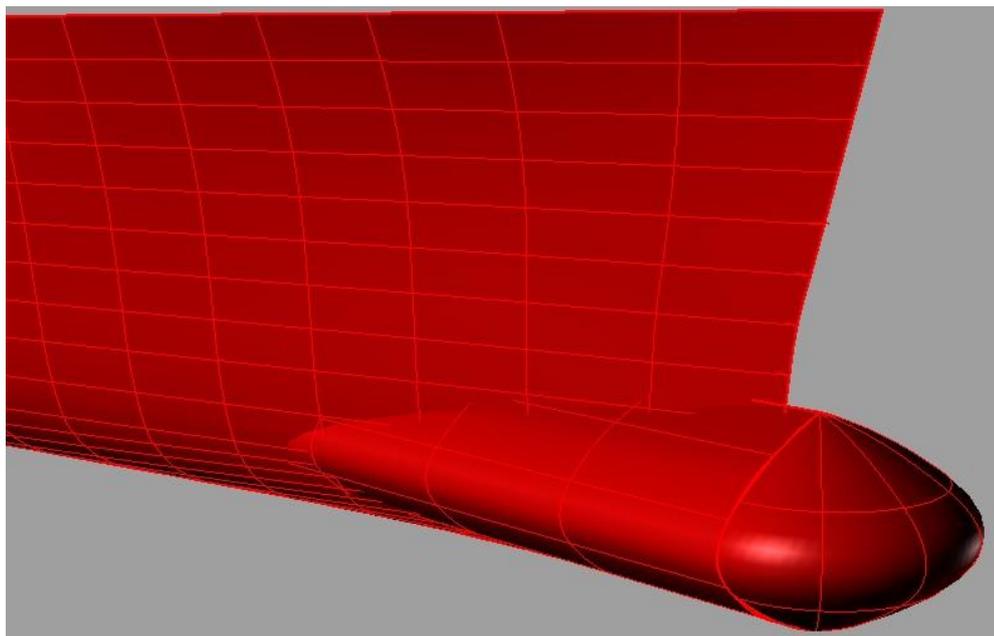
Os bulbos 2 e 3 foram criados a partir de uma curva com dimensões definidas de maneira que possuísem uma razão entre largura e altura da seção do bulbo de 0,7 e 0,14 para o bulbo 2 e 3 respectivamente. A Figura 23 e a Figura 24 mostram exemplos de geometrias criadas para os bulbos do tipo 2 e 3, respectivamente.

Figura 23 - Forma do Bulbo 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

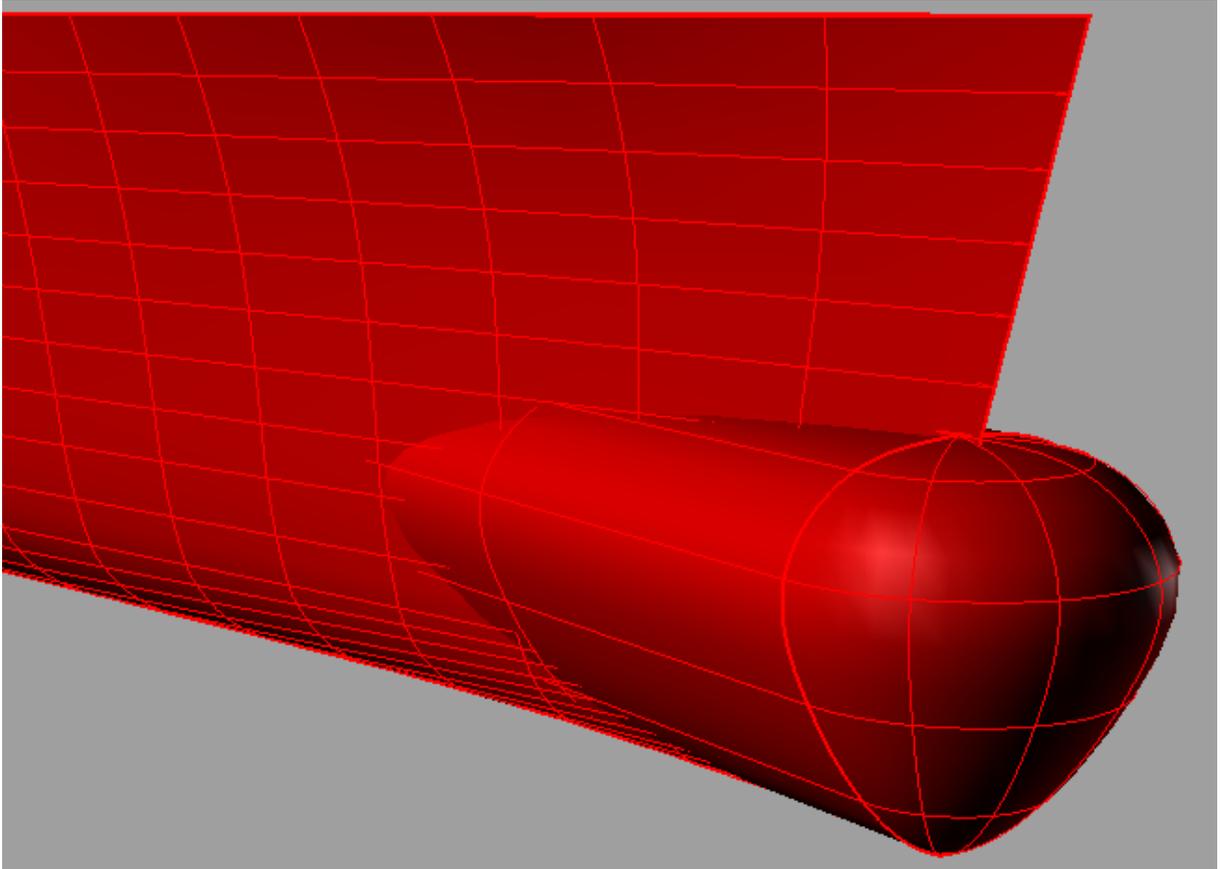
Figura 24 - Forma do Bulbo 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalmente para o bulbo 4, foi adotado um perfil de bulbo onde a largura máxima se encontra acima do ponto médio da altura na seção do bulbo, diferenciando dos três primeiros modelos apresentados. Esse modelo é descrito em Kracht (1978) como um perfil “nabla”. A visualização tridimensional da geometria modelada para o bulbo nabla pode ser vista na Figura 25.

Figura 25 - Formas de Bulbo 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada bulbo foi criado com uma dimensão inicial de modo que todas as formas pudessem ser comparadas de maneira paramétrica, umas com as outras, após obtidos os resultados das simulações. Além disso, as variações de dimensão para cada bulbo foram feitas da mesma maneira para cada bulbo. Nas seções seguintes, o método como essas variações foram feitas serão discutidos e explicados. As dimensões adotadas são as descritas em Kracht (1978), a Tabela 10 mostra os resultados para cada bulbo.

Tabela 10 - Dimensões Iniciais dos Bulbos

Dimensões	Bulbo 1	Bulbo 2	Bulbo 3	Bulbo 4
Comprimento	0,07	0,07	0,07	0,07
Boca	0,2	0,14	0,14	0,19
Calado	0,1	0,1	0,07	0,14
Área seção	0,0292	0,0187	0,0187	0,0256
Área lateral	0,0104	0,0093	0,0093	0,0085
Volume a vante	0,0013	0,0008	0,0012	0,001
Volume total*	0,008	0,007	0,007	0,007

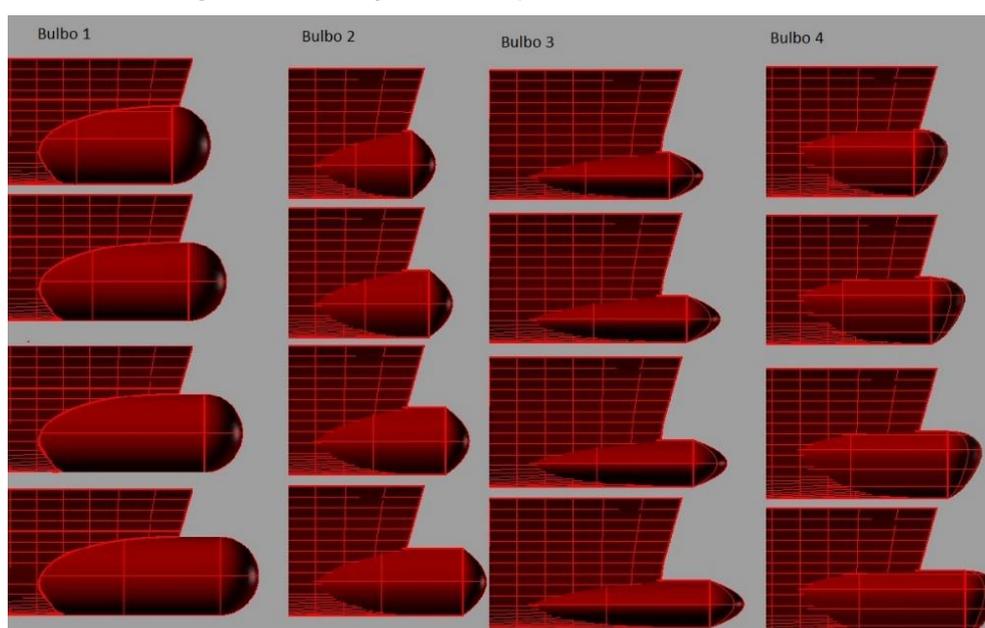
*O volume total é a diferença entre o deslocamento que o casco possui com e sem o bulbo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1. Variação das formas dos Bulbos

Adotou-se o mesmo método para a variação das formas dos bulbos estudadas. As formas foram variadas de duas maneiras, na primeira delas foi variado o comprimento do bulbo e na segunda a largura da seção transversal do mesmo. Para as variações nos comprimentos, adicionou-se 0,05 m a partir da seção perpendicular de vante do bulbo, obtendo-se assim 4 bulbos de mesma forma, porém comprimentos diferentes, conforme visto na Figura 26.

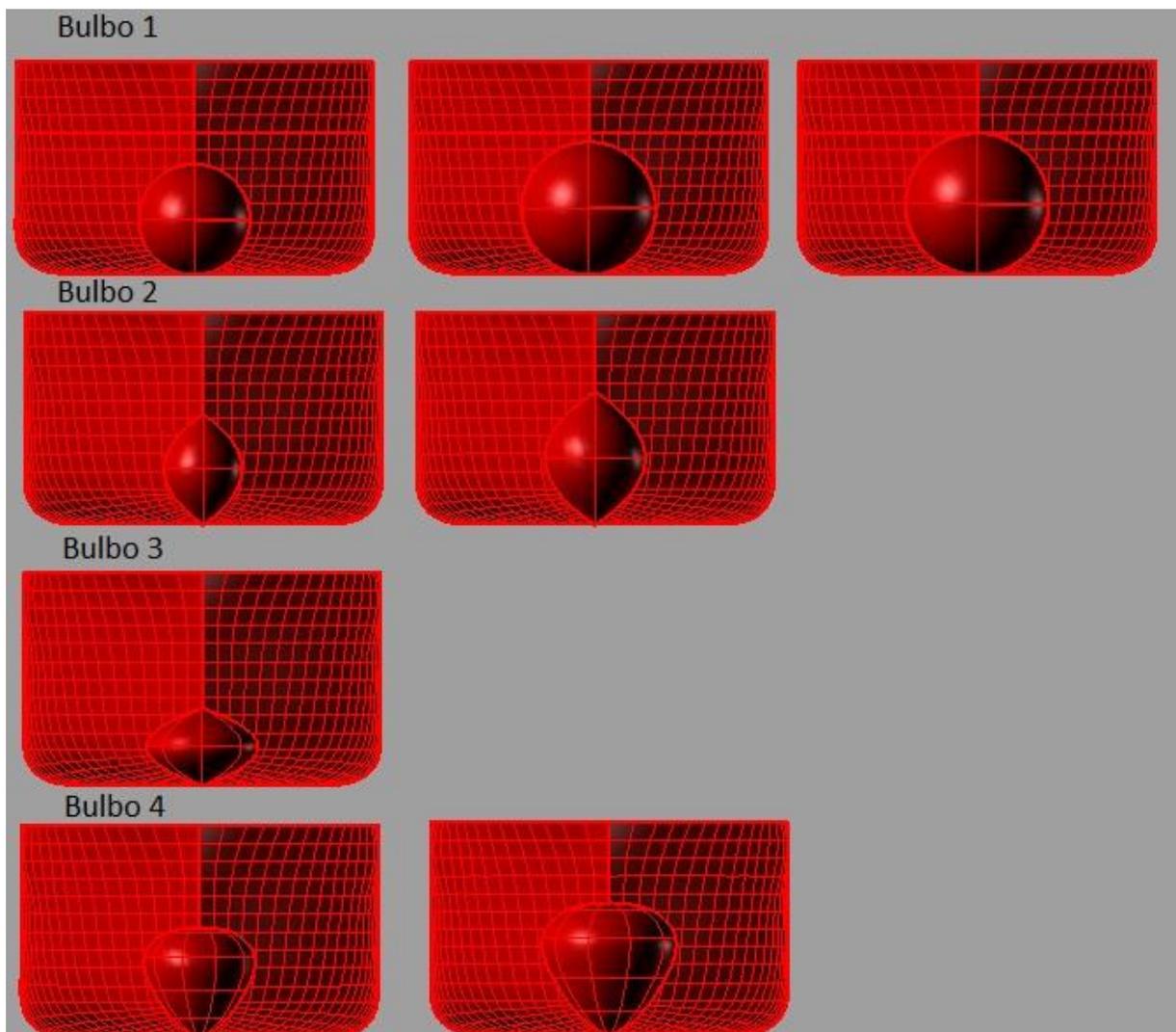
Figura 26 - Variação do Comprimento dos Bulbos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a segunda variação, aumentou-se a boca do bulbo na seção da perpendicular de vante. Diferentemente da primeira variação, essa não foi feita igual para todos os bulbos. O bulbo 1 teve duas variações de boca, o bulbo 2 e 4 teve uma variação e o bulbo 3 nenhuma, todas as variações a partir da dimensão inicial. A Figura 27 ilustra os resultados obtidos.

Figura 27 - Variação da Boca dos Bulbos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a variação da boca, usou-se o mesmo método de variação do comprimento descrito anteriormente para gerar novas dimensões de bulbo a partir do comprimento. Assim, cada bulbo com a nova boca tem quatro comprimentos diferentes. Finalmente, obteve-se então 32 formas de bulbo que foram simuladas em três números de Froude diferentes.

Todas as variações de comprimento e boca foram feitas de modo que ao calcular-se os parâmetros de comprimento e boca descritos em Kracht (1978), os parâmetros ficassem iguais para as devidas comparações. Ao variar essas duas dimensões, inevitavelmente outros parâmetros foram modificados. Porém, as análises posteriores foram feitas apenas com parâmetro do comprimento e da boca do bulbo.

4.2. Simulações

Cada simulação foi feita com três números de Froude diferentes: 0, 0.15 e 0.25. Os resultados serão apresentados para cada um dos números de Froude, para uma boca e os quatro comprimentos que essa boca foi variada. No mesmo gráfico será também mostrado o resultado, anteriormente calculado, do casco da série 60 sem bulbo.

4.2.1. Resultados para Bulbo 1 A-D

A seguir, são mostrados os resultados para o bulbo 1 e suas correspondentes variações de dimensão. As bocas utilizadas para o bulbo 1 são: 0.1, 0.12 e 0.128 metros. Utilizando o programa Rhinoceros com o auxílio do *plug-in* Orca 3D, foi possível gerar a Tabela 11 que mostra as propriedades do casco com a inserção de cada bulbo com boca de 0.1 m através de sua variação de comprimento.

Tabela 11 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 1 A-D

	CAD (ORCA3D)	Bulbo 1-A	Bulbo 1-B	Bulbo 1-C	Bulbo 1-D
Boca do Bulbo [m]	0	0,2	0,2	0,2	0,2
Comprimento do Bulbo [m]	0	0,07	0,12	0,17	0,22
Coefficiente de Bloco	0,686	0,695	0,697	0,699	0,702
Volume Deslocado [m ³]	0,520	0,528	0,529	0,531	0,532
Coefficiente Prismático	0,696	0,707	0,709	0,711	0,713
FB/Lpp	0,513	0,519	0,520	0,522	0,524
Loa/Boa	7,091	7,336	7,413	7,487	7,568

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros para cada bulbo então foram calculados a partir dos dados do casco e do bulbo. Os resultados são mostrados na Tabela 12.

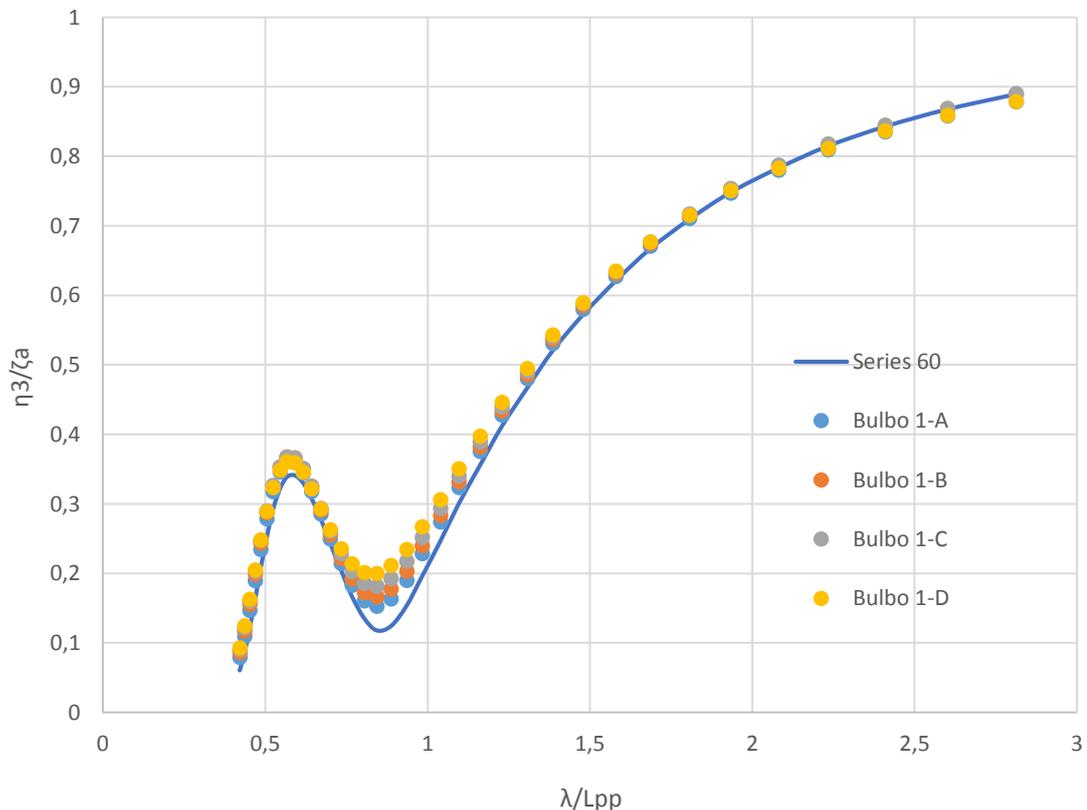
Tabela 12 – Parâmetros do Bulbo 1 A-D

Parâmetros	Bulbo 1-A	Bulbo 1-B	Bulbo 1-C	Bulbo 1-D
C_{LPR}	1,53%	2,62%	3,72%	4,81%
C_{BB}	31,01%	31,01%	31,01%	31,01%
C_{ZB}	38,76%	38,76%	38,76%	38,76%
C_{ABT}	17,80%	19,17%	19,17%	19,17%
C_{VPR}	0,25%	0,54%	0,85%	1,13%
C_{VT}	1,54%	1,73%	2,12%	2,31%

Fonte: Elaborado pelo autor.

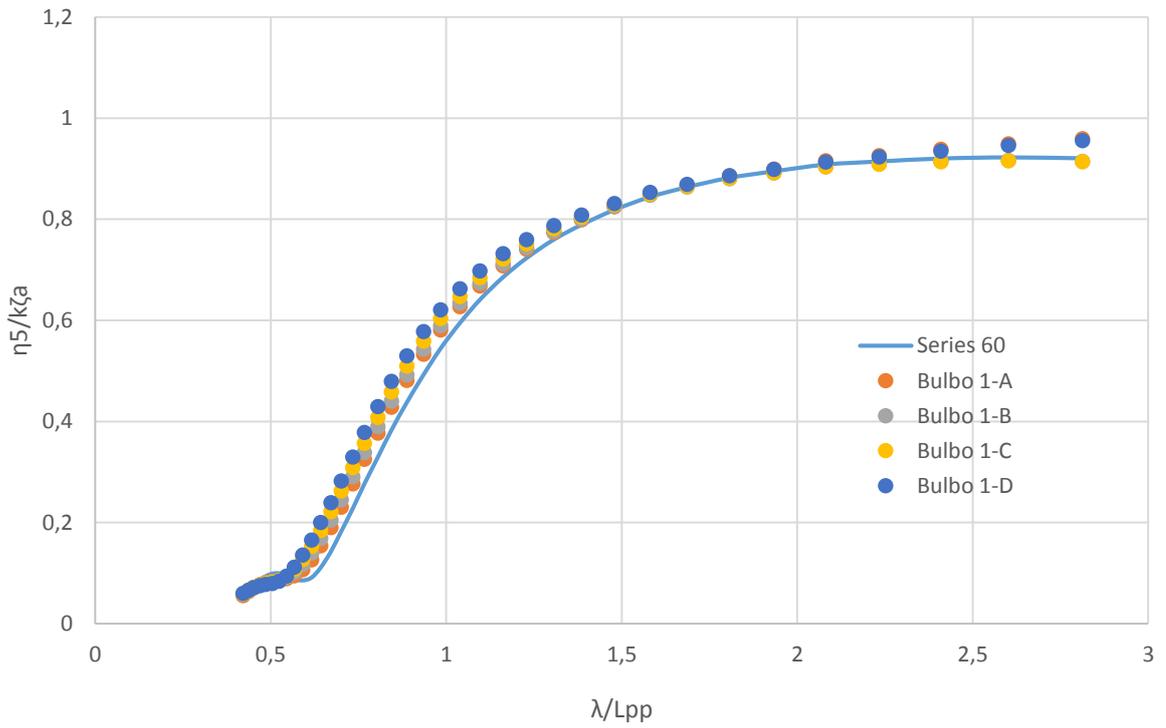
Após levantar os parâmetros dos bulbos, as presentes formas foram simuladas no AQWA. A Figura 29 até a Figura 33 apresentam os resultados para *heave* e *pitch* para as variações de A até D do Bulbo 1 para os números de Froude estudados.

Figura 28 - Resultados para *Heave* Bulbo 1 A-D, $Fn=0$



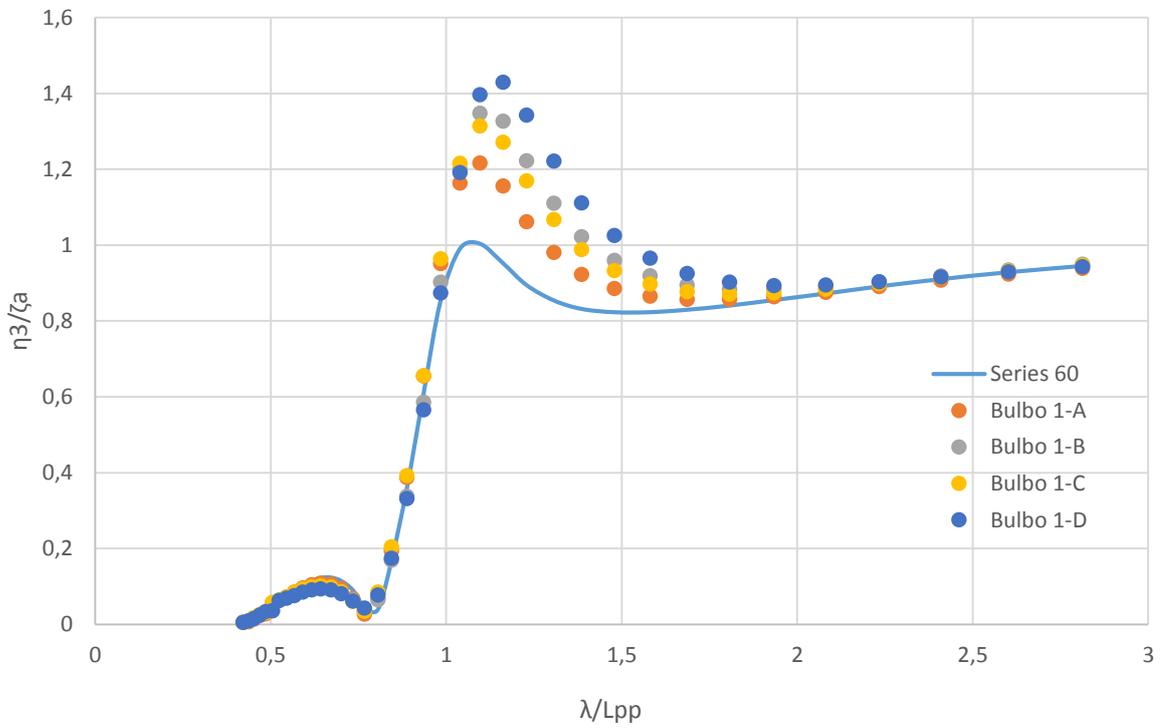
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 29 - Resultados para *Pitch* Bulbo 1 A-D, $F_n=0$



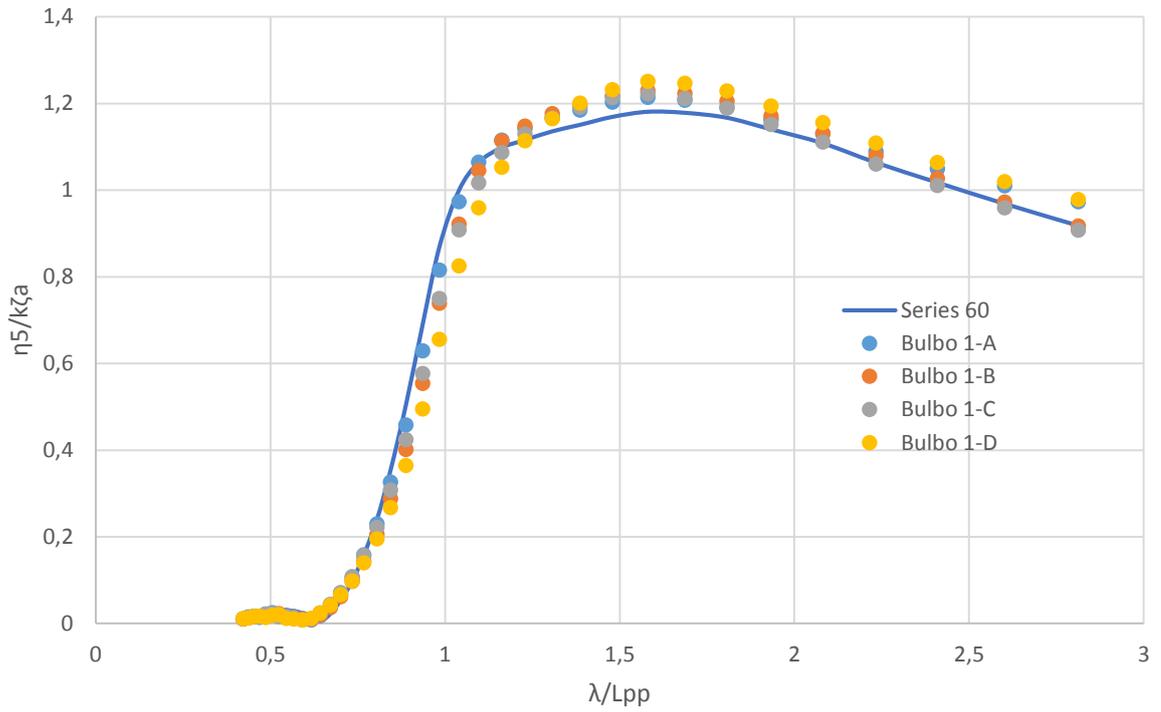
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Resultados para *Heave* Bulbo 1 A-D, $F_n=0.15$



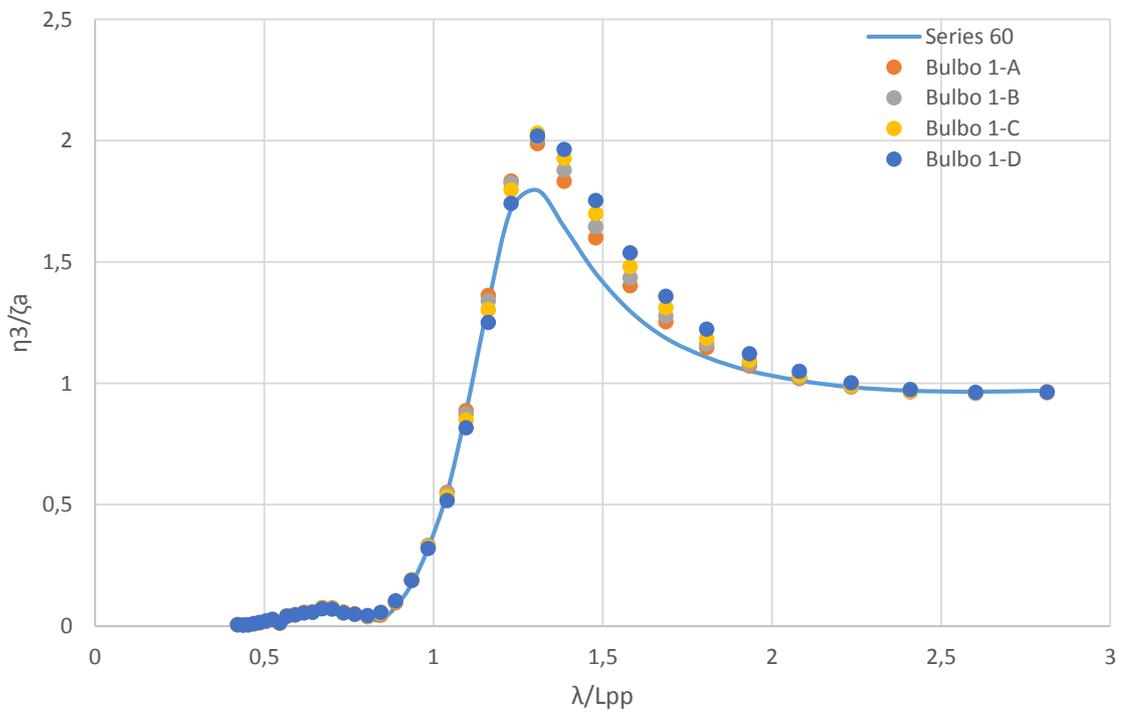
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Resultados para *Pitch* Bulbo 1 A-D, $F_n=0.15$

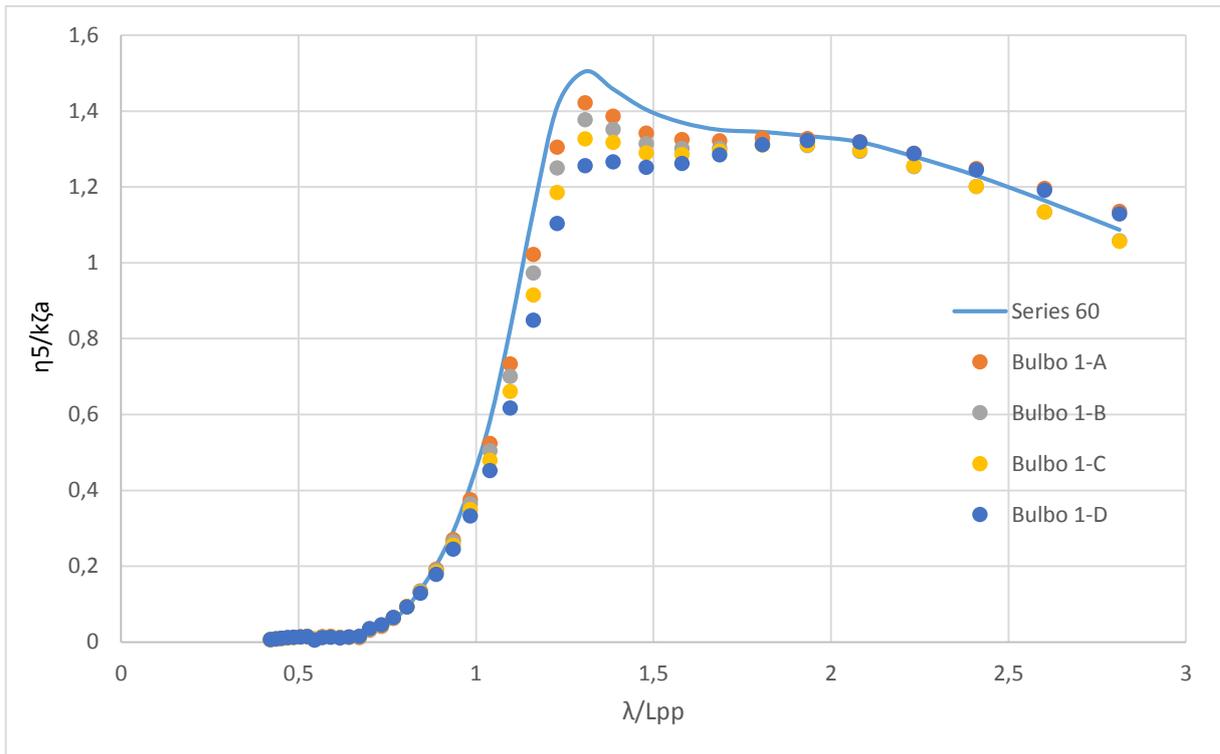


Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Resultados para *Heave* Bulbo 1 A-D, $F_n=0.25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Resultados para *Pitch* Bulbo 1 E-H, $F_n=0.25$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2. Resultados para Bulbo 1 E-H

Para a segunda variação a boca do Bulbo 1 foi aumentada para 0.12 m. Novamente, seu comprimento foi variado usando o método descrito. As Tabela 13 e a Tabela 14 mostram os parâmetros do casco e os parâmetros do bulbo respectivamente.

Tabela 13 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 1 E-H

	CAD (ORCA3D)	Bulbo 1-E	Bulbo 1-F	Bulbo 1-G	Bulbo 1-H
Boca do Bulbo [m]	0	0,24	0,24	0,24	0,24
Comprimento do Bulbo [m]	0	0,09	0,14	0,19	0,24
Coefficiente de Bloco	0,686	0,702	0,705	0,706	0,711
Volume Deslocado [m ³]	0,520	0,533	0,535	0,537	0,539
Coefficiente Prismático	0,696	0,713	0,717	0,72	0,723
FB/Lpp	0,513	0,523	0,525	0,527	0,53
Loa/Boa	7,091	7,363	7,443	7,522	7,599

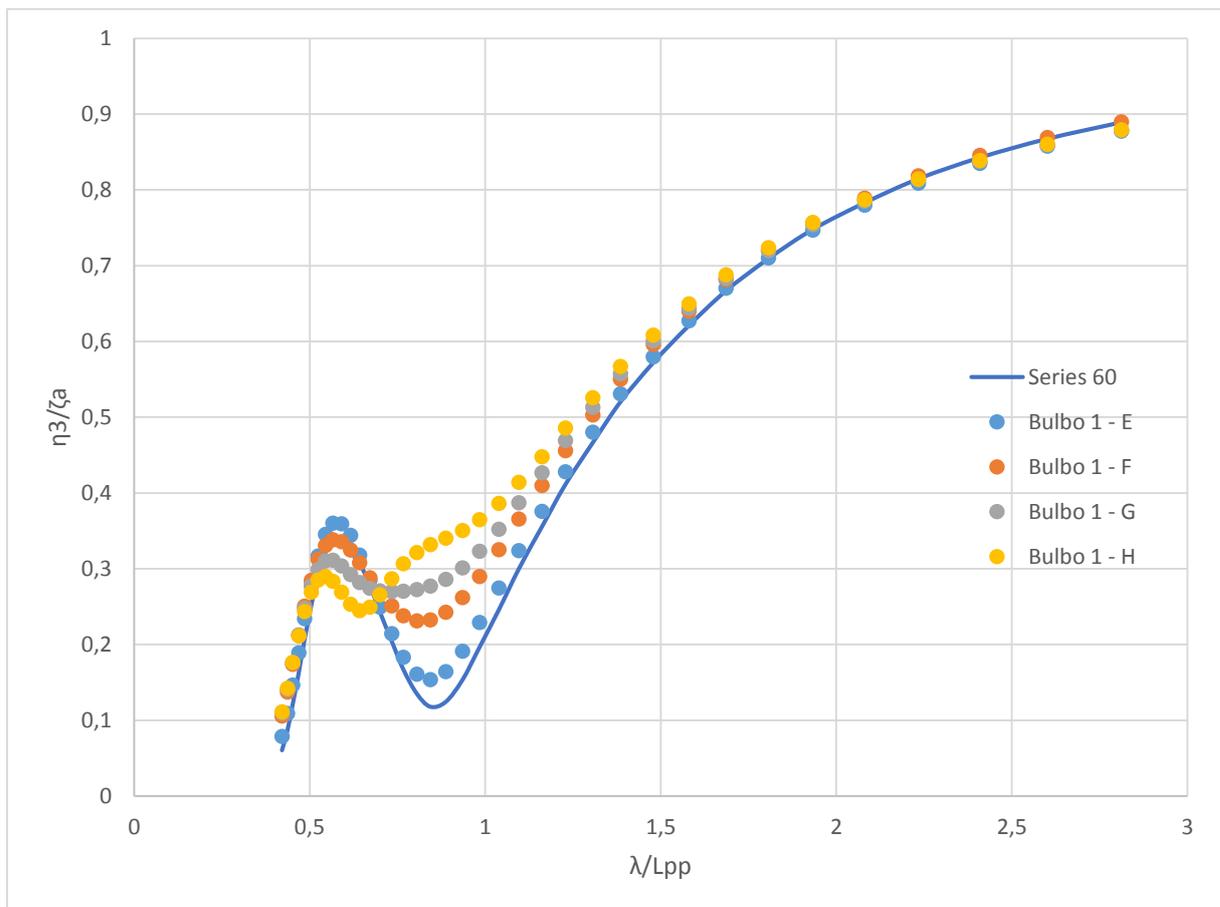
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Parâmetros do Bulbo 1 E-F

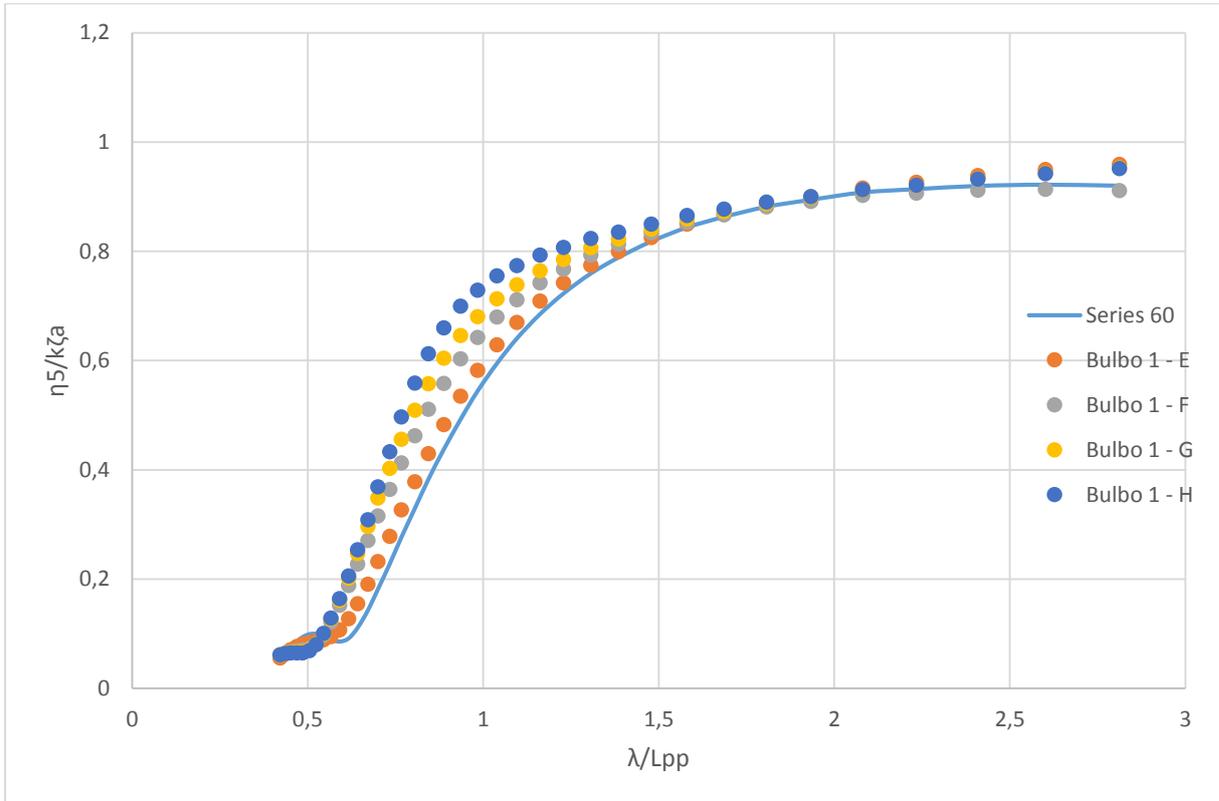
Parâmetros	Bulbo 1-E	Bulbo 1-F	Bulbo 1-G	Bulbo 1-H
C_{LPR}	1,97%	3,06%	4,15%	5,25%
C_{BB}	37,21%	37,21%	37,21%	37,21%
C_{ZB}	46,51%	46,51%	46,51%	46,51%
C_{ABT}	27,60%	27,60%	27,60%	27,60%
C_{VPR}	0,47%	0,90%	1,34%	1,78%
C_{VT}	2,50%	2,88%	3,27%	3,65%

Fonte: Elaborado pelo autor.

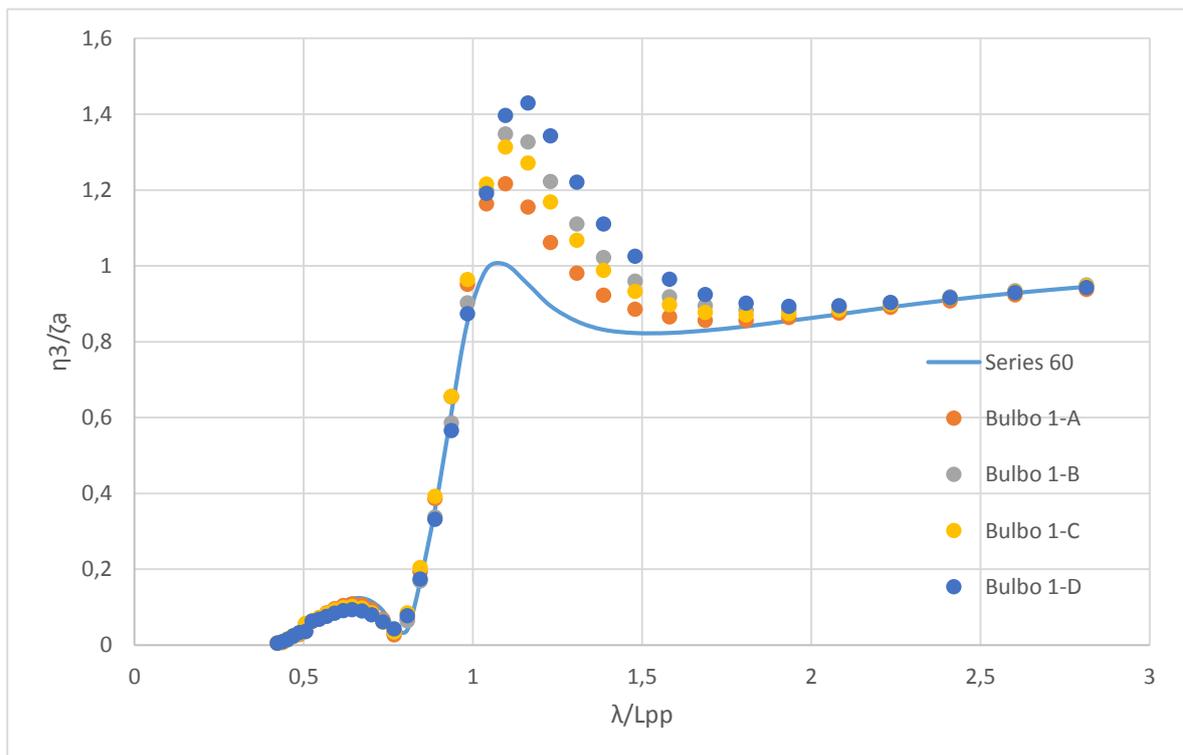
A Figura 34 até a Figura 39 mostram os novos resultados para o RAO do casco da série 60 com a inserção dessa série de bulbos.

Figura 34 - Resultados para *Heave* Bulbo 1 E-H, $F_n=0$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

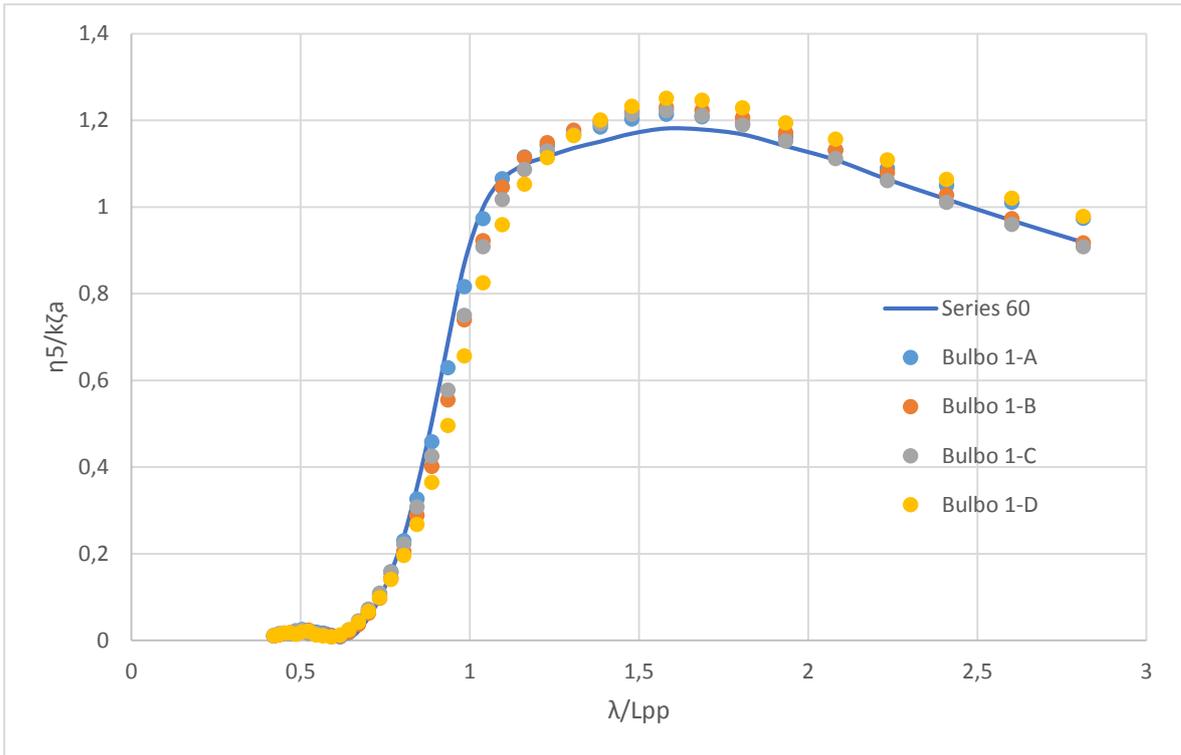
Figura 35 - Resultados para *Pitch* Bulbo 1 E-H, $F_n=0$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Resultados para *Heave* Bulbo 1 E-H, $F_n=0.15$ 

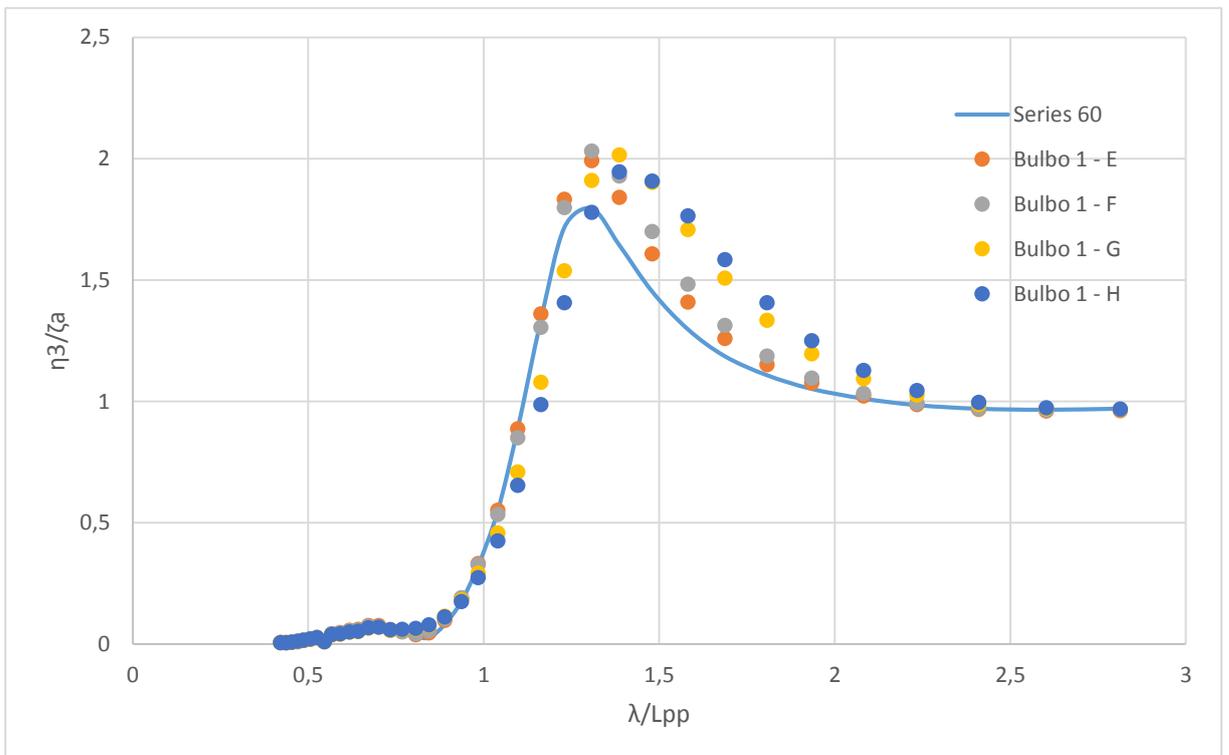
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Resultados para *Pitch* Bulbo 1 E-H, $Fn=0.15$

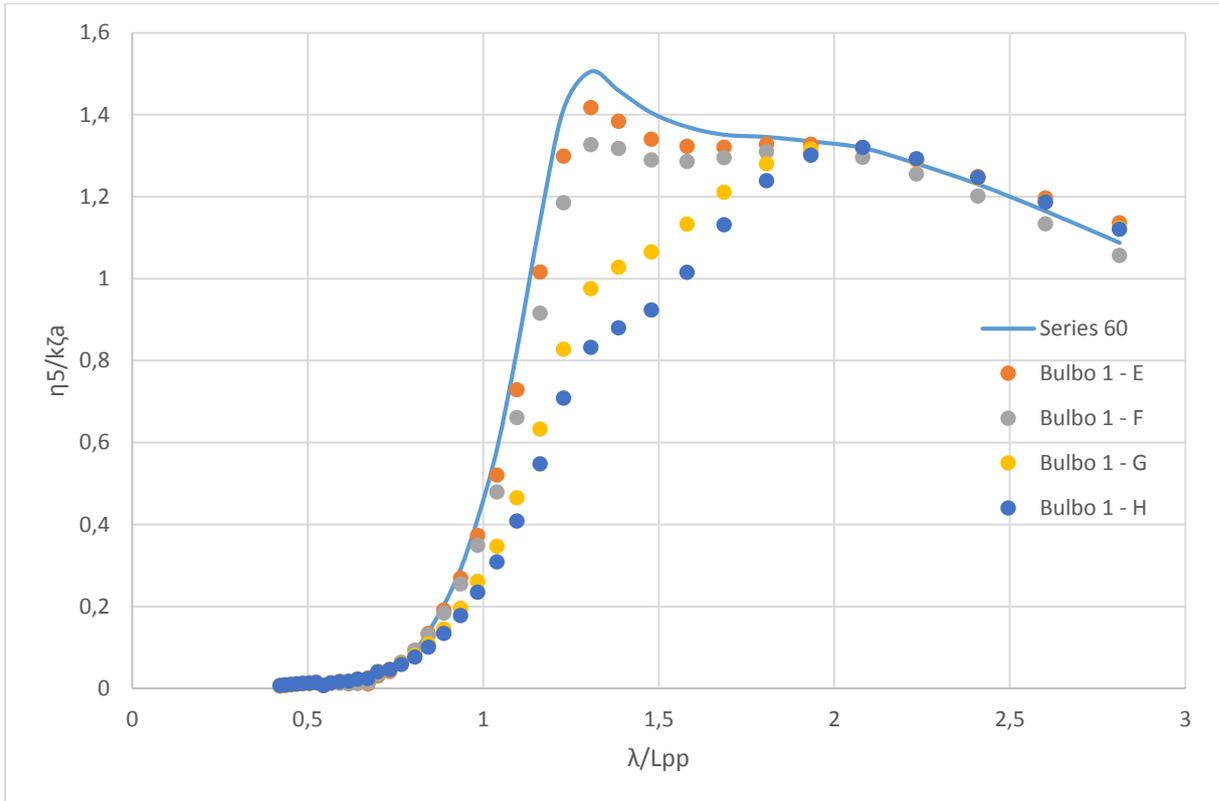


Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Resultados para *Heave* Bulbo 1 E-H, $Fn=0.25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Resultados para *Pitch* Bulbo 1 E-H, $F_n=0.25$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3. Resultados para Bulbo 1 I-L

Finalmente, para a última série do Bulbo 1 foi adotado um valor de boca de 0,128m. Com esse valor o bulbo tem sua altura no limite da linha d'água do casco que possui um calado de 0,258 m possibilitando então analisar o efeito que um bulbo muito junto a superfície tem. A Tabela 15 mostram as propriedades do casco com a inserção do bulbo e a Tabela 16 mostra os parâmetros dessa forma de bulbo.

Tabela 15 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 1 J-L

	CAD (ORCA3D)	Bulbo 1-I	Bulbo 1-J	Bulbo 1-K	Bulbo 1-L
Boca do Bulbo [m]	0	0,256	0,256	0,256	0,256
Comprimento do Bulbo [m]	0	0,098	0,148	0,198	0,248
Coefficiente de Bloco	0,686	0,705	0,708	0,712	0,715
Volume Deslocado [m ³]	0,520	0,535	0,538	0,54	0,543
Coefficiente Prismático	0,696	0,716	0,721	0,724	0,727
FB/Lpp	0,513	0,525	0,528	0,53	0,532
Loa/Boa	7,091	7,376	7,47	7,534	7,612

Fonte: Elaborado pelo autor.

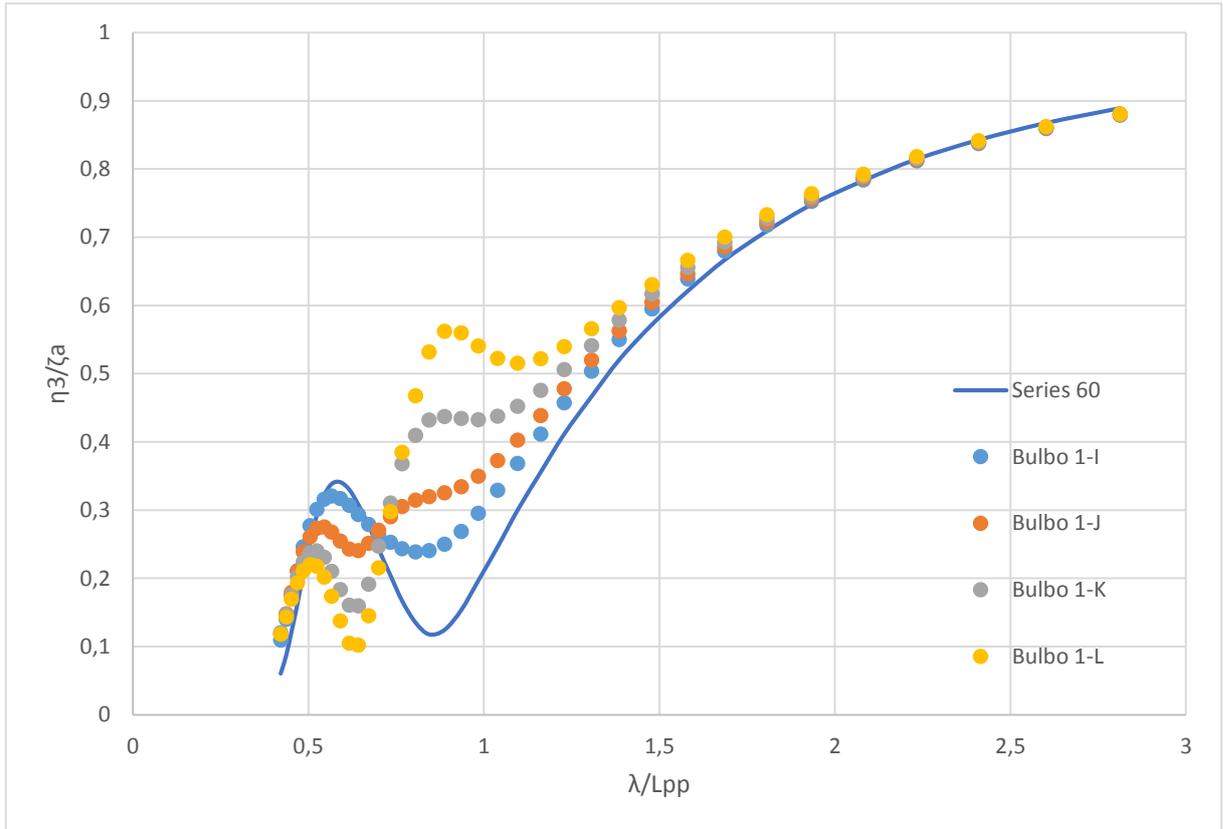
Tabela 16 - Parâmetros do Bulbo 1 I-L

Parâmetros	Bulbo 1-I	Bulbo 1-J	Bulbo 1-K	Bulbo 1-L
C_{LPR}	2,14%	3,24%	4,33%	5,42%
C_{BB}	39,69%	39,69%	39,69%	39,69%
C_{ZB}	49,61%	49,61%	49,61%	49,61%
C_{ABT}	30,03%	31,40%	31,40%	31,40%
C_{VPR}	0,59%	1,08%	1,57%	2,06%
C_{VT}	2,88%	3,46%	3,85%	4,42%

Fonte: Elaborado pelo autor.

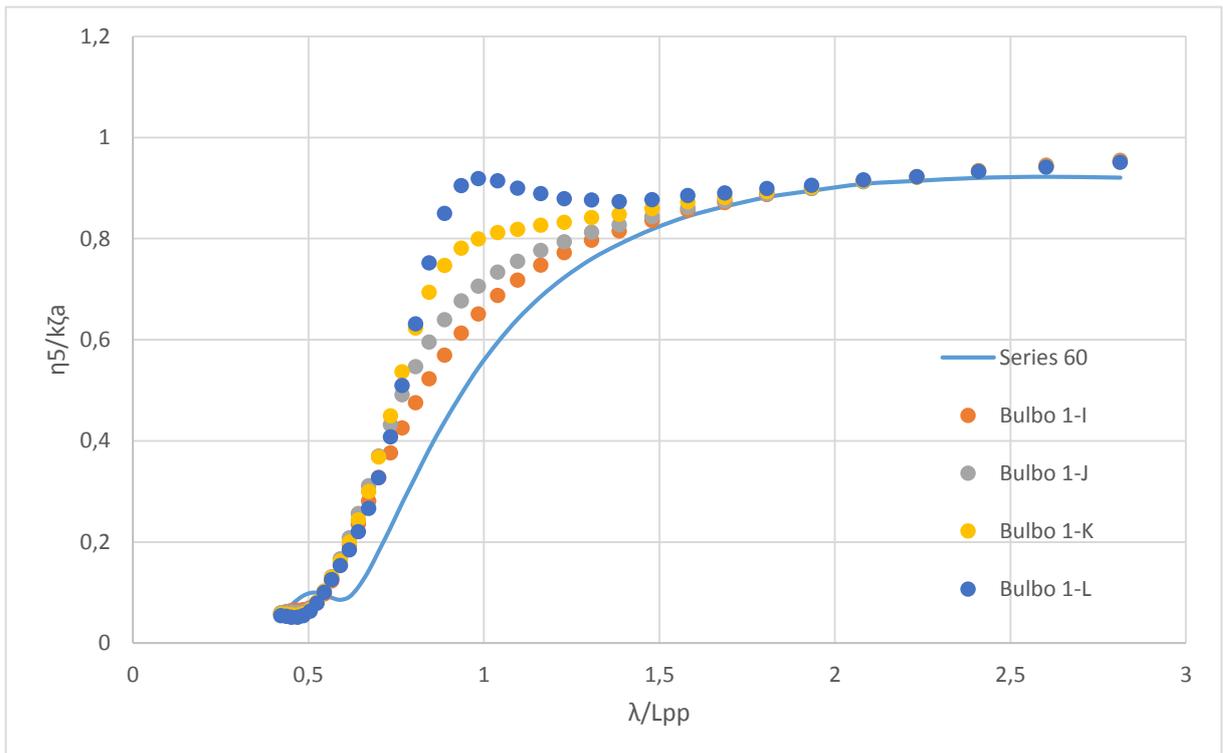
As Figura 40 até a Figura 45 mostram os resultados do RAO do casco da série 60 para a série I-L do Bulbo 1.

Figura 40 - Resultados para *Heave* Bulbo 1 I-L, $F_n=0$



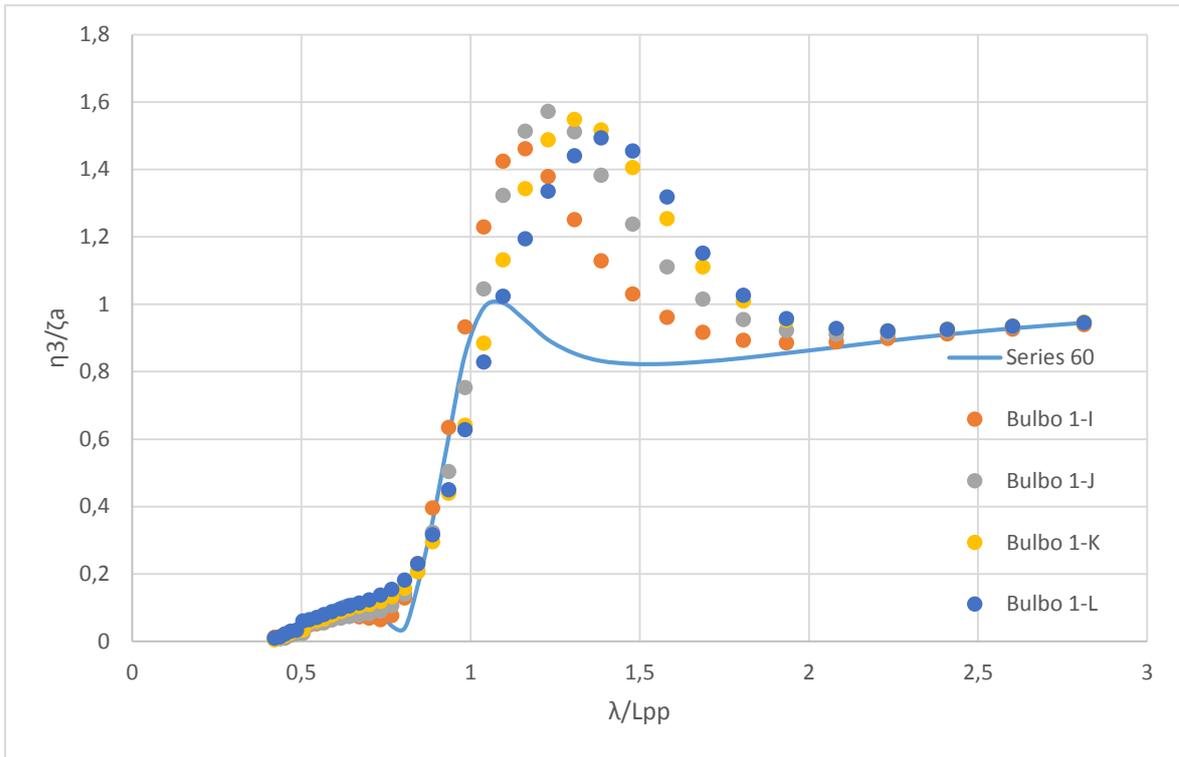
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 - Resultados para *Pitch* Bulbo 1 I-L, $F_n=0$



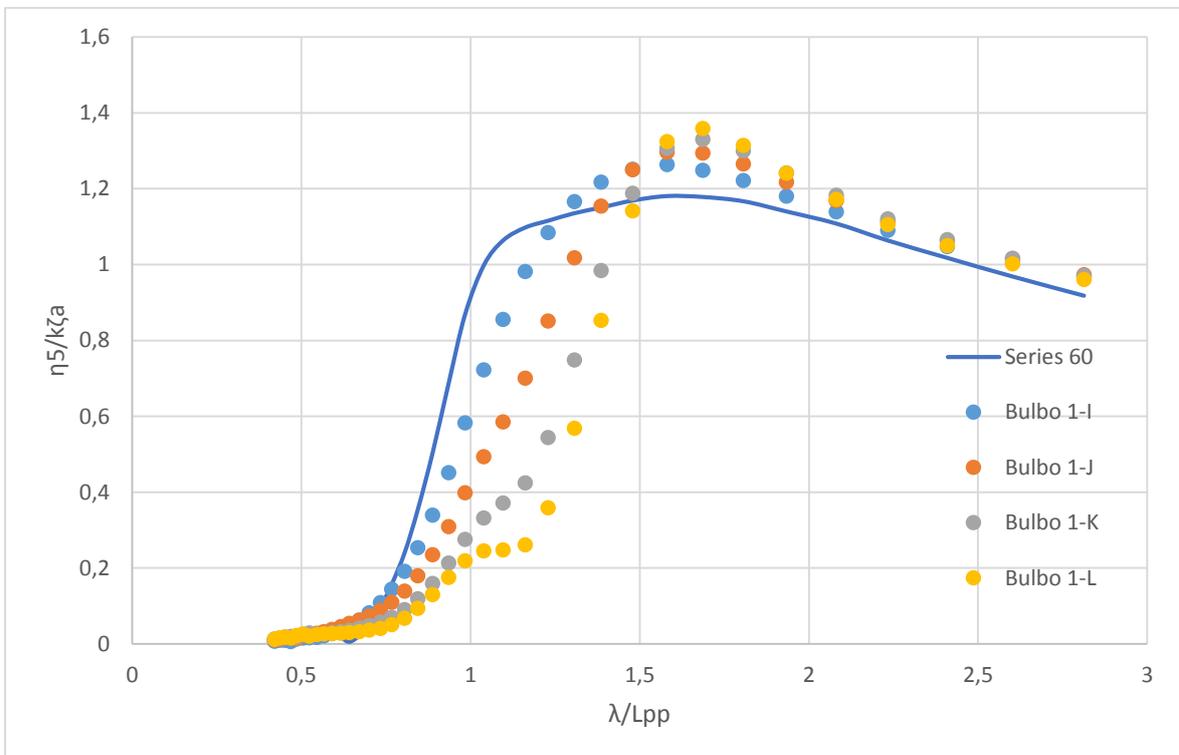
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Resultados para *Heave* Bulbo 1 I-L, $F_n=0.15$



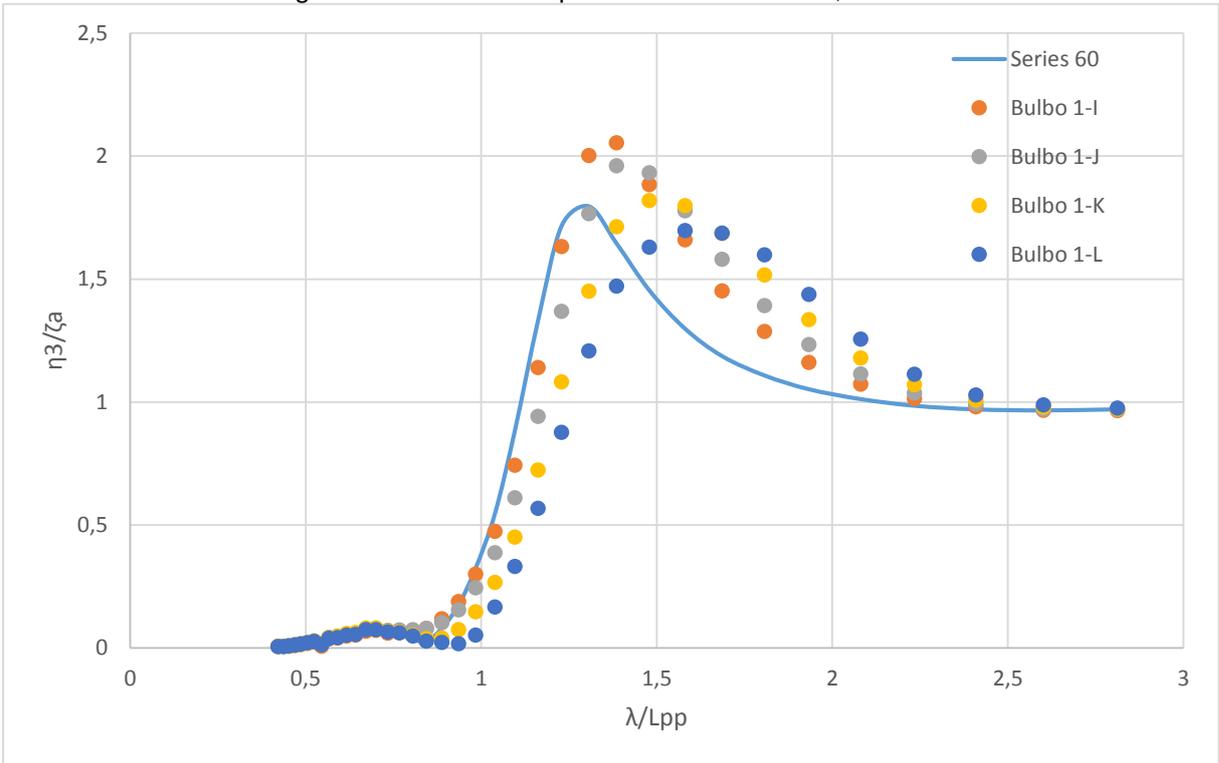
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 - Resultados para *Pitch* Bulbo 1 I-L, $F_n=0.15$



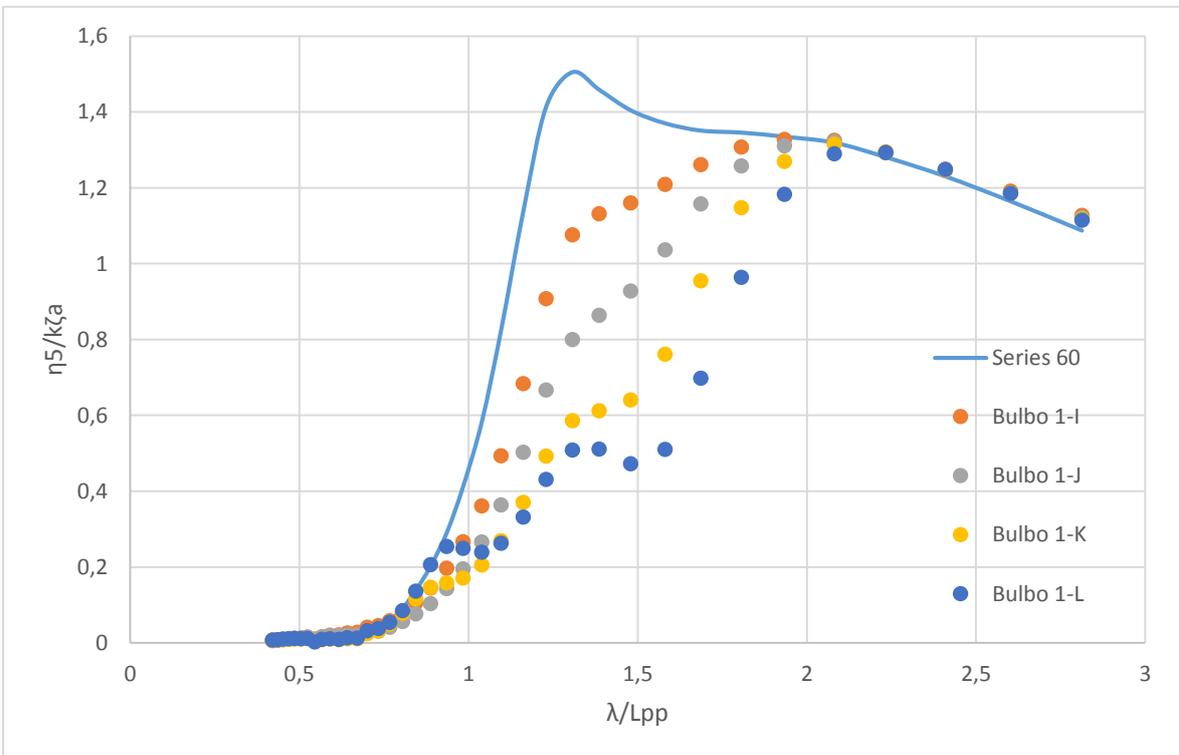
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Resultados para *Heave* Bulbo 1 I-L, $Fn=0.25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 - Resultados para *Pitch* Bulbo 1 I-L, $Fn=0.25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4. Resultados para Bulbo 2 A-D

Conforme descrito anteriormente, a segunda forma de bulbo possui duas variações de boca e para cada boca quatro variações de comprimento, totalizando assim 8 bulbos. A Tabela 16 mostra as propriedades do casco com a adição do bulbo e a Tabela 18 mostra os parâmetros do bulbo.

Tabela 17 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 2 A-D

	CAD (ORCA3D)	Bulbo 2-A	Bulbo 2-B	Bulbo 2-C	Bulbo 2-D
Boca [m]	0	0,14	0,14	0,14	0,14
Comprimento [m]	0	0,07	0,12	0,17	0,22
Coeficiente de Bloco	0,686	0,695	0,697	0,698	0,699
Volume Deslocado [m ³]	0,52	0,527	0,528	0,529	0,53
Coeficiente Prismático	0,696	0,706	0,707	0,708	0,711
FB/Lpp	0,513	0,519	0,519	0,52	0,521
Loa/Boa	7,091	7,329	7,406	7,484	7,561

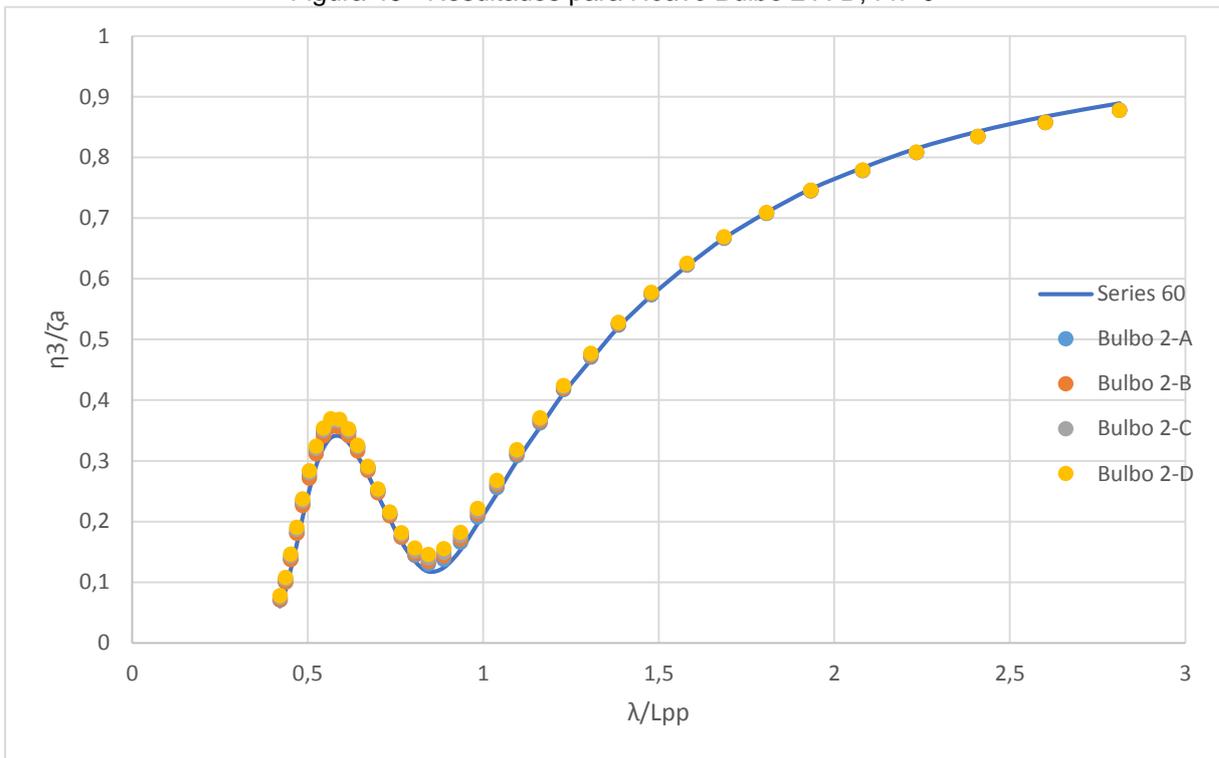
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 - Parâmetros do Bulbo 2 A-D

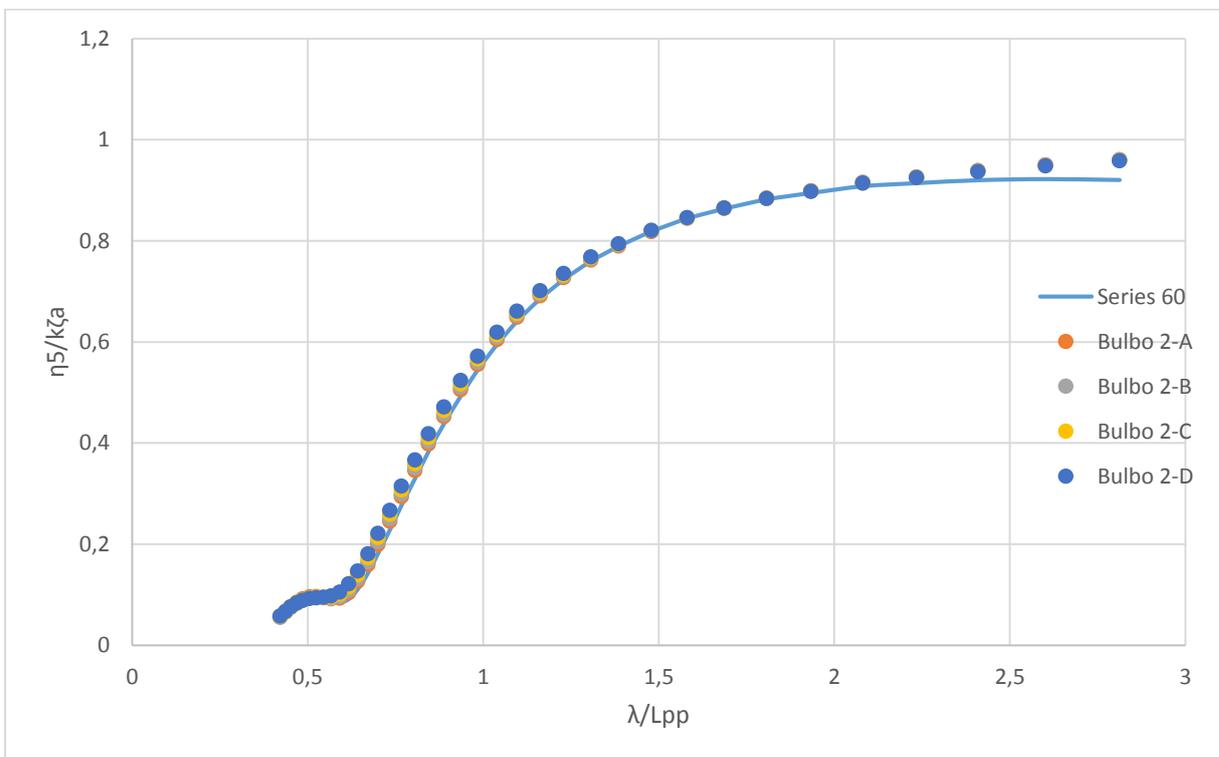
Parâmetros	Bulbo 2-A	Bulbo 2-B	Bulbo 2-C	Bulbo 2-D
C_{LPR}	1,53%	2,62%	3,72%	4,81%
C_{BB}	21,71%	21,71%	21,71%	21,71%
C_{ZB}	38,76%	38,76%	38,76%	38,76%
C_{ABT}	11,39%	11,39%	11,39%	11,39%
C_{VPR}	0,16%	0,34%	0,52%	0,70%
C_{VT}	1,35%	1,54%	1,73%	1,92%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Das Figura 46 até Figura 51 são mostrados os resultados para o comportamento do casco da série 60 em *heave* e *pitch* com a inserção dos bulbos.

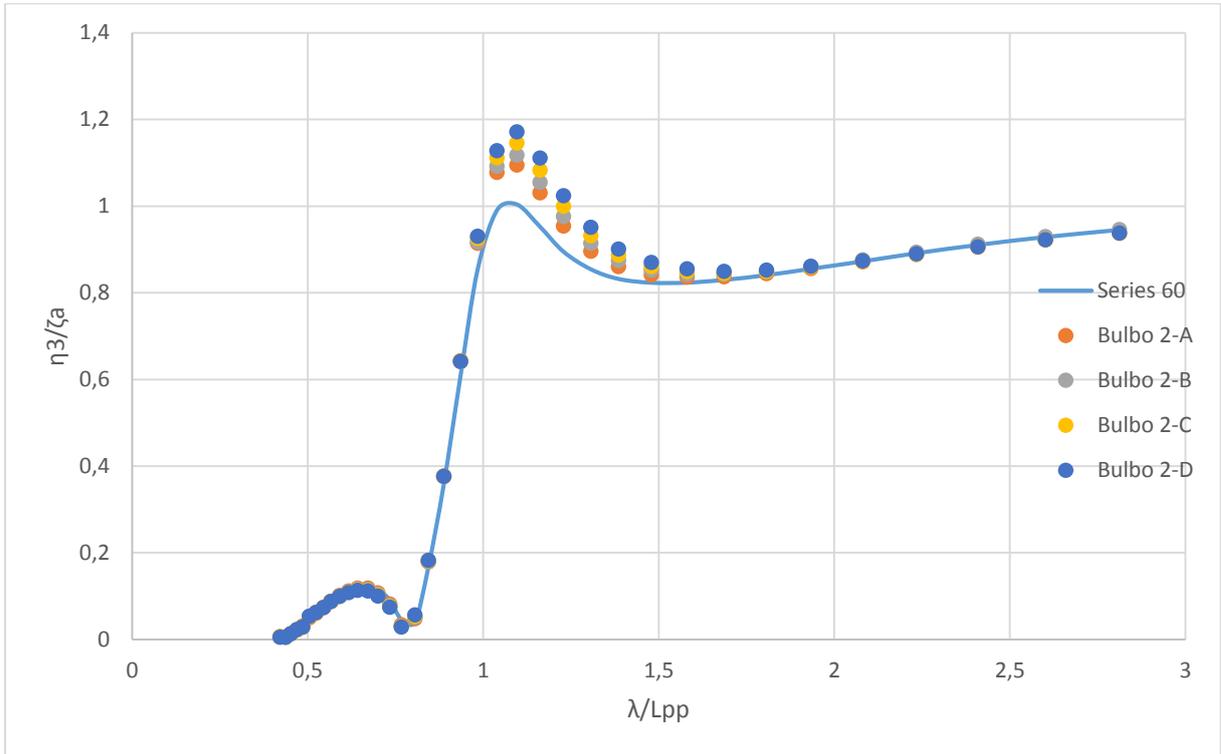
Figura 46 - Resultados para *Heave* Bulbo 2 A-D, $F_n=0$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Resultados para *Pitch* Bulbo 2 A-D, $F_n=0$ 

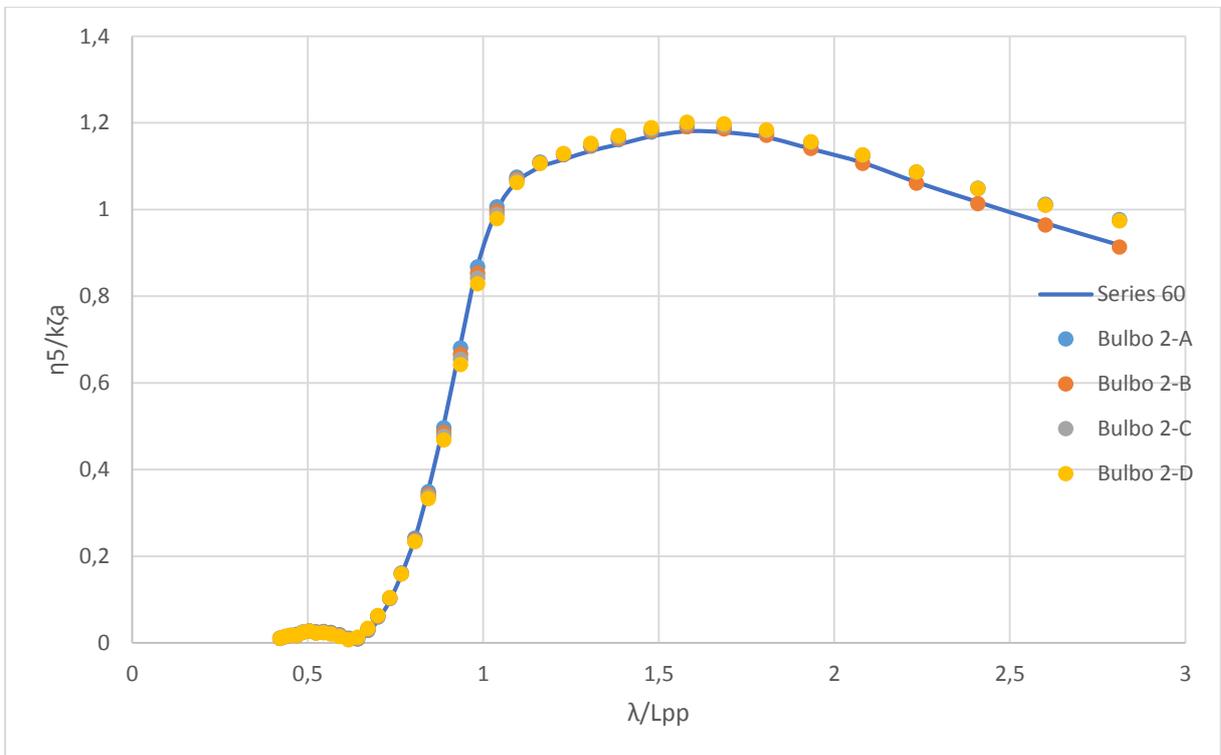
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 - Resultados para *Heave* Bulbo 2 A-D, $F_n=0.15$

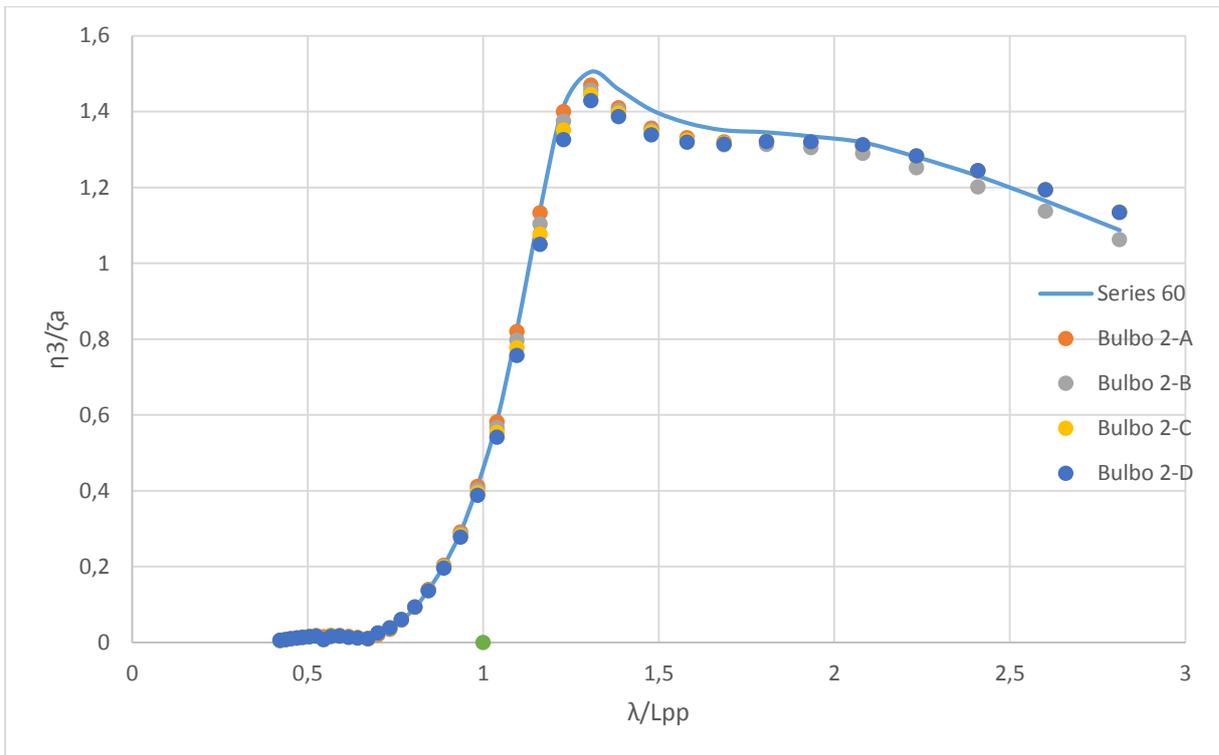


Fonte: Elaborado pelo autor.

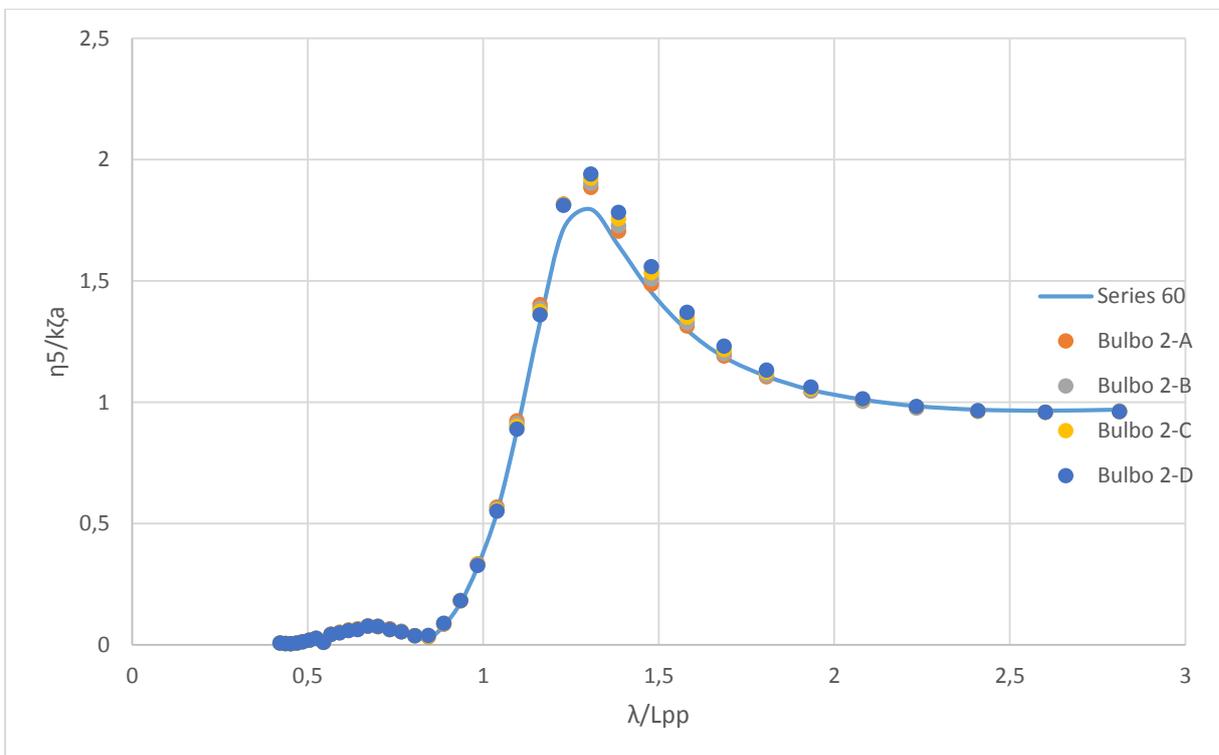
Figura 49 - Resultados para *Pitch* Bulbo 2 A-D, $F_n=0.15$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 - Resultados para *Heave* Bulbo 2 A-D, $F_n=0.25$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Resultados para *Pitch* Bulbo 2 A-D, $F_n=0.25$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5. Resultados para Bulbo 2 E-H

Para a segunda variação, a boca do bulbo foi aumentada para 0,18 m e as quatro variações de comprimento executadas. As Tabela 19 e a Tabela 19 mostram como essas variações do casco e os parâmetros do bulbo encontrados.

Tabela 19 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 2 E-H

	CAD (ORCA3D)	Bulbo 2-E	Bulbo 2-F	Bulbo 2-G	Bulbo 2-H
Boca [m]	0	0,18	0,18	0,18	0,18
Comprimento [m]	0	0,09	0,14	0,19	0,24
Coefficiente de Bloco	0,686	0,702	0,704	0,706	0,708
Volume Deslocado [m ³]	0,52	0,533	0,534	0,536	0,537
Coefficiente Prismático	0,696	0,714	0,716	0,718	0,72
FB/Lpp	0,513	0,523	0,524	0,526	0,527
Loa/Boa	7,091	7,36	7,437	7,515	7,592

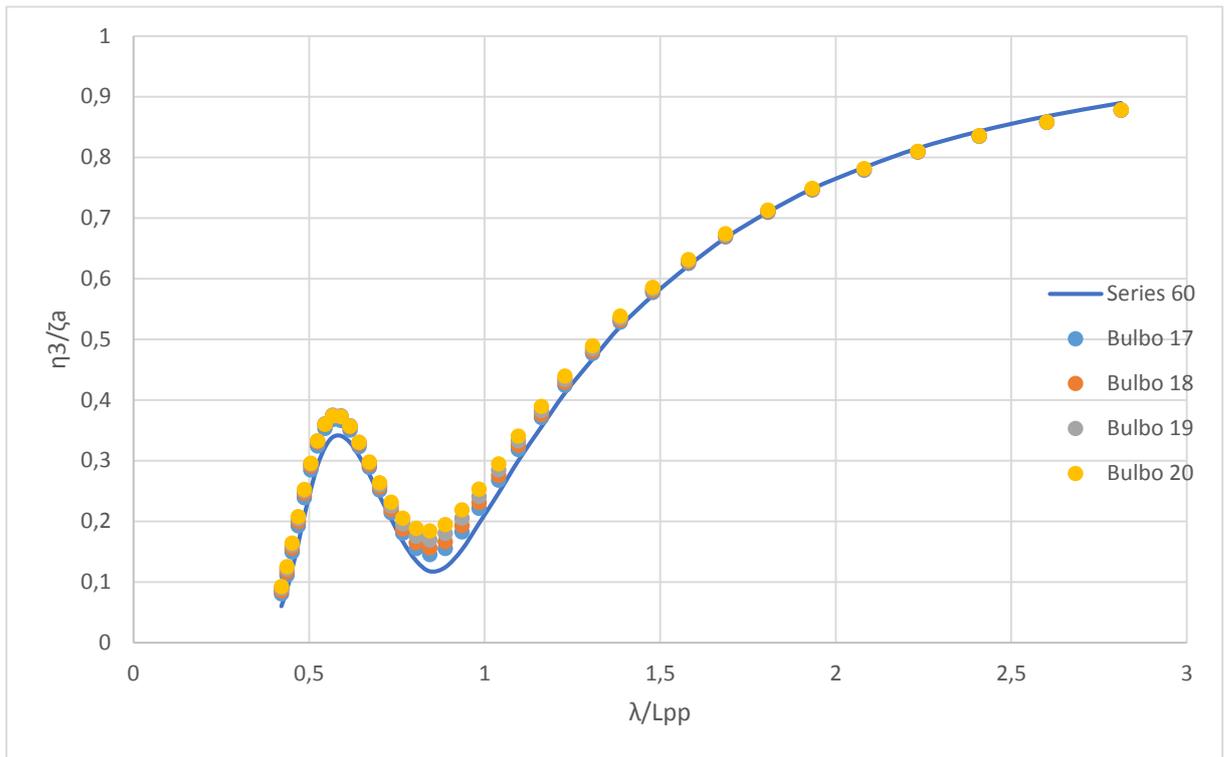
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 - Parâmetros do Bulbo 2 E-H

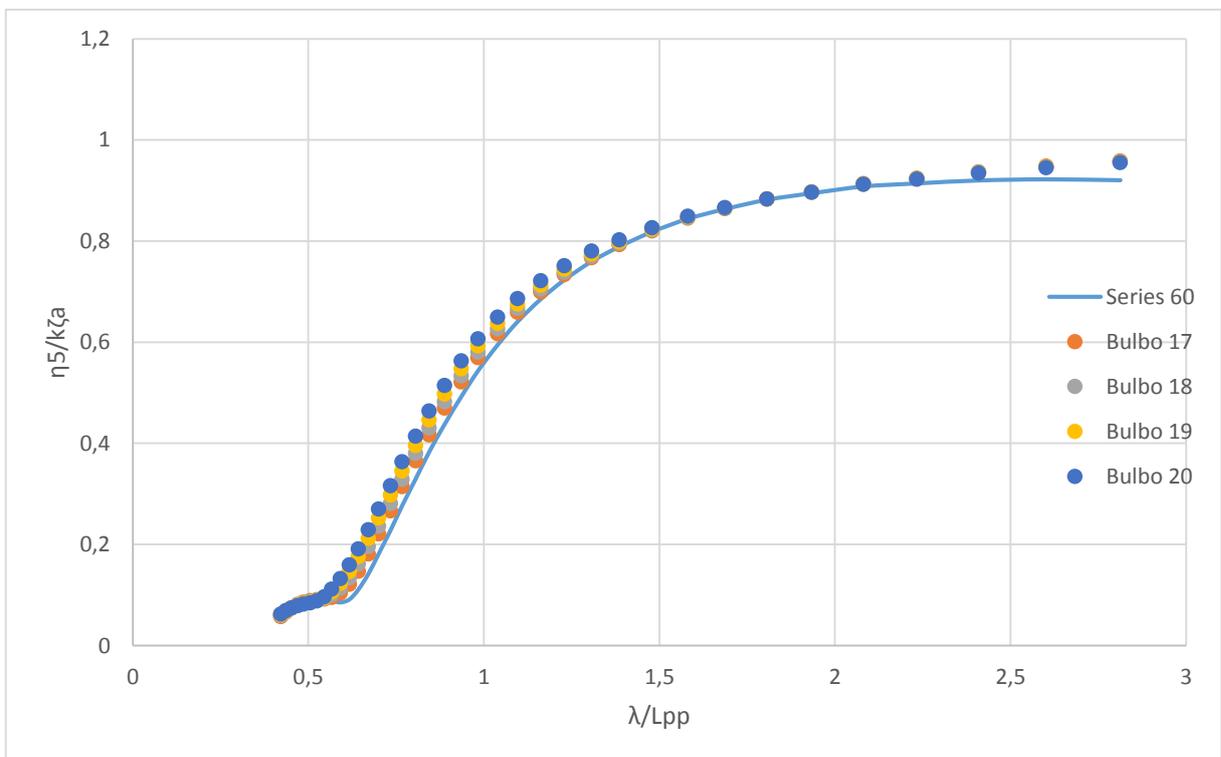
Parâmetros	Bulbo 2-E	Bulbo 2-F	Bulbo 2-G	Bulbo 2-H
C_{LPR}	1,97%	3,06%	4,15%	5,25%
C_{BB}	27,91%	27,91%	27,91%	27,91%
C_{ZB}	46,51%	46,51%	46,51%	46,51%
C_{ABT}	17,57%	17,57%	17,57%	17,57%
C_{VPR}	0,31%	0,59%	0,87%	1,14%
C_{VT}	2,50%	2,69%	3,08%	3,27%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para essa variação de bulbo, a boca é aumentada cerca de 6% em relação a primeira enquanto o volume total (C_{VT}) praticamente dobrou. Da Figura 52 até a Figura 57 são mostrados como essas variações mudaram a resposta do casco.

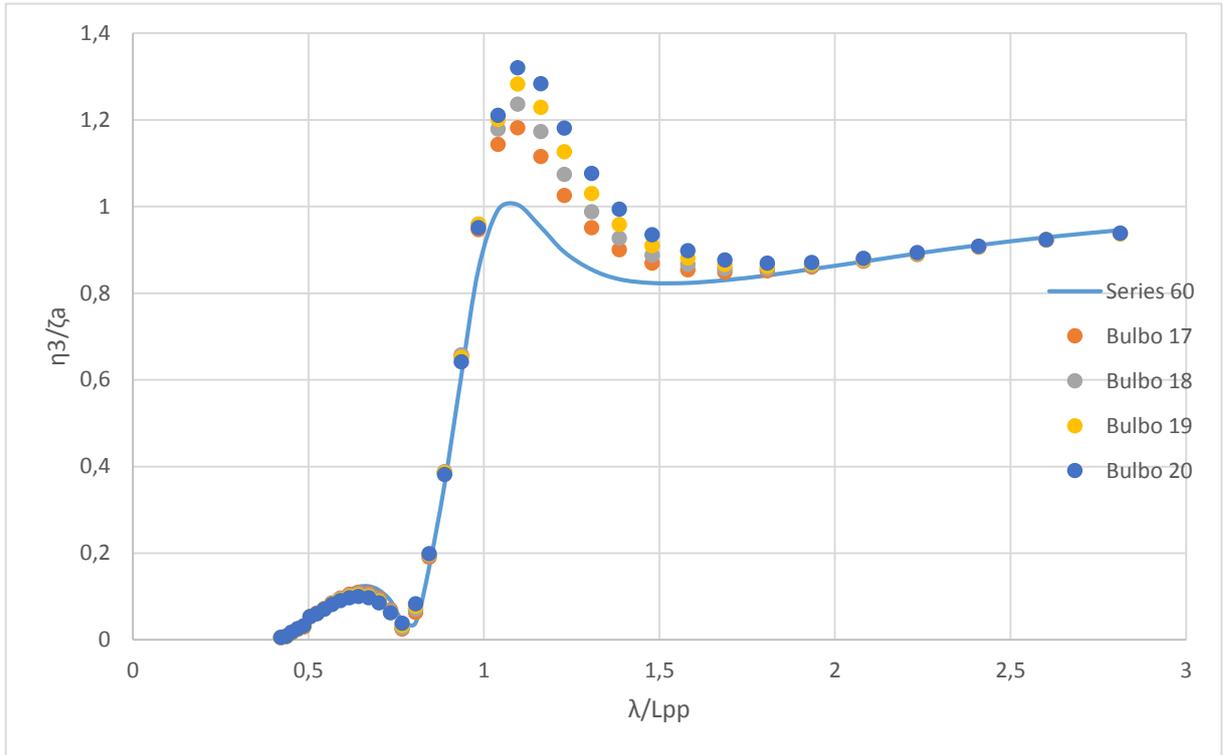
Figura 52 - Resultados para *Heave* Bulbo 2 E-H, $Fn=0$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53 - Resultados para *Pitch* Bulbo 2 E-H, $Fn=0$ 

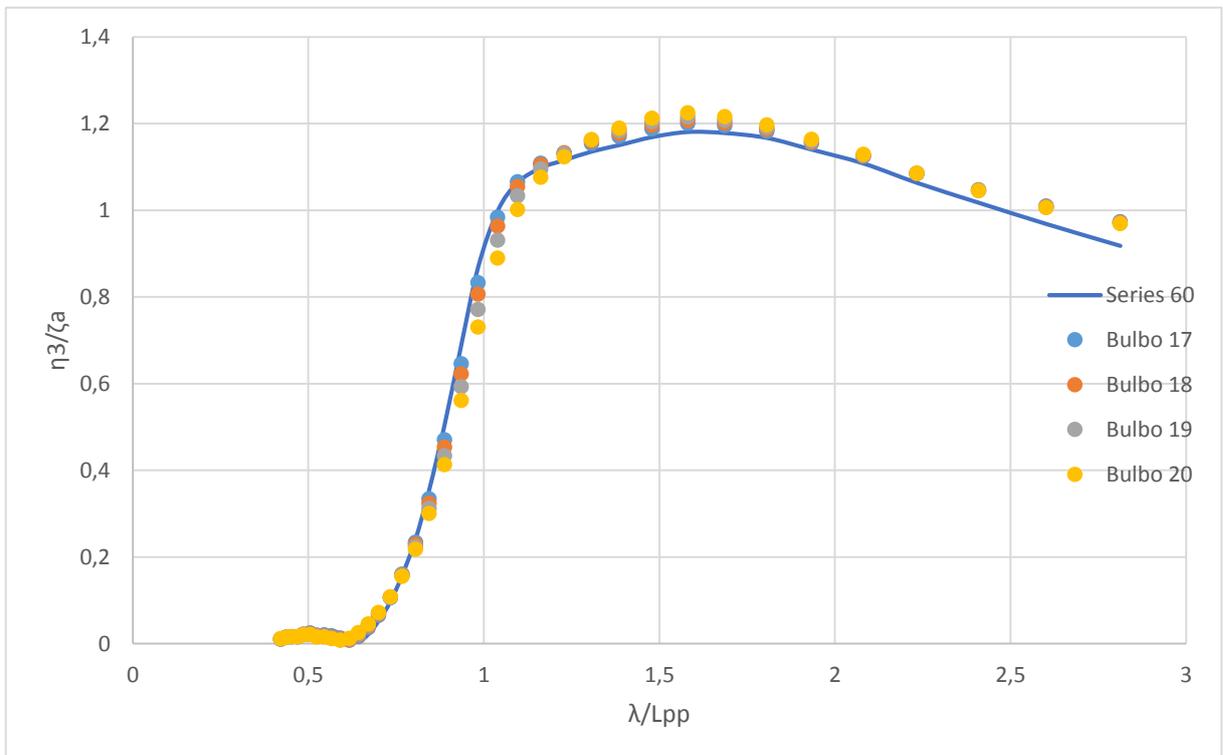
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 - Resultados para *Heave* Bulbo 2 E-H, $F_n=0.15$

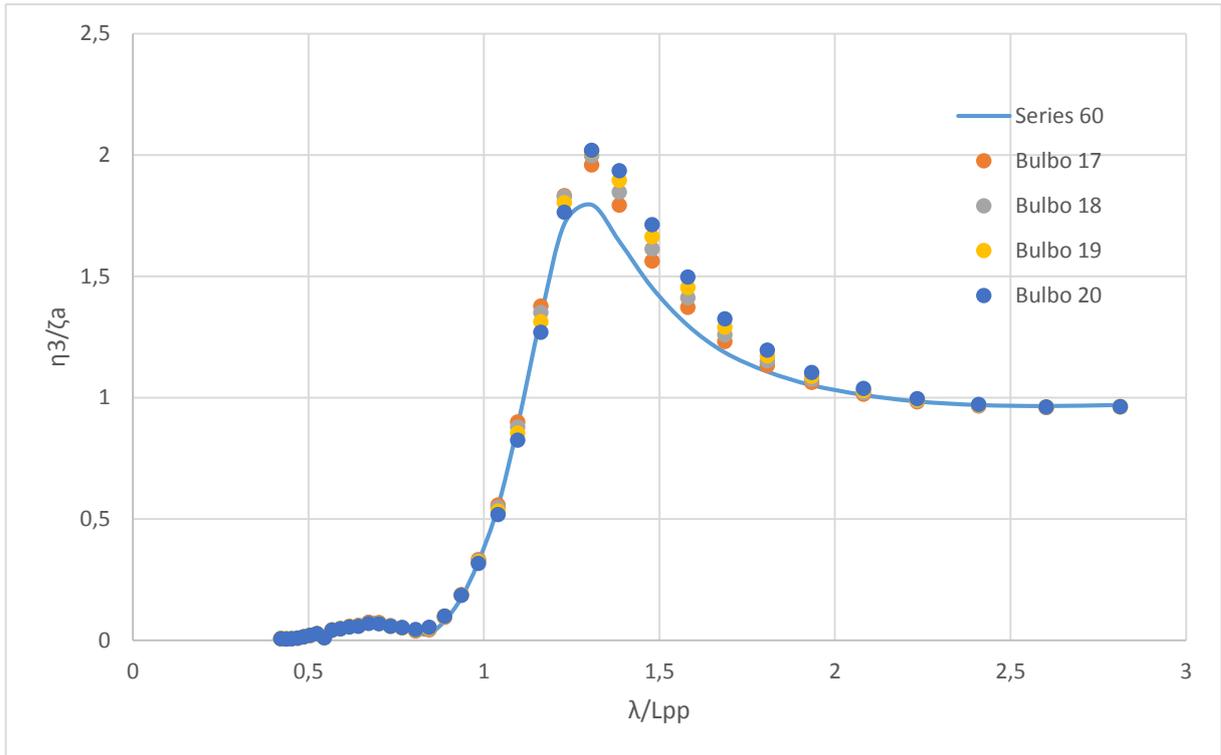
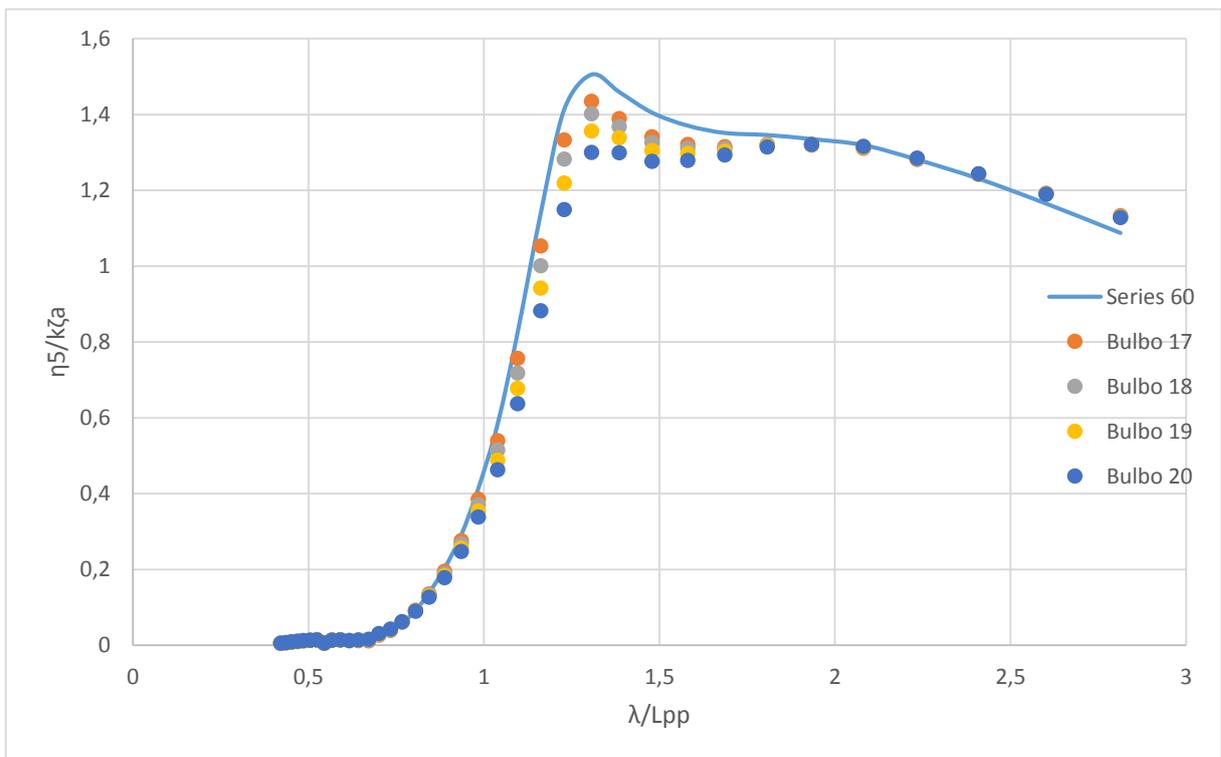


Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Resultados para *Pitch* Bulbo 2 E-H, $F_n=0.15$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 56 - Resultados para *Heave* Bulbo 2 E-H, $F_n=0.25$ Figura 57 - Resultados para *Pitch* Bulbo 2 E-H, $F_n=0.25$ 

4.2.6 Resultados para Bulbo 3 A-D

Para o Bulbo 3, sua forma foi escolhida de maneira que a razão entre a boca e altura do mesmo fosse o dobro da razão que o Bulbo 2 possui para a sua primeira boca. Assim, o resultado é um bulbo com a mesma área de seção porém com um parâmetro de boca 10% maior e um de calado cerca de 11% menor. A Tabela 22 mostra esses valores e a Tabela 21 as propriedades do casco com a inserção do bulbo. As Figura 58-Figura 63 mostram os resultados para o RAO em *heave* e *pitch* para essa forma de bulbo.

Tabela 21 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 3 A-D

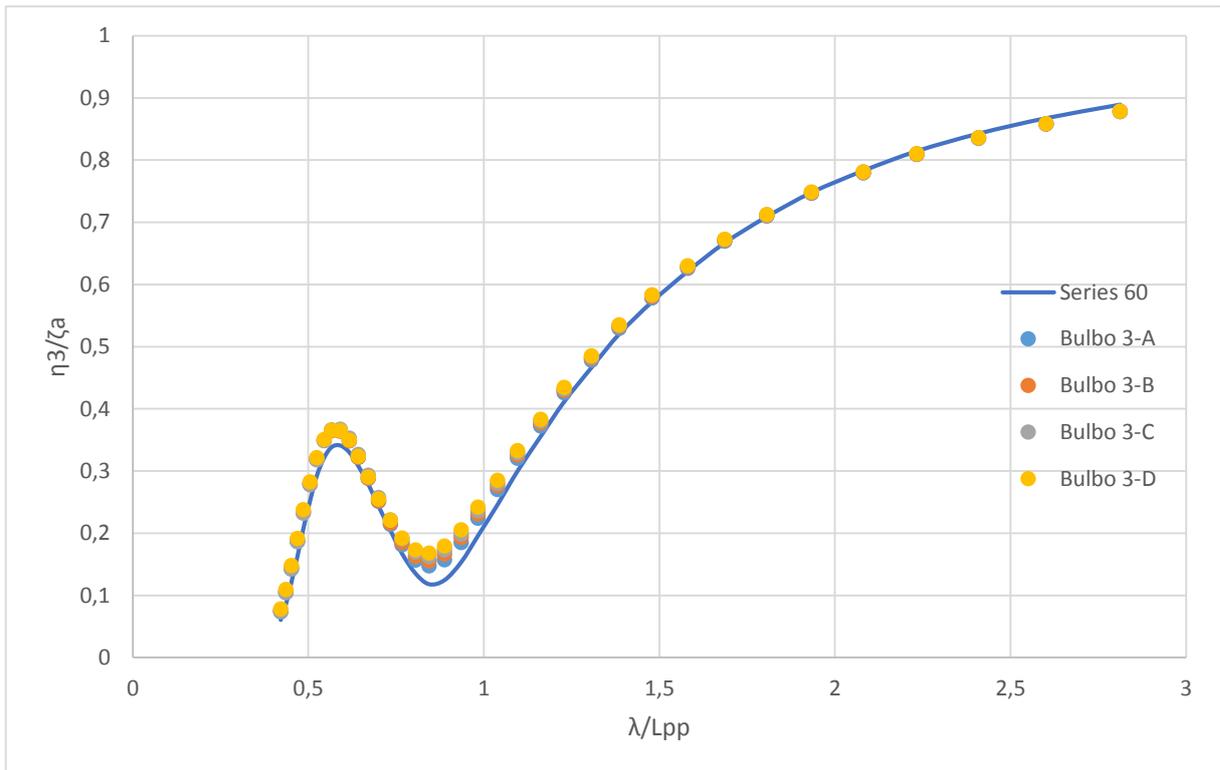
	CAD (ORCA3D)	Bulbo 3-A	Bulbo 3-B	Bulbo 3-C	Bulbo 3-D
Calado [m]	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258
Volume Deslocado [m ³]	0,52	0,527	0,528	0,529	0,53
Coefficiente Prismático	0,696	0,706	0,707	0,708	0,711
FB/Lpp	0,513	0,519	0,519	0,52	0,521
Loa/Boa	7,091	7,329	7,406	7,484	7,561

Fonte: Elaborado pelo autor.

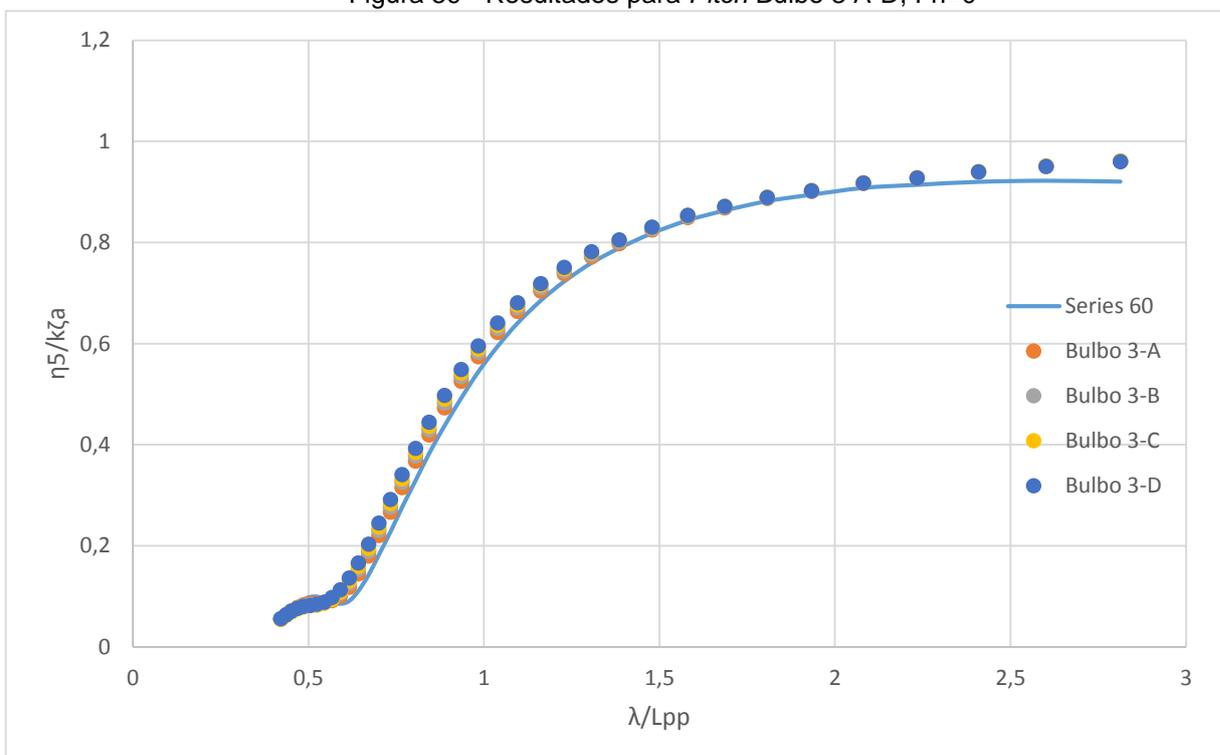
Tabela 22 - Parâmetros do Bulbo 3 A-D

Parâmetros	Bulbo 3-A	Bulbo 3-B	Bulbo 3-C	Bulbo 3-D
C_{LPR}	2,19%	2,62%	3,72%	4,81%
C_{BB}	31,01%	31,01%	31,01%	31,01%
C_{ZB}	27,13%	27,13%	27,13%	27,13%
C_{ABT}	11,39%	11,39%	11,39%	11,39%
C_{VPR}	0,22%	0,30%	0,48%	0,66%
C_{VT}	1,35%	1,54%	1,73%	1,92%

Fonte: Elaborado pelo autor.

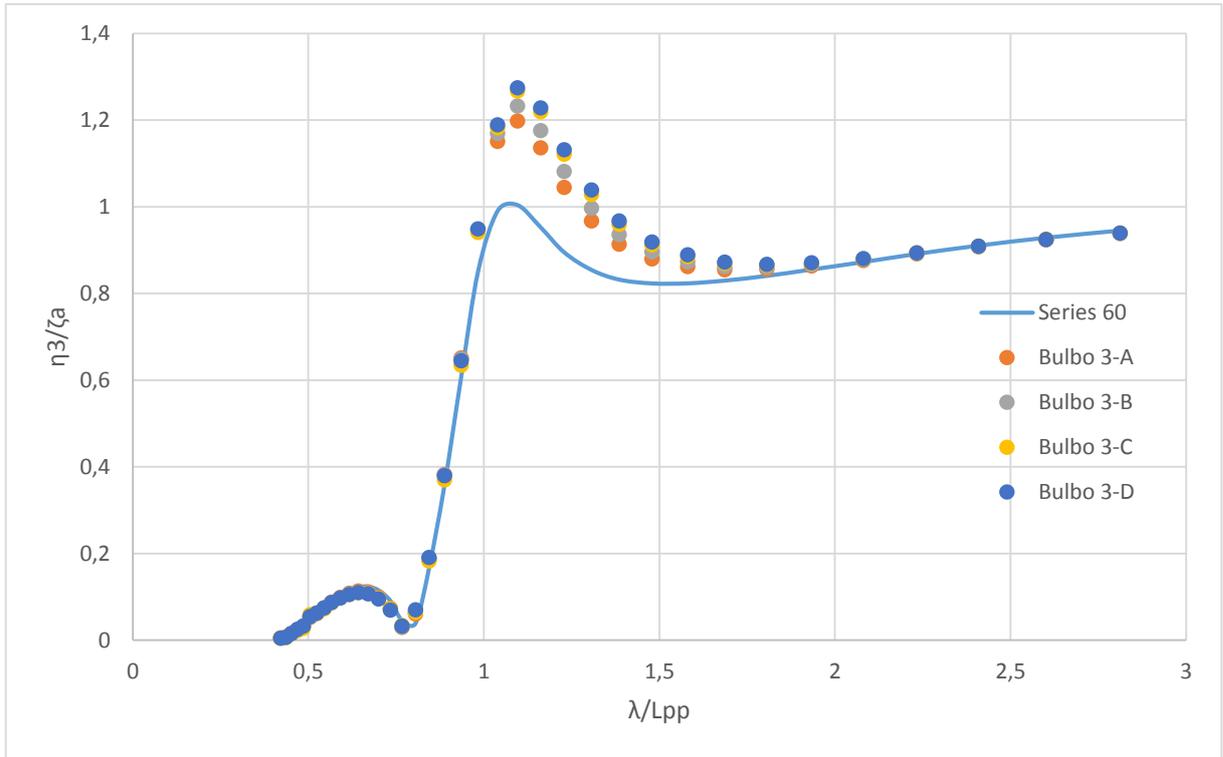
Figura 58 - Resultados para *Heave* Bulbo 3 A-D, $F_n=0$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 - Resultados para *Pitch* Bulbo 3 A-D, $F_n=0$ 

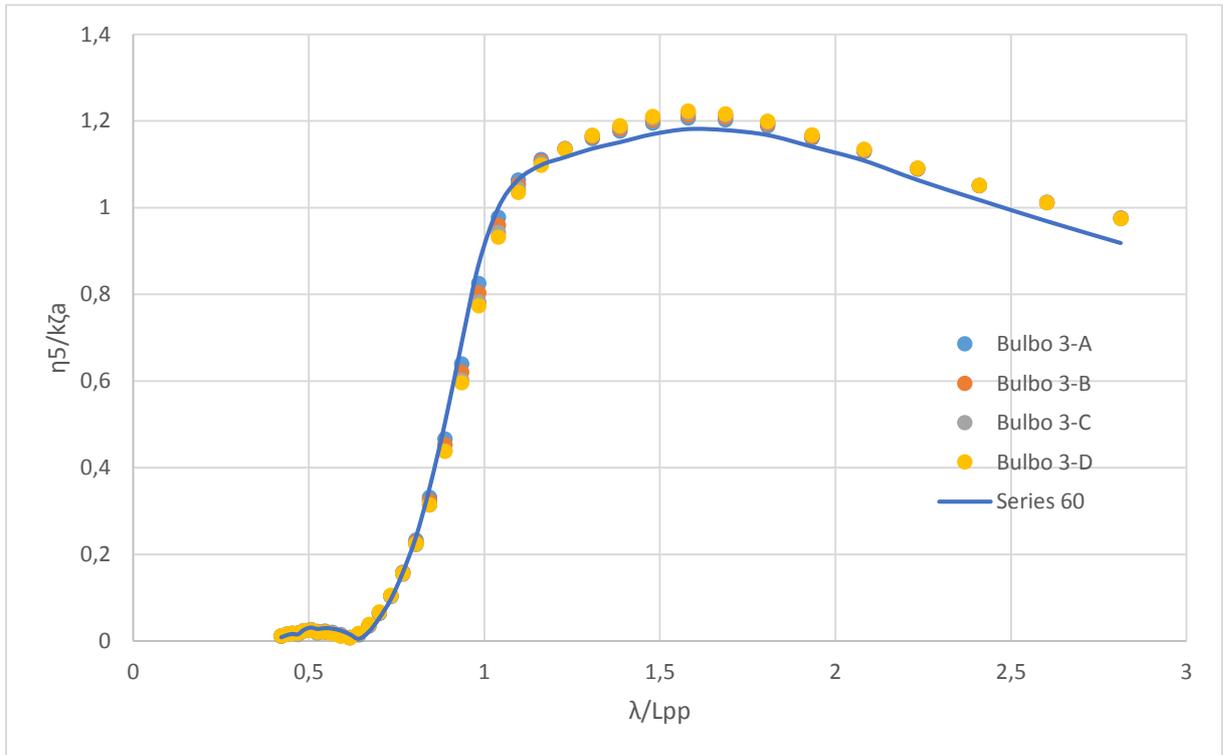
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 60 - Resultados para *Heave* Bulbo 3 A-D, $F_n=0,15$



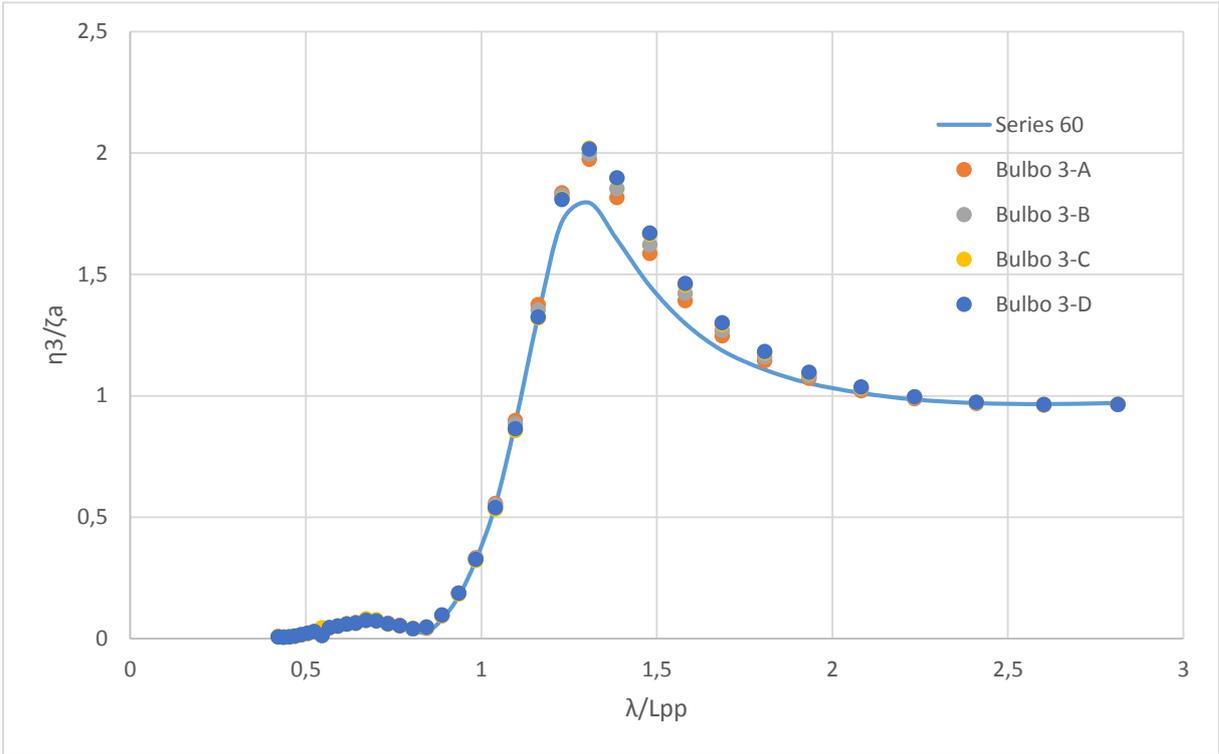
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61 - Resultados para *Pitch* Bulbo 3 A-D $F_n=0,15$



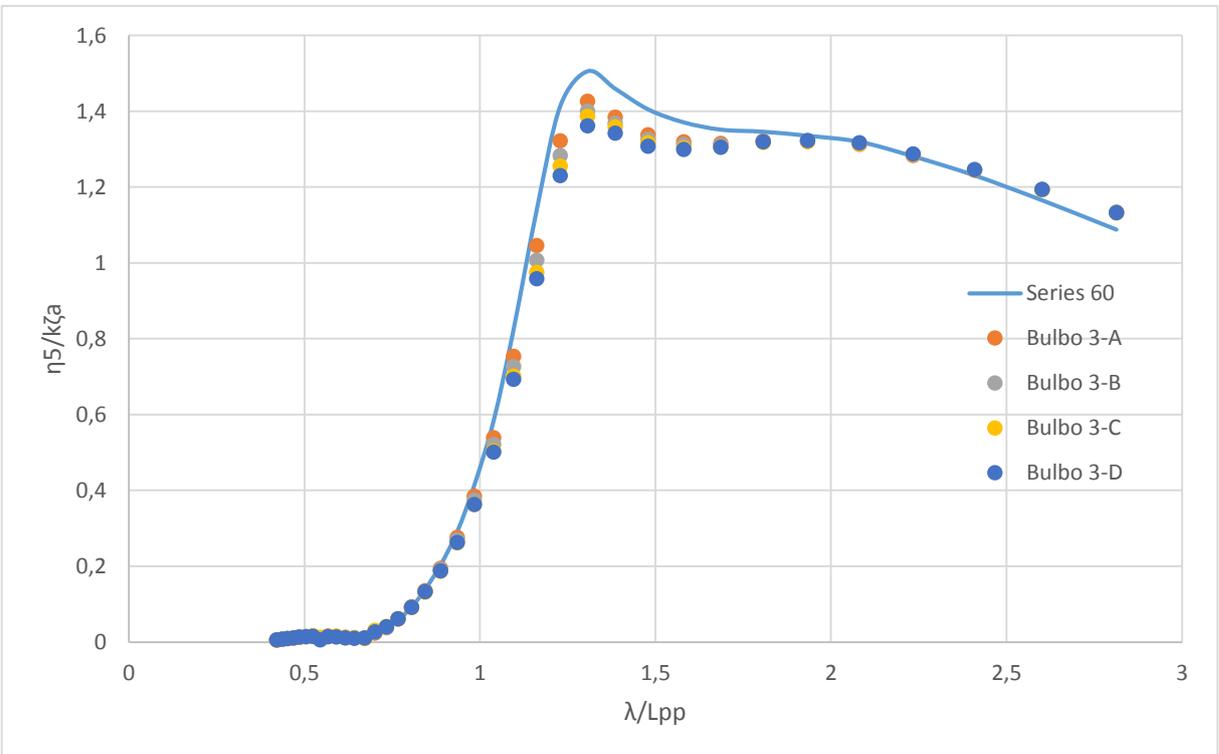
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 - Resultados para *Heave* Bulbo 3 A-D, $F_n=0,25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 63 - Resultados para *Pitch* Bulbo 3 A-D, $F_n=0,25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.7. Resultados para Bulbo 4 A-D

Finalmente, a última forma de bulbo simulada foi a de formato em nábila. Assim como as outras, iniciou-se com uma boca de 0,2 m e posteriormente aumentou-se para 0,24 m. Um outro parâmetro importante para essa forma de bulbo é que sua boca máxima não é mais localizada no meio de sua altura. Inclui-se então um parâmetro adicional que é a altura da boca máxima sobre a altura do bulbo. Para o Bulbo 4 esse parâmetro foi de 68% e foi mantido constante quando a boca variou de 0,2 para 0,24 metros.

A Tabela 23 mostra as propriedades do casco com a inserção do bulbo e a Tabela 24 mostra os parâmetros utilizados nesse bulbo. As Figura 64-Figura 69 mostram os resultados obtidos na simulação do RAO com esse bulbo.

Tabela 23 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 4 A-D

	CAD (ORCA3D)	Bulbo 4-A	Bulbo 4-B	Bulbo 4-C	Bulbo 4-D
Boca [m]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Comprimento [m]	0,07	0,12	0,17	0,22	
Coefficiente de Bloco	0,686	0,695	0,697	0,698	0,699
Volume Deslocado [m ³]	0,52	0,527	0,528	0,529	0,53
Coefficiente Prismático	0,696	0,706	0,707	0,708	0,711
FB/Lpp	0,513	0,519	0,519	0,52	0,521
Loa/Boa	7,091	7,329	7,406	7,484	7,561

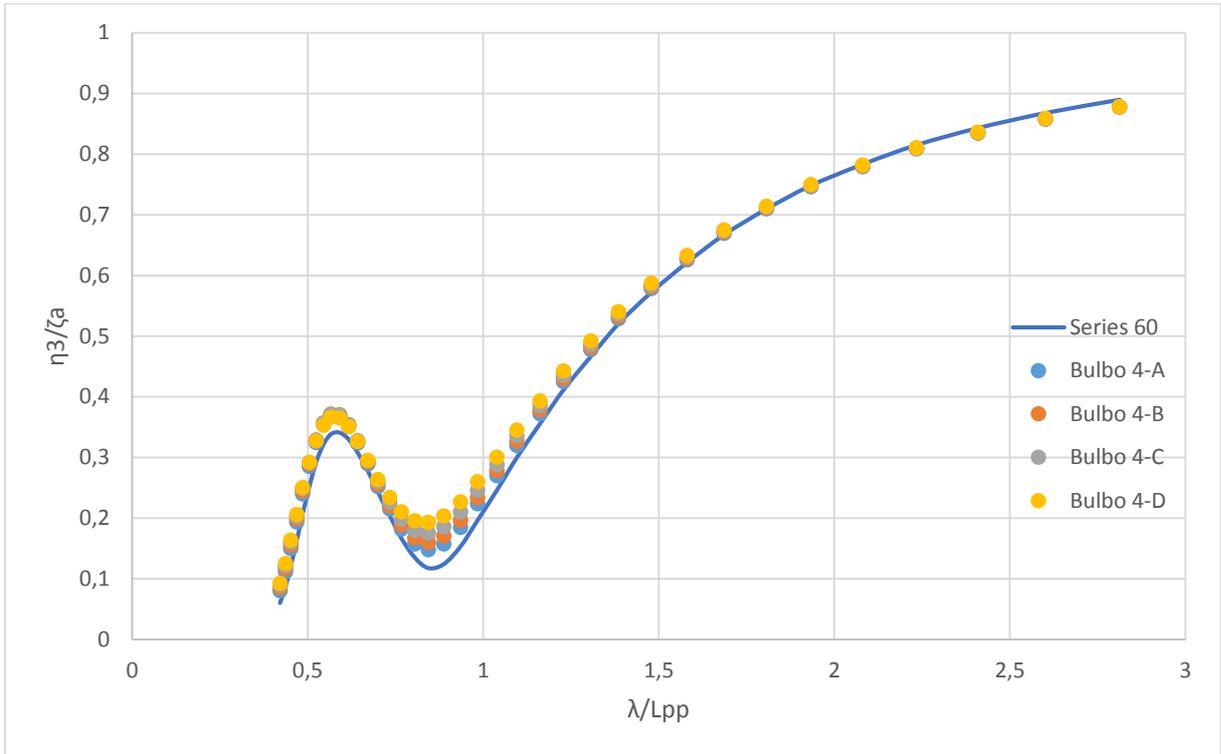
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 - Parâmetros do Bulbo 4 A-D

Parâmetros	Bulbo 4-A	Bulbo 4-B	Bulbo 4-C	Bulbo 4-D
C_{LPR}	1,53%	2,62%	3,72%	4,81%
C_{BB}	29,46%	31,01%	31,01%	31,01%
C_{ZB}	54,26%	54,26%	54,26%	54,26%
C_{ABT}	15,59%	17,60%	17,60%	17,60%
C_{VPR}	0,19%	0,46%	0,74%	1,02%
C_{VT}	1,35%	1,54%	1,73%	1,92%

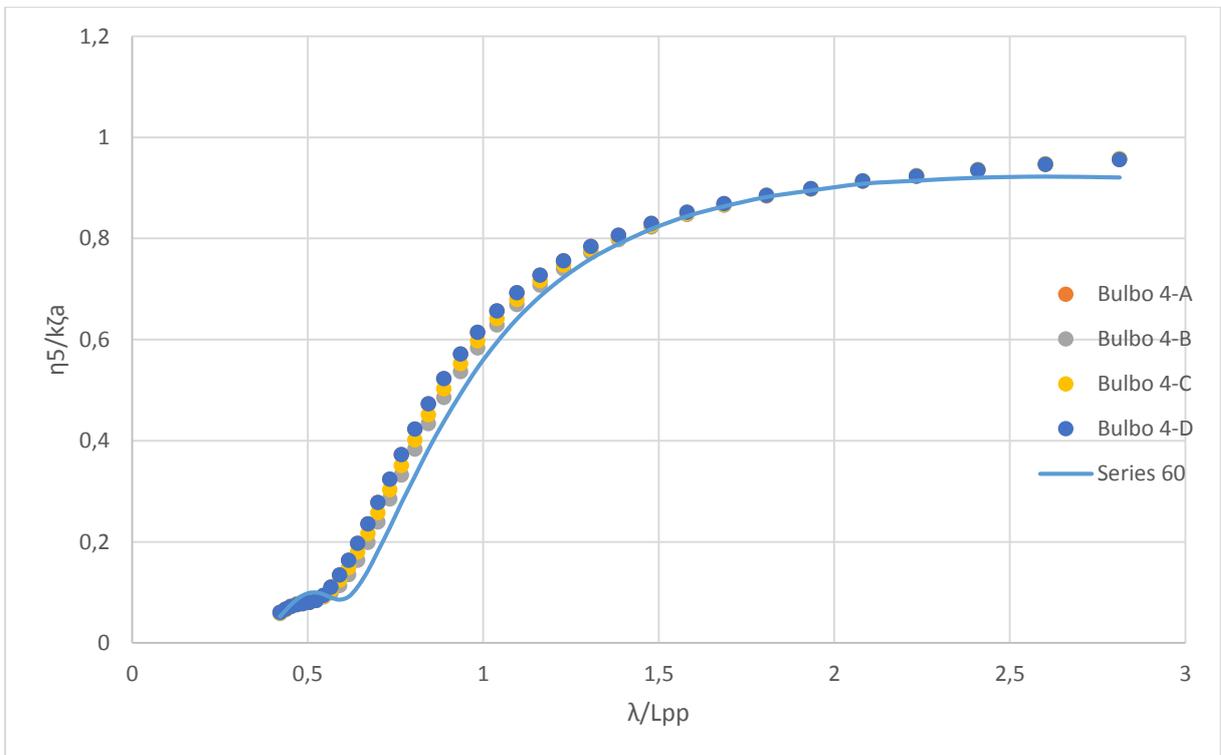
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 64 - Resultados para *Heave* Bulbo 4 A-D, $F_n=0$

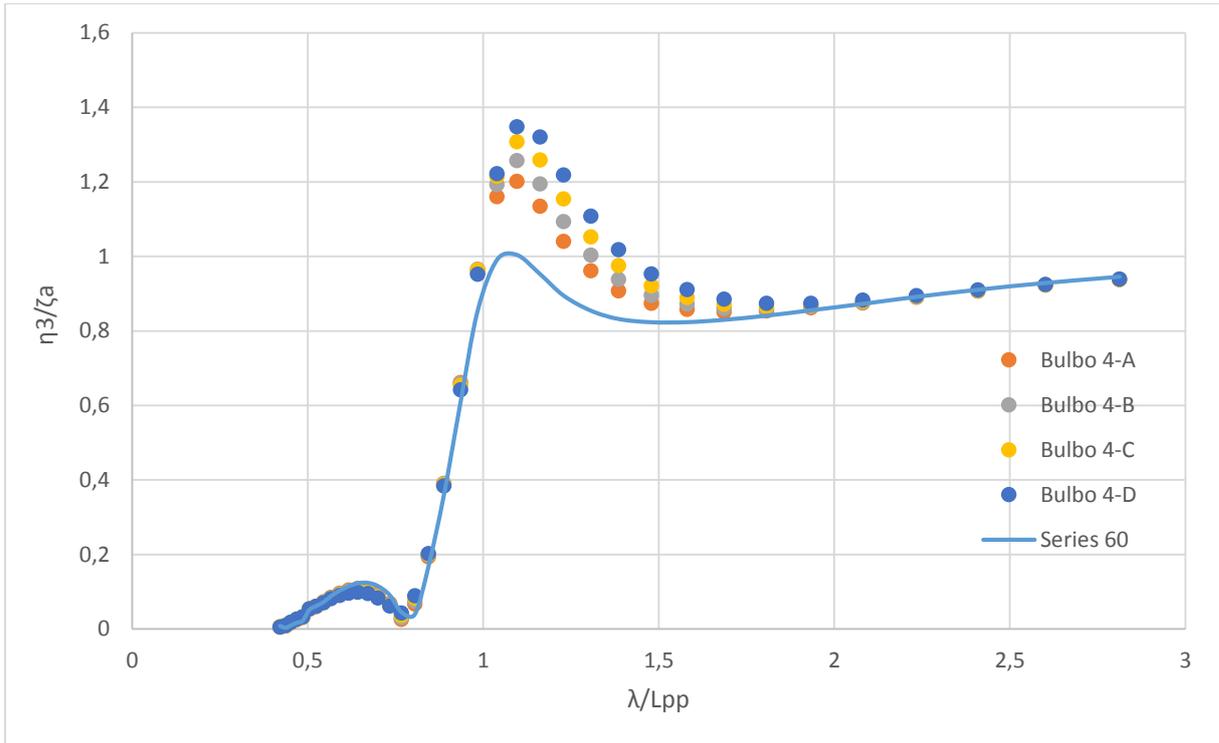


Fonte: Elaborado pelo autor.

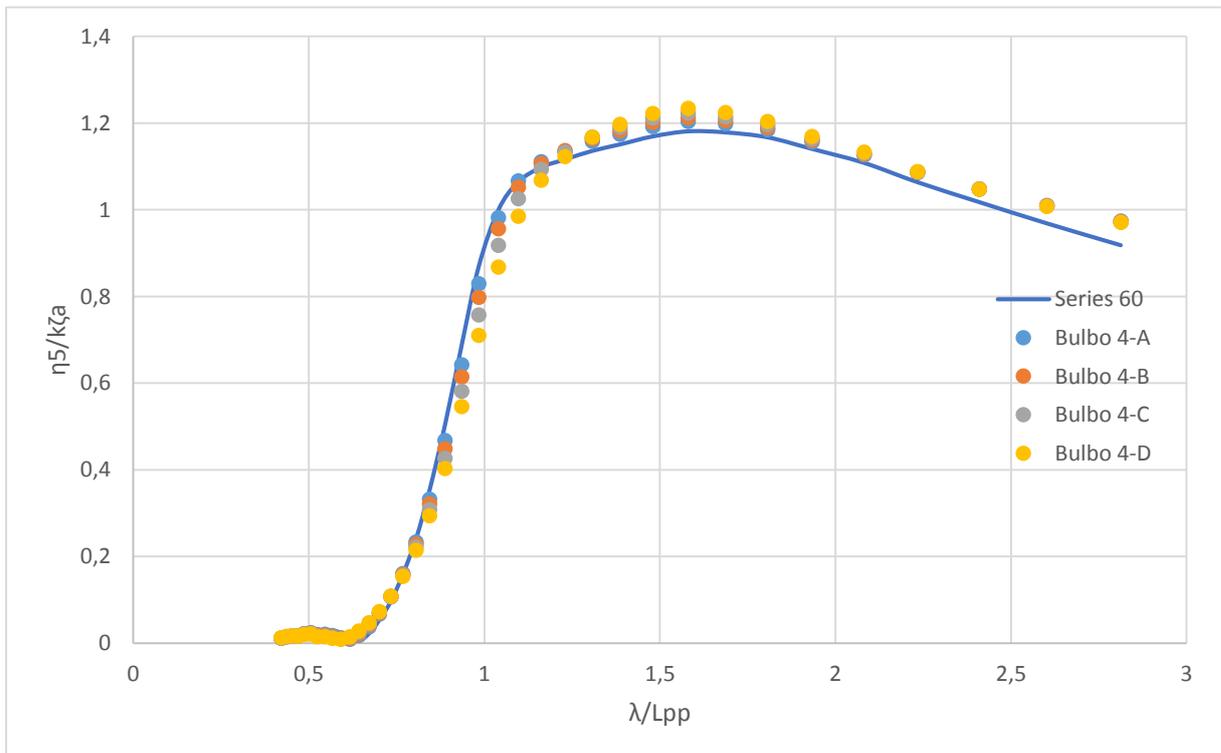
Figura 65 - Resultados para *Pitch* Bulbo 4 A-D, $F_n=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

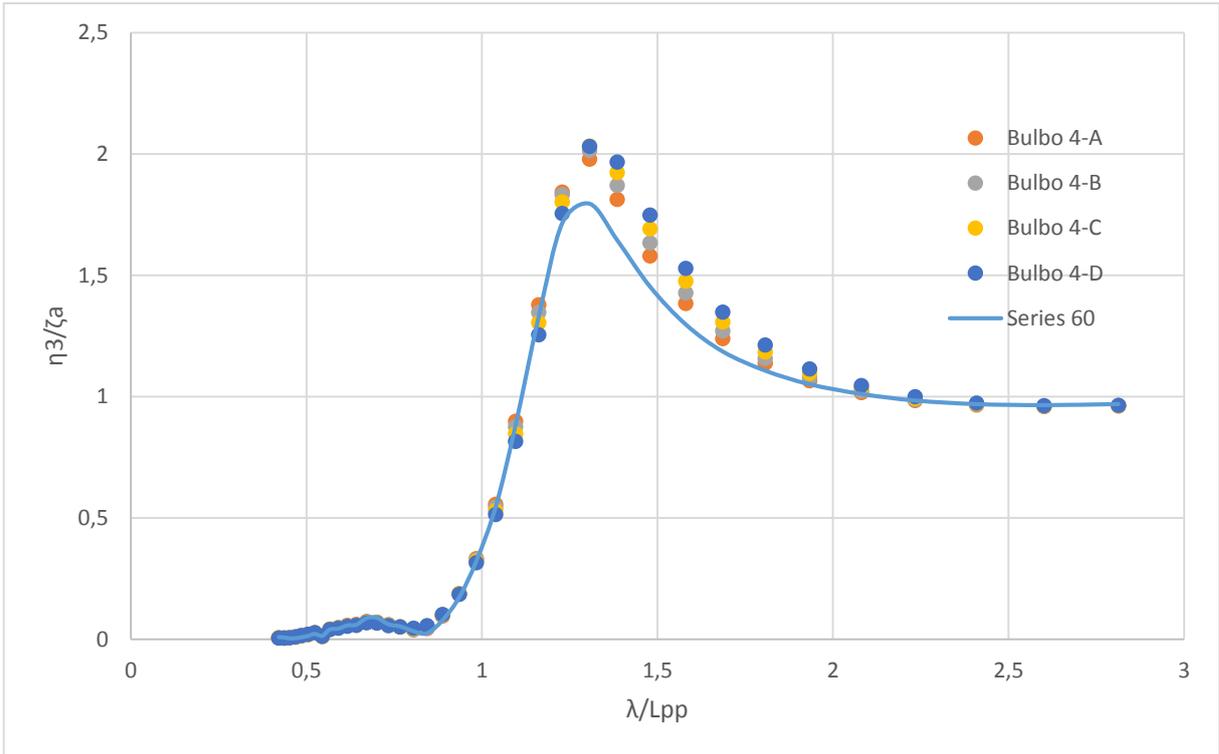
Figura 66 - Resultados para *Heave* Bulbo 4 A-D, $F_n=0.15$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 67 - Resultados para *Pitch* Bulbo 4 A-D, $F_n=0.15$ 

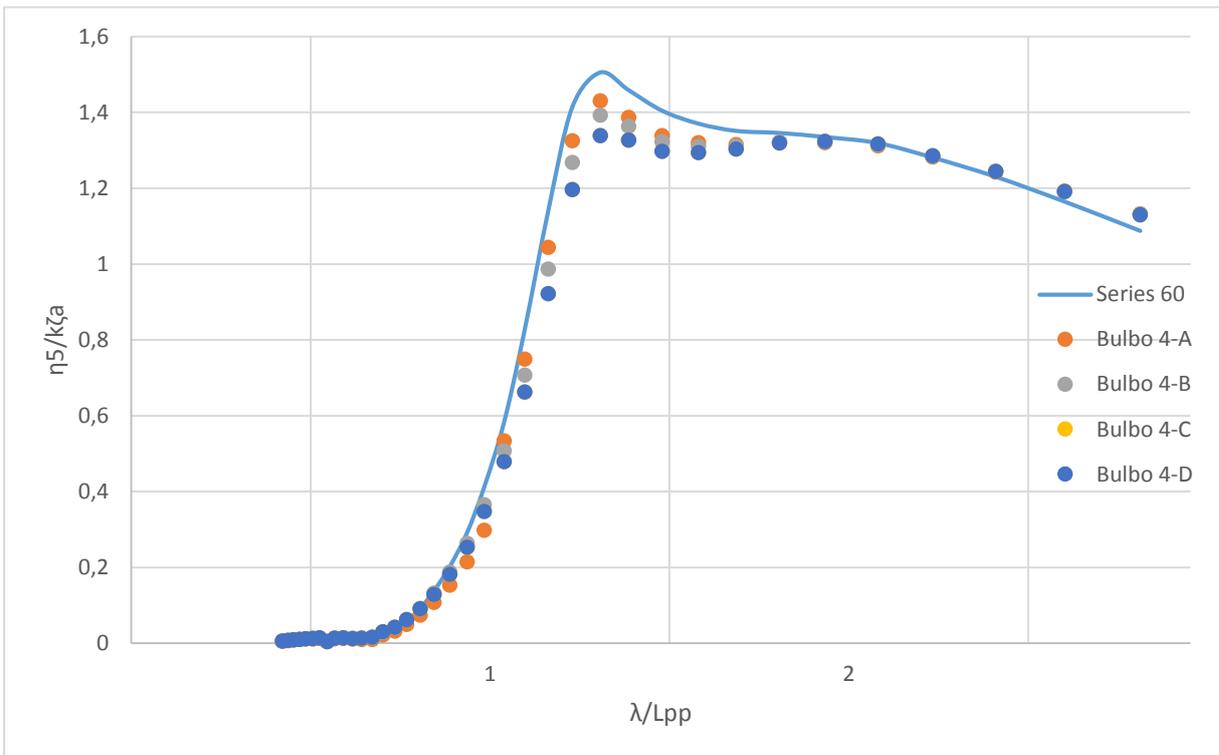
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 68 - Resultados para *Heave* Bulbo 4 A-D, $F_n=0.25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 69 - Resultados para *Pitch* Bulbo 4 A-D, $F_n=0.25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.8. Resultados para Bulbo 4 E-H

O Bulbo 4 então teve sua boca aumentada para 0,24 m. Com isso, a boca teve um aumento de cerca de 6%. Outros parâmetros foram alterados conforme a Tabela 26 e as modificações do casco que bulbo causou no casco são mostradas na Tabela 25.

Tabela 25 - Variações na Dimensão do Casco com a inserção do Bulbo 4 E-H

	CAD (ORCA3D)	Bulbo 4-E	Bulbo 4-F	Bulbo 4-G	Bulbo 4-H
Boca [m]	0	0,23	0,24	0,24	0,24
Comprimento [m]	0	0,09	0,14	0,19	0,24
Coefficiente de Bloco	0,686	0,702	0,704	0,706	0,708
Volume Deslocado [m ³]	0,52	0,533	0,534	0,536	0,537
Coefficiente Prismático	0,696	0,714	0,716	0,718	0,72
FB/Lpp	0,513	0,523	0,524	0,526	0,527
Loa/Boa	7,091	7,36	7,437	7,515	7,592

Fonte: Elaborado pelo autor.

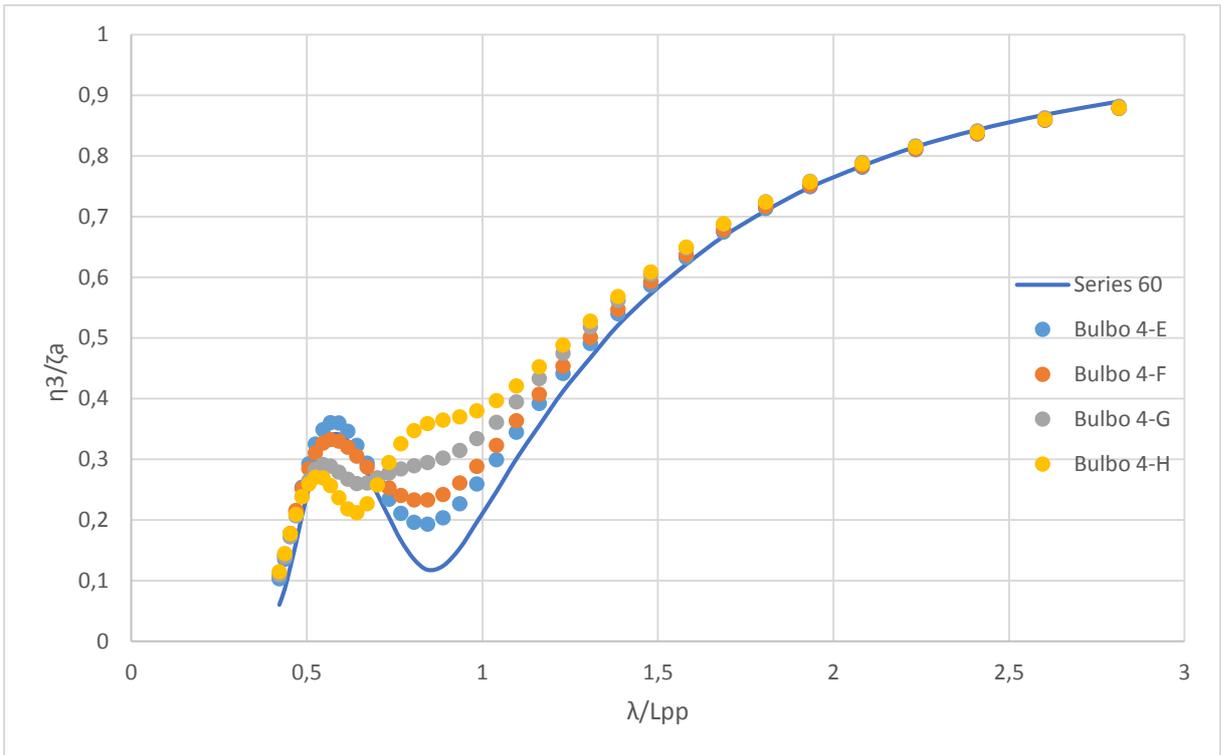
Tabela 26 - Parâmetros do Bulbo 4 E-H

Parâmetros	Bulbo 4-E	Bulbo 4-F	Bulbo 4-G	Bulbo 4-H
C_{LPR}	1,97%	3,06%	4,15%	5,25%
C_{BB}	35,66%	37,21%	37,21%	37,21%
C_{ZB}	62,02%	62,02%	62,02%	62,02%
C_{ABT}	23,30%	25,35%	25,35%	25,35%
C_{VPR}	0,38%	0,77%	1,17%	1,57%
C_{VT}	2,50%	2,69%	3,08%	3,27%

Fonte: Elaborado pelo autor.

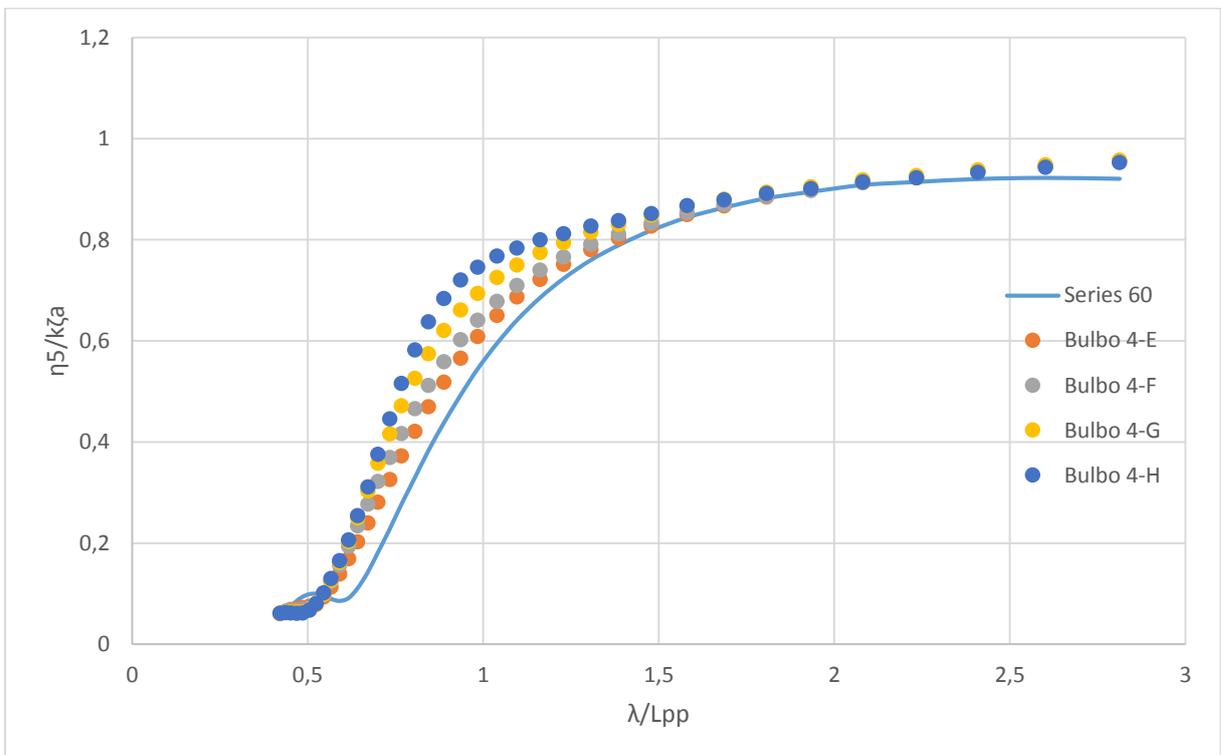
As Figura 70 até Figura 75 mostram os resultados para a resposta do casco com a inserção do Bulbo 4.

Figura 70 - Resultados para *Heave* Bulbo 4 E-H, $F_n=0$

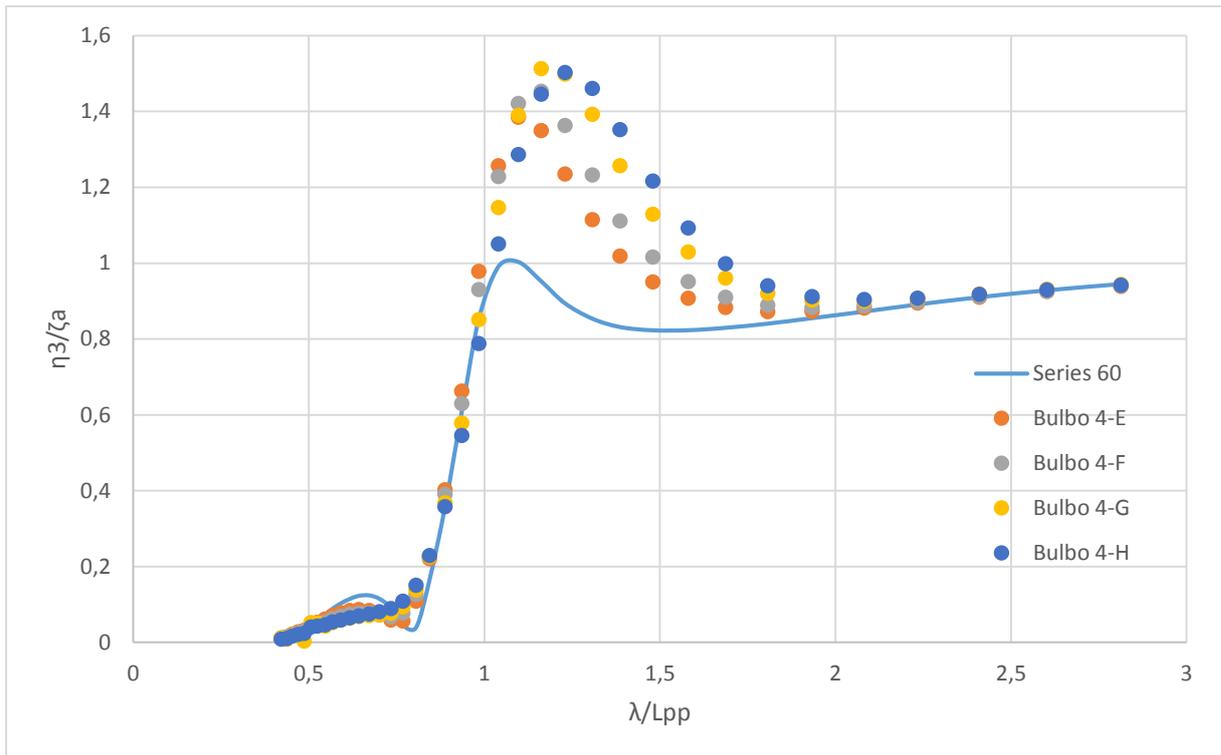


Fonte: Elaborado pelo autor.

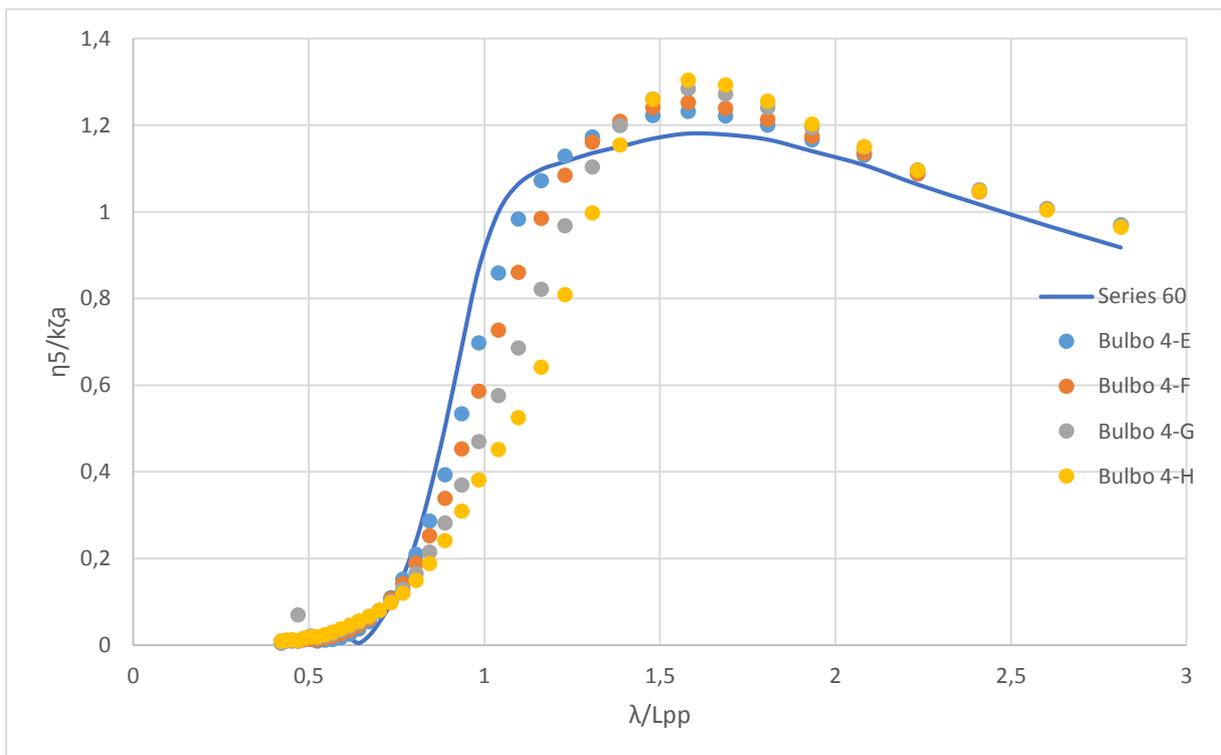
Figura 71 - Resultados para *Pitch* Bulbo 4 E-H, $F_n=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

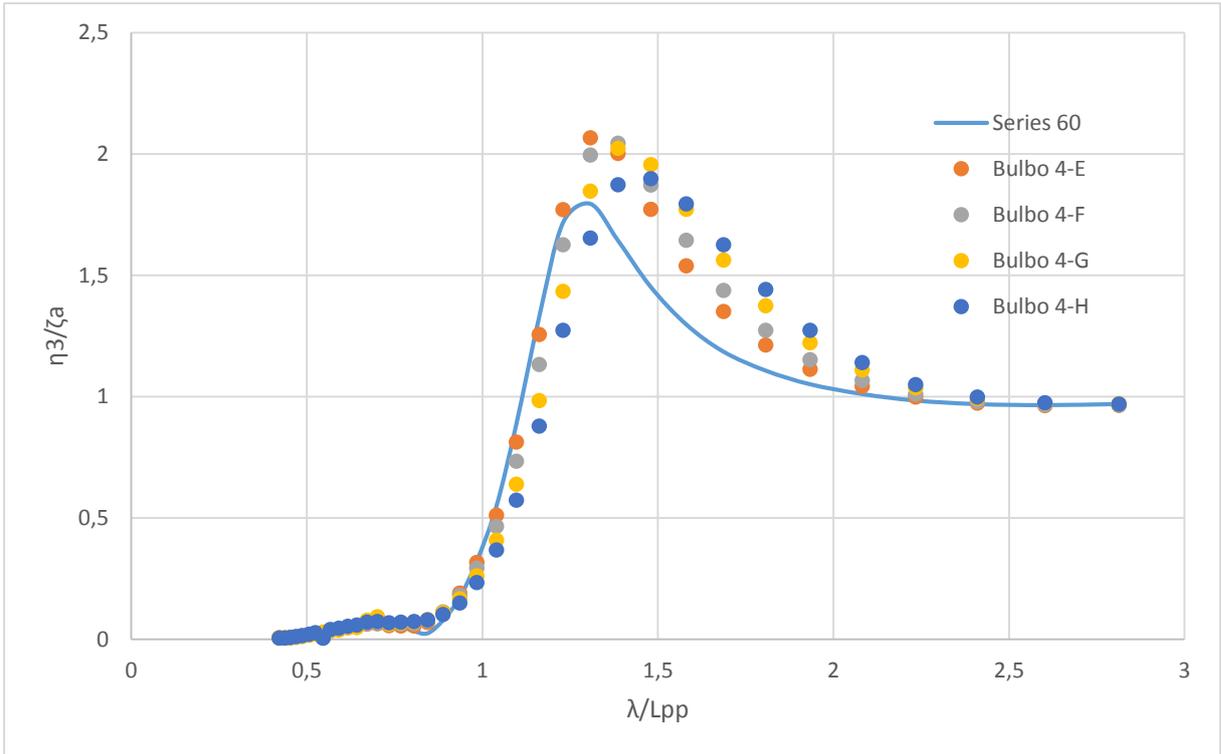
Figura 72 - Resultados para *Heave* Bulbo 4 E-H, $F_n=0,15$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 73 - Resultados para *Pitch* Bulbo 4 E-H, $F_n=0,15$ 

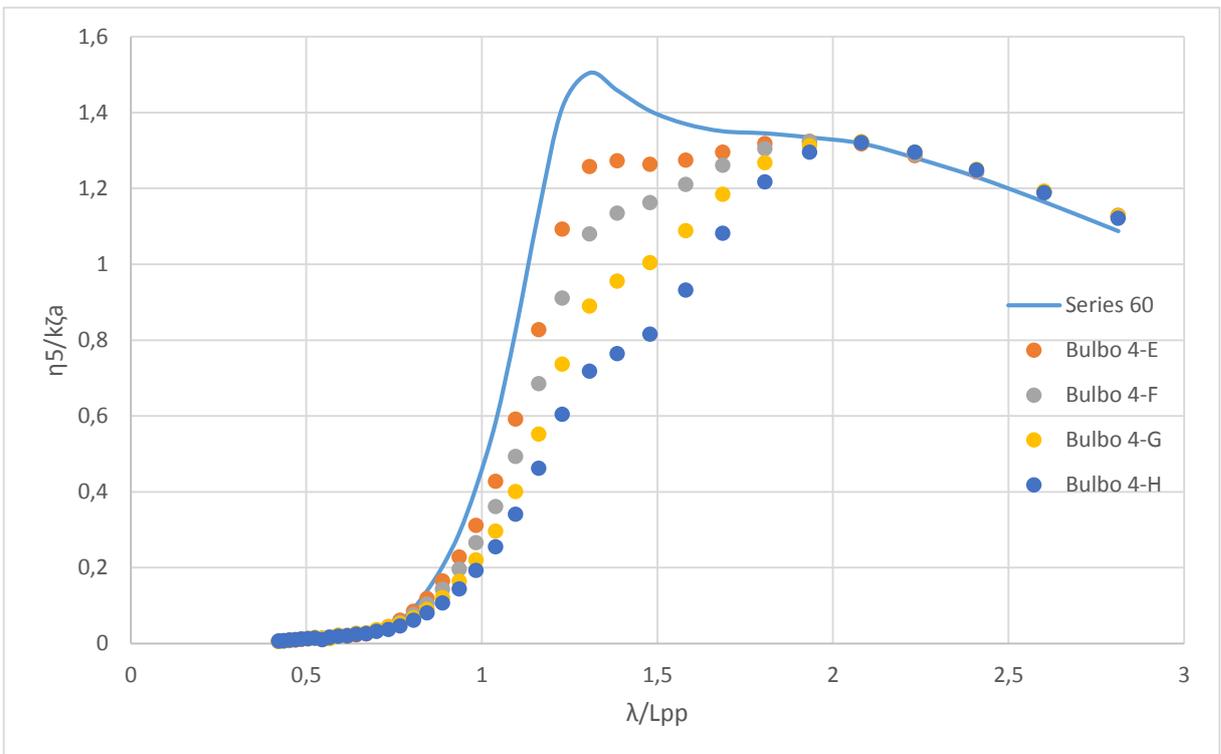
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 74 - Resultados para *Heave* Bulbo 4 E-H, $F_n=0,25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 75 - Resultados para *Pitch* Bulbo 4 E-H, $F_n=0,25$



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados no capítulo anterior mostram que é possível ter uma modificação da resposta dinâmica do casco ajustando os parâmetros que descrevem a geometria do bulbo. É importante observar que o presente trabalho foca o estudo na influência do bulbo apenas nos movimentos de *heave* e *pitch* da embarcação.

Em geral, o bulbo aparenta deslocar a frequência natural do casco para o movimento em *pitch* tanto para razões de λ/L_{pp} maiores quanto para menores. Já para o movimento de *heave*, essa influência aparenta ser menor. Assim, o presente capítulo visa analisar cada parâmetro que descreve a geometria do bulbo e inferir qual a contribuição de cada um dos parâmetros na resposta dinâmica da embarcação.

Inicialmente, notou-se que, para as dimensões utilizadas no presente trabalho, as formas 2 e 3 de bulbo não possuem influência significativa na resposta dinâmica da embarcação. Mesmo com parâmetros semelhantes, essas formas mostraram uma influência na dinâmica da embarcação consideravelmente menor do que as demais formas de bulbo analisadas. Por essa razão, resolveu-se focar a análise paramétrica no estudo das formas de bulbo 1 e 4.

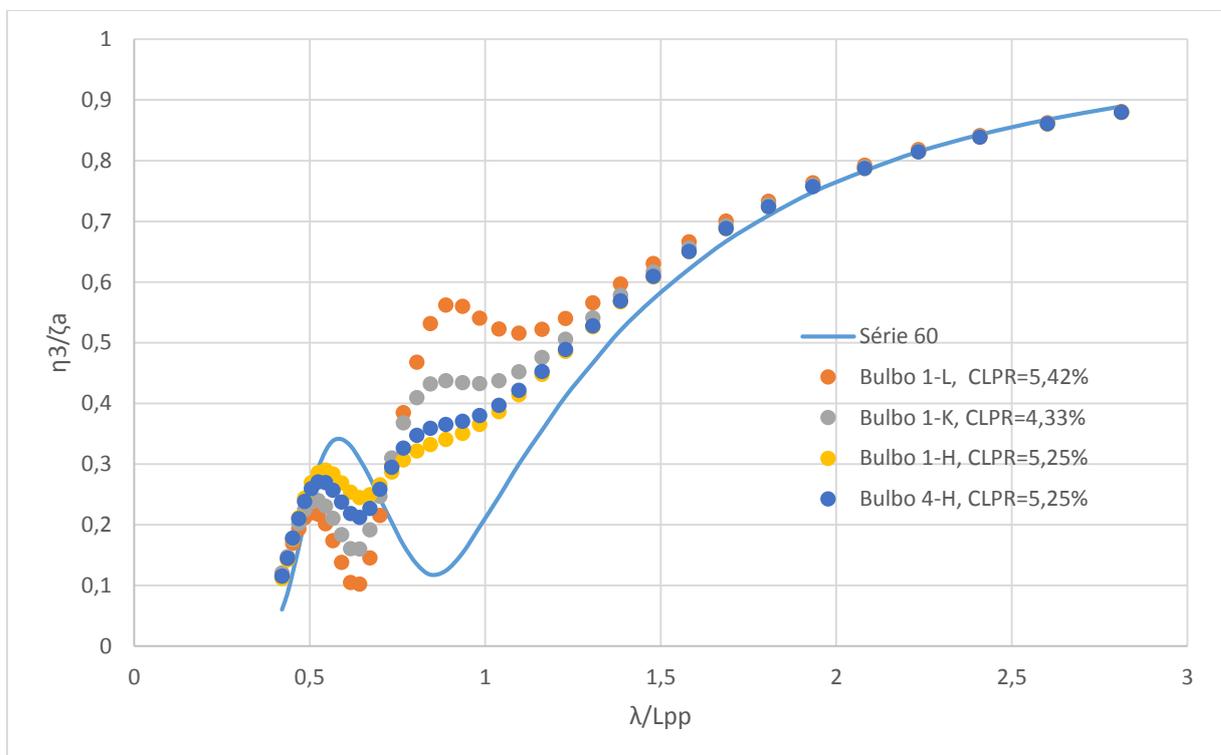
Como a análise do comportamento dinâmico de uma embarcação é um assunto complexo e que depende do estado de mar considerado, resolveu-se focar a análise na influência que as formas do bulbo têm em dois parâmetros: o valor da frequência natural do movimento e o perfil da curva de resposta dinâmica.

5.1. Parâmetro de Comprimento

Esse parâmetro foi tomado como base, juntamente com o de boca, nas variações dimensionais. Nesta análise, variou-se o parâmetro geométrico que descreve o comprimento do bulbo para valores entre 1,53% a 5,25% para todas as formas de bulbo estudadas. Porém, é importante observar, que a variação do comprimento do bulbo afeta também o volume do bulbo, e por consequência, o volume da embarcação, impedindo uma análise independente e dificultando a análise dos resultados.

Observou-se que, para movimentos de *heave*, o aumento do comprimento aparenta diminuir a frequência natural, ou seja, aumentar a razão λ/L_{pp} . Esse efeito é melhor evidenciado na Figura 34, Figura 40 e Figura 70. Na Figura 40 observou-se o maior deslocamento da frequência natural, que mudou de 0,78 Hz segundo Nakamura (1966), para 0,68 Hz com o Bulbo 1 em $F_n=0$. Esse efeito aparenta diminuir a medida que F_n aumenta. A Figura 76 mostra os bulbos que mais deslocaram a frequência natural em *heave* para $F_n=0$ com seus respectivos parâmetros de comprimento.

Figura 76 - Análise do Parâmetro de Comprimento em Heave, $F_n=0$

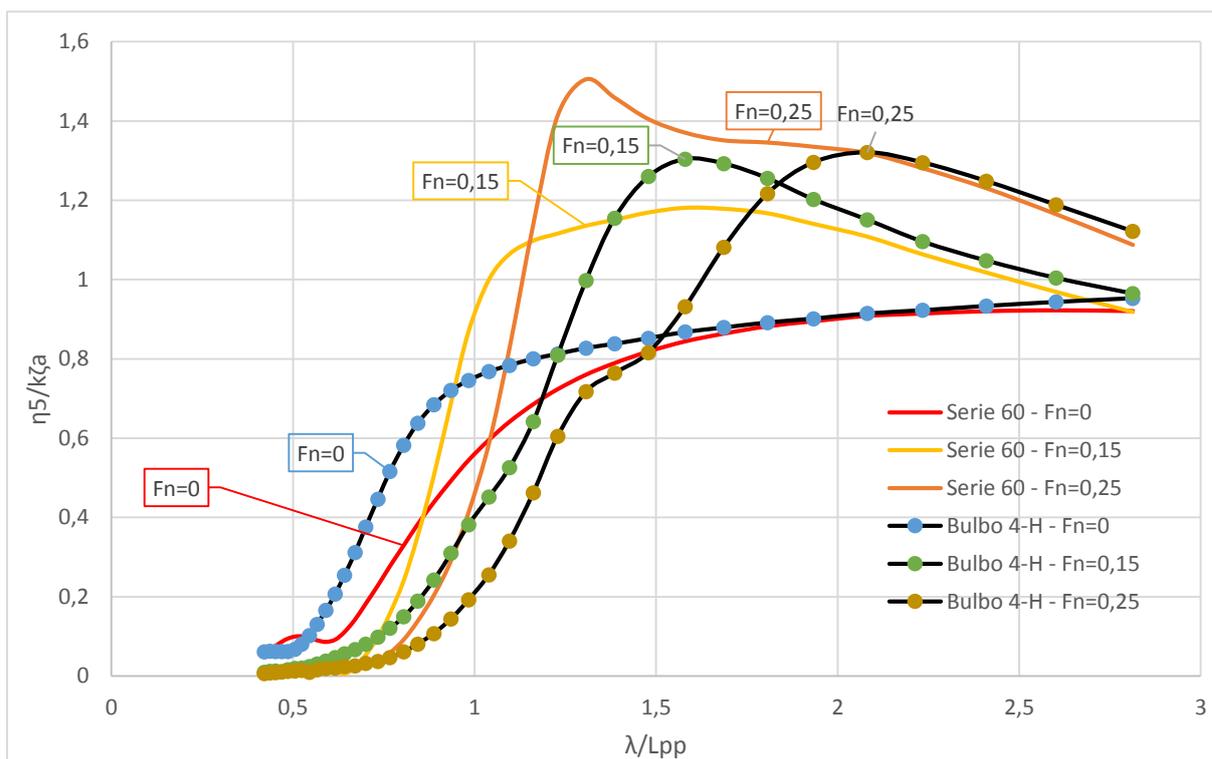


Fonte: Elaborado pelo autor.

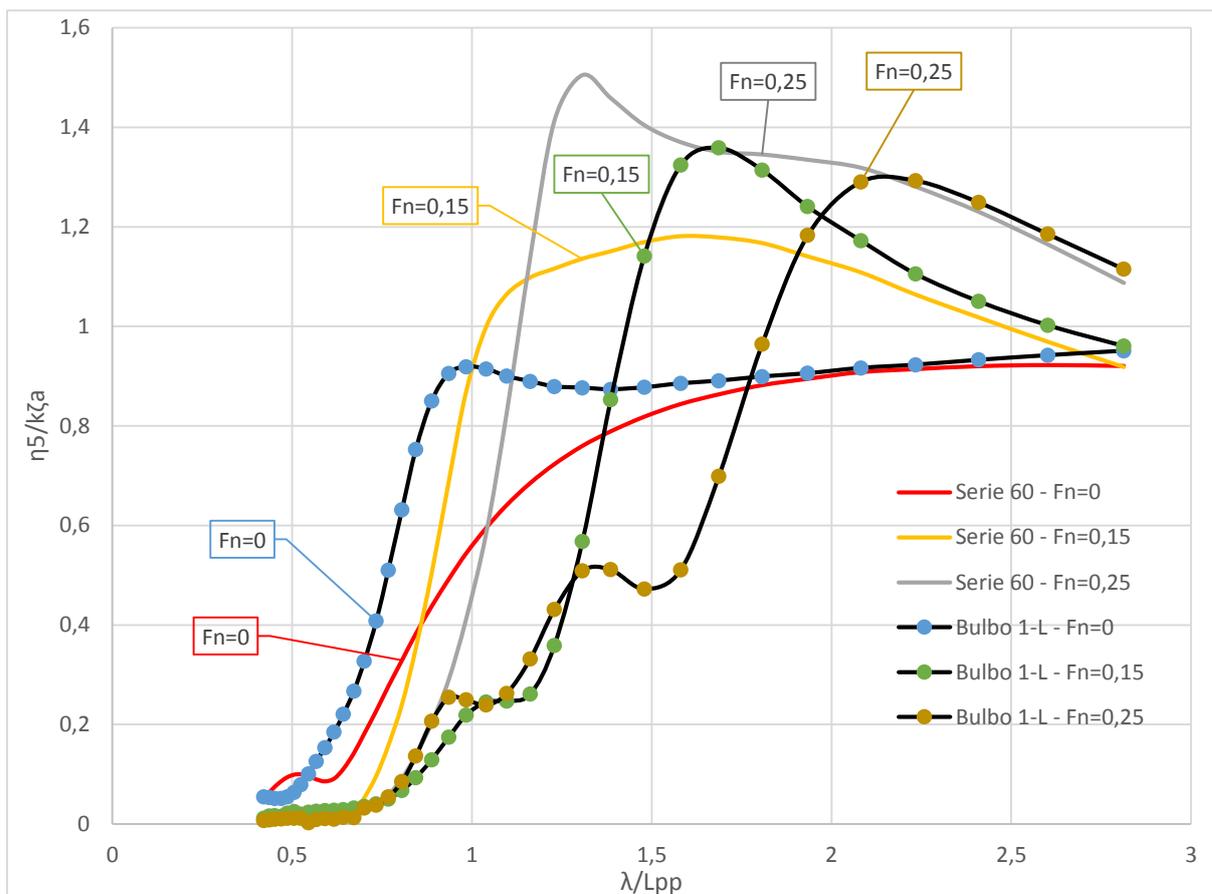
Entende-se então que a frequência natural é alterada pelo parâmetro de comprimento. Porém, alterando o comprimento do bulbo alteramos também o parâmetro de volume, ficando assim inconclusivo inferir qual variação que o parâmetro de comprimento pode trazer para a frequência natural já que olhando para o Bulbo 1-K que aparenta deslocar mais a frequência natural que os bulbos 1-H e 4-H, o mesmo possui um parâmetro de volume maior. Para o perfil das curvas, analisando as duas formas de bulbos diferentes 1-H e 4-H, que possuem o mesmo C_{LPR} ambos perfis são semelhantes.

Para analisar a influência no movimento de *pitch*, a variação de F_n se mostra importante nos resultados, visto que os perfis das curvas mudam significativamente em função do F_n . Neste caso, as análises com os bulbos 1-L e 4-H (Figura 77 e a Figura 78) mostram como a resposta dinâmica em *pitch* varia com a alteração do número de Froude.

Figura 77 - Análise do Parâmetro de Comprimento em *Pitch* - Bulbo 4-H



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 78 - Análise do Parâmetro de Comprimento em *Pitch* - Bulbo 1-L

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ambos os bulbos com $F_n=0$ nota-se uma mudança no perfil da curva no gráfico. Enquanto para os valores de F_n maiores, aparenta surgir “degraus” na curva para o Bulbo 1-L. O efeito de amortecimento é notável para $F_n=0,25$ e $0,15$ para ambos os bulbos considerados nesta análise.

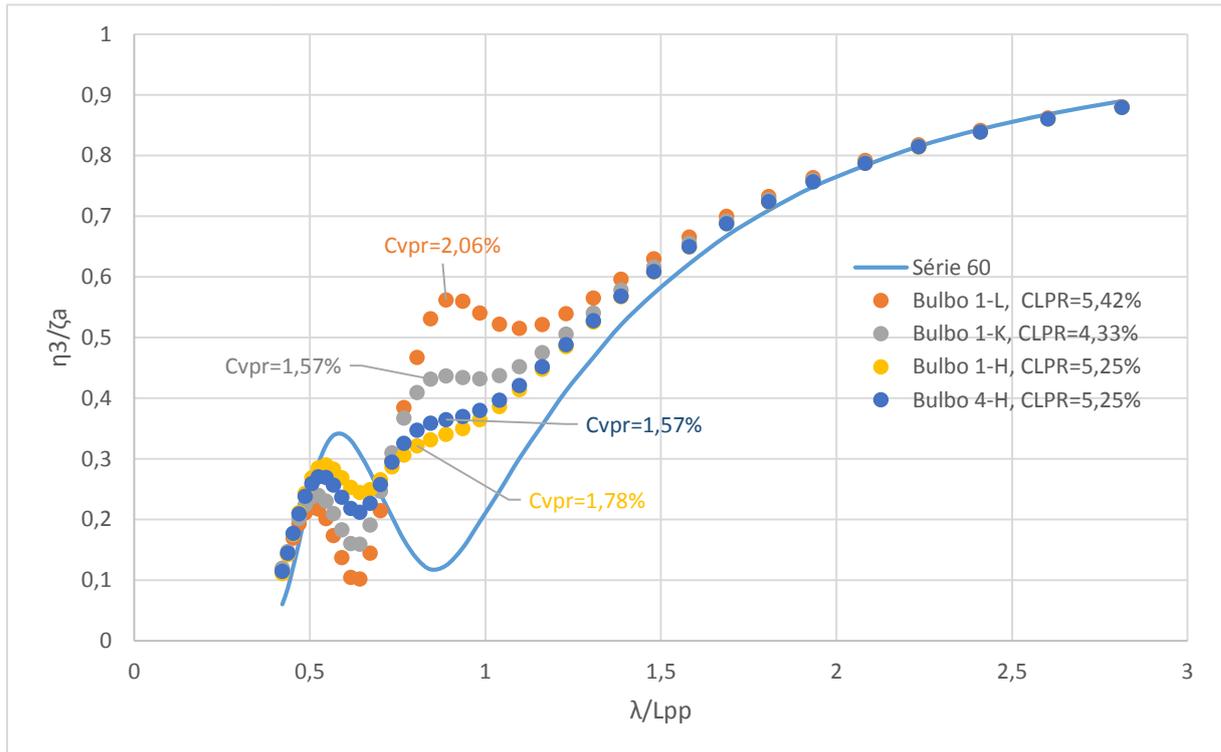
Portanto conclui-se que, assim como para *heave*, o comprimento do bulbo altera a frequência natural do movimento de *pitch*, além de alterar bastante o perfil da resposta dinâmica do casco com os bulbos em forma de esfera e nábula, como pode ser notado na Figura 45 e na Figura 75.

5.2. Parâmetro de Volume

Na fundamentação teórica são descritos dois parâmetros relativos ao volume do bulbo. Nesta seção a análise ficará restrita apenas ao parâmetro apresentado por Kratch (1978), ou seja, o parâmetro do volume a frente da perpendicular de vante.

Como citado anteriormente a modificação do parâmetro do comprimento altera o volume a vante do bulbo. Assim, a análise do parâmetro do volume utilizará os mesmos resultados apresentados em 5.1. Novamente, analisando somente o caso de $F_n=0$, na Figura 79 é mostrada a influência do parâmetro de comprimento e de volume simultaneamente.

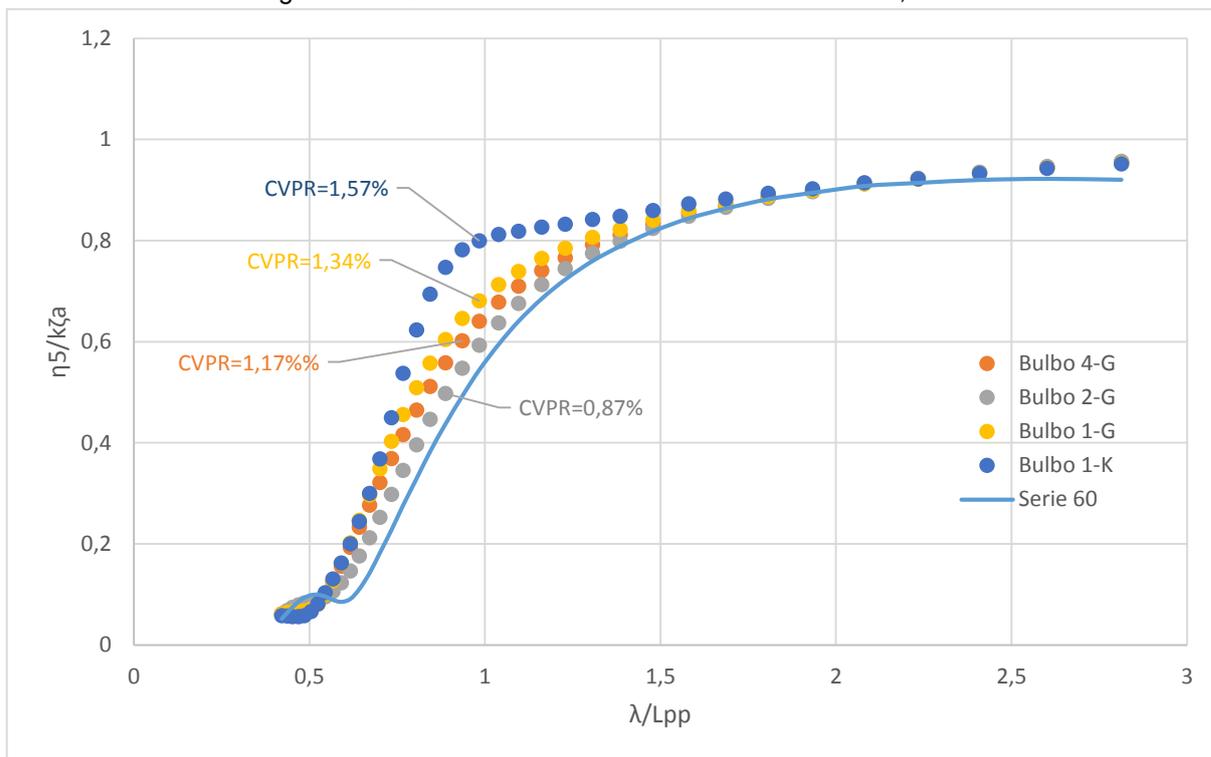
Figura 79 - Análise do Parâmetro de Volume em Heave, $F_n=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o movimento de *heave*, é possível observar que geometrias com o mesmo parâmetro de volume podem gerar curvas com perfis diferentes, como observado na análise dos bulbos 4-H e 1-K. Isso ocorre porque as geometrias têm diferentes valores do parâmetro de comprimento, onde um é cerca de 1% maior que o outro. Para o caso da frequência natural, como anteriormente citado, o pico da curva é deslocado para frente.

Já em relação ao movimento de *pitch*, analogamente ao comprimento, o aumento do parâmetro do volume também altera a frequência natural e o perfil da curva gerada. Para o perfil das curvas, fixou-se o valor do parâmetro de comprimento em 4,15% e selecionou-se vários bulbos com parâmetros diferentes de volume em $F_n=0$. O resultado é apresentado na Figura 80.

Figura 80 - Análise do Parâmetro de Volume em *Pitch*, $F_n=0$ 

Não foi possível selecionar bulbos de mesma forma com o parâmetro de comprimento igual, o que tornaria a análise mais precisa. Porém, observa-se que, com o aumento do parâmetro de volume, o perfil de resposta desloca-se para a esquerda do gráfico. O mesmo efeito é observado em todos os números de Froude analisados.

5.2.1. Análise da Variação de Calado

Para analisar o efeito que o volume do bulbo tem no casco, escolheu-se três bulbos com o mesmo C_{VT} e deslocou-se o calado do navio para obter um volume deslocado equivalente ao do casco quando os bulbos foram inseridos. Obteve-se então a resposta dinâmica para essa nova condição de calado as quais foram comparadas com as repostas dinâmicas do casco na condição de calado original e com a presença do bulbo. O C_{VT} dos bulbos é de 3,27%, o novo volume deslocado do casco é então de 0,5377m³. Da Figura 81 até a Figura 84 são mostradas a resposta em *heave* e *pitch* do casco nas condições analisadas

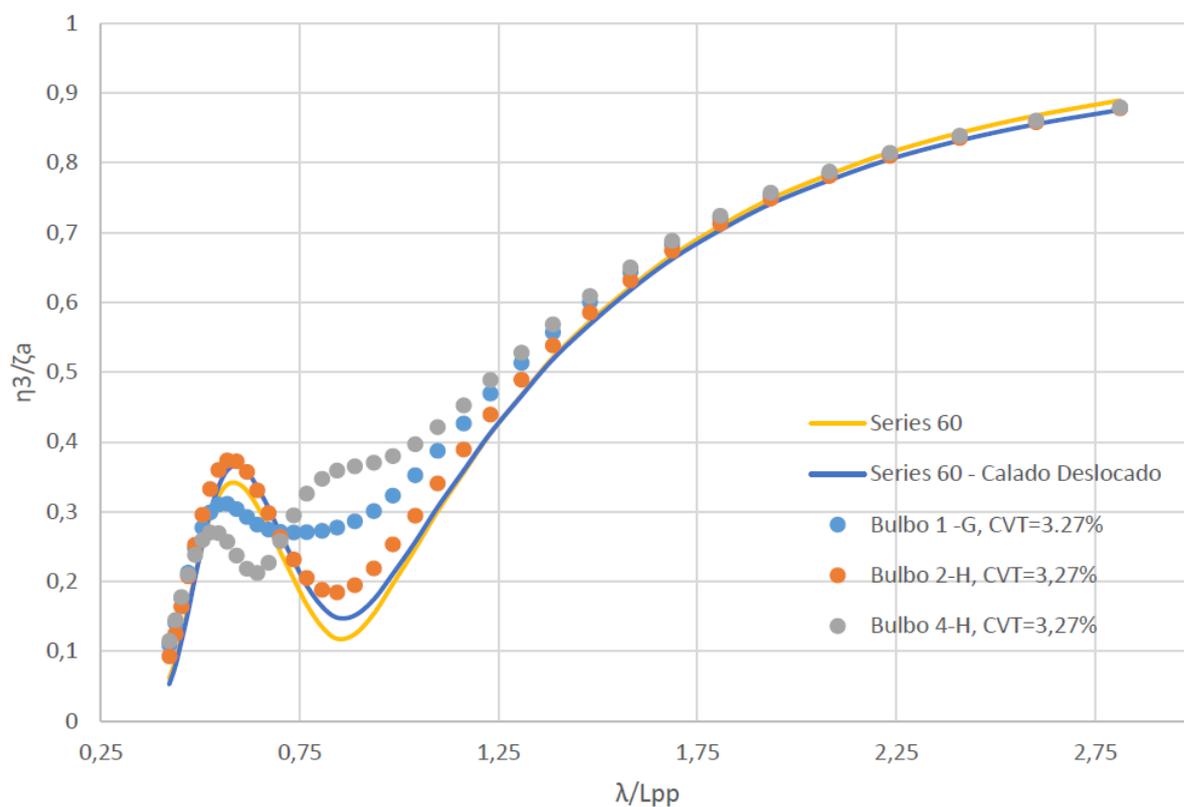
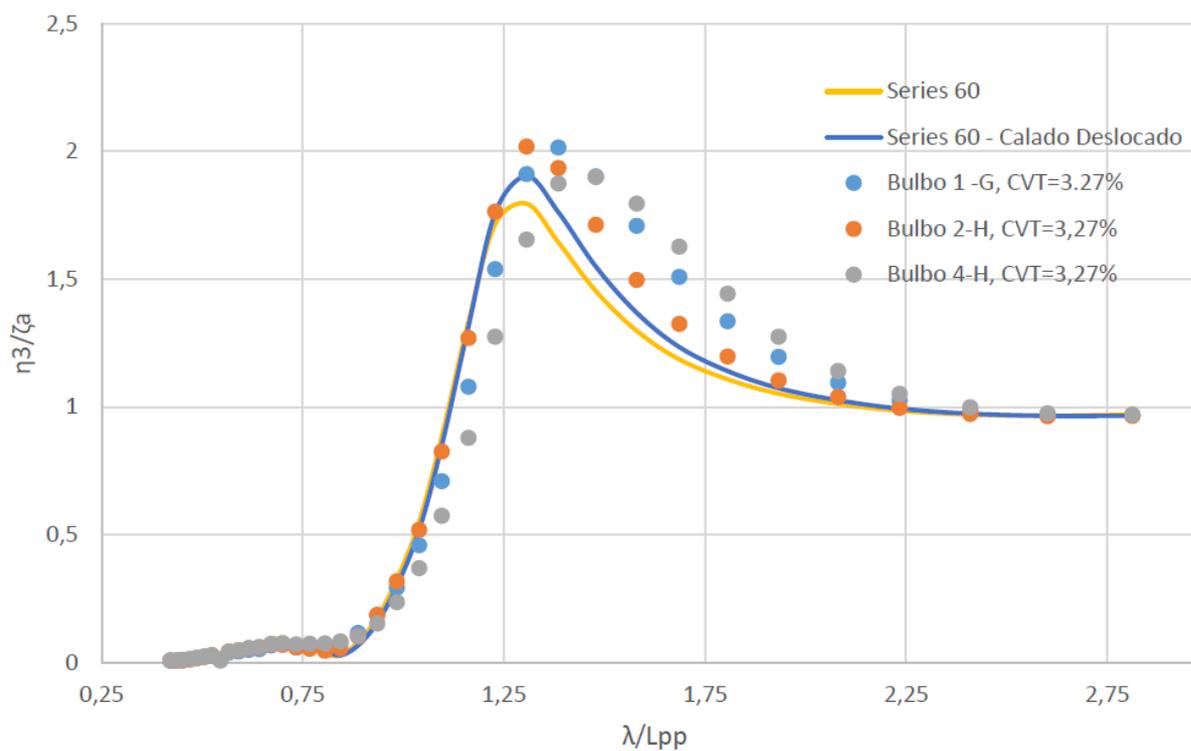
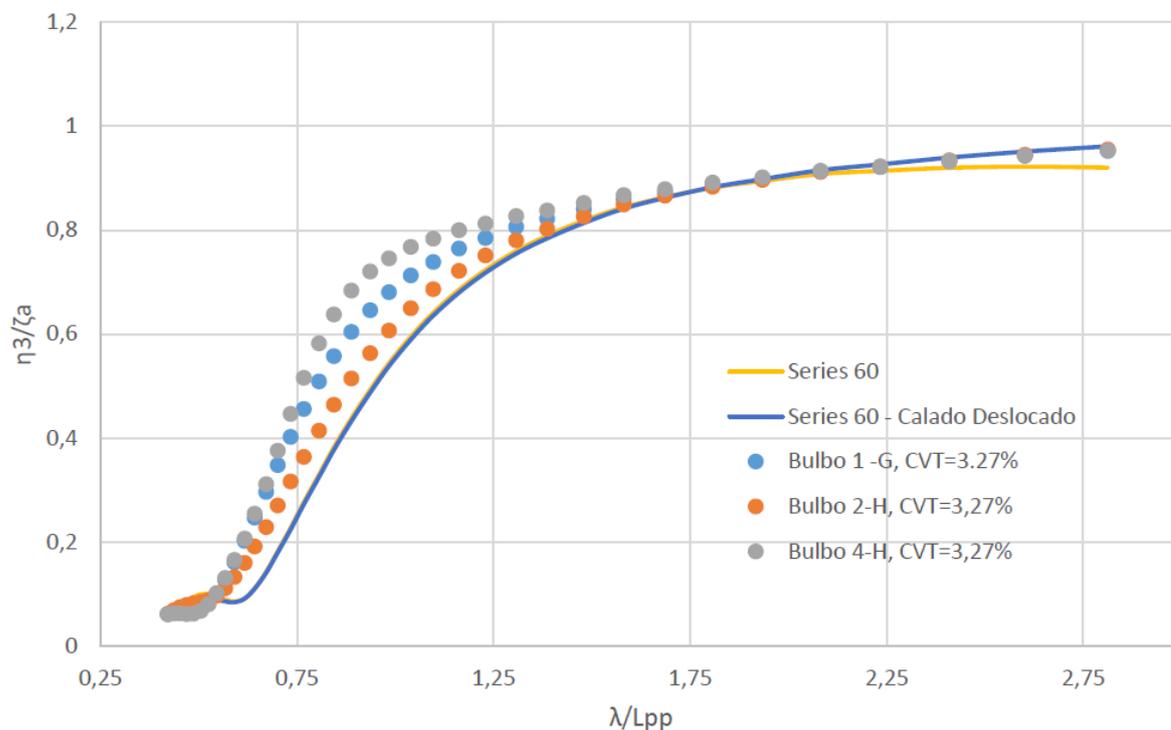
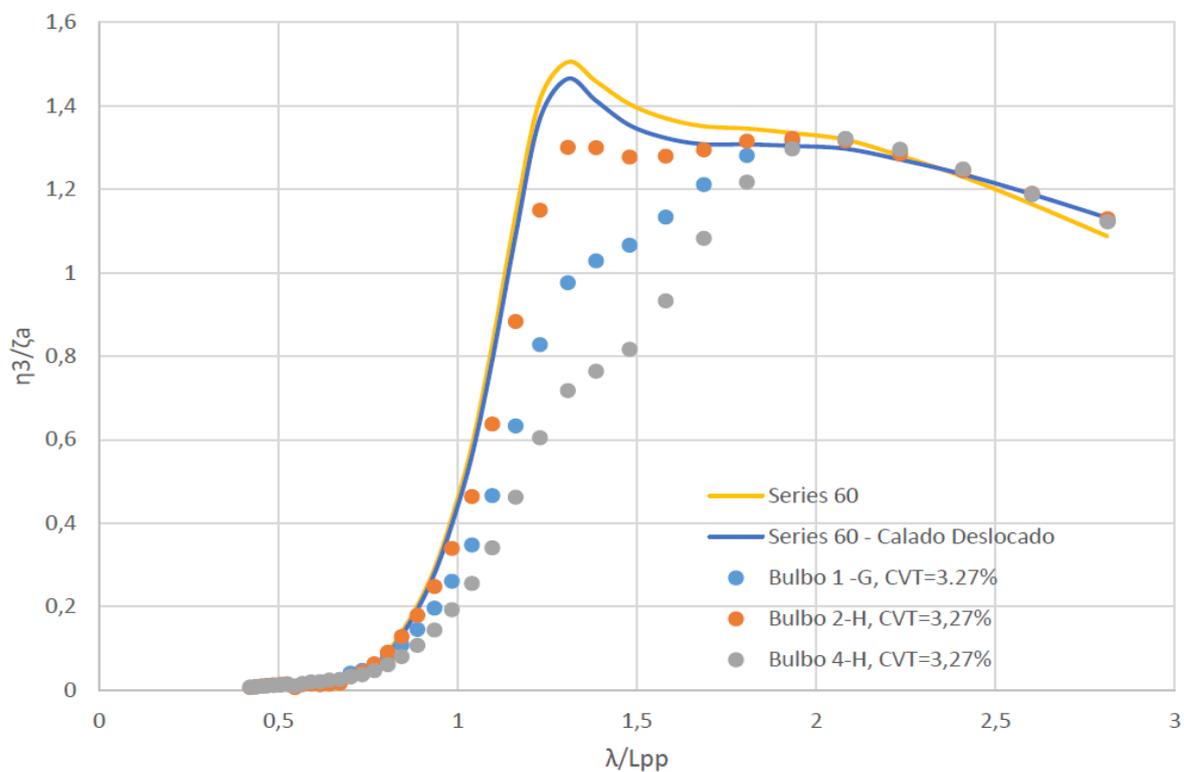
Figura 81 - Comparação entre a variação de calado e bulbos em *Heave*, $F_n=0$ Figura 82 - Comparação entre a variação de calado e bulbos em *Heave*, $F_n=0,25$ 

Figura 83 - Comparação ente a variação de calado e bulbos em *Pitch*, $F_n=0$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 84 - Comparação ente a variação de calado e bulbos em *Pitch*, $F_n=0,25$ 

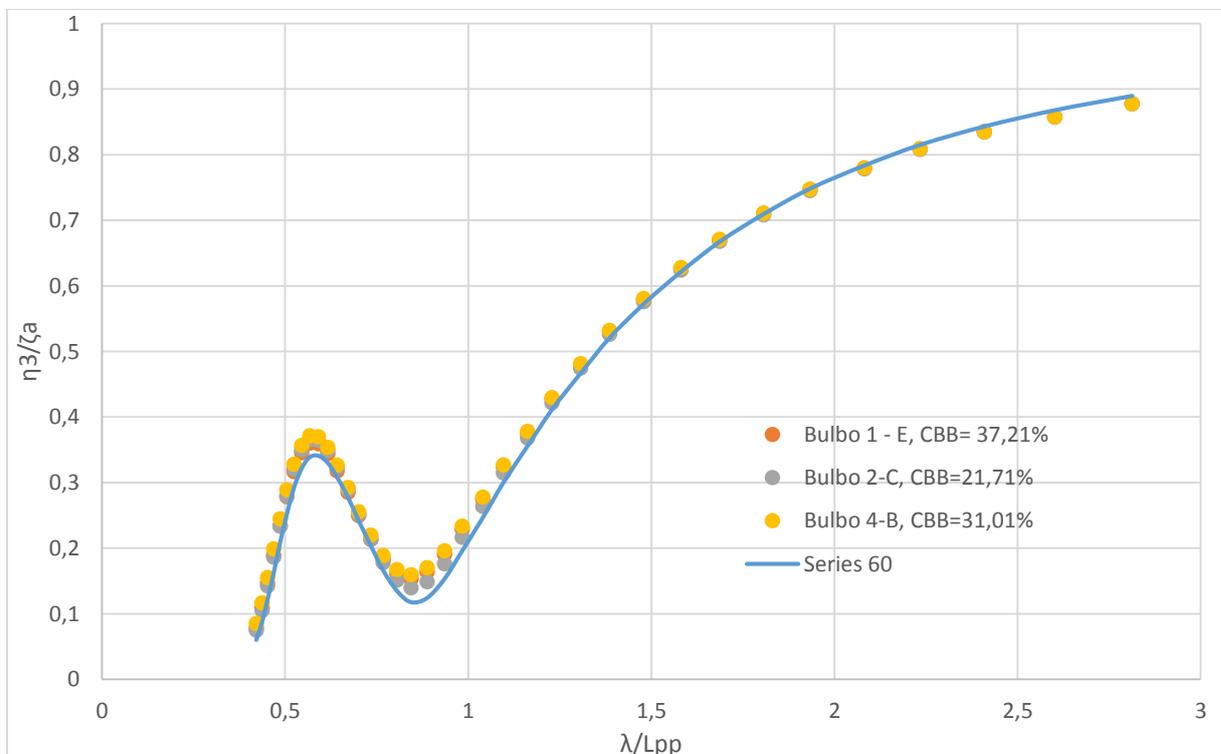
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que a variação do calado não desloca o pico de resposta do casco ou altera perfil das curvas de maneira significativa. O que prova que a influência do volume do bulbo vai além de adicionar deslocamento ao casco. Além disso, demonstra também que o volume total do bulbo tem sim uma influência significativa na resposta.

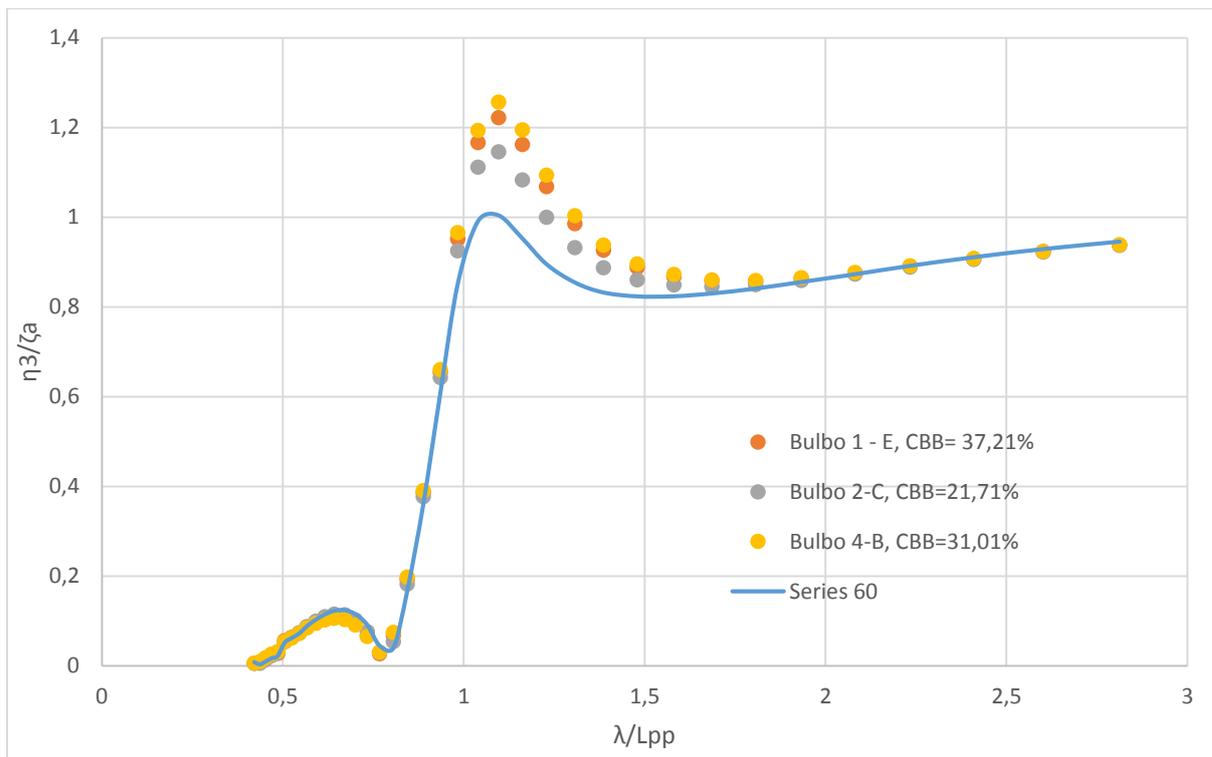
5.3. Parâmetro de Boca

Para avaliar a influência do C_{BB} , analisou-se quatro diferentes bulbos que possuíam volumes a vante parecidos, variando de 0,46% até 0,59%, os bulbos escolhidos foram: 1-E, 2-C e 4-B cujos valores de C_{VPR} são: 0,47%, 0,52% e 0,46% respectivamente. Compreende-se que uma análise com um valor fixo para esse parâmetro seria mais precisa, porém torna-se difícil obter valores diferentes para boca mantendo outros parâmetros como o de comprimento e de volume a vante constante. O resultado para todos os valores de F_n é mostrado na Figura 85, Figura 86 e Figura 87.

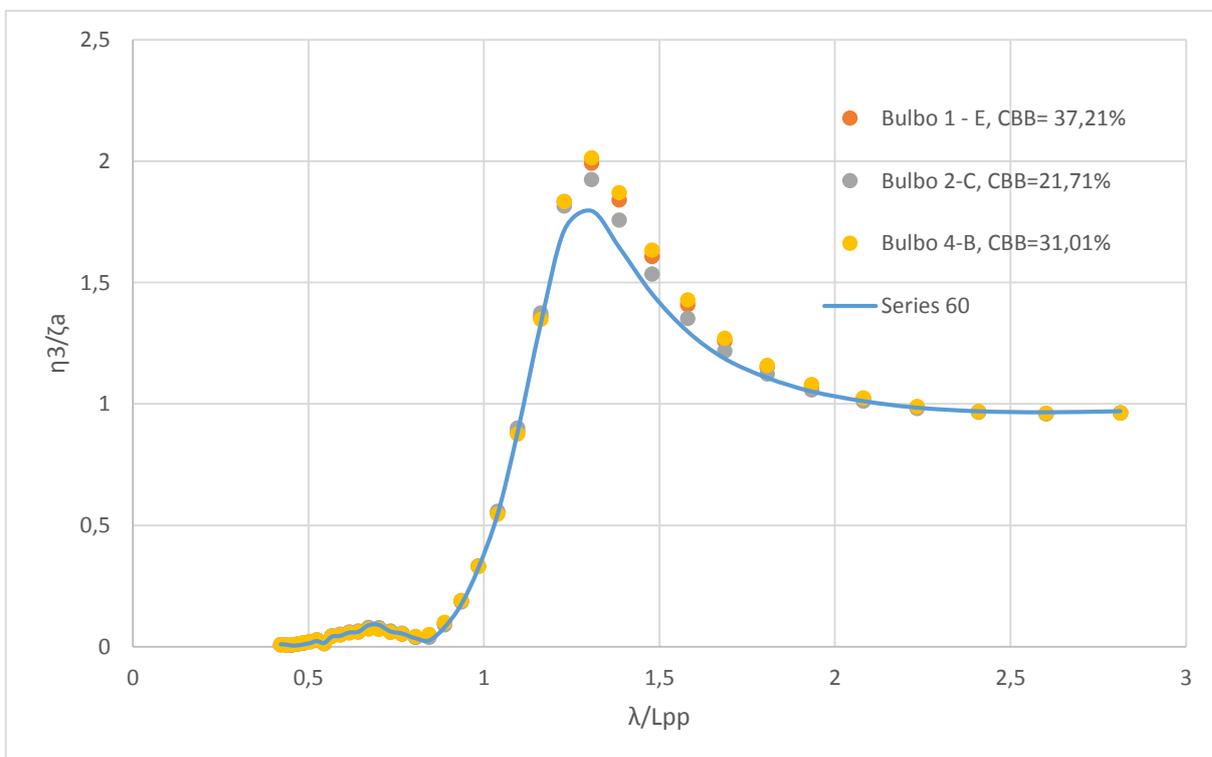
Figura 85- Análise do Parâmetro de Boca em *Heave*, $F_n=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 86 - Análise do Parâmetro de Boca em Heave, $F_n=0,15$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 87 - Análise do Parâmetro de Boca em Heave, $F_n=0,25$ 

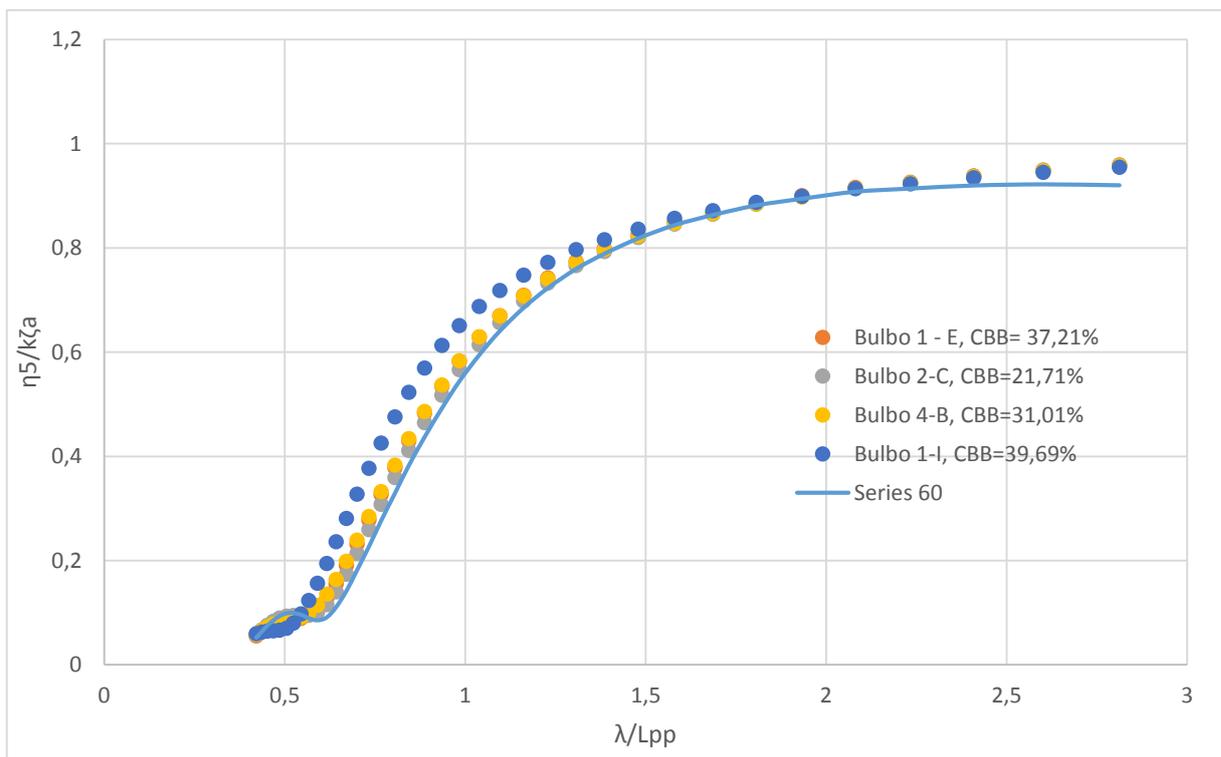
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que esse parâmetro parece não modificar de maneira significativa a frequência natural do movimento de *heave*. Aparentemente, o perfil das curvas também não é modificado, elas seguem o mesmo padrão aparentando deslocar-se a vante conforme o C_{BB} aumenta.

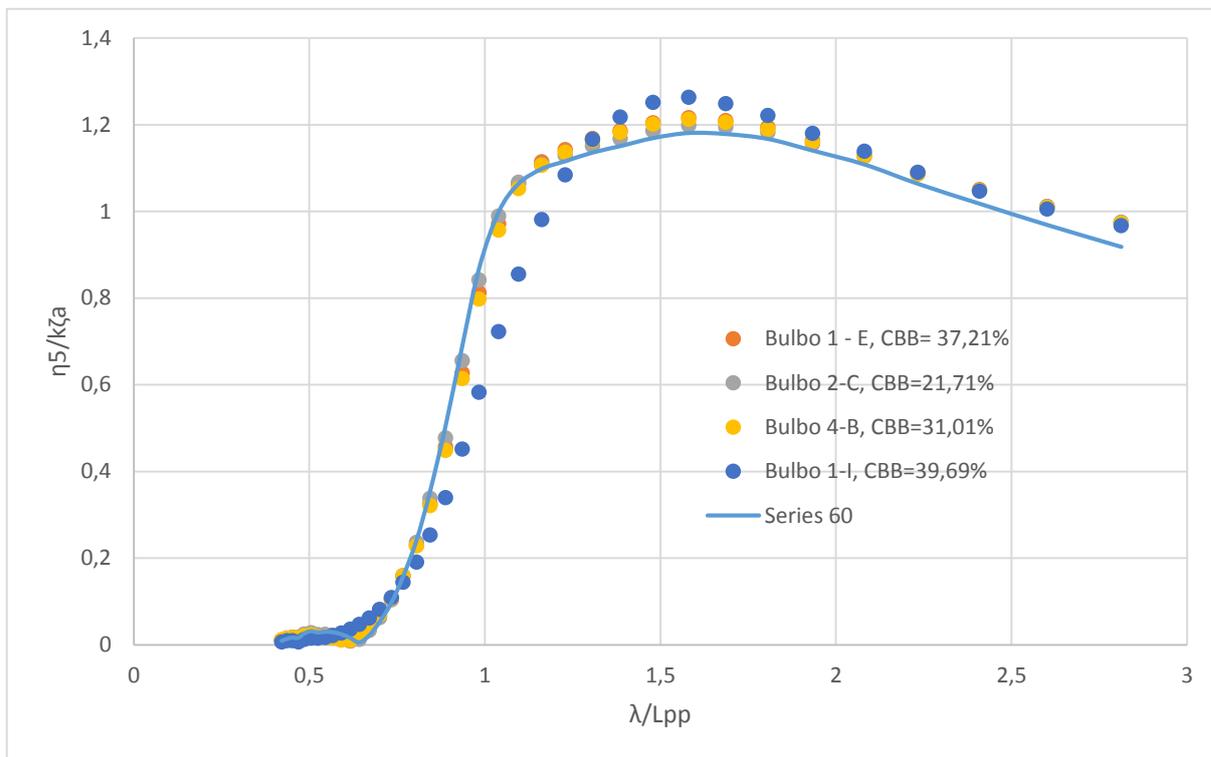
A mesma análise foi realizada para o movimento em *pitch*, usando as mesmas formas de bulbo e com os mesmos C_{VPR} e C_{BB} . O resultado para os três números de Froude é então mostrado na Figura 88, Figura 89 e na Figura 90.

Nessas figuras podemos observar que em geral o perfil das curvas fica constante com a variação de C_{BB} exceto para o Bulbo 1-I, que aparenta ter um comportamento diferenciado, mas que possui o maior C_{VPR} . Para a frequência natural, não observa-se mudanças significativas, exceto para $Fn=0,25$ onde o Bulbo 1-I fornece um amortecimento maior que as outras condições analisadas.

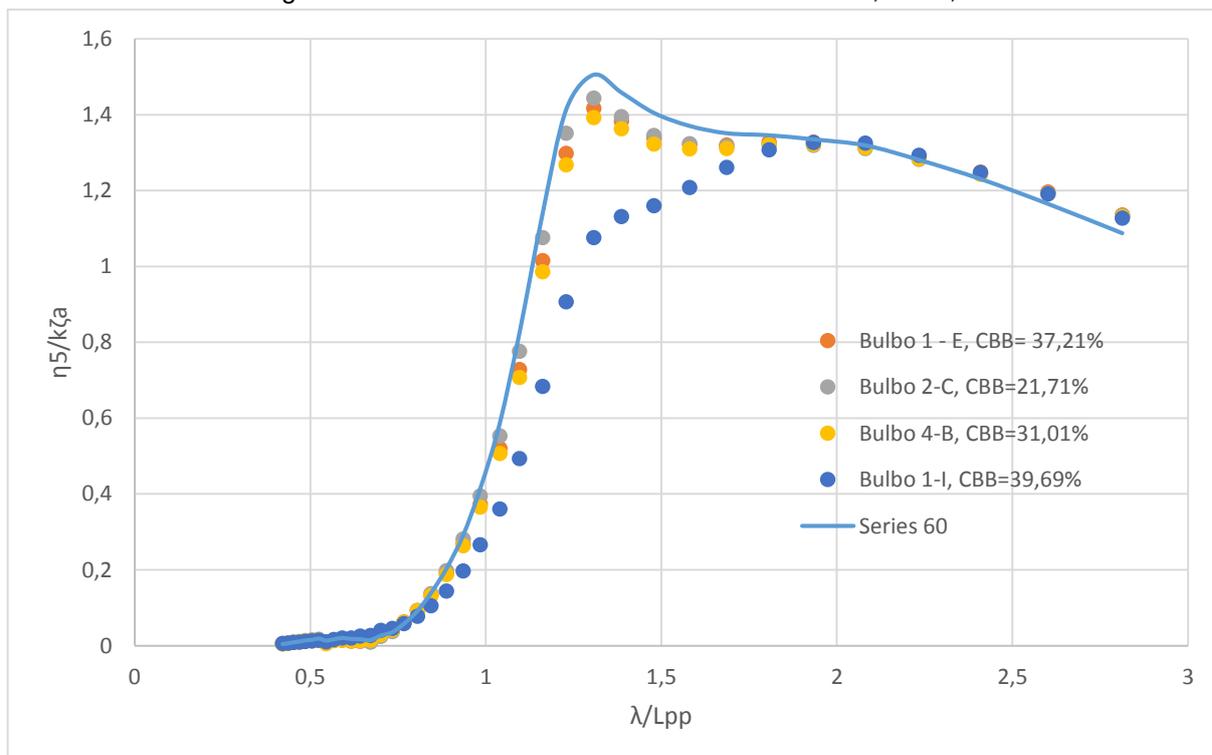
Figura 88 - Análise do Parâmetro de Boca em *Pitch*, $Fn=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 89 - Análise do Parâmetro de Boca em *Pitch*, $Fn=0,15$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

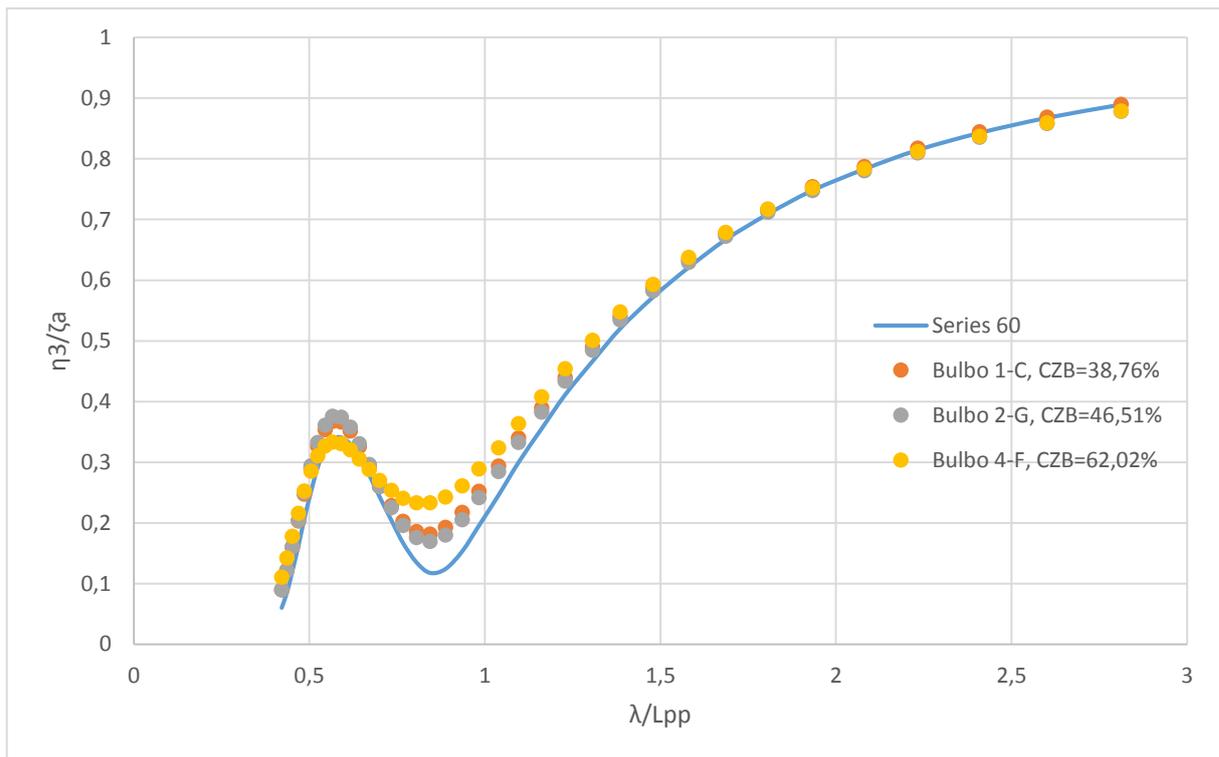
Figura 90 - Análise do Parâmetro de Boca em *Pitch*, $Fn=0,25$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

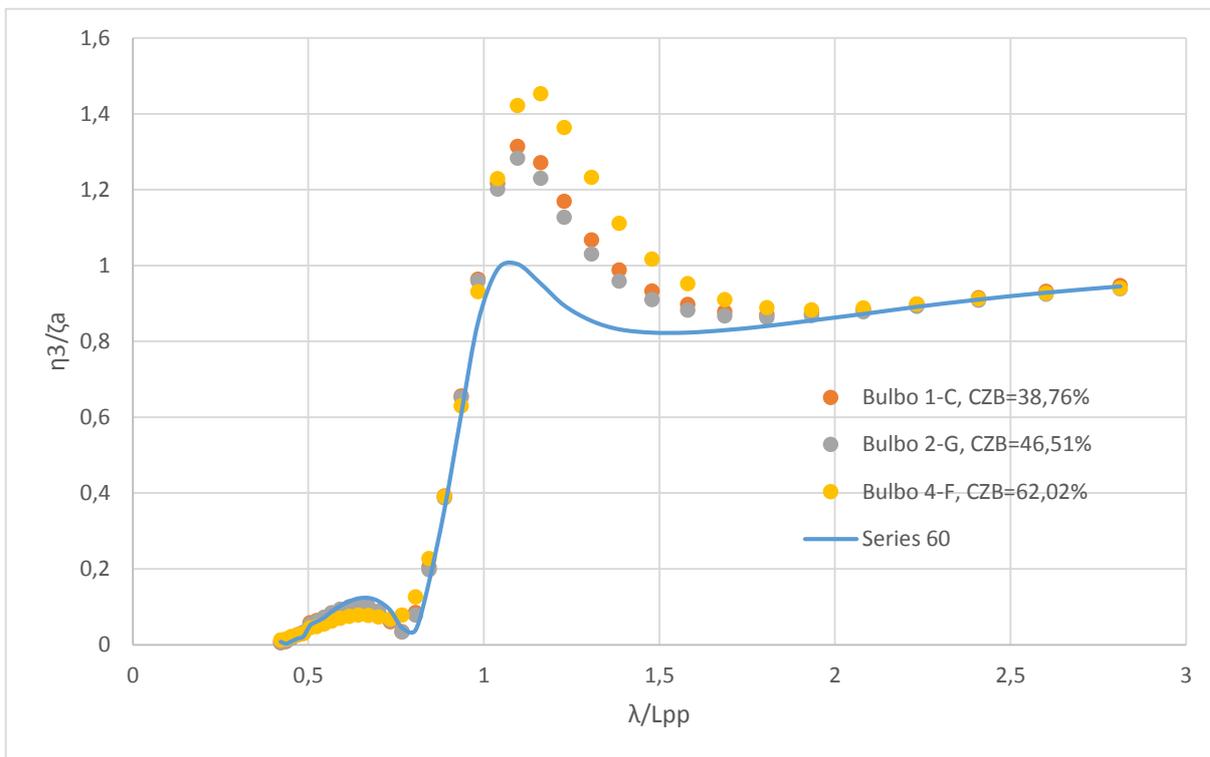
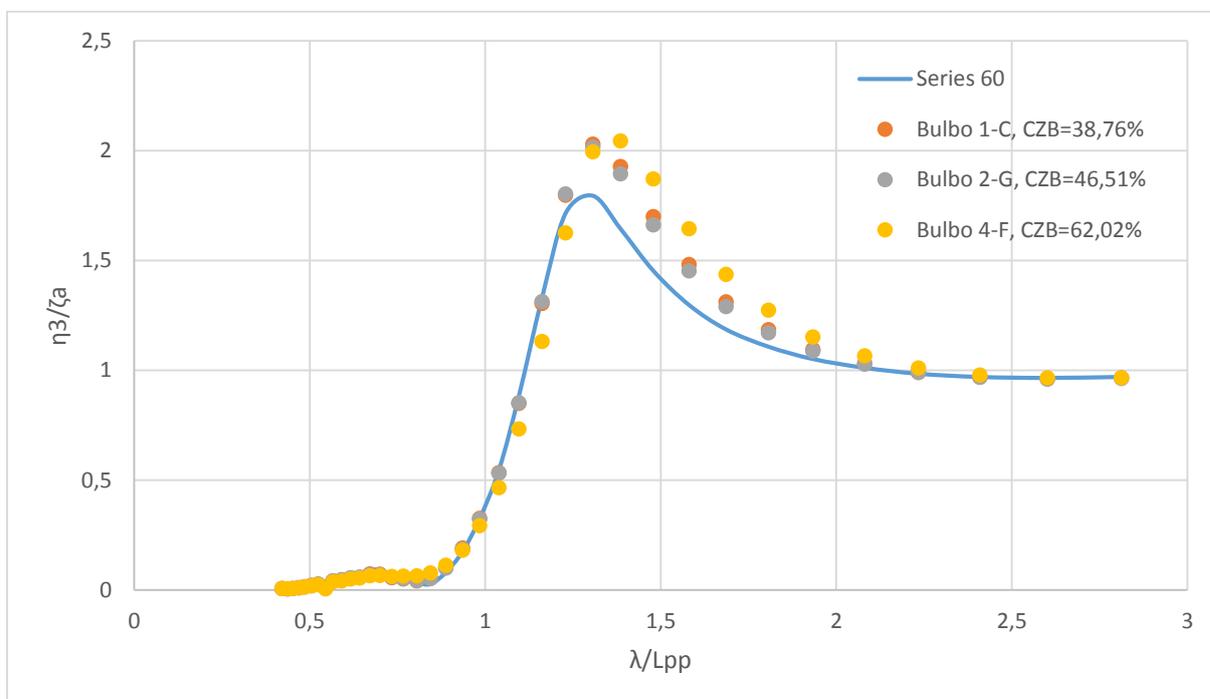
5.4. Parâmetro do Calado

Para realizar a análise desse parâmetro, tentou-se manter, na medida do possível, o parâmetro de volume o mais constante possível, já que esse é o parâmetro que mais aparenta influenciar a resposta. Os bulbos utilizados para a comparação são 1-C, 2-G e 4-F que possuem parâmetros de volume a vante de: 0,85%, 0,87% e 0,77%. Observa-se que a forma de bulbo 4-F possui a posição de calado acima da metade de sua altura na perpendicular de vante conforme descrito em Kratch (1978), enquanto os outros dois possuem essa posição coincidindo com a metade dessa altura. Na Figura 91, Figura 92 e Figura 93 são mostradas a comparação para diferentes valores de parâmetro C_{ZB} no movimento de *heave* da embarcação.

Figura 91 - Análise do Parâmetro de Calado em *Heave*, $F_n=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

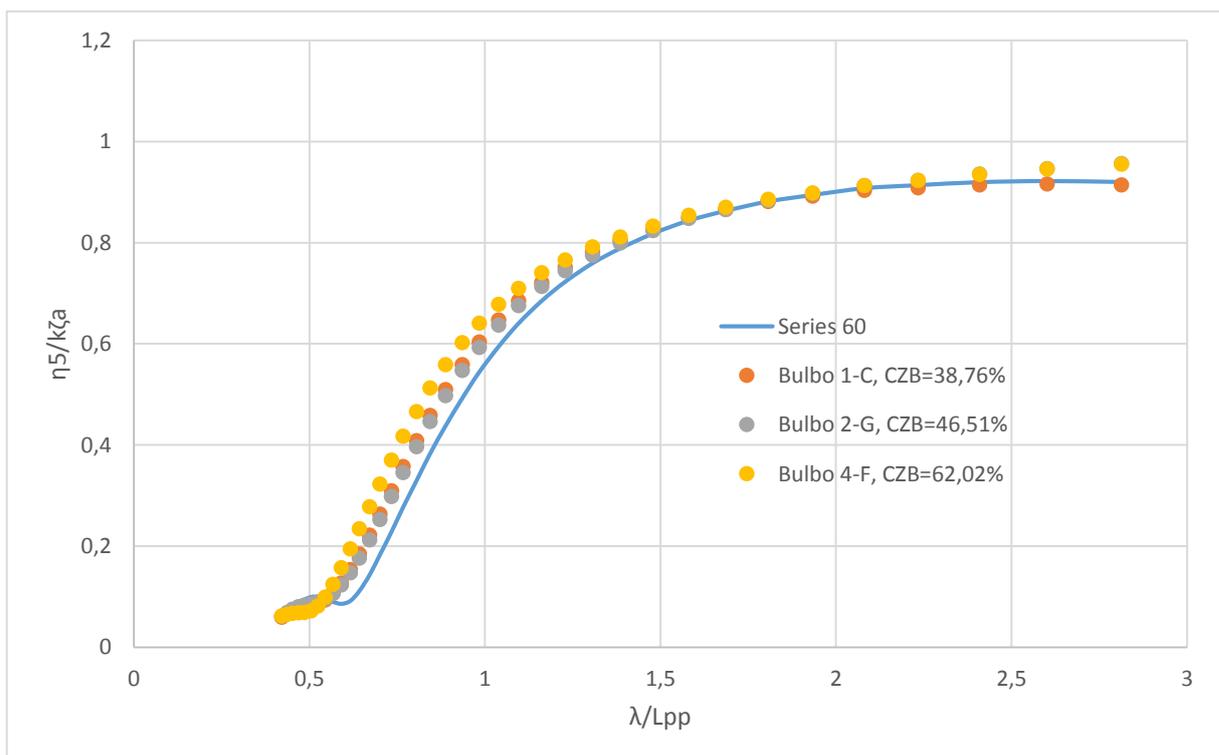
Figura 92 - Análise do Parâmetro de Calado em *Heave*, $Fn=0,15$ Figura 93 - Análise do Parâmetro de Calado em *Heave*, $Fn=0,25$ 

Assim como o parâmetro de boca, esse parâmetro para *heave* tem pouca influência, principalmente para $F_n=0$, mas o que pode-se observar é que para maiores valores de C_{ZB} , os picos das curvas em $F_n=0,15$ e $F_n=0,25$ tende a deslocar-se para frente, mas não há variações significativas no perfil da curva, porém a amplitude das repostas aumentam como mostrado para $F_n=0,15$. Além disso, pode-se então concluir que bulbos com a forma semelhante ao Bulbo 4-F, deslocam mais a frequência natural que os vistos nos Bulbos 1-C e 2-G.

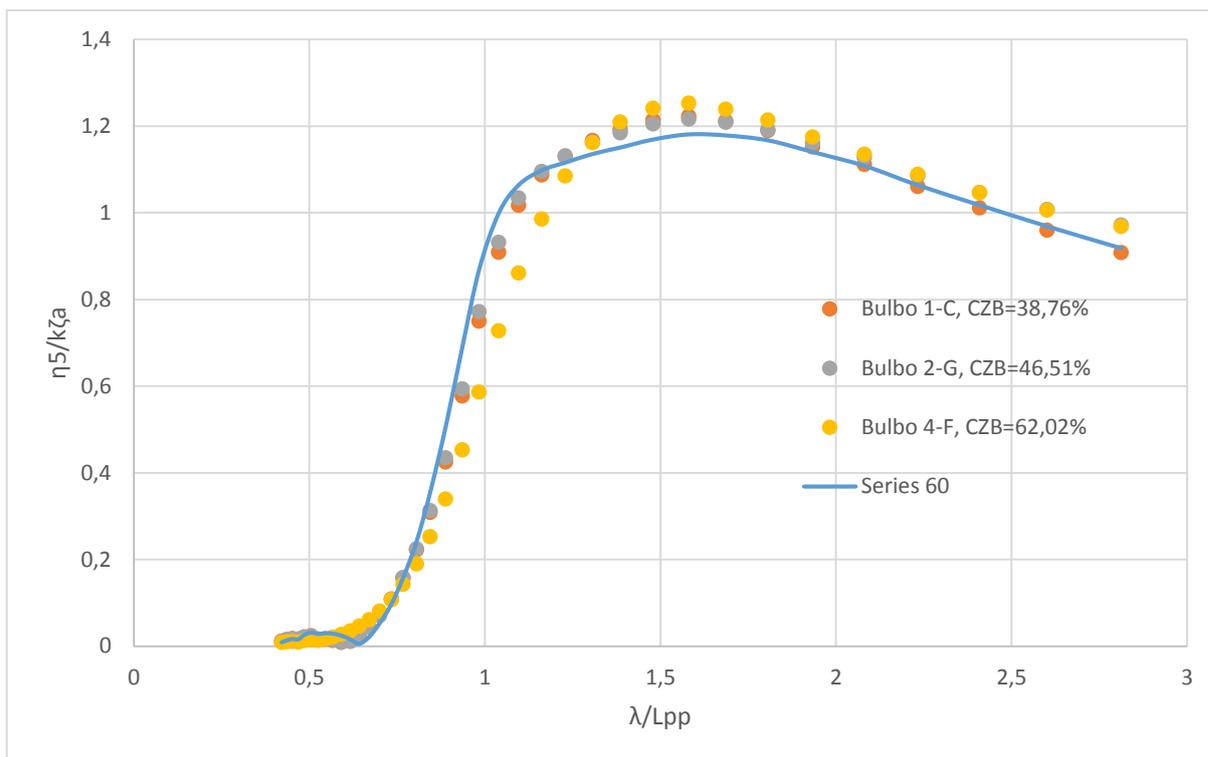
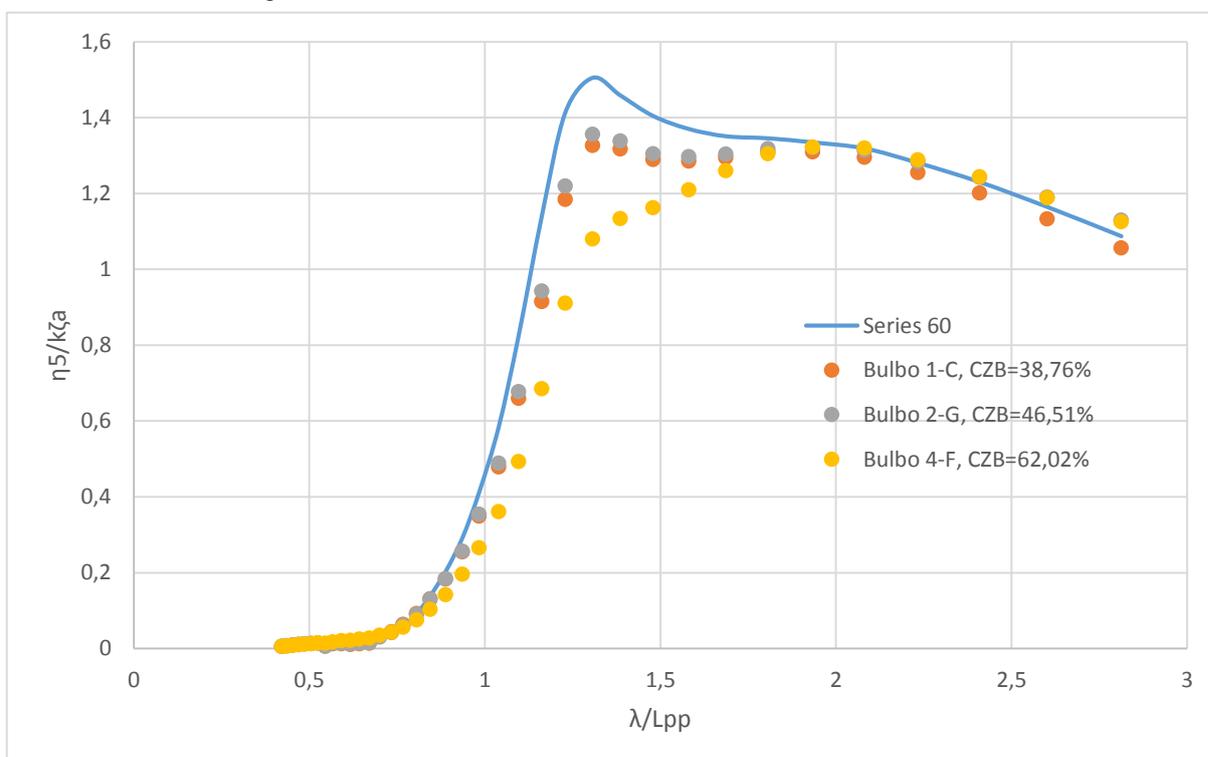
Para avaliação em *pitch*, os mesmos Bulbos foram utilizados e as Figura 94 até a Figura 95 mostram a influência desse parâmetro para os mesmos C_{VPR} . Analisando então a Figura 94, nota-se que para $F_n=0$, o aumento desse parâmetro desloca o perfil da curva de resposta para trás, enquanto a frequência natural aparenta manter-se constante.

Com velocidade de avanço o perfil das curvas é alterado mais significativamente. Eles se deslocam para frente, aparentando se diferenciar mais com o aumento da velocidade e com o aumento de C_{ZB} . Além disso, a frequência natural é alterada mais significativamente para $F_n=0,25$, especialmente para a forma 4-F de bulbo.

Figura 94 - Análise do Parâmetro de Calado em *Pitch*, $F_n=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

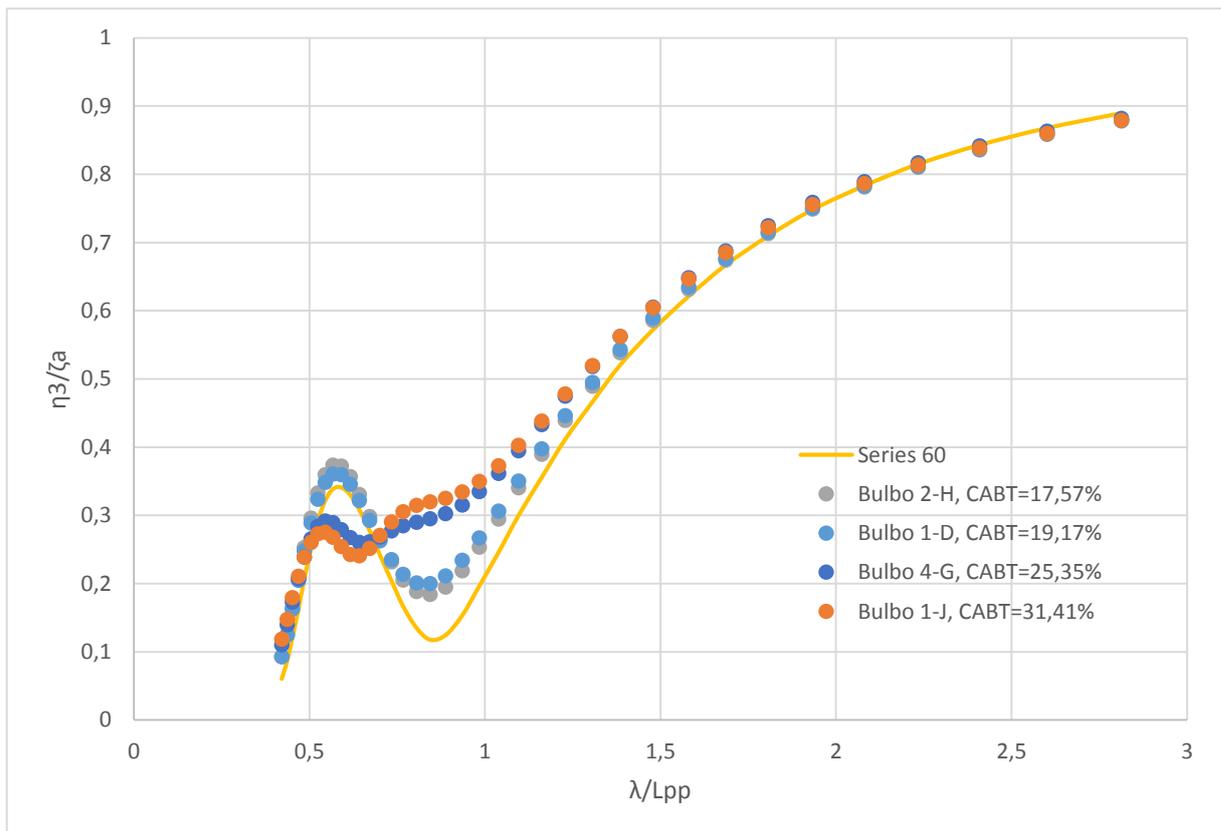
Figura 95 - Análise do Parâmetro de Calado em *Pitch*, $F_n=0,15$ Figura 96 - Análise do Parâmetro de Calado em *Pitch*, $F_n=0,25$ 

5.5. Parâmetro de Área de Seção

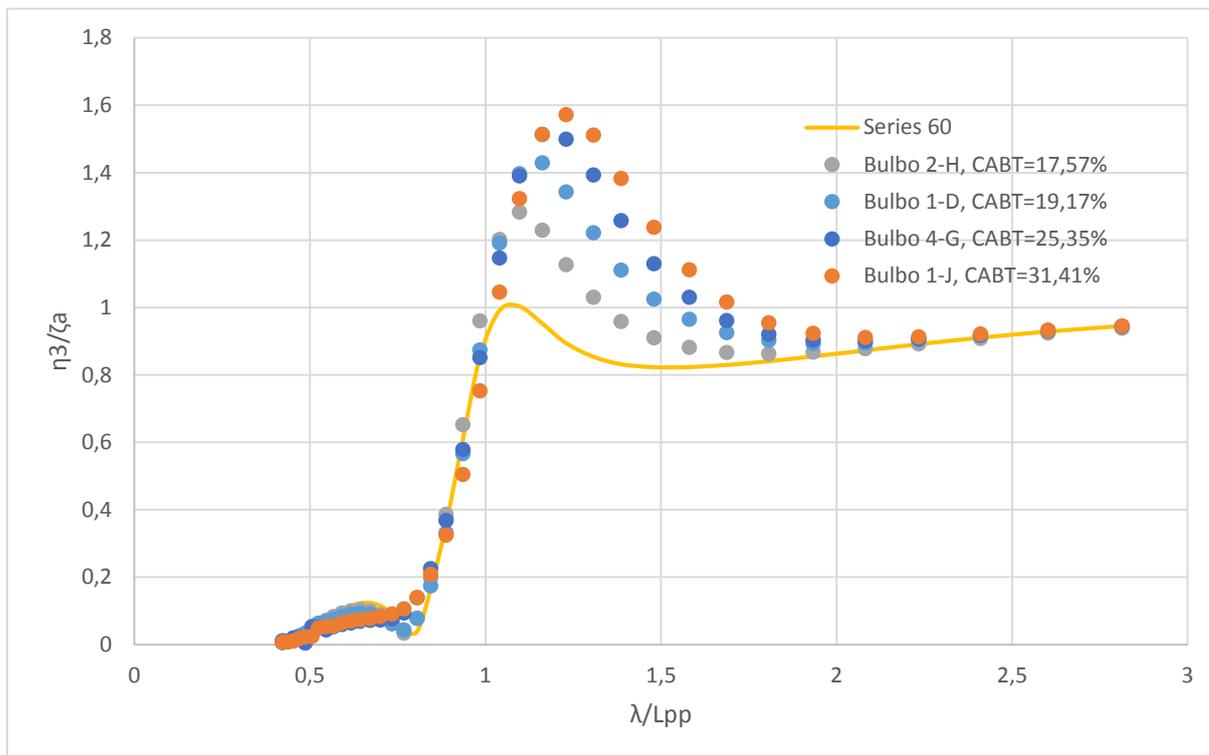
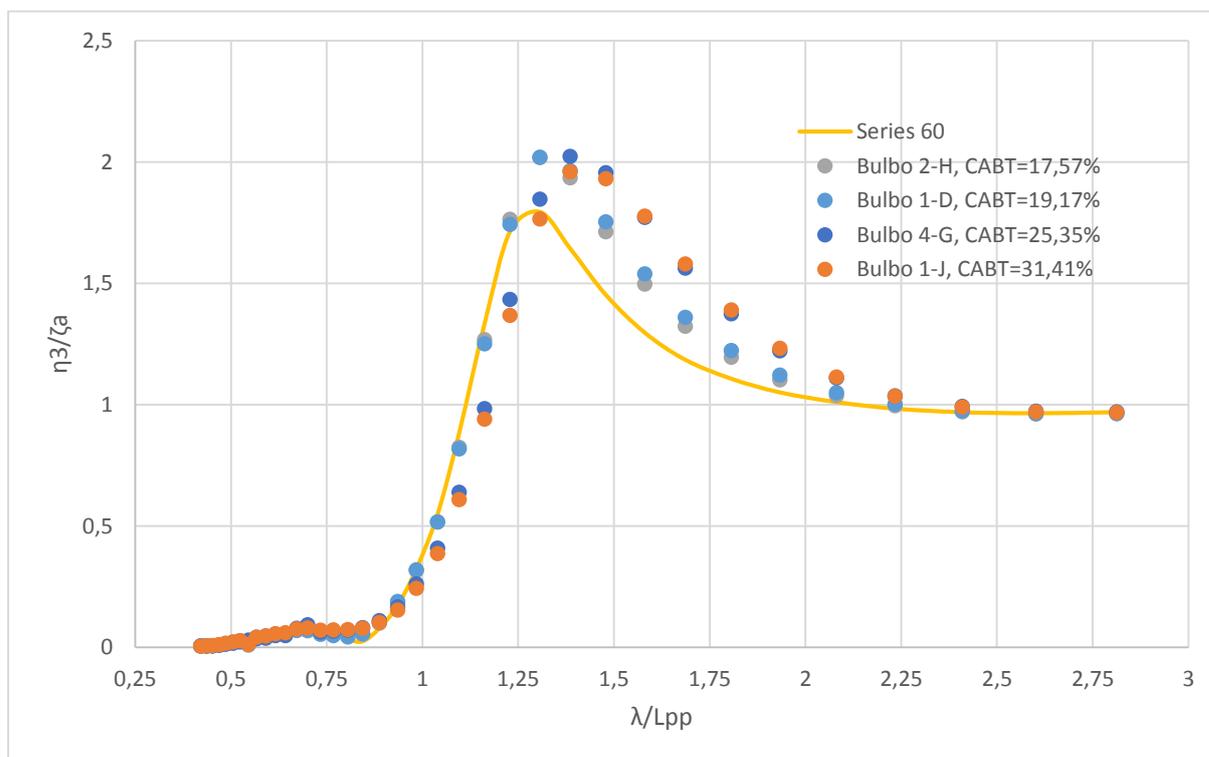
Para a análise desse parâmetro, o mesmo procedimento de manter o parâmetro de volume o mais perto do constante foi feito. Assim, os bulbos selecionados foram: 1-D, 1-J, 2-H e 4-G com valores de C_{VPR} iguais a: 1,13%, 1,08%, 1,14% e 1,17% respectivamente. Na Figura 97, Figura 98 e Figura 99 são mostradas essas comparações.

Para o movimento de *heave* observou-se um descolamento da frequência natural a medida que C_{ABT} aumenta. Para $F_n=0$ a região de $\lambda/L_{pp}=0,8$ aparenta ser a mais afetada. Enquanto que para números de Froude maior que zero o comportamento fica muito parecido com o qual o parâmetro de boca fornece.

Figura 97 - Análise do Parâmetro de Calado em *Heave*, $F_n=0$



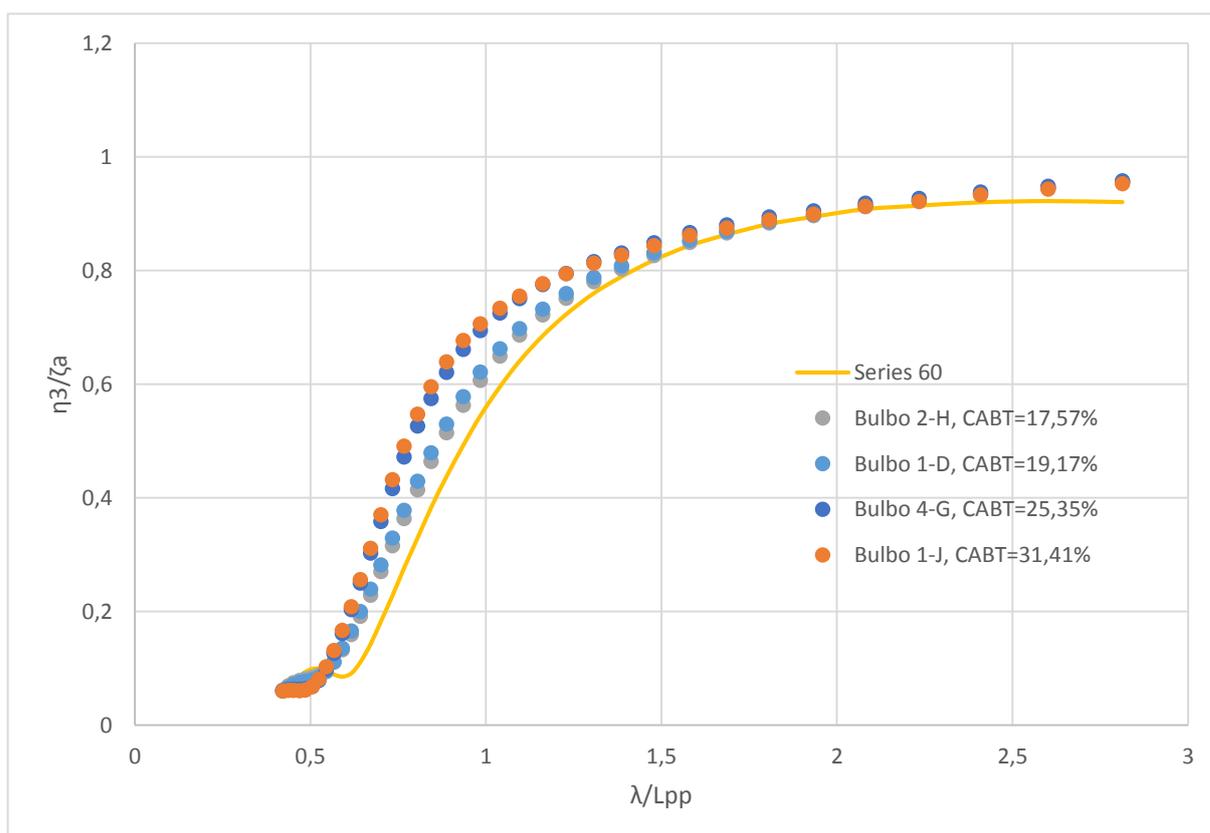
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 98 - Análise do Parâmetro de Calado em *Heave*, $Fn=0,15$ Figura 99 - Análise do Parâmetro de Calado em *Heave*, $Fn=0,25$ 

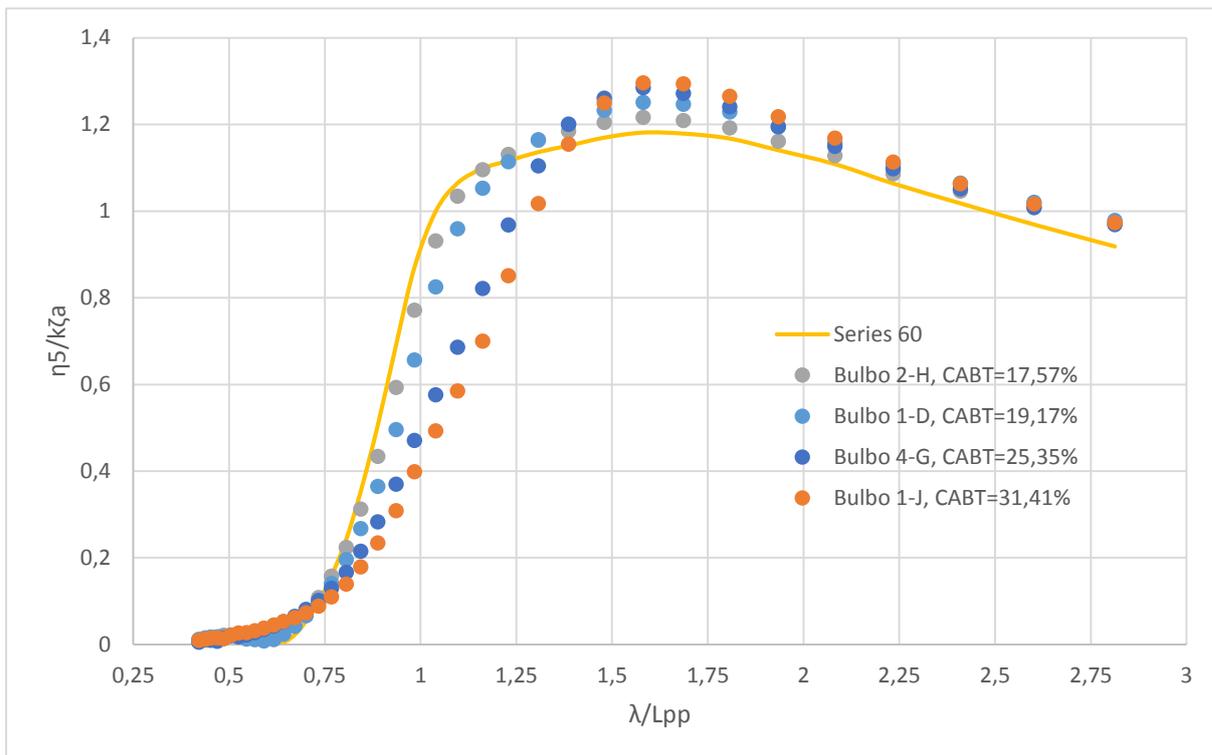
Para o movimento em *pitch*, os mesmos bulbos são usados para analisar esse parâmetro. Na Figura 100, Figura 100 e Figura 102 é mostrada a variação da resposta dinâmica do casco em função do parâmetro de área de seção.

Nota-se um comportamento semelhante ao comportamento encontrado para o parâmetro de boca, porém as curvas aparentam estar levemente mais deslocadas. Em $F_n=0$ a curva é deslocada para trás, assim o casco começa a ter amplitude de resposta maiores com frequências menores. Para $F_n=0,25$ um amortecimento é notado na região de $\lambda/L_{pp}=1,3$ onde o casco possuía seu pico de resposta na condição sem bulbo. Assim como para $F_n=0,15$ há também um aparente amortecimento. Portanto, analisando-se os resultados, conclui-se que o parâmetro de área de seção, tem mais influência que o parâmetro de boca.

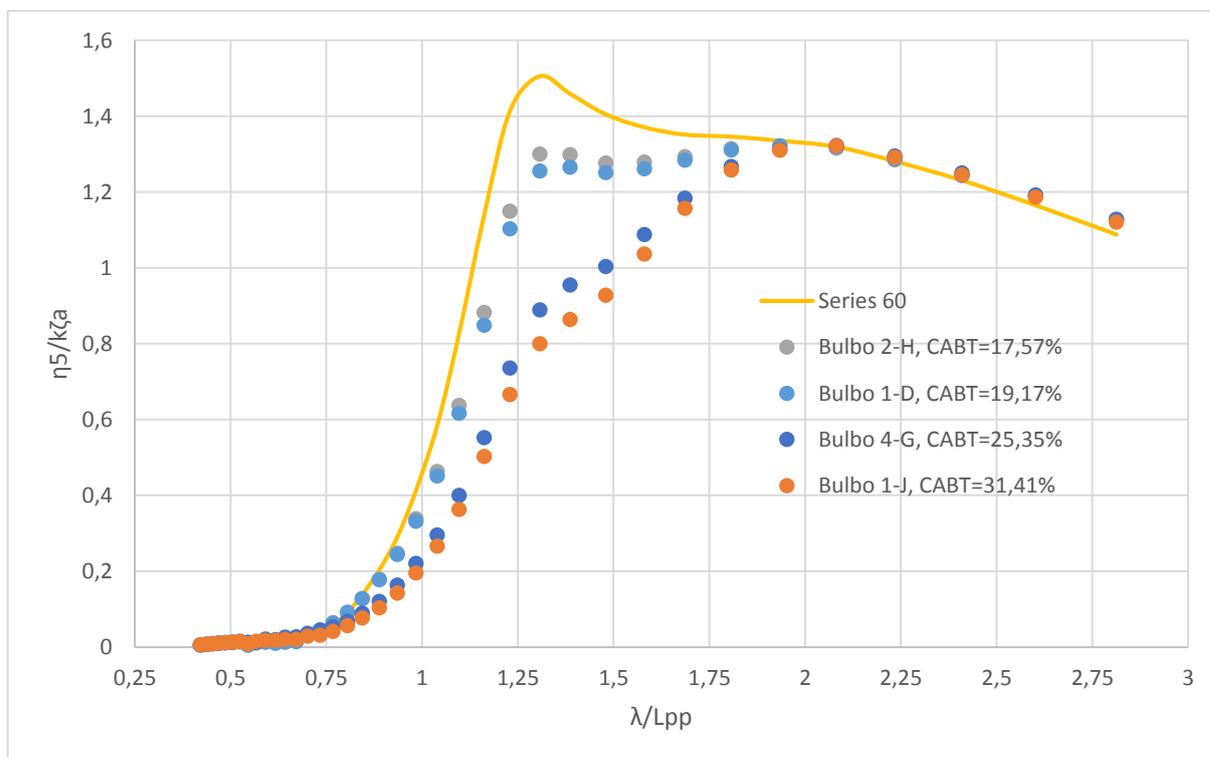
Figura 100 - Análise do Parâmetro de Calado em *Pitch*, $F_n=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 101 - Análise do Parâmetro de Calado em *Pitch*, $Fn=0,15$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 102 - Análise do Parâmetro de Calado em *Pitch*, $Fn=0,25$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

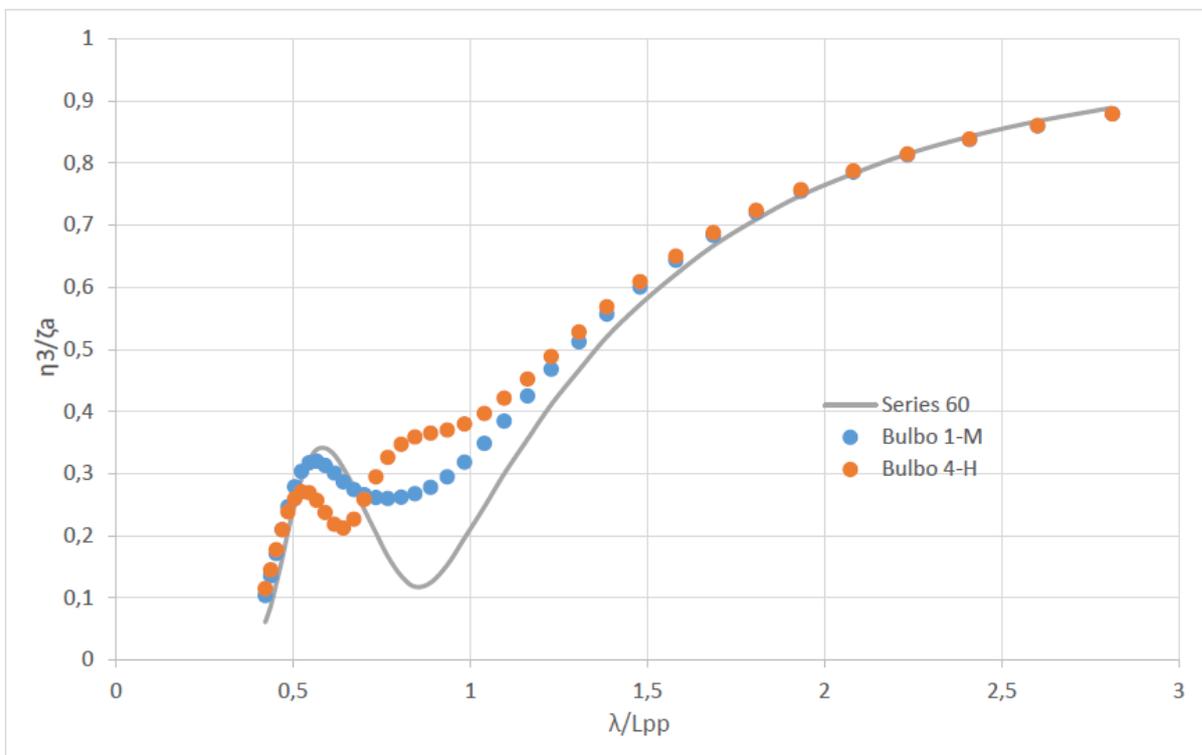
5.6. Forma do Bulbo

Para avaliar a influência que a forma do bulbo tem na resposta dinâmica, fixou-se dois parâmetros: comprimento e volume a vante. Esses dois parâmetros foram fixados, pois aparentam ter a maior influência sobre o comportamento dinâmico do casco. Assim, as duas formas de bulbo que apresentaram mais alteração na resposta dinâmica foram escolhidas para a comparação, são elas: bulbo esférico e bulbo em nábula.

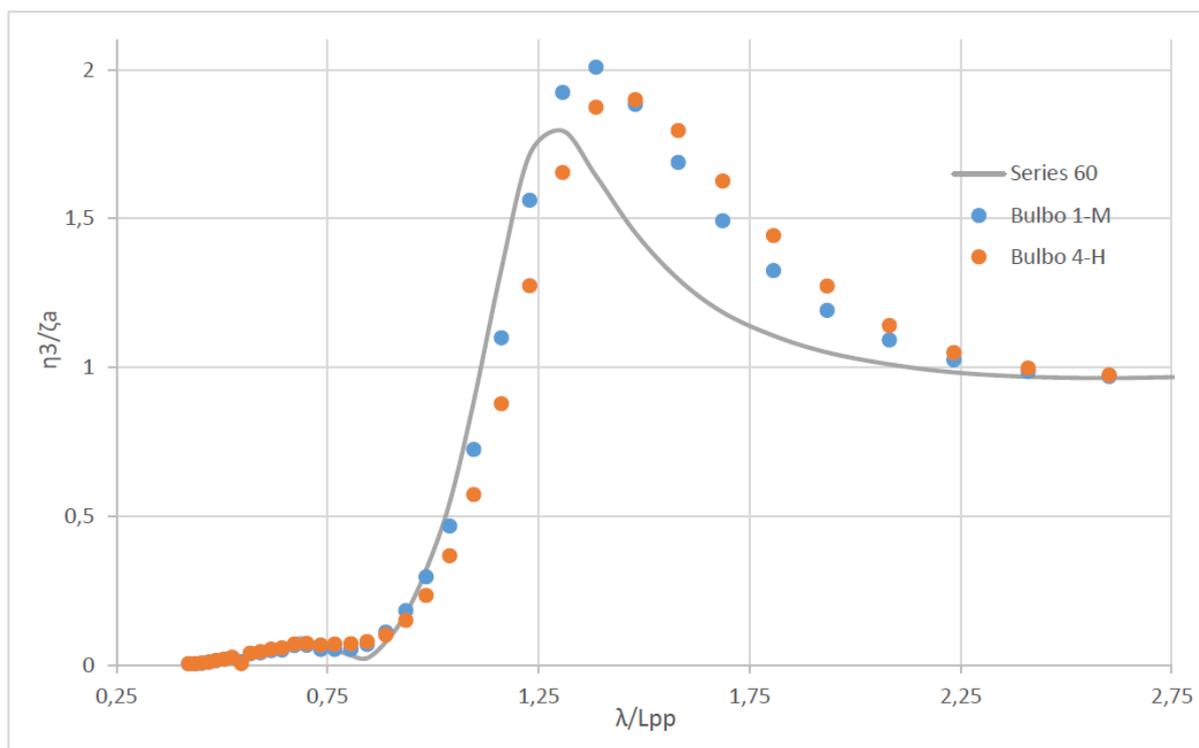
A fim de manter os dois parâmetros citados constante, criou-se uma nova forma de bulbo esférico sobre as mesmas condições das formas citadas no capítulo 4 que foi denominada Bulbo 1-M. Essa forma possui então o mesmo parâmetro de comprimento e o mesmo parâmetro de volume a vante do Bulbo 4-H. Os valores desses parâmetros são $C_{LPR}=5,25\%$ e $C_{VPR}=1,57\%$, respectivamente

Dentre toda a base de dados desenvolvida, essas formas e esses valores de parâmetros foram os que mais alteraram a resposta dinâmica do casco. Assim, as Figura 103 e Figura 104 mostram a resposta da embarcação no movimento de *heave* dessas geometrias de bulbo para diferentes números de Froude.

Observando a Figura 103 e comparando com o Bulbo 1-K em $F_n=0$, nota-se que o aumento do comprimento alterou a curva em $\lambda/L_{pp}=0,6$ o pico que o 1-K possuía diminuiu com o aumento de C_{LPR} . Além disso, para razões de λ/L_{pp} entre 0,5 e 1, o comportamento da curva difere nos valores máximos. Para a Figura 104, as diferenças acontecem para λ/L_{pp} entre 1 e 2. Essas diferenças não são significativas, apenas um deslocamento na frequência em que os picos ocorrem, enquanto que o perfil da resposta permanece semelhante.

Figura 103 - Análise da Forma de Bulbo em *Heave*, $F_n=0$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

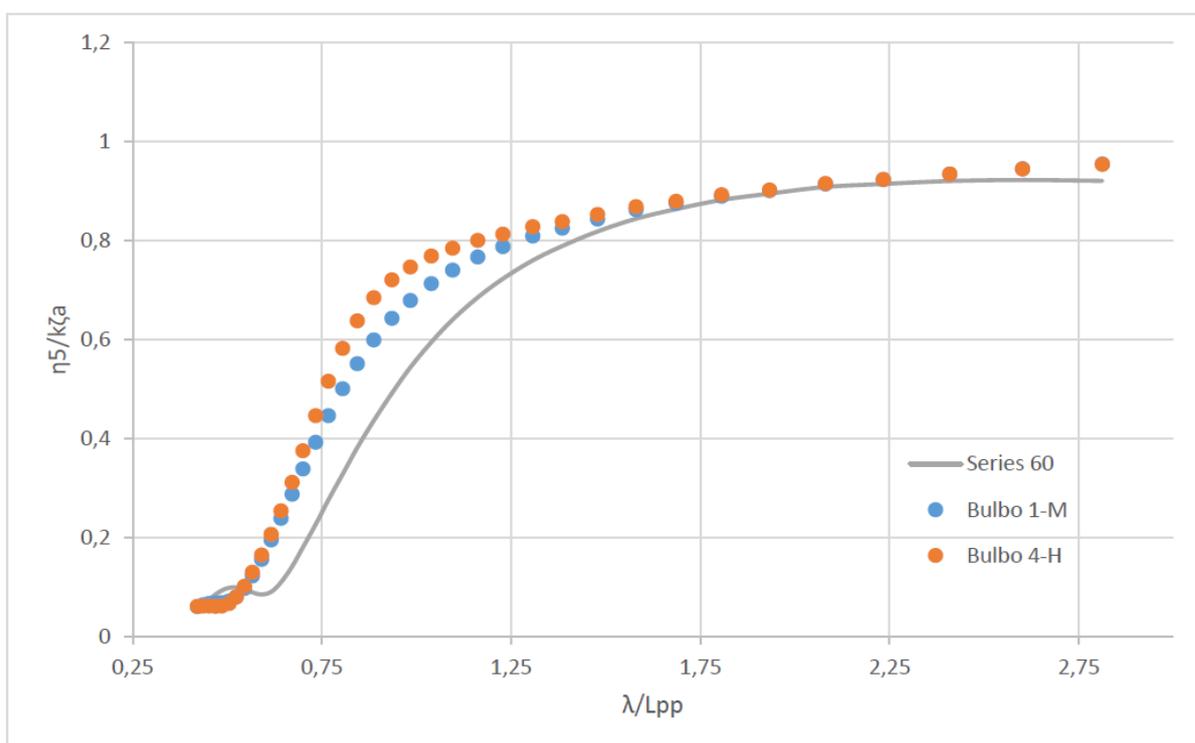
Figura 104 - Análise da Forma de Bulbo em *Heave*, $F_n=0,25$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

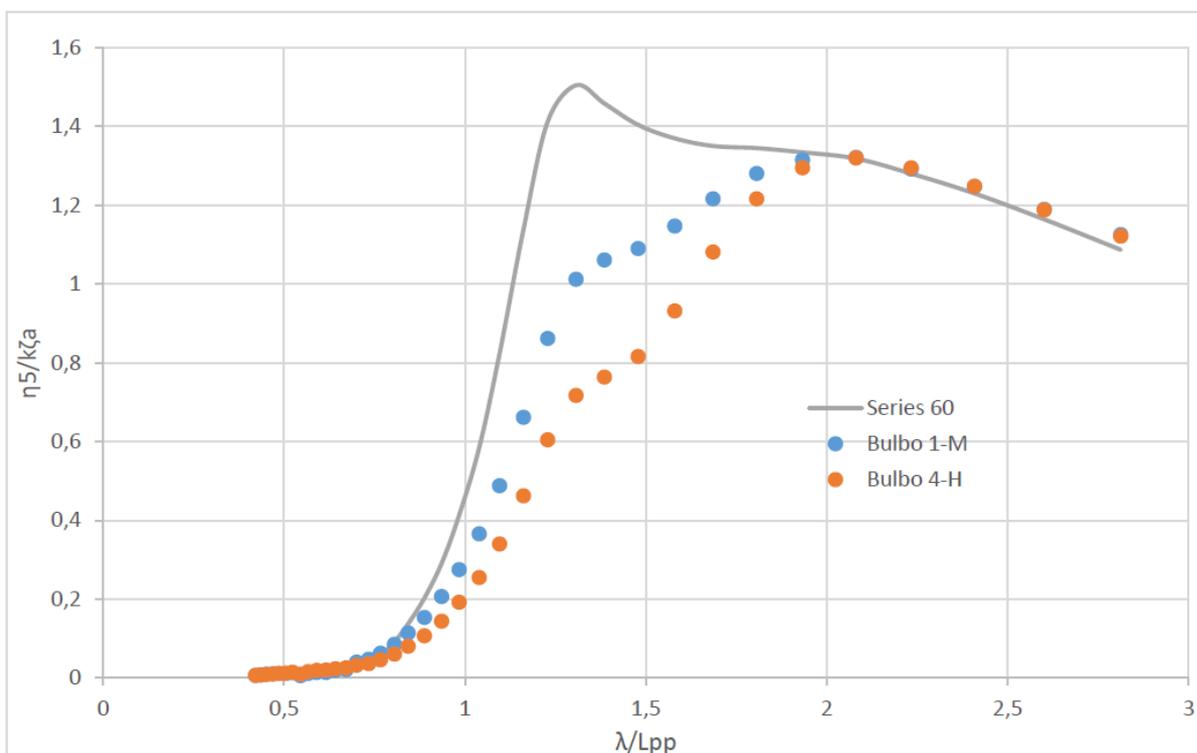
Para o movimento em *pitch*, as Figura 105 e Figura 106 mostram o comportamento do casco com a adição das duas formas de bulbo citadas. Observa-se que o comportamento de ambas as formas é similar ao comportamento do casco sem bulbo, porém o casco com bulbo tem sua resposta a excitação adiantada, ou seja, atinge movimento maiores com comprimento de ondas mais baixos. Esse efeito é maior com o bulbo em forma de nábula.

Com velocidade de avanço, porém, o resultado observado é outro. Um amortecimento da resposta é observado na região de λ/L_{pp} entre 0,9 e 2,3. A forma em nábula possui um amortecimento maior, provocando respostas dinâmicas que chegam a ser 57% menor que o casco sem bulbo e cerca de 30% menor em comparação com o bulbo de forma esférica.

Figura 105 - Análise da Forma de Bulbo em *Pitch*, $F_n=0$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 106 - Análise da Forma de Bulbo em *Pitch*, $F_n=0,25$ 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalmente, a Tabela 27 mostra qualitativamente as influências de cada parâmetro do bulbo estudado com base nos dados gerados pelo presente trabalho.

Tabela 27 - Resumo da Influência dos Parâmetros do Bulbo

Heave		
Parâmetro	Sem Velocidade de Avanço	Com Velocidade de Avanço
Área da seção	pouca	pouca
Boca	nenhuma	nenhuma
Calado	nenhuma	nenhuma
Comprimento	muita	moderada
Volume a Vante	muita	moderada
Pitch		
Parâmetro	Sem Velocidade de Avanço	Com Velocidade de Avanço
Área da seção	pouca	moderada
Boca	pouca	moderada
Calado	pouca	moderada
Comprimento	moderada	muita
Volume a Vante	moderada	muita

Fonte: Elaborado pelo autor.

6. CONCLUSÃO

A adição de um bulbo alterou a resposta dinâmica do casco da série 60, como foi demonstrado através das simulações. Essa resposta pode ser parcialmente controlada através da inserção de um bulbo com parâmetros geométricos controlados, eventualmente, melhorando o comportamento da embarcação quando sujeita a ação de ondas.

A análise paramétrica realizada, mostra que os diferentes parâmetros que descrevem a geometria do bulbo, apresentam diferentes níveis de influência na resposta dinâmica da embarcação. Observou-se que os parâmetros de volume e de comprimento foram aqueles que apresentaram maior influência na resposta dinâmica do casco.

Se considerarmos somente os dados gerados para o presente trabalho, os parâmetros de calado, boca e área da seção transversal aparentaram ter uma menor influência na resposta do casco e portanto, podem ser considerados secundários na determinação de um bulbo visando aprimorar o comportamento no mar de uma embarcação.

Observou-se também que esses três parâmetros denominados secundários são fortemente governados pela forma do bulbo. Algumas formas terão então dimensões com valores diferentes de outras devido a sua geometria, conseqüente seus parâmetros também serão diferentes. Portanto, conclui-se que a geometria do bulbo tem influência nos parâmetros denominados secundários.

Notou-se também uma maior influência do bulbo na resposta em *pitch* do que em *heave*. Um efeito de amortecimento foi observado nas análises considerando velocidades de avanço, especialmente na faixa de comprimentos de ondas de uma até duas vezes o comprimento entre perpendiculares do navio. Enquanto para *heave*, respostas com maiores amplitudes são observadas e efeitos de deslocamento da frequência natural são observados somente sem velocidade de avanço, ou seja $F_n=0$.

Porém um cuidado deve ser tomado ao operar em condições na qual o bulbo fornece um melhor desempenho em relação ao movimento de *pitch*. Em uma situação onde embarcação não diminui a velocidade de operação devido ao mar severo, energia pode estar sendo retirada do sistema propulsivo, devido ao amortecimento, para compensar a velocidade nessa condição. O benefício de diminuição da resistência ao avanço fornecido pelo bulbo pode então ser diminuído. Assim, é uma

questão de verificar se essa não diminuição na velocidade em mares severos é benéfica em termos de consumo para o sistema de propulsão.

De maneira geral, com os parâmetros aqui investigados, é possível um controle parcial sobre a faixa de respostas dinâmica de maior interesse, faixa essa que se localiza entre os valores de comprimentos de onda entre 0,5 e 2,5 vezes o comprimento entre perpendiculares do casco. É importante observar que os parâmetros estudados exerceram maior influência em relação a posição das frequências naturais

Para obter-se uma real avaliação do comportamento de mar do casco com a adição de um bulbo, seria necessário a criação de mais parâmetros geométricos como, por exemplo, a distância vertical entre a superfície da água e o bulbo, área da superfície do bulbo e um controle maior sobre a geometria de forma (que no presente trabalho foi simplificada).

Finalmente, o estudo dos movimentos dinâmicos do casco é complicado e necessita de muito tempo de pesquisa. Assim, recomenda-se a avaliação do bulbo considerando diferentes ângulos de incidência, e a realização de experimentos em tanque de prova para a avaliação de efeitos não lineares e efeitos viscosos, visando a obtenção de resultados mais conclusivos.

REFERÊNCIAS

- ANSYS CORPORATION. *Ansys Aqwa Brochure*, Canonsburg 2010.
- BERTRAM, V. *Practical Ship Hydrodynamics*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.
- BERTRAM, V.; SCHNEEKLUTH, H. *Ship Design for Efficiency and Economy*. Woburn: Butterworth Heinemann, 1998.
- FALTINSEN, O. M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge, 2004.
- FONSECA, N. Comportamento do Navio no Mar. (Mestrado) - Programa de Engenharia e Arquitetura Naval, Instituto Superior Técnico, 1990.
- JOURNÉE, J. *Quick Strip Theory Calculations in Ship Design*. Newcastle : Delft University of Technology, 1992.
- KRACHT, A. Design of Bulbous Bow. *SNAME*, pp. 197-217, 1978.
- MORENO, C. A. Interferência Hidrodinâmica no Comportamento em Ondas entre Navios com Velocidade de Avanço. Tese (Doutorado) - Programa de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, set. 2010.
- NAKAMURA, S. Experiments on the Series 60 $C_b=0.60$ and 0.70 Ship- Models in Regular Head Waves, Pag. 418-420, Contribution to the 11th I.T.T.C. Tokyo, 1966.
- TODA, Y.; STERN, F.; TANAKA, I.; PATEL, V. *Mean-Flow Measurements in the Boundary Layer and Wake of a Series 60 $C_b=0.6$ Model ship with and without Propeller*. Iowa City, 1988.
- TODD, F. H. *Series 60 Methodical Experiments with Models of Single-Screw Merchant Ships*. David Taylor Model Basin, 1963
- VOLPINI, J. H.; *Análise de Carregamento Hidrodinâmico em Estruturas Flutuantes*, DNV Software, 2012.
- ZUBALY, R. B. *Applied Naval Architecture*. Atglen: Schiffer Publishing Ltd, 1996.