



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO CASCO DE LANCHAS
ESCOLAR AMAZÔNICA UTILIZANDO A TÉCNICA DE DINÂMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD)**

HARLYSSON WHEINY SILVA MAIA

Belém – PA

Abril/2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO CASCO DE LANCHAS
ESCOLAR AMAZÔNICA UTILIZANDO A TÉCNICA DE DINÂMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD)**

HARLYSSON WHEINY SILVA MAIA

Dissertação de Mestrado Submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará como requisito final para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval.

Área de Concentração: Tecnologia Naval

Orientador: Prof. Dr. Mounsif Said

Belém – PA

Abril/2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Maia, Harlysson Wheiny Silva.

Análise e Otimização hidrodinâmica do casco de lancha escolar amazônica utilizando a técnica de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)/ Harlysson Wheiny Silva Maia -; Orientador – Mounsif Said - Belém, 2018 - __ f.

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Mounsif Said.

1. Simulação. 2. CFD. 3. Otimização. 4. Hidrodinâmica.

UFPA / BC

HARLYSSON WHEINY SILVA MAIA**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO CASCO DE LANCHAS ESCOLARES
AMAZÔNICAS UTILIZANDO A TÉCNICA DE DINÂMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD)**

Dissertação de Mestrado Submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará como Parte dos Requisitos Necessários para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval.

Belém-PA, 26 de abril de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Mounsif Said

Membro: Prof. Dr. Hito Braga de Moraes

Membro: Prof. Dr. Newton Sure Soeiro

Membro Externo: Prof. Dr. Remo Magalhães de Souza

Membro Suplente: Prof. MSc. Hamilton Pessoa Picanço

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais e heróis, Antônio
Ruberval e Antônia Oliveira*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFPA (Universidade Federal do Pará), às instituições de ensino da área de Engenharia Naval, FENAV (Faculdade de Engenharia Naval) e PPGENAV (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval) assim como a todo o seu corpo docente, por proporcionarem uma formação de excelência nesta área.

À instituição Fapespa (Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas), pela disponibilização de uma bolsa de mestrado para auxílio financeiro e suporte para a realização deste trabalho.

Às companhias FRIENDSHIP SYSTEMS e FLOWTECH International AB, por patrocinarem as pesquisas realizadas ao disponibilizar licenças de uso para os *softwares* CAESES e SHIPFLOW, além de proporcionar um excelente suporte técnico, fatores indispensáveis na realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Mounsif Said, por ter aceitado o desafio árduo de nortear o desenvolvimento deste trabalho, por compartilhar o seu amplo conhecimento nesta complexa área de simulação em CFD com ensinamentos e elucidações imprescindíveis nos tantos momentos em que as soluções pareciam ser inalcançáveis, assim como por ser um exemplo de retidão.

Agradeço ao Professor Kao Yung Ho, pelos seus ensinamentos não só na área de arquitetura naval, indispensáveis para a realização deste projeto, mas também na área da vida, sendo um modelo de profissional ético e íntegro.

Agradeço ao Professor Dr. Toshi-Ichi Tachibana, por compartilhar a sua imensa sabedoria na área de hidrodinâmica naval, sendo um suporte importantíssimo no desenvolvimento desta pesquisa e de outros trabalhos relacionados.

Agradeço ao Professor Dr. Hito Braga de Moraes, pela sugestão da problemática investigada, assim como pelo seu suporte nas mais diversas áreas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Professor MSc. Hamilton Pessoa Picanço, pela oportunidade concedida para ministrar aulas na disciplina de Hidrodinâmica do Navio I no curso de Engenharia Naval.

Ao meu pai, Antônio Ruberval da Silva Maia e à minha mãe, Antônio Oliveira da Silva, pelo amor e apoio incondicionais em todos os momentos de dificuldade. Por serem os meus maiores modelos de caráter e por todos os valores ensinados a muito custo, os quais seguirei por toda a vida.

À companheira da minha vida, Michelle Fernandes, por todo o seu amor, apoio e parceria, tanto nos momentos felizes quanto nos momentos difíceis.

A todos os meus amigos e companheiros de profissão e estudo, pela ótima convivência nesses dois anos de pós-graduação.

Aos meus amigos de infância, os PNF, por todo o companheirismo, apoio e planos ambiciosos em todos estes anos.

RESUMO

Tendo em vista o cenário da navegação interior na região amazônica, especificamente na questão do transporte escolar, o FNDE (Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação) propiciou a implantação das Lanchas Escolares através do programa Caminhos da Escola, de forma a oferecer um transporte mais seguro e eficiente às mais de 180 mil crianças dependentes deste modal para chegarem às escolas diariamente. Entretanto, dos dois modelos de lanchas disponibilizadas, a LE-G (Lancha Escolar Grande) e a LE-M (Lancha Escolar Média), esta última tem sido alvo de reclamações dos usuários acerca do tempo de viagem elevado, pois a mesma não atingiu os requisitos mínimos de velocidade definidos em projeto, além de um elevado consumo de combustível, configurando uma ineficiência operacional da mesma. Com o intuito de tornar a operação da LE-M economicamente viável, este trabalho apresenta uma análise com a utilização da ferramenta de modelagem numérica e simulação de escoamento pela técnica da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) SHIPFLOW. Desta forma, foram realizadas simulações de uma série de velocidades da lancha ($F_n = 0,25 \sim 0,63$), conduzidas de forma que as características do escoamento ao redor do casco pudessem ser investigadas. Após analisada a série de velocidades propostas, foram realizados estudos de otimização hidrodinâmica das formas do casco, com o objetivo de reduzir a resistência de ondas R_{WP} e a resistência de ondas transversais $R_{WP\ trans}$ e consequentemente reduzindo a resistência ao avanço, a amplitude de ondas geradas e o consumo de combustível, utilizando o algoritmo genético NSGA-II no ambiente CAD CAESES. Como resultados finais, há a redução máxima de 5% da resistência total ao avanço e na identificação da tendência de variação geométrica do casco para investigação em estudos posteriores.

Palavras-chave: CFD; Otimização; Hidrodinâmica; Lancha Escolar; NSGA-II.

ABSTRACT

Considering the scenario of inland navigation in the Amazon region, specifically in the issue of school transportation, the FNDE (National Fund for the Development of Education) provided the implementation of School Boats through the “Caminhos da Escola” program, in order to provide a safe and efficient transportation to more than 180 thousand children dependent on this modal to reach schools daily. However, of the two models of launches available, the LE-G (Large School Boat) and the LE-M (Medium School Boat), the latter has been the object of complaints from users about the high travel time, since it has not reached the minimum speed requirements defined in the design, as well as a high fuel consumption, configuring its operational inefficiency. In order to make the operation of the LE-M economically viable, this work presents an analysis with the use of SHIPFLOW, a numerical modeling and flow simulation tool that utilizes the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. Hence, simulations of a series of boat speeds were conducted ($F_n = 0.25 \sim 0.63$), in such a way that the characteristics of the flow around the hull could be investigated. After the analysis of the proposed series of speeds, hull shape hydrodynamic optimization studies were performed using the NSGA-II genetic algorithm in the CAD environment CAESSES, with the objective of reducing the wave resistance R_{WP} and the transverse wave resistance $R_{WP\ trans}$, consequently reducing the resistance to advance, amplitude of generated waves and fuel consumption. The achieved results are a maximum reduction of 5% of the total resistance to advance and the identification of the trend of geometric variation of the hull for investigation in later studies.

Keywords: CFD; Optimization; Hydrodynamics; School Boat; NSGA-II.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Protótipo da LE-M	2
Figura 1.2. Onda Incidente Gerada na Região da Bolina a 17 km/h ($Fn = 0,54$)	3
Figura 1.3. Trem de Ondas Incidentes a 17 km/h ($Fn = 0,54$)	4
Figura 1.4.a. Fluxograma do Desenvolvimento da Dissertação	8
Figura 3.1. Esquema da Segregação dos Tipos de Resistência ao Avanço.	17
Figura 3.2. Distribuição de Pressão em um Escoamento Ideal Invíscido	18
Figura 3.3. Diagrama Esquemático dos Trens de Onda de Proa e Popa	19
Figura 3.4. Classificação das Faixas de Resistência ao Avanço	20
Figura 3.5. Diagrama Esquemático dos Trens de Onda da Embarcação, Mostrando o Corte Longitudinal yWC e os Ângulos de Propagação de Ondas Transversais ($\Theta = 0$) e Divergentes ($\Theta > 0$).	24
Figura 3.6. Vetores de Velocidade na Área de Separação da Popa na Geometria Inicial (Acima) e na Geometria Otimizada (Abaixo).	25
Figura 3.7. Diagrama Esquemático do Perfil de Velocidade do Escoamento de Blasius. A Componente de Velocidade ao Longo do Escoamento $u\eta/Ux$ é Mostrada em Função da Variável de Similaridade η.	37
Figura 3.8. Esquema de um Algoritmo Genético.	53
Figura 4.1. Plano de Linhas do Protótipo da LE-M no AutoCAD 2018.	55
Figura 4.2. Casco Tridimensional da LE-M (BB) no Inventor Professional 2018.	56
Figura 4.3. Esquema de Separação Zonal do Escoamento do <i>Software</i> SHIPFLOW.	61
Figura 5.1.a. Fluxograma da Metodologia	65

Figura 6.1. Esquema para Teste de Resistência em Tanque de Provas.....	67
Figura 6.2. Os Seis Graus de Liberdade de uma Embarcação	68
Figura 6.3. Plano de Balizas da Proa da LE-M	69
Figura 6.4. Plano das Linhas de Alto da LE-M	69
Figura 6.5. Casco da LE-M Preliminar, com a Bolina em Azul, o Convés de Proa em Vermelho e a Popa Transom em Verde	70
Figura 6.6. Modelo Tridimensional da LE-M no Inventor Pro (ambos os bordos).....	71
Figura 6.7. Janela 3DView do CAESES, Casco no Formato IGES (BB).....	72
Figura 6.8. Árvore de Comandos para o Cálculo Zonal	73
Figura 6.9. Janela 3DView do CAESES, Casco Convertido em <i>offsets</i>	73
Figura 6.10. Janela de Configuração do Comando <i>hulltype</i>	75
Figura 6.11. Domínio de Controle da Simulação.....	77
Figura 6.12. Regiões e Condições de Contorno	78
Figura 6.13. Número de Elementos por Densidade de Malha	78
Figura 6.14. Malha Gerada na Configuração <i>coarse</i> , 446.368 Elementos	79
Figura 6.15. Malha Gerada na Configuração <i>medium</i> , 744.372 Elementos	79
Figura 6.16. Malha Gerada na Configuração <i>fine</i> , 1.218.078 Elementos	80
Figura 6.17. Resistência Total x F_n para os Modelos EASM e $k-\omega$ SST	80
Figura 6.18. Iterações para a Convergência de Cada Simulação.....	81
Figura 6.19. Protótipo da LE-M na Ocasão da Prova de Rio	82
Figura 6.20. Motor da LE-M, um MWM série 229 de 4 Cilindros	82

Figura 6.21. Trem de Ondas Divergentes a 17 km/h	83
Figura 6.22. Curva de Resistência Total x F_n da LE-M	85
Figura 6.23. Fundo da LE-M, Distribuição de Pressão e Linhas de Fluxo a $F_n = 0,25$..	86
Figura 6.24. Fundo da LE-M, Distribuição de Pressão e Linhas de Fluxo a $F_n = 0,47$..	86
Figura 6.25. Fundo da LE-M, Distribuição de Pressão e Linhas de Fluxo a $F_n = 0,54$..	87
Figura 6.26. Resistência Total/Peso Leve x Velocidade/Comprimento Total para Cascos de Deslocamento, Semiplaneio e Planeio	88
Figura 6.27. Vista de Proa da LE-M à Direita, e da LE-M (Mod) à Esquerda, Sem as Bolinas e Com a Quilha Modificada no Formato de "V"	89
Figura 6.28. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,25$ (08 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)	89
Figura 6.29. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,25$ (08 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima).....	90
Figura 6.30. Padrão de Ondas a $F_n = 0,25$ (08 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima).....	90
Figura 6.31. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,31$ (10 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)	91
Figura 6.32. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,31$ (10 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima).....	91
Figura 6.33. Padrão de Ondas a $F_n = 0,31$ (10 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima).....	92
Figura 6.34. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,41$ (13 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)	92

Figura 6.35. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,41$ (13 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (cima).....	93
Figura 6.36. Padrão de Ondas a $F_n = 0,41$ (13 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (cima).....	93
Figura 6.37. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,47$ (15 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (cima)	94
Figura 6.38. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,47$ (15 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (cima).....	94
Figura 6.39. Padrão de Ondas a $F_n = 0,47$ (15 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (cima).....	95
Figura 6.40. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,54$ (17 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (cima)	96
Figura 6.41. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,54$ (17 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (cima).....	96
Figura 6.42. Padrão de Ondas a $F_n = 0,54$ (17 km/h), para LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (cima).....	97
Figura 6.43. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,63$ (20 km/h), para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (cima).....	98
Figura 6.44. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,63$ (20 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (cima).....	98
Figura 6.45. Padrão de Ondas a $F_n = 0,63$ (20 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (cima).....	99
Figura 6.46. Curva de Resistência Total por F_n da LE-M e LE-M (Mod)	100

Figura 6.47. Redução de Resistência para a LE-M (Mod), em Porcentagem	100
Figura 7.1. Superfície de B-splines utilizada nas simulações.....	102
Figura 7.2. Pontos de Controle	102
Figura 7.3. Nro. da Simulação x Parâmetro " <i>higher</i> "	105
Figura 7.4. Nro. da Simulação x Parâmetro " <i>middle</i> "	105
Figura 7.5. Nro. da Simulação x Parâmetro " <i>lower</i> "	106
Figura 7.6. Nro da Simulação x Parâmetro Hr1	107
Figura 7.7. Nro da Simulação x Parâmetro Hr2	108
Figura 7.8. Nro da Simulação x Parâmetro Hr3	108
Figura 7.9. Nro da Simulação x Parâmetro Md1	109
Figura 7.10. Nro da Simulação x Parâmetro Md2.....	110
Figura 7.11. Nro da Simulação x Parâmetro Lw5	110
Figura 7.12. Nro da Simulação x Restrição minDispl	111
Figura 7.13. Vista Frontal dos <i>Offsets</i> de Proa da LE-M, à BE, e da des0013, à BB	112
Figura 7.14. <i>Offsets</i> de BB sobrepostos, da LE-M em cinza, e da des0013 em verde....	112
Figura 7.15. Vista Frontal dos <i>Offsets</i> de Proa da LE-M, à BE, e da des0371, à BB....	113
Figura 7.16. <i>Offsets</i> de BB sobrepostos, da LE-M em cinza, e da des0013 em verde....	113
Figura 7.17. Tendência à Concavidade do Fundo nos <i>Designs</i>	114
Figura 7.18. Vista Superior, Comparação dos Perfis de Onda da LE-M e des0013.....	115
Figura 7.19. Vista Lateral, Comparação dos Perfis de Onda da LE-M e des0013	115
Figura 7.20. Vista Superior, Comparação dos Perfis de Onda da LE-M e des0371.....	116

Figura 7.21. Vista Superior, Comparação dos Perfis de Onda da LE-M e des0371	116
Figura 7.22. Redução de Resistência dos Cascos Propostos	117
Figura 10.1. Transformação Delta de Superfície para Modificação do Raio do Bojo ..	130
Figura 10.2. Modificação Resultante nas Balizas	130
Figura 10.3. Histórico de Otimizações (R_t x tempo)	131
Figura 10.4. Comparação das Resistências Totais (R_t) do Casco Original (A) e do Casco Otimizado para Resistência Mínima (B).....	132
Figura 10.5. Comparação das Potências Entregues ao Propulsor (P_d) do Casco Original (A) e do Casco Otimizado para Potência Mínima (C)	133
Figura 10.6. Resistência Total dos Cascos B e C	133
Figura 10.7. Potência Entregue ao Propulsor dos Cascos B e C	134
Figura 10.8. Perfil da Esteira do Casco D nas Escalas do Modelo (Esquerda) e do Navio Real (Direita).....	136
Figura 10.9. Cascos Otimizados C (Azul) e D (Vermelho)	136
Figura 10.10. Mudança da P_d em Escala Real	137
Figura 10.11. Mudança da P_d em Escala Reduzida.....	137
Figura 10.12. Balizas e Curva de Áreas Seccionais do Navio Pré e Pós Otimização	139
Figura 10.13. Resistência de Ondas Cruzadas (CWTWC) x Posição Longitudinal do Centro de Carena (XCB).....	140
Figura 10.14. Comparação dos Perfis de Onda Gerados pela Geometria Original (acima) com uma das Geometrias Otimizadas (abaixo)	141
Figura 10.15. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Malhas Geradas.....	143

Figura 10.16. Comparação Entre Dois <i>Designs</i> Variantes do Bulbo.....	144
---	------------

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Constantes do Modelo SST $\kappa - \omega$	33
Tabela 3.2. As Condições de Contorno	35
Tabela 6.1. Dimensões Principais da LE-M	69
Tabela 6.2. Valores de f_{dens} e $df1$ por Velocidade.....	75
Tabela 6.3. Dados da Prova de Rio e Valores de Resistência.....	83
Tabela 6.4. Resultados de Resistência Total da LE-M.....	85
Tabela 7.1. Parâmetros e Retrições do Estudo OP1	103
Tabela 7.2. Parâmetros e Restrições do Estudo OP6	103
Tabela 7.3. Valores de Resistência da LE-M, des0013 e des0371.....	114
Tabela 10.1 Características Principais, Escala Real	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEM	<i>Boundary Element Methods</i> (Método dos Elementos de Contorno)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de Fluidos Computacional)
EASM	<i>Explicit Algebraic Stress Model</i> (Modelo Algébrico Explícito de Tensão)
EFD	<i>Experimental Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de Fluidos Experimental)
FNDE	Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
FVM	<i>Finite Volume Method</i> (Método de Volumes Finitos)
GOT	<i>Global Optimization Toolbox</i> (Ferramentas de Otimização Global)
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i> (Especificação de Intercâmbio Inicial de Gráficos)
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ITTC '57	<i>International Towing Tank Conference 1957</i> (Conferência Internacional de Tanques de Prova de 1957)
ITTC '78	<i>International Towing Tank Conference 1978</i> (Conferência Internacional de Tanques de Prova de 1978)
LE-G	Lancha Escolar Grande
LE-M	Lancha Escolar Média
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II</i> (Algoritmo Genético de Seleção Não-Dominada II)
RANS	<i>Reynolds-averaged Navier-Stokes</i> (Navier-Stokes por Médias de Reynolds)
SST	<i>Shear Stress Transport</i> (Transporte de Tensão de Cisalhamento)
URANS	<i>Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes</i> (Navier-Stokes por Médias

de Reynolds Instáveis)

VLCC *Very Large Crude Carrier* (Petroleiro da Classe VLCC)

WCA *Wave Cut Analysis* (Análise de Cortes de Onda)

LISTA DE SÍMBOLOS

R_{WP}	Resistência de padrão de ondas
$R_{WP\ trans}$	Resistência de padrão de ondas transversais
R_v	Resistência de pressão viscosa
R_f	Resistência friccional
R_t	Resistência total ao avanço
C_{wp}	Coefficiente de resistência de padrão de onda
$C_{wp\ trans}$	Coefficiente de resistência de padrão de ondas transversais
C_v	Coefficiente de resistência de pressão viscosa
F_n	Número de Froude
$\overrightarrow{U_\infty}$	Velocidade do navio
$\widehat{U_\infty}$	Vetor unitário de velocidade do escoamento não-perturbado
L	Comprimento do casco
L_{pp}	Comprimento entre perpendiculares
V_s	Velocidade do navio
g	Aceleração da gravidade
ϕ	Potencial de velocidade total
ϕ_∞	Potencial do fluxo sem perturbações
ϕ'	Potencial de velocidade da perturbação causada pelo navio
Φ	Potencial de velocidade da solução-base conhecida das séries de Taylor
F	Componente na direção normal ao casco
ζ	Elevação de onda no eixo z a partir da superfície livre

r	Distância normal a partir da superfície do casco
σ_q	Densidade de fontes por unidade de área de superfície em um ponto q
q	Ponto determinado em uma superfície de contorno S_D , onde se localiza uma fonte
S_D	Superfície de contorno de discretização
r_{pq}	Distância do ponto q a um ponto arbitrário p
p	Ponto arbitrário na superfície de contorno S_D onde é computado o potencial
σ_j	Densidades de fontes em um painel j
j	Um painel de referência determinado
i	Outro painel de referência determinado
A_{ij}	Coefficiente de influência do painel j à velocidade no painel i
B_i	Termo não-homogêneo ao painel i
N_{FS}	Número total de painéis da superfície livre
N_H	Número total de painéis do casco
X_{ij}	Porção induzida do painel j à velocidade do painel i na direção x
Y_{ij}	Porção induzida do painel j à velocidade do painel i na direção y
Z_{ij}	Porção induzida do painel j à velocidade do painel i na direção z
ζ_i	Elevação da superfície livre em relação ao painel de referência i
Φ_x	Derivada de Φ em relação a x
Φ_y	Derivada de Φ em relação a y
Φ_z	Derivada de Φ em relação a z

ϕ_x	Derivada de ϕ em relação a x
ϕ_y	Derivada de ϕ em relação a y
ϕ_z	Derivada de ϕ em relação a z
u	Componente da velocidade do escoamento normal ao casco
v	Componente da velocidade do escoamento no sentido do fluxo
ρ	Densidade do fluido em um ponto específico
p	Pressão do fluido em um ponto específico
ν	Viscosidade cinemática do fluido em um ponto específico
U	Componente da velocidade do fluido fora da camada limite, paralelo a u
η	Variável de similaridade da camada limite
$\bar{u}$	Componente média da velocidade do escoamento normal ao casco
$\bar{v}$	Componente média da velocidade do escoamento no sentido do fluxo
u'	Componente flutuante da velocidade do escoamento normal ao casco
v'	Componente flutuante da velocidade do escoamento no sentido do fluxo
$\bar{p}$	Média da pressão do fluido em um ponto específico
$\overline{u'v'}$	Tensão de cisalhamento de Reynolds
u_*	Escala de velocidade das flutuações de turbulência
$\delta(x)$	Espessura da camada limite
ψ	Função do fluxo
δ^*	Espessura de deslocamento da camada limite
θ	Espessura de momento da camada limite
τ_ω	Tensão de cisalhamento na parede da placa plana

F	Força de arrasto atuante na placa plana
l	Comprimento da placa plana
R_e	Número de Reynolds
σ_{ij}	Tensor das tensões em um volume de fluido
S_{ij}	Tensor das deformações de um volume de fluido
U_i	Componente instantâneo da velocidade em um ponto do escoamento
u_i	Velocidade média em um ponto do escoamento
u_i''	Velocidade flutuante em um ponto do escoamento
P	Pressão instantânea em um ponto do escoamento
p	Pressão média em um ponto do escoamento
p''	Pressão flutuante em um ponto do escoamento
$\overline{\phi}$	Média de uma variável em função do tempo
ν_E	Viscosidade cinemática efetiva
κ	Energia turbulenta
ϵ	Taxa de dissipação de energia turbulenta
ν_T	Viscosidade de turbilhonamento
d	Distância normal da parede
Ω_{ij}	Tensor Vorticidade
$\mathcal{T}$	Grandeza do tempo adimensionalizada
$\mathcal{L}$	Grandeza do comprimento adimensionalizada
$\mathcal{M}$	Grandeza da massa adimensionalizada
Pot_{inst}	Potência instantânea

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	JUSTIFICATIVAS.....	2
1.2	OBJETIVOS.....	5
1.2.1	Objetivo Geral.....	5
1.2.2	Objetivos Específicos	5
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	6
1.4	FLUXOGRAMA DO TRABALHO.....	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1	HIDRODINÂMICA DE EMBARCAÇÕES.....	16
3.2	RESISTÊNCIA AO AVANÇO	16
3.2.1	Resistência de Fricção.....	17
3.2.2	Resistência de Pressão Viscosa	18
3.2.3	Resistência de Ondas	19
3.3	PROPOSTA DE ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO.....	21
3.4	EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DE DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	25
3.4.1	Sistema de Coordenadas de Referência e Normalização.....	25
3.4.2	Equações de Conservação	26
3.4.3	Forma Adimensional das Equações de Navier Stokes.....	28
3.4.4	Condições de Contorno.....	29
3.4.5	Equações de Médias de Reynolds (RANS).....	30
3.4.6	Modelo de Turbulência SST $\kappa - \omega$	31

3.4.7	Modelo de Turbulência EASM (<i>Explicit Algebraic Stress Model</i>)	34
3.4.8	Condições de Contorno do Escoamento Turbulento	35
3.4.9	Solução Numérica do Escoamento Turbulento	35
3.5	CAMADA LIMITE LAMINAR E TURBULENTA	36
3.5.1	Camada Limite Laminar	36
3.5.2	Camada Limite Turbulenta	38
3.5.3	Camada Limite de Primeira Ordem	39
3.5.4	Camada Limite de Segunda Ordem	41
3.5.5	Camada Limite de Terceira Ordem	42
3.6	ESCOAMENTO POTENCIAL	43
3.6.1	Condições de Contorno Cinemáticas e Dinâmicas do Casco	43
3.6.2	Condições de Contorno Cinemáticas e Dinâmicas da Superfície Livre....	44
3.6.3	Linearização das Condições de Contorno da Superfície Livre.....	45
3.6.4	Condições de Irradiação e de Popa Transom.....	46
3.6.5	Distribuição de Singularidades	47
3.6.6	Discretização pelo Método de Painéis	48
3.6.7	Solução Numérica	50
3.7	TEORIA DE OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA.....	51
3.8	ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO EVOLUTIVOS E GENÉTICOS	52
4	RECURSOS COMPUTACIONAIS	55
4.1	GEOMETRIA.....	55
4.2	ESCOAMENTO	56
4.2.1	Descrição dos Módulos	57
4.2.1.1	Módulo XMESH	57
4.2.1.2	Módulo XPAN	57

4.2.1.3	Módulo XBOUND	58
4.2.1.4	Módulo XGRID	59
4.2.1.5	Módulo XCHAP	59
4.2.2	Esquema de Separação Zonal do Escoamento em Torno do Casco.....	60
4.2.2.1	Zona 1 (Escoamento Potencial).....	61
4.2.2.2	Zona 2 (Escoamento da Camada Limite).....	61
4.2.2.3	Zona 3 (Escoamento Viscoso).....	62
5	METODOLOGIA DE ANÁLISE	63
5.1	FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA	64
6	SIMULAÇÕES REALIZADAS	67
6.1	SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO – ESQUEMA DE SEPARAÇÃO ZONAL	68
6.1.1	Geometria	68
6.1.2	Importação da Geometria e Pré-Processamento.....	71
6.1.3	Estudo de Sensibilidade para os Parâmetros da Malha e Modelos de Turbulência	76
6.1.4	Resultados das Simulações	84
6.1.5	Análise do Escoamento	85
6.1.6	Validação por Comparação com um Casco Modificado	88
7	ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO	101
7.1	PROCEDIMENTO	101
7.2	PARÂMETROS E RESTRIÇÕES	102
7.2.1	Primeira Simulação – OP4.....	102
7.2.2	Segunda Simulação – OP6.....	103
7.3	RESULTADOS	104

7.3.1	Primeira Simulação – OP4.....	104
7.3.2	Segunda Simulação – OP6.....	107
7.3.3	Discussão dos Cascos Ótimos.....	111
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	119
8.1	PROPOSIÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	120
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
10	ANEXOS.....	128
10.1.	OTIMIZAÇÃO DA POPA DE UM GRANELEIRO PARA GANHO DE EFICIÊNCIA PROPULSIVA	128
10.2	OTIMIZAÇÃO DE UM CASCO PELO MÉTODO DE LACKENBY	138
10.3	OTIMIZAÇÃO DO FORMATO DE UM BULBO.....	141
10.4	COMANDOS DE CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES - MÉTODO DE SEPARAÇÃO ZONAL.....	144

1 INTRODUÇÃO

Na região amazônica, a navegação interior é um dos principais modais de transporte, dada a sua importância no transporte de pessoas e mercadorias e na consequente manutenção de trabalhos e serviços na sociedade, assim como o transporte de alunos ribeirinhos às escolas.

Às várias ilhas e demais localidades da região, só existe o acesso por meio das águas. Apesar da importância deste modal, ainda se observa a utilização de embarcações inadequadas, como alguns barcos de madeira, lentos e barulhentos, mais vulneráveis às chuvas, ventos e correntes, oferecendo situações de risco e desconforto aos usuários em grande parte dos casos.

Tendo em vista esse cenário, especificamente na questão do transporte escolar, o FNDE (Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação) propiciou a implantação das Lanchas Escolares através do programa Caminhos da Escola. Desta forma, um transporte mais rápido, seguro e eficiente é oferecido às crianças que precisam de transporte fluvial para chegar às salas de aula.

Segundo o FNDE, apenas na região norte do país, o número de crianças que precisam utilizar este modal para chegar às escolas chega a aproximadamente 180 mil. Pelo menos 208 municípios, de todo o Brasil, precisam de transporte fluvial para manter as crianças na escola (COELHO, 2016).

Dois modelos de embarcação foram propostos pelo programa: LE-G (Lancha Escolar Grande) e LE-M (Lancha Escolar Média). A LE-G se mostrou funcionalmente eficaz, estando a sua operação dentro dos limites de velocidade e consumo de combustível estipulados em projeto. O modelo LE-G atualmente se encontra em operação ao longo dos vários rios da região. Entretanto, a LE-M, ilustrada na figura 1.1, foi alvo de reclamações dos usuários acerca do tempo de viagem elevado, pois a mesma não atingiu os requisitos mínimos de velocidade definidos em projeto. Além da velocidade reduzida de operação, foi evidenciado um elevado consumo de combustível, configurando uma ineficiência operacional da mesma.

Figura 1.1. Protótipo da LE-M



A proposta do presente trabalho é de realizar uma análise hidrodinâmica da LE-M, investigando os principais parâmetros do escoamento incidente, formas do casco e valores atuais de resistência por velocidade. Isto posto, será proposta uma otimização de forma nas áreas do casco consideradas como maiores contribuintes da elevada resistência observada. Desta forma, a operação da LE-M tornar-se-á economicamente viável, disponibilizando um transporte escolar de qualidade às áreas ribeirinhas mais remotas, onde é impraticável a operação da LE-G.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Apesar da importância do modal hidroviário, a região amazônica carece de ferramentas técnicas e plantas físicas de pesquisa e desenvolvimento na área de hidrodinâmica, como tanques de prova ou de cavitação. O processo de *design* e aprimoramento arquitetônico naval, disseminado na região, ainda é dominado pela tradição e empirismo, ficando as inovações nesta área a cargo do setor privado, delimitadas aos estaleiros de grande porte.

Por conseguinte, este trabalho analisará as características hidrodinâmicas da LE-M em tanque de provas virtual, utilizando a técnica de Dinâmica de Fluidos Computacional, CFD, de forma a definir parâmetros geométricos cuja variação

resulte na redução da resistência de ondas. Como a maior parte da resistência total é composta pela resistência de ondas, na faixa de velocidades de operação da LE-M, estas modificações propostas resultarão na redução da amplitude das ondas geradas e da resistência ao avanço, fatores que incidem diretamente na preservação das encostas dos rios e na redução do consumo de combustível, respectivamente.

Em prova de rio com o protótipo em escala real da LE-M, foi observada uma alta resistência residual, mesmo quando operando em baixas velocidades e abaixo da sua capacidade máxima de passageiros e carga. Tal característica implica na geração de um trem de ondas de grande amplitude, ilustrado nas figuras 1.2 e 1.3, e um alto consumo de combustível para velocidades incompatíveis, o que caracteriza a baixa eficiência hidrodinâmica do casco.

Figura 1.2. Onda Incidente Gerada na Região da Bolina a 17 km/h ($F_n = 0,54$)



A velocidade máxima registrada na prova foi de 17 km/h a 2300 RPM, a favor da correnteza, sendo apenas 68% da velocidade máxima (25 km/h), e 85% da velocidade de projeto (20 km/h) estipuladas em projeto. A velocidade máxima registrada na rotação nominal (1800 RPM) foi de 12,4 km/h, 62% da velocidade de projeto estipulada.

Figura 1.3. Trem de Ondas Incidentes a 17 km/h ($F_n = 0,54$)



Ante o apresentado, o presente estudo de otimização hidrodinâmica proverá um grande benefício social às comunidades ribeirinhas, ao tornar a operação da LE-M economicamente viável. Desta forma, as crianças destas comunidades terão à disposição mais uma modalidade de transporte escolar de qualidade, com um custo de operação reduzido para as Prefeituras das regiões contempladas.

Ademais, o presente trabalho propiciará uma contribuição para a área acadêmica, ao propor uma metodologia de otimização que poderá ser utilizada como base para o desenvolvimento de novos estudos nesta área, com a possibilidade de implantação de uma nova linha de pesquisa referente a simulações e análises em CFD de embarcações, assim como aplicações na área comercial.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Conforme tratado sobre a relevância do assunto e a problemática atual, cuja solução satisfatória acarretará em benefícios ecológicos, econômicos e sociais, este trabalho tem como objetivo geral a realização de uma análise hidrodinâmica do escoamento incidente sobre a lancha escolar média (LE-M) operante na região da bacia amazônica, visando a redução da parcela de resistência de ondas na resistência total ao avanço. A seguir são apresentados os objetivos específicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Construir um modelo numérico de um casco similar ao da LE-M para validação do modelo utilizado, com dados de provas de rio de protótipo em escala real;
- Construir um modelo virtual tridimensional do casco do protótipo da LE-M, de acordo com os planos de linhas fornecido, através de um *Software* CAD;
- Gerar uma malha de acordo com o modelo tridimensional, para análise numérica utilizando o *Software* comercial SHIPFLOW;
- Simular uma série de velocidades de operação da lancha, nos métodos potencial e viscoso de cálculo do escoamento;
- Obter os valores de resistência total e parcela de resistência de ondas, assim como o perfil de ondas para cada velocidade simulada;
- Realizar o estudo de otimização hidrodinâmica do casco da LE-M, utilizando o ambiente do *Software* CAESES, especificamente o algoritmo genético NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algoritm-II*);
- Analisar a proposta de alteração geométrica do casco mais eficiente e comparar os dados de resistência e elevação de onda com os dados do protótipo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na presente seção a estrutura da dissertação é explanada, sendo dividida em 9 capítulos apresentados da seguinte forma:

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, consistindo de trabalhos no estado da arte cujos temas são relacionados com o presente projeto. São apresentados estudos e hipóteses a respeito de otimizações de formas de casco em ambiente CFD, técnicas de análise de resistência total e sua decomposição, análises paramétricas e validações de resultados.

No capítulo 3 são apresentadas as principais teorias para embasamento das técnicas utilizadas no trabalho. Discorre-se sobre a resistência ao avanço e o seu desmembramento em três tipos principais de resistência, de acordo com o efeito hidrodinâmico predominante em áreas determinadas do escoamento, as principais teorias e respectivas condições de contorno para os escoamentos viscoso, de camada limite, potencial e modelos de turbulência, assim como o embasamento teórico para o estudo de otimização.

No capítulo 4 as ferramentas de *Software* Computacional utilizadas no desenvolvimento do trabalho são ilustradas. Suas funcionalidades gerais, a estrutura de funcionamento dos seus módulos e procedimentos de cálculo das simulações são explanados.

No capítulo 5 são explanadas as metodologias para o preparo das geometrias, geração das malhas, pré-configuração das simulações e parâmetros de otimização utilizados, embasados com uma sucinta apresentação da problemática e hipóteses consideradas.

No capítulo 6 são apresentados os detalhes sobre a geração de malha, validação e as simulações realizadas neste trabalho, assim como os respectivos resultados. As configurações utilizadas, parâmetros definidos e métodos são explanados em detalhes, de forma que possam ser reproduzidos em trabalhos futuros.

No capítulo 7 são apresentados os métodos, configurações e restrições utilizadas no estudo de otimização. Os resultados obtidos nesta etapa são discutidos, assim como considerações sobre as tendências observadas.

No capítulo 8 são feitas considerações conclusivas acerca dos resultados obtidos no estudo, levando em consideração os objetivos propostos. Também nesta seção são sugeridos os possíveis estudos futuros a serem realizados.

Os Anexos são apresentados logo após as referências bibliográficas, no capítulo 10. Nesta seção são apresentados estudos de caso de simulação e otimização hidrodinâmica realizados no ambiente CAESES-SHIFLOW. Os estudos foram selecionados de acordo com a sua relevância para o presente trabalho, de forma a demonstrar as capacidades do ambiente de simulação utilizado. Também são apresentados os códigos de configuração das simulações realizadas no SHIPFLOW.

1.4 FLUXOGRAMA DO TRABALHO

Nesta seção é apresentado o fluxograma da dissertação, que ilustra as subdivisões do trabalho organizadas em etapas, de forma a direcionar o desenvolvimento da pesquisa de acordo com os objetivos propostos. A estrutura do fluxograma é ilustrada na figura 1.4.a e 1.4.b.

Figura 1.4.a. Fluxograma do Desenvolvimento da Dissertação

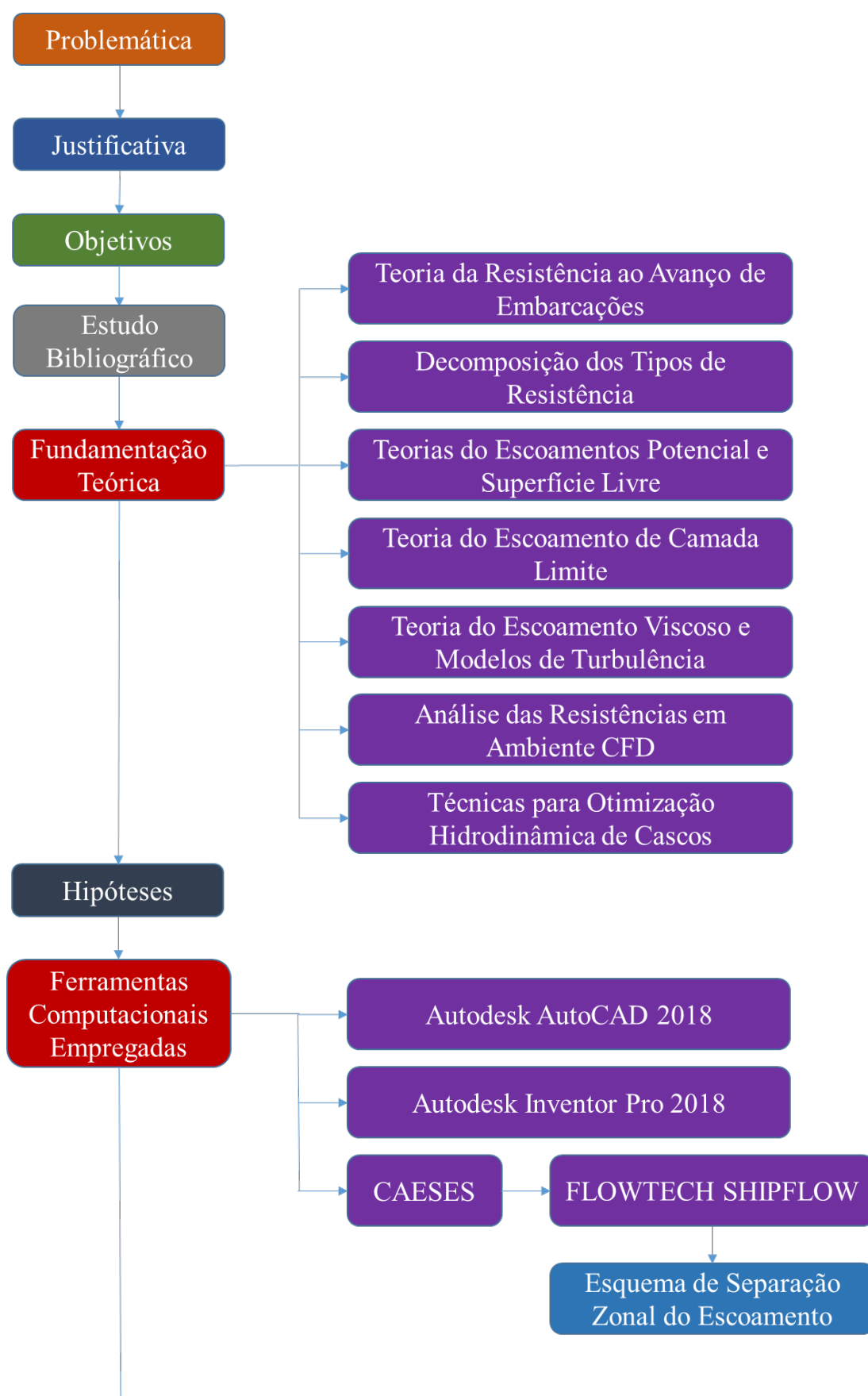
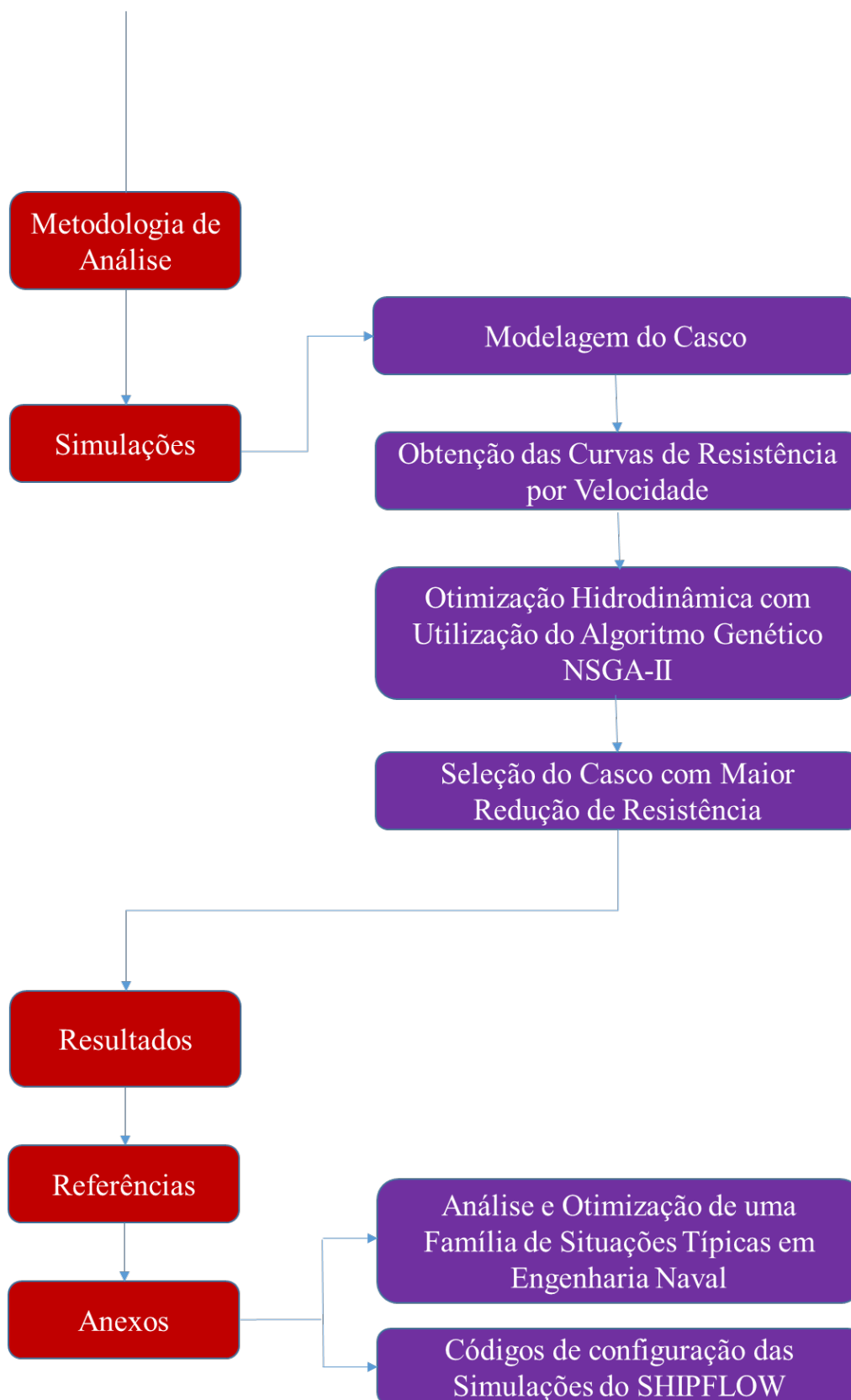


Figura 1.4.b. Fluxograma do Desenvolvimento da Dissertação



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Acerca da problemática apresentada a respeito de otimização de formas de casco e das hipóteses propostas para o aprimoramento do escoamento, foi realizada uma pesquisa extensiva em literatura científica especializada, a fim de se obter o embasamento teórico necessário para a realização do trabalho. Foram pesquisados diversos artigos, livros e publicações relacionadas a esta temática em engenharia naval, sendo os de principal relevância para o desenvolvimento do trabalho citados e comentados adiante.

Visonneau (2005) apresentou um artigo com o objetivo de simular e validar o campo de escoamento viscoso ao redor de um navio em escala real, incluindo a simulação da superfície livre, o campo da esteira, a interação casco/propulsor, a resistência total e potência, considerando que dados de validação para escoamentos com estas características são escassos ou de difícil acesso. Foi utilizado para o estudo de caso um navio de pesquisa com $L = 55,15$ m e $D = 3,15$ m, simulado em sete códigos CFD distintos, cedidos pelos colaboradores do projeto, a uma velocidade de 12 nós. Foi notado que a modelagem de um escoamento em escala real não demanda uma complexidade tão maior que a de um modelo em escala reduzida, sendo a influência do tamanho de elementos próximos à parede aceitável para a maioria dos códigos utilizados. Acerca da simulação da superfície livre, não foi observada uma diferença considerável entre os códigos de cálculo viscoso, mas sim entre os métodos de cálculo potencial, onde foi verificada uma alta amplitude de ondas nas áreas da proa e popa.

Guha e Falzanaro (2015) realizaram um trabalho de otimização em um casco discretizado por curvas B-Spline, utilizando 6 códigos de otimização presentes nas Ferramentas Globais de Otimização (GOT) do MATLAB, incluindo um algoritmo genético, e comparando os resultados de cada um de acordo com o objetivo proposto que foi a redução da resistência ao avanço. A geometria do casco objeto de estudo foi definida em 25 parâmetros ligados às funções-objetivo, a área molhada e a aceleração na proa. O código com o algoritmo genético se mostrou o mais eficiente, gerando um casco otimizado que apresentou reduções

significativas na amplitude de *heave* e *pitch*, quando comparado com o casco original.

Yousefi, Shafaghat e Shakeri (2013) investigaram as técnicas computacionais existentes para análise hidrodinâmica de cascos, descrevendo os pontos fortes e fracos de cada uma e os seus campos de aplicação. As técnicas analisadas foram divididas em duas categorias, analítico-experimentais e numéricas, que são sub-divididas em métodos para camada limite e problemas dependentes do domínio. Os métodos de cálculo de escoamentos potenciais são muito úteis para uma análise preliminar de padrão de onda em superfície livre, onde os efeitos da viscosidade podem ser desprezados, além de ser um método relativamente rápido. Por outro lado, este método não é recomendado para a simulação de escoamentos turbulentos, com superfícies livre de configurações mais complexas, onde os efeitos viscosos não podem ser desconsiderados. Para estes casos, o cálculo viscoso com o método de volumes finitos é mais adequado, pois apesar de demandar mais tempo computacional, permite a modelagem de efeitos complexos na superfície livre como a quebra de ondas, além de simulações de manobrabilidade e estabilidade de embarcações.

Bagheri, Ghassemi e Dehghanian (2014) propuseram um método computacional atrelado a um algoritmo genético para otimização de cascos, para estimar as características de *seakeeping* (análise do comportamento no mar da embarcação) de um casco de Wigley e de um casco S60 em uma condição de ondas regulares de proa. Na otimização, o deslocamento foi considerado como restrição de projeto e uma combinação de parâmetros geométricos e dimensões principais como as variáveis. Para o casco de Wigley foram gerados 130 cascos por geração, e para o S60, este número foi aumentado para 200 cascos por geração. Os casos ótimos resultaram em uma redução no pico de velocidade vertical (*heave*) de 33% para o casco de Wigley e de 27% para o casco S60, ilustrando a robustez da aplicação do algoritmo genético para a otimização de cascos.

Maisonneuve et. al. (2003), em um consórcio de catorze parceiros europeus, incluindo estaleiros, consultores, centros de pesquisa, universidades e laboratórios de tanques de provas, conduziram um projeto de *P&D* (pesquisa e

desenvolvimento), e apresentaram propostas de melhorias para os métodos funcionais de projeto de navios mais utilizados computacionalmente, métodos de otimização paramétrica e ferramentas CFD. Neste projeto, foram propostas metodologias de otimização paramétrica baseadas na redução do tempo de cálculo e demanda de capacidade computacional para a ferramenta de projeto *FRIENDSHIP-Modeler* do *Software* CAD CAESES, dentre outros, e para os módulos de escoamento potencial XPAN e de escoamento viscoso XCHAP do *Software* SHIPFLOW, todos módulos constituintes do CAESES.

Shallen (2016) apresentou um cálculo dos coeficientes de resistência total, residual e de ondas do casco R/V Athena (modelo em escala 1/8,25) usando a técnica CFD, através do cálculo da elevação da superfície livre (cálculo potencial) e cortes longitudinais dos perfis de ondas para uma série de velocidades, com o *Software* SHIPFLOW e um código escrito no MATLAB, utilizado o método de transformada de Fourier e a confrontação com dados experimentais de tanques de prova para validação. Os valores obtidos pelo método proposto apresentaram boa concordância com os dados experimentais e a curva de resistência apresentou a mesma tendência, apenas com pequenas discrepâncias para os números de Froude nos extremos mais baixos e mais altos.

Kumar et. al. (2007) propuseram uma análise da área de influência da esteira de um catamarã ao longo da rota proposta de San Francisco a um terminal em Hercules, nos EUA, calculada para uma série de velocidades e profundidades, abrangendo os regimes sub-crítico, trans-crítico e super-crítico para o número de Froude baseado na profundidade. Para a simulação do problema, foi utilizado o módulo de cálculo de escoamento potencial XPAN do SHIPFLOW para o cálculo da superfície livre e cortes longitudinais de perfil de ondas para a determinação dos coeficientes de resistência de ondas. O método foi devidamente validado, demonstrando a robustez do código para o cálculo de escoamento de embarcações do tipo catamarã.

Bagheri e Ghassemi (2014) propuseram uma metodologia computacional para a otimização do formato de um casco, tendo como funções-objetivo parâmetros relacionados com a performance de *seakeeping*, com a utilização da teoria das faixas, um algoritmo genético como método de otimização e equações

de ordens superiores para a determinação do formato do casco com curvas, de forma a obter o movimento vertical mínimo na proa em resposta a ondas regulares. Foi utilizado um casco de Wigley como modelo para o estudo, e são determinados dois casos: No primeiro os coeficientes de forma do casco são as variáveis determinadas e as dimensões principais são fixadas; No segundo, tanto os coeficientes de forma quanto as dimensões principais são variadas simultaneamente. O casco resultante da otimização apresentou uma redução nas velocidades e acelerações verticais na proa.

Cerqueira et. al. (2011) apresentou uma análise numérica dos efeitos de escala no fator de forma em escoamentos viscosos com e sem superfície livre, considerando três modelos de turbulência diferentes, utilizando como estudo de caso três diferentes monocascos simulados no *Software* SHIPFLOW. Foi investigada a dependência entre o fator de forma e a linha de fricção adotada, considerando três modelos diferentes de fricção. Os resultados obtidos evidenciaram que o fator de forma não é constante com a alteração da escala do modelo, podendo ser utilizada uma regressão logarítmica para a aplicação de um coeficiente de correção.

Hutchinson e Hochkirch (2007) realizaram um estudo de otimização paramétrica com o *Software* SHIPFLOW, do casco de uma draga de 9.175 m² em operação nos EUA, para operação tanto em águas profundas quanto em águas rasas, comparando com dados experimentais de tanques de prova e dados de operações passadas. Com a utilização de um algoritmo de otimização baseado no sequenciamento de Sobol, 150 modelos geométricos modificados foram gerados, estando 47 destes em concordância com todas as restrições adotadas. O modelo com a melhor performance em águas rasas foi selecionado para comparação com os dados experimentais, apresentando uma boa concordância nas características de velocidade, potência e elevação de onda na esteira.

Abt e Harries (2007) apresentaram o ambiente FRIENDSHIP-Framework (CAESES), que integra os sistemas CAD e CFD especificamente para análises hidrodinâmicas e projetos de navios, dissertando acerca de sua praticidade e suas funcionalidades. Com uma interface integrada, é possível, no mesmo ambiente, gerar a geometria com a opção de acoplamento de propulsores e apêndices,

selecionar um modelo paramétrico para análise, configurar o pré-processamento da simulação numérica, selecionar uma estratégia de otimização e analisar os resultados no pós-processamento, com menos complexidade no manuseio de formato de arquivos e, conseqüentemente, economia de tempo.

Sahoo, Browne e Salas (2004) investigaram as características da resistência de onda em águas calmas de uma série de cascos de catamarãs de semiplaneio, com bojo arredondado e popa do tipo transom, através de modelagem em CFD com o *Software* SHIPFLOW. A análise abrangeu especialmente os efeitos de espaçamento entre os cascos em uma série de velocidades correspondentes aos números de Froude de 0,2 a 1,0, onde uma malha diferente foi gerada para cada velocidade através de uma análise de regressão, com uma comparação dos resultados com dados experimentais de tanques de prova de uma série semelhante aos cascos testados para validação. Foi verificado que os resultados da equação de regressão apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais, especialmente no intervalo de números de Froude entre 0,5 e 1,0.

Ruggeri, Nogueira, Araújo e Sampaio (2010) realizaram um estudo comparativo entre os resultados de simulação numérica em CFD de um navio do tipo CNG (*Compressed Natural Gas*), com e sem bulbo de proa, de três *Softwares* comerciais distintos, *ANSYS CFX*, *CD-Adapco STAR-CCM+* e *FLOWTECH SHIPFLOW*, com dados experimentais do tanque de provas do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, SP). As três simulações foram configuradas para escoamento viscoso utilizando o método RANS e o modelo de turbulência $k - \omega$. Os resultados se mostraram satisfatórios em comparação com os dados experimentais, com uma diferença máxima de 7%. Na análise dos perfis de velocidade, os resultados entre os *Softwares* não apresentaram grandes discrepâncias, com a diferença que no SHIPFLOW o tempo computacional demandado foi superior, provavelmente devido ao uso de malha estruturada, diferente dos outros *Softwares*, demandando mais elementos para um cálculo mais preciso.

Zou, Larsson e Orych (2010) apresentaram um estudo de validação de simulações em CFD, utilizando o módulo de cálculo *RANS* do *Software*

SHIPFLOW sem considerar a superfície livre, afundamento e trim, do casco de um *tanker* sem apêndices em diferentes profundidades. A diferença máxima dos resultados em CFD para o caso em águas profundas foi de 5% para todas as variáveis consideradas, estando em concordância com a precisão dos dados experimentais.

Vangbo (2011) em sua tese de mestrado, disserta sobre a utilização de *Softwares* CFD na etapa conceitual de projeto de embarcações, assim como os vários métodos que podem ser utilizados para cada tipo de aplicação pretendida. Após a discussão conceitual, o autor apresenta três estudos de otimização distintos para um casco de Wigley, dois utilizando o algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II e um utilizando o método de localização pela tangente (*Tangent Search Method*).

Heimann (2005) em sua tese de doutorado sobre a otimização das características de geração de ondas de cascos de navios baseada em CFD, realizou uma pesquisa sobre a relação de causa e efeito entre a variação de parâmetros geométricos de um casco e o seu impacto na geração do perfil de ondas, por um método de perturbações e análise do espectro do perfil de ondas através de cortes longitudinais. Nos resultados observou-se a redução de até 50% das resistências de geração de ondas e da resistência de pressão viscosa.

Podem ser destacados os trabalhos de Vangbo (2011) e Heimann (2005), que serviram como base para o presente estudo, por combinarem técnicas de CFD no *software* SHIPFLOW com estudos de otimização na interface CAESES para a redução da resistência total ao avanço. Os estudos de Sahoo et. al. (2004), Visonneau (2005), Abt e Harries (2007), Yousefi et. al. (2007), Cerqueira et. al. (2011), Ruggeri (2010), Zou et. al. (2010), Shallen (2016) serviram como base para os procedimentos de modelagem e simulação no SHIPFLOW. Os estudos de Maisonneuve et. al. (2003), Hutchinson et al (2007), Bagheri et. al. (2014) e Guha e Falzanaro (2015), apesar de tratarem de objetivos distintos, serviram como base para os procedimentos de otimização na interface CAESES.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são explanados os principais tópicos teóricos relacionados com a problemática apresentada no capítulo 1, de forma a embasar o trabalho, abrangendo as temáticas da análise da resistência total ao avanço de um navio e a sua separação em componentes isolados de resistência, simulação e obtenção dos parâmetros de resistência e técnicas de otimização dos mesmos em ambiente CFD e a formulação teórica utilizada na simulação dos escoamentos potencial, viscoso, de camada limite e modelos de turbulência.

3.1 HIDRODINÂMICA DE EMBARCAÇÕES

Uma parte importante no projeto de embarcações, ou na análise de uma já existente, é a otimização hidrodinâmica do casco. Segundo Heimann (2005), por exemplo, a redução do consumo de combustível de um típico ferry marítimo de tamanho médio de alta velocidade em 1%, reduz os custos anuais em até \$50.000 e a emissão anual de gases do efeito estufa em até 350 ton.

Segundo Tachibana (2015), a partir do pressuposto de que o escoamento ao redor do casco do navio é tridimensional, o processo pode ser analisado a partir da individualização de cada componente de resistência, de acordo com o efeito de dissipação de energia predominante em cada área do escoamento.

A maior parte dos componentes “puros” de resistência e das subsequentes convenções de separação existentes não possuem meios experimentais satisfatórios de verificação, estando sujeitos a processos de medições e extrapolações numéricas imprecisos. Mesmo na área de hidrodinâmica experimental, há uma tradição de se aplicar fatores de correção dentro da área de determinação de parcelas de resistência.

3.2 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

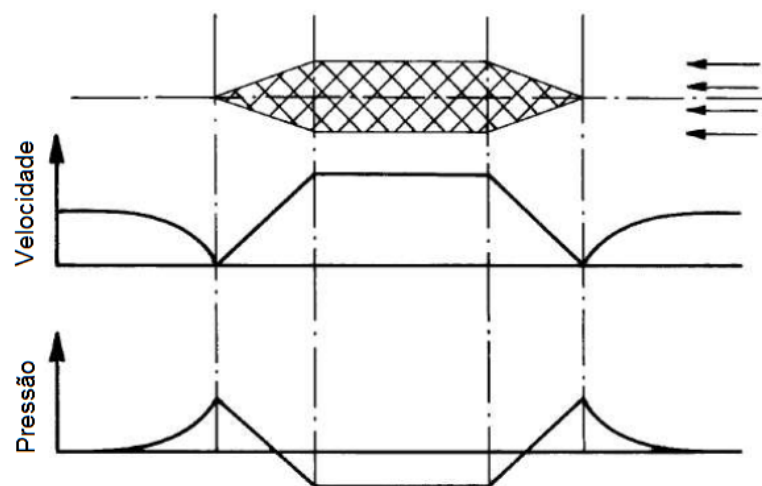
A movimentação de embarcações em meio fluido (água), a uma velocidade constante, acaba gerando dois tipos de esforços sobre cascos: normais e tangenciais. A força contrária ao movimento da embarcação é denominada de resistência ao avanço (Bertram, 2000).

As rápidas mudanças de velocidade provocam grande troca de quantidade de movimento dentro da camada limite, resultando em perdas de energia por atrito. A integral das componentes de atrito na superfície molhada do casco resulta na resistência por atrito. (Trindade, 2012; Bertram, 2000).

3.2.2 Resistência de Pressão Viscosa

Em um escoamento ideal invíscido, ver figura 3.2, com um corpo submerso a grande profundidade, a pressão exercida na popa do corpo é igual à exercida na proa, ou seja, força resultante nula (paradoxo de D'Alembert). Na prática, efeitos viscosos reduzirão a pressão exercida na popa do navio, criando um gradiente de pressão proa-popa (Trindade, 2012).

Figura 3.2. Distribuição de Pressão em um Escoamento Ideal Invíscido



Fonte: BERTRAM, 2000 (adaptado)

A forma do casco da embarcação induz campos locais de escoamento que diferem da velocidade média do escoamento total. Os efeitos viscosos reduzirão a pressão exercida na popa do navio, como a ocorrência da camada limite e áreas de separação e turbilhonamento.

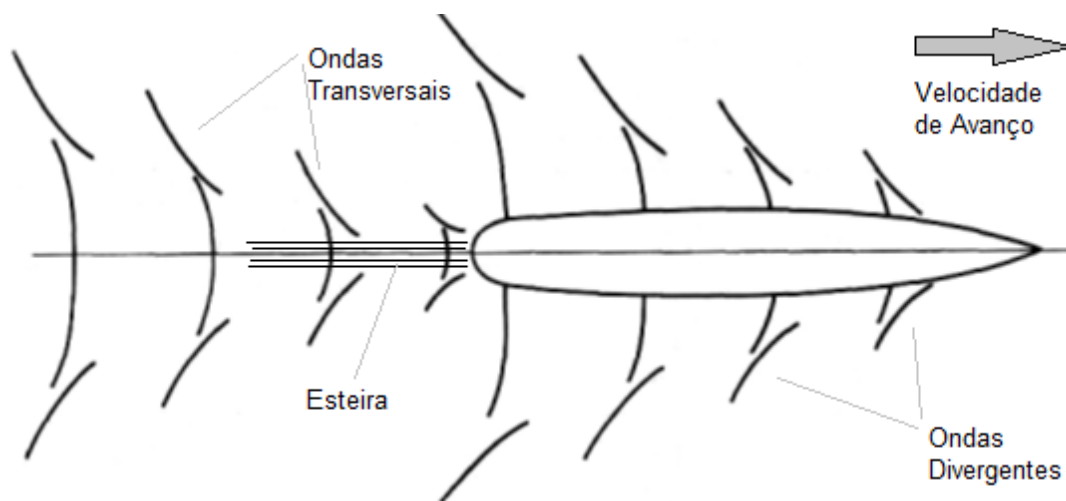
Contribuições à resistência de pressão viscosa incluem perdas de energia na camada limite, com o aumento da espessura desta e, em alguns casos, potencializada por separação de escoamento (Trindade, 2012). Induzidos por

descontinuidades no casco e pelo caráter viscoso, a separação do escoamento rente à superfície do casco forma vórtices, que induzem mudanças no campo de velocidade e, conseqüentemente, nos campos de pressão distribuídos pelo casco. Devido à predominância de perdas de pressão viscosa se dar devido à geração de vórtices, alguns autores como Lewis (1988) a referenciam como Resistência de Geração de Vórtices (*Eddy-Making Resistance*).

3.2.3 Resistência de Ondas

Dentro da análise de resistência de ondas, destacamos os resultados da interação entre o fluido e a estrutura, nesse caso toda a energia empregada na geração e destruição das paredes de ondas compõe a resistência de ondas (Bertram, 2000). Na figura 3.3 é possível verificar o padrão de ondas transversais e divergentes que se formam e acompanham a embarcação, originalmente observadas por Kelvin (1906) em vários experimentos relacionados a este tipo de resistência. Uma região de turbulência se forma a ré da embarcação, se estendendo e formando a esteira (*wake*).

Figura 3.3. Diagrama Esquemático dos Trens de Onda de Proa e Popa



Fonte: PNA Vol. II, 1988 (adaptado)

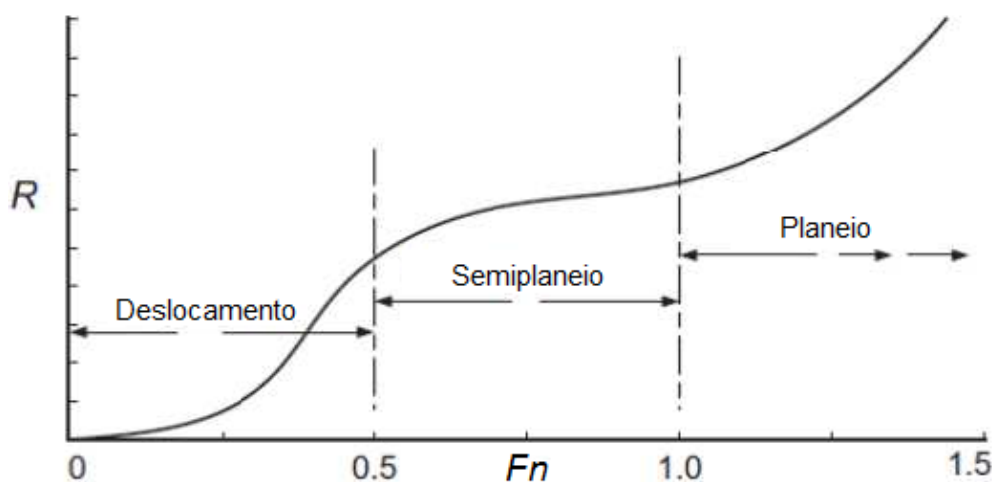
Segundo Iervolino (2015), a curva de velocidade de uma embarcação pode ser dividida em três estágios distintos, conforme apresentado na figura 3.4. A

partir da situação de repouso até baixas velocidades, a embarcação se situa em um regime de deslocamento, sustentada principalmente pelo empuxo. Com o aumento da velocidade, a partir de um número de Froude de 0,5, ocorre a entrada no regime de semiplaneio, com o fenômeno da sustentação dinâmica começando a atuar na embarcação, havendo uma redução do coeficiente da curva de resistência e o aumento da parcela da resistência de ondas na resistência total. Com um número de Froude acima de 1,0, a embarcação entra em regime de planeio, com a total atuação da sustentação dinâmica, uma maior estabilidade e redução do trim até atingir o equilíbrio.

Uma porcentagem considerável da resistência ao avanço deriva do trem de ondas gerado pelo casco, mesmo quando navegando em águas relativamente calmas. Navios rápidos de deslocamento consomem até mais de 50% das suas potências instaladas para vencer a resistência de ondas. As ondas geradas também causam efeitos adversos longe da fonte geradora, ao atingirem as encostas dos rios e outras embarcações. Por essas razões, é de grande importância a redução da geração de ondas, o quanto for possível.

Diversos métodos foram desenvolvidos para estimativa da resistência ao avanço de embarcações, os quais são tipicamente baseados em ensaios com modelos em escala reduzida e calculados via interpolação dos dados ensaiados de maneira paramétrica.

Figura 3.4. Classificação das Faixas de Resistência ao Avanço



Fonte: MOLLAND, 2011 (adaptado)

O método da ITTC '57 divide a resistência total entre atrito e residual (sendo esta última dividida em resistência de formação de ondas e resistência viscosa de pressão ou de turbilhonamento), considerando que o fator de resistência residual é igual para o modelo e navio, levando em consideração outros coeficientes e fatores de correção.

O método de Hughes-Prohaska, classificado como um método de fator de forma de acordo com Trindade (2012), divide a resistência entre uma componente de resistência de ondas e outra de resistência de forma do casco. Baseia-se no método da ITTC '57, com correções e utilização do fator de forma $(1+k)$, assumido como independente dos adimensionais Froude e Reynolds e igual para o protótipo em escala real e para o modelo.

O método ITTC '78 é um aprimoramento dos anteriores, adicionando coeficientes de correção e inclusão da resistência do ar das obras mortas.

3.3 PROPOSTA DE ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Pela sua importância para o projeto do casco de um navio ou para uma otimização, a determinação do padrão e da resistência de ondas de um navio movendo-se a uma velocidade constante em águas calmas é um campo extensivamente estudado da hidrodinâmica naval. Hoje em dia, ferramentas CFD avançadas e confiáveis estão disponíveis para a avaliação numérica da propagação de ondas em superfície livre.

Métodos baseados em teoria potencial não-viscosa estão bem disseminados hoje em dia, sendo comumente a primeira escolha no caso de computações práticas de resistência de onda para uma vasta gama de tipos de navio e de escoamentos. Além disso, os métodos de escoamento potencial, ou métodos dos painéis de Rankine em superfície livre, são extremamente úteis na otimização da resistência de onda baseada em CFD, pois são métodos comparativamente diretos em seu manuseio, rápidos e geram resultados confiáveis

em termos de informação detalhada do escoamento para uma variedade de aplicações.

A formação de ondas geradas por um navio movendo-se com velocidade constante por águas calmas é determinada pelo formato do casco e velocidade. A velocidade de serviço é normalmente determinada nos primeiros estágios de projeto, pelo armador ou pelo operador. Otimizações da frota, tipo de serviço e da rota devem ser realizadas de forma a determinar a velocidade de serviço demandada. Deste modo, um requerimento mínimo do projeto do navio é que o navio alcance a velocidade de serviço estipulada. Entretanto, um requerimento mais crítico é o da performance hidrodinâmica ótima na velocidade de serviço, ou próxima desta. Em termos de redução da resistência e do consumo de combustível, este último requerimento é alcançado com um formato de casco otimizado para o escoamento.

Segundo Heimann (2005), para uma análise detalhada da resistência de ondas, pode-se tomar como base para a otimização de um casco a análise das ondas cruzadas transversais no perfil de ondas e a integração dos componentes de pressão longitudinal ao longo do casco. Desta forma, a análise de ondas cruzadas transversais, WCA, é usada tanto na identificação do sistema quanto para fornecer a função objetivo da otimização. A análise de cruzamento de ondas fornece a resistência de padrão de onda, R_{wp} , enquanto a integração dos componentes de pressão longitudinal ao longo do casco fornece a resistência de pressão viscosa R_v .

Na otimização por este método, as variações no formato do casco são realizadas em função dos efeitos hidrodinâmicos. As variáveis de otimização são relacionadas com as características do escoamento, constituindo uma relação direta entre a geometria do casco e as suas propriedades hidrodinâmicas.

A função objetivo da otimização está diretamente relacionada com os trens de onda em termos do espectro de energia de onda e da resistência de formação de ondas, determinada por uma análise de cruzamento de ondas. Por este método, o módulo de otimização traça variações no formato do casco de acordo com o espectro de energia de onda e com a resistência de formação de ondas. Deste modo, o trem de onda pode ser modificado e reduzido mais sistematicamente e

com um maior controle. A otimização do casco é realizada pela variação da posição do centro de carena do navio em avanço, considerando os efeitos de trim e afundamento. As variações são aplicadas diretamente à área molhada do casco abaixo (e um pouco acima) da linha da superfície livre de ondas.

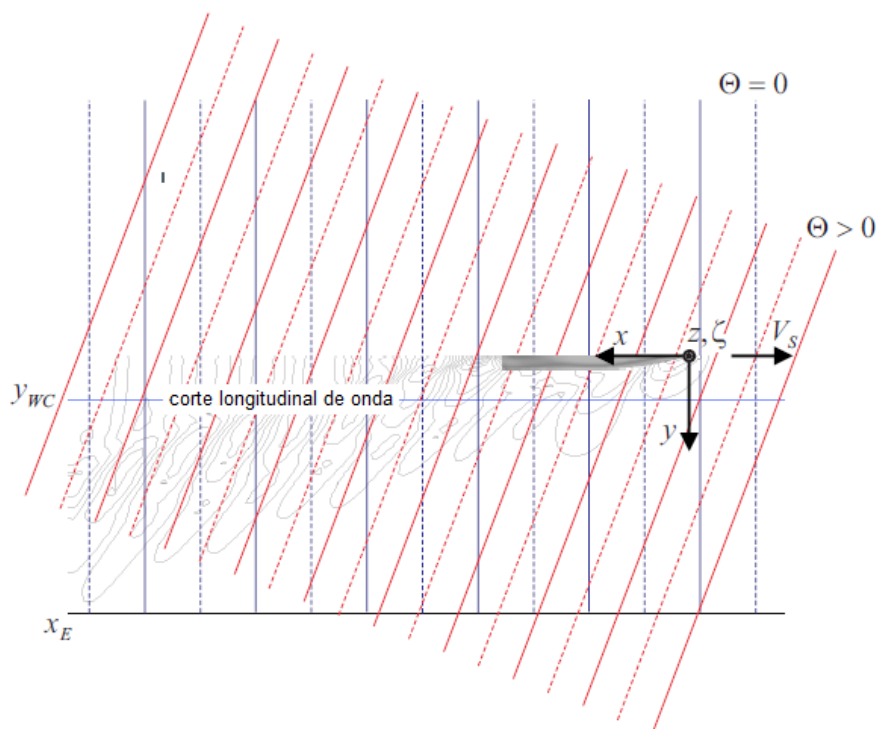
O processo de otimização é estabelecido em um esquema de passos iterativos sucessivos com *loops* de sub-otimização. Em cada sub-otimização, o problema da camada limite é acessado por um método de perturbações lineares ao redor do ponto-base atual, resultando em uma imagem quadrática convexa do conjunto de soluções em uma região determinada ao redor deste ponto. Esta imagem do conjunto de soluções possui um valor mínimo determinado pelas condições de contorno. Assim, é possível realizar uma análise rápida e direta dos gradientes da função-objetivo e das condições de contorno, com o tratamento de várias variáveis de otimização atuando localmente em cada superfície determinada do casco.

A partir deste método, pode-se reduzir a resistência de formação de ondas em um conjunto de velocidades de operação determinadas, identificando a correlação de causa e efeito de variações locais no casco e os seus respectivos resultados na resistência de formação de ondas.

No método proposto por Heimann (2005) e repetido por Shallen (2016), o perfil de elevação de ondas na superfície livre foi modelado pelo módulo de cálculo potencial do *Software* CFD SHIPFLOW, para um conjunto de valores de F_n , a partir de uma determinada quantidade de cortes longitudinais do perfil de ondas. O espectro de onda é calculado a partir dos cortes, resultando, após tratamento, nos coeficientes de resistência de padrão de onda C_{wp} , para cada faixa de F_n .

Heimann (2005) desenvolveu um código para o *Software* MATHEMATICA, uma implementação do método de corte longitudinal de onda de Sharma (1963, 1966) e Eggers et al. (1967), ver figura 3.5. Os resultados da elevação do nível de onda em cada corte são pós-processados pelo código, resultando no espectro de onda e consequentemente nos valores de C_{wp} .

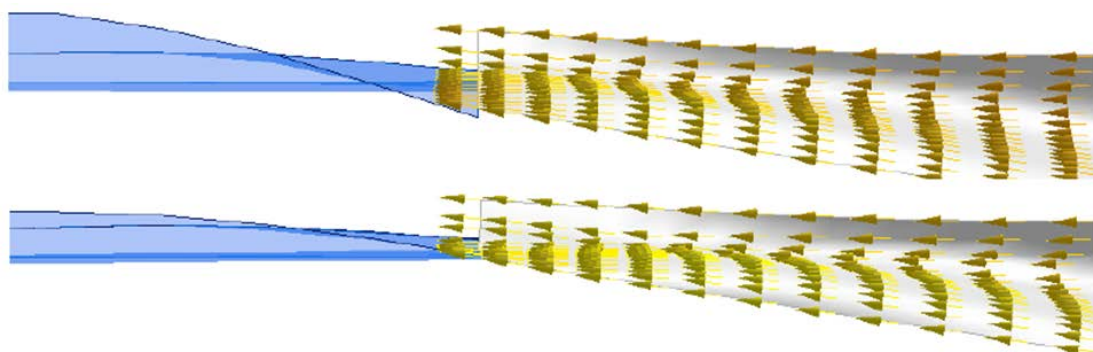
Figura 3.5. Diagrama Esquemático dos Trens de Onda da Embarcação, Mostrando o Corte Longitudinal y_{WC} e os Ângulos de Propagação de Ondas Transversais ($\Theta = 0$) e Divergentes ($\Theta > 0$).



Fonte: HEIMANN, 2005 (adaptado).

Após a obtenção dos coeficientes de resistência, são propostas modificações na orientação de determinados painéis na malha calculada do casco, de forma a identificar os intervalos de influência final na resistência, emulando modificações nas dimensões em áreas específicas do casco. As faixas de panelização cujas modificações são mais favoráveis para a redução da resistência de onda serão otimizadas sucessivamente, até atingir o intervalo esperado ou os intervalos máximos de variação dos parâmetros geométricos de restrição. O método foi aplicado em dois casos, um casco de Wigley padrão a um $F_n = 0,3$ e o ferry FANTASTIC FantaRoRo a $F_n = 0,311$. No primeiro, houve uma redução de 58,87% na resistência de padrão de ondas transversais, $R_{WP\ trans}$, e de 49,38% na resistência de padrão de ondas total, R_{WP} . No segundo, houve uma redução de 10,45% na $R_{WP\ trans}$, e de 10% na R_{WP} . A variação do escoamento na área de separação da popa é ilustrada na figura 3.6.

Figura 3.6. Vetores de Velocidade na Área de Separação da Popa na Geometria Inicial (Acima) e na Geometria Otimizada (Abaixo).



Fonte: HEIMANN, 2005.

Shallen (2016) escreveu um código para o *Software* MATLAB, utilizando transformadas de Fourier para o tratamento dos dados de resistência de onda, obtidos pelas simulações no SHIPFLOW. Os coeficientes de resistência do experimento numérico foram comparados com os dados do tanque de provas do Centro Naval de Desenvolvimento e Pesquisa de Navios (DTNSRDC) para o R/V Athena, uma embarcação do tipo Canhoneira desativada. Os resultados da modelagem numérica do R/V Athena se mostraram em concordância satisfatória com os dados do tanque de provas, com variação máxima de 4,25% no intervalo de $0,448 \leq F_n \leq 0,577$, com um ligeiro aumento da diferença nos limites de teste, $F_n = 0,28$ e $F_n = 1$.

3.4 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DE DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

3.4.1 Sistema de Coordenadas de Referência e Normalização

O escoamento fluido é descrito de forma Euleriana, estando o sistema de coordenadas de referência fixo ao navio, tendo a mesma velocidade, mas não seguindo as condições de trim dinâmico (*pitch*) e afundamento (*heave*).

Um sistema Cartesiano é definido tendo a sua origem na popa, ao nível da superfície livre, com x positivo na direção contrária ao fluxo, z positivo na

direção para cima e y positivo na direção para bombordo, como ilustrado na figura 3.7. As quantidades usadas estão em forma adimensionalizada, com base na velocidade do navio $|\vec{U}_\infty|$ e o comprimento do casco, L .

Figura 3.7. Sistema de Coordenadas Padrão do SHIPFLOW, x + na Direção Contrária ao fluxo, z + na Direção para Cima e y + na Direção para Bombordo .



3.4.2 Equações de Conservação

O escoamento incompressível de um fluido é governado por equações diferenciais parciais que descrevem a conservação de massa e da quantidade de movimento. A forma diferencial das equações de conservação é obtida a partir da aplicação do teorema de transporte de Reynolds considerando uma forma Euleriana de representação do escoamento fluido incompressível:

Equação de Conservação de Massa:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Equações de Conservação de Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + g_i \quad (2)$$

onde ρ é a densidade do fluido, p é a pressão, u_i e g_i são respectivamente os componentes da velocidade e aceleração de gravidade na direção i . A expressão para fluidos Newtonianos das tensões viscosas é definida como:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

sendo δ_{ij} é o delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ se $i=j$ e $\delta_{ij} = 0$ se $i \neq j$) e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

As equações de Navier-Stokes são obtidas através da combinação das três equações anteriores, na forma seguinte:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g_i \quad (4)$$

onde: ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Para um escoamento laminar, esse conjunto de equações e condições de contorno apropriadas, são suficientes para descrever o comportamento do fluido. Nos escoamentos turbulentos, as tensões predominantes não podem ser associadas diretamente à viscosidade molecular do fluido e, portanto, para simular o comportamento turbulento do escoamento, as equações de Navier-Stokes são transformadas em equações médias de Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

3.4.3 Forma Adimensional das Equações de Navier Stokes

Na dinâmica de fluido computacional, os problemas envolvem grandezas como velocidade, pressão, massa específica do fluido, etc. Essas grandezas são adimensionalizadas por grandezas caracterizando o problema escolhidas previamente. Deste processo resultam números sem dimensão importantes por caracterizarem o escoamento fluido quanto às forças que são predominantes.

Na área de hidrodinâmica, os números sem dimensão são definidos da forma seguinte:

a) Número de Reynolds (R_e): Representa a razão entre as forças inerciais, responsáveis pelo movimento do fluido, e as forças viscosas responsáveis pela dissipação devido à viscosidade molecular do fluido, na forma seguinte:

$$R_e = \frac{\rho L U}{\mu} = \frac{L U}{\nu} \quad (5)$$

onde, L é a grandeza característica de comprimento ou escala de comprimento (comprimento do casco do navio), U é a escala de velocidade (velocidade do navio V_s).

b) Número de Froude (F_n): Representa a razão entre as forças inerciais e as forças gravitacionais, na forma seguinte:

$$F_n = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (6)$$

Para adimensionalizar a equação de continuidade (1) e as equações de Navier-Stokes (4), adotamos as variáveis dimensionais na forma seguinte:

$$p = \rho_0 \cdot U^2 \cdot p^* ; x_i = L \cdot x_i^* ; t = \frac{L}{U} \cdot t_i^* ; \quad (7)$$

Substituindo as variáveis dimensionais (7) nas equações (1) e (4) e eliminando a notação com “*”, obtemos as equações de Navier-Stokes na forma adimensional:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{R_e} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{F_n^2} g_i \quad (9)$$

3.4.4 Condições de Contorno

a) Condições de Não Escorregamento (“no-slip”): o fluido imediatamente adjacente à parede é considerado em repouso em relação à mesma. Portanto, a componente normal ($\mathbf{u}_n$) e a componente tangencial ($\mathbf{u}_t$) da velocidade são definidas como sendo nulas.

b) Condição de Simetria ou Com Escorregamento (“free-slip”): o fluido pode deslizar livremente sobre a superfície. A componente normal ($\mathbf{u}_n$) e a derivada normal da componente tangencial ($\frac{\partial \mathbf{u}_t}{\partial n}$) da velocidade são definidas como sendo nulas na fronteira de simetria.

c) Condição de Entrada de fluido (“inflow”): Todas as variáveis devem receber um valor nessa fronteira. A componente normal da velocidade nesta fronteira $\mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{inflow}$, as componentes tangenciais $\mathbf{u}_t = \mathbf{0}$ e o gradiente normal da pressão é nulo $\frac{\partial p}{\partial n} = \mathbf{0}$.

d) Condição de Saída de fluido (“outflow”): Nesta fronteira é necessário ser mantida a conservação de massa, através da imposição do gradiente normal da velocidade nulo nesta fronteira ($\frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial n} = \mathbf{0}$; $\frac{\partial \mathbf{u}_t}{\partial n} = \mathbf{0}$).

e) Condição de Contorno na Superfície Livre: Na interface entre o fluido e a atmosfera, o coeficiente de tensão superficial é considerado nulo (Griebel et al. 1998):

$$\vec{n} \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{n}) = \mathbf{0} \quad ; \quad \vec{m} \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{n}) = \mathbf{0} \quad (10)$$

onde $\vec{n}$ e $\vec{m}$ são vetores unitários normal e tangencial à superfície livre, respectivamente e $\vec{\sigma}$ é o tensor das tensões.

3.4.5 Equações de Médias de Reynolds (RANS)

No escoamento turbulento, a velocidade, pressão e outras grandezas, sofrem oscilações irregulares (flutuações) ao redor de um valor médio. Aplicando a decomposição de Reynolds, a velocidade instantânea (u_i) é dividida num valor médio ($\bar{u}_i$) e um valor flutuante (u'_i), assim como, o campo de pressão instantânea (p) é separado num campo de pressão média ($\bar{p}$) e um campo de pressão flutuante (p').

As equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, conhecidas como equações RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) são obtidas através da aplicação da média estatística às equações de Navier-Stokes (4).

A média para uma variável qualquer φ é definida da forma seguinte:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} \varphi \, dt \quad (11)$$

As equações “RANS” resultantes são as seguintes:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + g_i \quad (12)$$

onde o termo de flutuações turbulentas $\overline{u'_i u'_j}$ é denominado tensão de Reynolds e representa incógnitas adicionais, induzindo o problema de fechamento da turbulência. Para a resolução deste problema (menos equações que incógnitas) é necessário adicionar novas equações na forma de modelos de turbulência.

Os modelos de turbulência são usados para acoplar as tensões de Reynolds às velocidades médias, e são obtidos através de considerações teóricas sobre a física da turbulência, a análise dimensional, e dados experimentais na forma de constantes e coeficientes empíricos. Estes modelos baseiam-se na hipótese de Boussinesq para as tensões de Reynolds, onde a turbulência é considerada isotrópica, ou seja, as propriedades são independentes da direção; e as tensões de Reynolds são relacionadas à velocidade média por uma viscosidade turbulenta ν_t ,

que não é uniforme (varia ponto a ponto no escoamento) e é definida da forma seguinte:

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} \quad (13)$$

onde o último termo representa a pressão dinâmica dos turbilhões, em relação à pressão estática termodinâmica, sendo κ a energia cinética turbulenta definida como:

$$\kappa = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (14)$$

Os modelos de turbulência propostos determinarão o valor da viscosidade turbulenta em função do cálculo do escoamento médio.

As equações de conservação (RANS) levando em conta o conceito de viscosidade turbulenta (hipótese de Boussinesq) são obtidas pela substituição da Eq. (13) na Eq. (12), ou seja:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_e \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \right) + g_i \quad ; \quad \nu_e = \nu_t + \nu \quad (15)$$

onde ν_e é a viscosidade efetiva e $\bar{P}$ é a pressão modificada, incluindo o termo da pressão dos turbilhões, ou seja:

$$\bar{P} = \frac{1}{\rho} \bar{p} + \frac{2}{3} \kappa \quad (16)$$

3.4.6 Modelo de Turbulência SST $\kappa - \omega$

Já que o modelo clássico $\kappa - \epsilon$ não produz resultados satisfatórios para várias aplicações, outros modelos de turbulência foram desenvolvidos. No modelo SST $\kappa - \omega$, a tensão turbulenta de Reynolds é modelada pela Eq. (13), sendo a viscosidade turbulenta modelada em função da energia cinética turbulenta κ e da taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta ω .

O atual modelo SST $\kappa - \omega$ de transporte de tensões de cisalhamento foi desenvolvido por Menter (1993) e, apresenta notáveis vantagens em relação ao

modelo $k - \epsilon$ e a modelos $k - \omega$ clássicos. Para escoamentos onde há formação de camada limite, o modelo $\kappa - \omega$ clássico é superior ao modelo $\kappa - \epsilon$ na solução da região viscosa próxima a parede, e tem demonstrado sucesso nos problemas envolvendo gradiente adverso de pressão. Entretanto, o modelo $\kappa - \omega$ requer uma condição de contorno diferente de zero para ω na corrente livre, e a solução final do escoamento é muito sensível ao valor especificado.

O modelo SST $\kappa - \omega$ usa o modelo $\kappa - \omega$ na região próxima à parede e um modelo $\kappa - \epsilon$, modificado para se assemelhar a um modelo $\kappa - \omega$, é utilizado fora dessa região. Para realizar isto, o modelo $\kappa - \epsilon$ é escrito em termo de ω . Então os dois modelos são multiplicados por uma função de mistura e somados. Esta função de mistura F_1 vale um (conduzindo ao modelo $\kappa - \omega$ padrão) na extremidade interna da camada limite turbulenta e tem um valor zero (correspondendo ao modelo $\kappa - \epsilon$ padrão) na parte externa à camada.

Desta forma a energia cinética turbulenta κ e a taxa de dissipação específica ω do modelo SST $\kappa - \omega$ são determinados pelas equações seguintes:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \check{P}_\kappa - \beta^* \kappa \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \sigma_\kappa \nu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = & \alpha S^2 - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \\ & + (1 - F_1) 2\sigma_d \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (18)$$

onde $\check{P}_\kappa$ é o termo de produção de energia cinética turbulenta. Este termo é limitado para um acúmulo de turbulência em regiões de estagnação:

$$\check{P}_\kappa = \min(\nu_t S^2; 10 \beta^* \kappa \omega) \quad (19)$$

Na equação (18) a difusão cruzada (último termo do lado direito) está multiplicada pela função de mistura F_1 (função da distância (y) à parede) é definida como:

$$F_1 = \tanh(\Gamma^4) \quad ; \quad \Gamma = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{\omega y^2} \right); \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}\kappa}{CD_{\kappa\omega}y^2} \right) \quad (20)$$

onde β^* e $\sigma_{\omega 2}$ são constantes empíricas e $CD_{\kappa\omega}$ é a parte positiva do termo de difusão cruzada, dada por:

$$CD_{\kappa\omega} = \max\left(2\rho\sigma_d \frac{1}{\omega} \frac{\partial\kappa}{\partial x_j} \frac{\partial\omega}{\partial x_j}; 10^{-10}\right) \quad (21)$$

onde σ_d é uma constante empírica.

A definição da viscosidade turbulenta apresenta um tratamento melhor para o transporte das tensões de Reynolds em camadas de limite na hipótese de Bradshaw (1967) que para escoamento em camada de limite as tensões de Reynolds são proporcionais à energia cinética turbulenta, na forma seguinte:

$$\nu_t = \frac{a_1\kappa}{\max(a_1\omega; |S_{ij}|F_2)} \quad ; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (22)$$

onde a_1 é uma constante empírica igual a 0.3 e S_{ij} é o tensor deformação do escoamento médio.

As constantes empíricas do modelo são obtidas combinando as constantes dos modelos $\kappa - \epsilon$ e $\kappa - \omega$. Seja ϕ uma constante do modelo SST $\kappa - \omega$ e sejam ϕ_1 e ϕ_2 constantes dos modelos $\kappa - \omega$ e $\kappa - \epsilon$, respectivamente. As constantes ϕ são calculadas usando a função de mistura F_1 , da forma seguinte:

$$\phi = F_1\phi_1 + (1 - F_1)\phi_2 \quad (23)$$

Tabela 3.1. Constantes do Modelo SST $\kappa - \omega$

Constante	ϕ_1 $\kappa - \omega$	ϕ_2 $\kappa - \epsilon$
σ_k	0,5	1,0
σ_ω	0,5	0,856
σ_d	0.856	0.856
β	0,075	0,0828
β^*	0.09	0.09
α	5/9	0.44

3.4.7 Modelo de Turbulência EASM (*Explicit Algebraic Stress Model*)

O desprezo pela anisotropia das tensões normais de Reynolds é apontado como um dos principais motivos da limitação de modelos anteriores baseados na hipótese de viscosidade turbulenta. Uma alternativa para o fechamento das equações de RANS consiste na utilização do modelo algébrico das tensões de Reynolds EASM, que inclui termos não-lineares de forma a efetuar essa correção nos resultados. O tensor das tensões de Reynolds é dado por:

$$\overline{u_i'' u_j''} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_T \left(S_{ij} + a_2 a_4 (S_{ik} W_{kj} - W_{ik} S_{kj}) \right) - \frac{a_3 a_4}{\rho} \left(S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} S_{mn} S_{mn} \delta_{ij} \right) \quad (24)$$

e a viscosidade turbulenta por:

$$\nu_t = \max \left(-k \alpha_1, \frac{0,0005 \kappa}{\beta^* \omega} \right) \quad (25)$$

α_1 é obtido a partir de:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\alpha_1}{\tau} \right)^3 - \frac{\gamma_1}{\eta^2 \tau^2 \gamma_0} \left(\frac{\alpha_1}{\tau} \right)^2 + \frac{\gamma_1^2 - 2\eta^2 \tau^2 \gamma_0 \alpha_1 - \frac{2}{3} \eta^2 \tau^2 \alpha_3^2 + 2R^2 \eta^2 \tau^2 \alpha_2^2}{(2\eta^2 \tau^2 \gamma_0)^2} \left(\frac{\alpha_1}{\tau} \right) \\ & = - \frac{\gamma_1 \alpha_1}{(2\eta^2 \tau^2 \gamma_0)^2} \end{aligned} \quad (26)$$

onde:

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad \eta^2 = S_{ij} S_{ij} \quad R^2 = \frac{W_{ij} W_{ij}}{\eta^2} \quad (27)$$

e:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} - C_2 \right) \quad \alpha_2 = \frac{1}{2} (2 - C_4) \quad \alpha_3 = \frac{1}{2} (2 - C_3) \\ \alpha_4 = \frac{\tau}{\gamma_1 - 2\gamma_0 \left(\frac{\alpha_1}{\tau} \right) \eta^2 \tau^2}; \quad \gamma_0 = \frac{C_1^1}{2} \quad ; \quad \gamma_1 = \frac{C_1^0}{2} + \frac{C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1}}{C_{\epsilon 2} - 1} \\ C_{\epsilon 1} = 1,44; \quad C_{\epsilon 2} = 1,83; \quad C_1^0 = 3,4; \quad C_1^1 = 1,8; \\ C_2 = 0,36; \quad C_3 = 1,25; \quad C_4 = 0,4 \end{array} \right. \quad (28)$$

3.4.8 Condições de Contorno do Escoamento Turbulento

As condições de contorno são descritas na tabela 3.2. Na implementação, duas camadas de células-fantasma são usadas.

Tabela 3.2. As Condições de Contorno

	Não-deslizamento	Deslizamento	Entrada do fluxo	Saída do fluxo
u	$u_i = 0$	$u_i n_i = 0, \frac{\partial u_i}{\partial \xi_B} = 0$	$u_i = \text{Constante}$	$\frac{\partial u_i}{\partial \xi_B} = 0$
p	$\frac{\partial p}{\partial \xi_B} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial \xi_B} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial \xi_B} = 0$	$p = 0$
κ	$\kappa = 0$	$\frac{\partial \kappa}{\partial \xi_B} = 0$	$k = \text{Constante}$	$\frac{\partial \kappa}{\partial \xi_B} = 0$
ω	$\omega = f(u_\tau, \dots)$	$\frac{\partial \omega}{\partial \xi_B} = 0$	$\omega = \text{Constante}$	$\frac{\partial \omega}{\partial \xi_B} = 0$

3.4.9 Solução Numérica do Escoamento Turbulento

As equações médias de Reynolds (15) acopladas com as equações do modelo de turbulência selecionado (SST κ - ω ou EASM), juntamente com as respectivas condições de contorno, são resolvidas usando o Método dos Volumes Finitos (MVF), descrito com detalhes em Patankar (1980). Neste método o domínio de solução é dividido em pequenos volumes de controle finitos. As equações diferenciais são integradas em cada um destes volumes de controle e desta integração resultam equações algébricas que, quando resolvidas, simultaneamente fornecem os campos de velocidade e pressão. Para o acoplamento pressão-velocidade o algoritmo iterativo SIMPLE (Semi IMPLICIT Linked Equations) é utilizado.

3.5 CAMADA LIMITE LAMINAR E TURBULENTA

3.5.1 Camada Limite Laminar

Na dedução das equações da camada limite, primeiramente realizada por Prandtl em 1904, é utilizada uma versão simplificada das equações de Navier-Stokes, de forma que as equações diferenciais parciais assumem uma forma parabólica, ao invés da forma elíptica das equações completas. Nesta simplificação, o escoamento é dividido em uma parte não-viscosa (cujo cálculo é facilitado) e a camada limite em si, que é governada por uma equação diferencial parcial.

Na aproximação, assume-se que em um número de Reynolds alto o suficiente, o escoamento sobre uma superfície pode ser dividido em uma região externa de escoamento potencial não afetada pela viscosidade (a maior parte do escoamento), e uma pequena região próxima à superfície onde os efeitos da viscosidade definem o perfil de velocidade da camada limite.

As velocidades dentro da camada limite, no sentido do escoamento e normal ao casco são, respectivamente, u e v . Utilizando uma análise de escala, a equação de continuidade (1) e as equações de Navier-Stokes (4), dentro da camada limite, são reduzidas a:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (29)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (30)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (31)$$

A análise de ordem de magnitude assume que a escala de comprimento no sentido do escoamento é significativamente maior que a escala de comprimento no sentido transversal (normal ao casco) dentro da camada limite. Portanto, variações em propriedades na direção do escoamento são geralmente menores do que variações na direção normal ao casco.

Aplicando esta análise às equações de continuidade, observa-se que v , a velocidade normal ao casco, é de magnitude menor que a velocidade u no sentido do escoamento. Sendo a pressão estática p independente de y (a partir da equação (31)), então a pressão na extremidade da camada limite em um determinado ponto corresponde à integral das pressões em x àquele ponto.

A pressão externa pode ser obtida através da aplicação da equação de Bernoulli, substituindo p na equação (30):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = U \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (32)$$

sendo U a velocidade do fluido fora da camada limite e u e U tendo direções paralelas. Para um escoamento onde a pressão estática p não varia com a direção da velocidade, então

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (33)$$

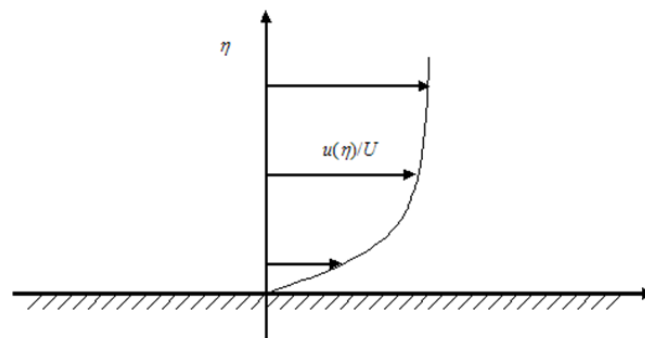
permanecendo U constante.

Portanto, a equação do movimento é simplificada a:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (34)$$

Estas equações simplificadas são diferenciais parciais parabólicas (figura 3.7), podendo ser resolvidas com uma solução de similaridade primeiramente desenvolvida por Blasius (1908).

Figura 3.7. Diagrama Squemático do Perfil de Velocidade do Escoamento de Blasius. A Componente de Velocidade ao Longo do Escoamento $u(\eta)/U(x)$ é Mostrada em Função ea Variável de Similaridade η .



Segundo Prandtl (1938), em seu teorema da transposição, para qualquer solução $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ que satisfaça as equações da camada limite, soluções do tipo $u^*(x, y, t)$, $v^*(x, y, t)$, que também satisfazem as equações, podem ser escritas na forma:

$$\begin{cases} u^*(x, y, t) = u(x, y + f(x), t) \\ v^*(x, y, t) = v(x, y + f(x), t) - f'(x) \cdot u(x, y + f(x), t) \end{cases} \quad (35)$$

onde $f(x)$ é uma função arbitrária. Já que a solução não é única, de uma perspectiva matemática, qualquer autofunção de um conjunto infinito de autofunções pode ser adicionada à solução.

3.5.2 Camada Limite Turbulenta

A variação na formulação da camada limite turbulenta é dada pela inclusão nas equações de conservação do escoamento de termos e fatores variáveis em função do tempo. Uma das técnicas mais aplicadas é a decomposição de Reynolds, onde as propriedades instantâneas do escoamento são decompostas em componentes médios e flutuantes.

Aplicando este método nas equações da camada limite, o resultado são as equações para a camada limite turbulenta:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (36)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'^2}) \quad (37)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'^2}) \quad (38)$$

Usando uma análise de ordem de magnitude, estas equações podem ser reduzidas eliminando termos de ordens superiores. Ao considerar escalas de comprimento δ para variações na direção transversal e L para variações na direção ao longo do escoamento, com $\delta \ll L$, a equação do momento para o eixo x é reduzida a:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u'v'}) \quad (39)$$

Para que os termos de viscosidade sejam reduzidos a uma ordem inferior na equação do momento, uma escala menor de comprimento deve ser utilizada. Ao considerar $\eta \ll \delta$ como a escala para o eixo y , a equação do momento reduzida para esta camada limite “interior” é dada por:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u'v'}) \quad (40)$$

Com o número de Reynolds tendendo ao infinito, o termo do gradiente de pressão tende a não exercer influência nesta região interna da camada limite turbulenta. Esta nova escala de comprimento “interior” η é uma escala viscosa de comprimento, de ordem ν/u_* , com u_* sendo a escala de velocidade das flutuações de turbulência, neste caso uma velocidade de fricção.

Diferentemente das equações para a camada limite laminar, a presença de dois regimes de escoamento governados por conjuntos diferentes de escalas (“interior” e “exterior”) torna complexa a dedução de uma formulação universal para a camada limite turbulenta. Para encontrar uma solução de similaridade que contemple ambas as regiões do escoamento, é necessário combinar assintoticamente as duas soluções de cada região do escoamento, o que irá resultar em uma relação logarítmica.

Para a solução das equações da camada limite turbulenta, é necessária a aplicação de um modelo de turbulência, cujo método objetiva expressar a tensão de cisalhamento de Reynolds em termos de variáveis do escoamento (vide sessão 3.4.6).

Uma camada de tensão constante existe próximo da região da parede. Devido ao amortecimento das flutuações da velocidade vertical perto da parede, o termo da tensão de Reynolds se torna desprezível, resultando em um perfil de velocidade linear, mas apenas em uma região muito próxima da parede.

3.5.3 Camada Limite de Primeira Ordem

Blasius (1908) propôs uma solução de similaridade para o caso onde a velocidade do escoamento é uniforme na direção x :

$$U(x) = U \quad ; \quad \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (41)$$

o que corresponde à camada limite sobre uma placa plana orientada paralela ao escoamento.

Soluções auto-similares existem pelo fato de as equações e as condições de contorno não apresentarem variação após as transformações:

$$x \rightarrow c^2 x \quad ; \quad y \rightarrow cy \quad ; \quad u \rightarrow u \quad ; \quad v \rightarrow \frac{v}{c} \quad (42)$$

onde c é uma constante positiva qualquer. As variáveis auto-similares são então introduzidas:

$$\eta = \frac{y}{\delta(x)} = y \sqrt{\frac{U}{2vx}} \quad ; \quad \psi = \sqrt{2vUx} f(\eta) \quad (43)$$

onde η é a variável de similaridade, $\delta(x) = \sqrt{2vx/U}$ é a espessura da camada limite e ψ é a função do fluxo, onde a nova função do fluxo normalizada introduzida, $f(\eta)$, é apenas uma função da variável de similaridade.

Assim, os componentes da velocidade são determinados:

$$u(x, y) = \frac{\partial \psi}{\partial y} = U f'(\eta) \quad ; \quad v(x, y) = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \sqrt{\frac{vU}{2x}} [\eta f'(\eta) - f(\eta)] \quad (44)$$

A substituição na equação do momento resulta na equação de Blasius:

$$2f'' + f''f = 0 \quad (45)$$

As condições de contorno são: de aderência impermeabilidade na parede e de velocidade de fluxo livre fora da camada limite:

$$u(x, 0) = 0 \rightarrow f'(0) = 0 \quad ; \quad v(x, 0) = 0 \rightarrow f(0) = 0; \quad u(x, \infty) = U \rightarrow f'(\infty) = 1 \quad (46)$$

A equação (45) é uma equação diferencial ordinária não-linear de terceira ordem, que pode ser resolvida numericamente pelo método de Runge-Kutta.

A forma limite para uma variável de similaridade $\eta \ll 1$ é:

$$f(\eta) = \frac{1}{2}\alpha\eta^2 + O(\eta^5) \quad ; \quad \alpha = 0,4696 \quad (47)$$

e a forma limite para $\eta \gg 1$ é:

$$f(\eta) = \eta - \beta + O\left[(\eta - \beta)^{-2}e^{-\frac{1}{2}(\eta - \beta)^2}\right] \quad ; \quad \beta = 1,21678 \quad (48)$$

Os parâmetros apropriados para comparação com observações experimentais são a espessura de deslocamento δ^* , espessura de momento θ , tensão de cisalhamento na parede τ_ω e a força de arrasto F atuando em um comprimento l da placa, que são dadas pelo perfil de Blasius:

$$\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy = 1,72\sqrt{\frac{\nu x}{U}} \quad ; \quad \theta = \int_0^\infty \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy = 0,665\sqrt{\frac{\nu x}{U}} \quad (49)$$

$$\tau_\omega = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0} = 0,332\sqrt{\frac{\rho\mu U^3}{x}} \quad ; \quad F = 2 \int_0^\infty \tau_\omega dx = 1,328\sqrt{\rho\mu l U^3} \quad (50)$$

onde, o fator 2 na fórmula da força de arrasto denota ambos os lados da placa.

Segundo Van Dyke (1975), o próprio Prandtl analisou a solução de Blasius no seu teorema de transposição e notou que ela não é única segundo uma perspectiva matemática. Para esta solução, qualquer uma das autofunções do conjunto discreto infinito de autofunções pode ser adicionada, já que cada uma satisfaz a equação linearmente perturbada com condições homogêneas e decaimento exponencial ao infinito. A primeira destas autofunções seria a derivada em função de x da equação de Blasius de primeira ordem, o que representa a incerteza na localização exata da origem.

3.5.4 Camada Limite de Segunda Ordem

A definição da camada limite prevê uma velocidade vertical não-nula a uma certa distância da parede, o que precisa ser levado em conta na camada

externa não-viscosa de próxima ordem, e a solução correspondente da camada limite interna, o que resulta em uma nova velocidade vertical e assim por diante.

A velocidade vertical ao infinito para a equação de Blasius para uma camada limite de primeira ordem é:

$$v = 0,86 \sqrt{\frac{\nu U}{x}} \quad (51)$$

Já para a camada limite de segunda ordem, a solução é nula. As soluções de Van Dyke para camadas limites não-viscosas externas e internas são:

$$\psi(x, y) \sim \begin{cases} y - \sqrt{\frac{\nu}{Ux}} \beta \Re \sqrt{2(x + iy)}, & \text{CL externa} \\ \sqrt{2\nu Ux} f(\eta) + 0, & \text{CL interna} \end{cases} \quad (52)$$

Como no problema da camada limite de primeira ordem, qualquer uma das autofunções do conjunto infinito de autofunções pode ser adicionada à esta solução. Em todas as soluções, $Re = Ux/\nu$ pode ser considerado como um número de Reynolds.

3.5.5 Camada Limite de Terceira Ordem

Já que a solução interna da segunda ordem é zero, as correções correspondentes para o problema de terceira ordem são nulas, e o problema da camada externa de terceira ordem é similar ao problema da camada externa de segunda ordem.

A solução para a correção de terceira ordem não tem uma expressão exata, mas a expansão da camada limite interna tem a forma:

$$\psi(x, y) \sim \sqrt{2\nu Ux} f(\eta) + 0 + \left(\frac{\nu}{Ux}\right)^{3/2} \left[\log\left(\frac{Ux}{\nu}\right) \sqrt{\frac{x}{2}} f_{32}(\eta) + \frac{1}{\sqrt{2x}} f_{31}(\eta) \right] + \dots \quad (53)$$

onde f_{32} é a primeira auto-solução da equação da camada limite de primeira ordem (que é a derivada em função de x da solução de Blasius para a camada de

primeira ordem) e a solução para f_{31} é não-única, o que resulta em uma constante indeterminada no problema.

3.6 ESCOAMENTO POTENCIAL

O escoamento não viscoso e irrotacional se estabelece fora da camada limite de um corpo submetido a uma corrente livre. A velocidade do escoamento $\vec{U}$ pode ser escrita como o gradiente de uma função potencial escalar ϕ (definida a menos de uma constante):

$$\vec{U} = \vec{\nabla}\phi \quad \Rightarrow \quad u = \frac{\partial\phi}{\partial x} ; \quad v = \frac{\partial\phi}{\partial y} ; \quad w = \frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (54)$$

Se além disso, o escoamento é incompressível, resulta da equação de continuidade (1) a equação seguinte:

$$\nabla \cdot \vec{U} = \nabla \cdot (\nabla\phi) = \nabla^2\phi = 0 \quad (55)$$

Isto é, o potencial ϕ satisfaz a equação de Laplace. O potencial escalar reduz o número de incógnitas, mas aumenta a ordem da equação diferencial resultante.

O potencial de velocidade total ϕ é determinado pelo potencial do escoamento sem perturbações ϕ_∞ e o potencial da velocidade da perturbação causada pelo navio ϕ' , que deve satisfazer a equação de Laplace (55) e as condições de contorno:

$$\phi = \phi_\infty + \phi' \quad (56)$$

3.6.1 Condições de Contorno Cinemáticas e Dinâmicas do Casco

Para a obtenção de resultados consistentes em comparação com as situações reais, condições de contorno adequadas devem ser definidas. A condição de contorno cinemática do casco atesta que a velocidade do escoamento deve ter uma componente na direção normal ao casco:

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = F \quad (57)$$

onde, normalmente $F = 0$, já que nenhuma partícula do fluido deve passar através da superfície de um corpo rígido. Em termos de potencial de perturbação, a condição de contorno cinemática do casco resulta em:

$$\frac{\partial \phi'}{\partial n} = -\widehat{U_\infty} \cdot \vec{n} + F \quad (58)$$

onde $\widehat{U_\infty} = \overrightarrow{U_\infty} / |\overrightarrow{U_\infty}|$ indica o vetor unitário de velocidade do escoamento não-perturbado.

Uma condição de contorno dinâmica do casco adicional deve ser adicionada, de forma a estabelecer um equilíbrio entre as forças de pressão hidrodinâmica e hidrostática na parte molhada do casco e na distribuição de pesos no navio. Esta condição determina o trim dinâmico e afundamento do casco.

3.6.2 Condições de Contorno Cinemáticas e Dinâmicas da Superfície Livre

Na superfície livre, são aplicadas mais duas condições de contorno, que devem satisfazer a superfície livre de ondas inicialmente desconhecida. A condição cinemática determina que o fluxo deve ser tangencial à superfície livre, ou seja, nenhuma partícula do fluido deve se desprender da superfície $\zeta = f(x, y)$:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (59)$$

onde ζ se refere à distância (normalizada) da superfície livre a partir do plano inicial sem perturbações. ζ entretando, se refere à elevação de onda (normalizada), no eixo z .

A segunda condição, a condição de contorno dinâmica da superfície livre, determina que a pressão estática, expressa através da equação de Bernoulli, deve ser constante (atmosférica) na superfície livre:

$$\frac{\zeta}{F_n^2} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 - 1 \right] = 0 \quad (60)$$

As condições de contorno cinemática (59) e dinâmica (60) da superfície livre são dadas em suas formas normalizadas.

3.6.3 Linearização das Condições de Contorno da Superfície Livre

O problema da superfície livre é não-linear, já que as condições de contorno, (59) e (60), são não-lineares e satisfazem a superfície livre inicialmente desconhecida. Assim, as quantidades do escoamento fluido dependem de forma não-linear da localização da superfície livre.

Métodos de solução para o problema não-linear da superfície livre vem sendo propostos desde a década de 80. Métodos atuais linearizam as condições de contorno da superfície livre com base em uma solução conhecida e resolvem o problema de uma maneira iterativa. No esquema iterativo, as quantidades do escoamento fluido e da elevação da superfície livre são atualizadas em passos alternados. Um método comumente utilizado é o de linearizar as condições de contorno da superfície livre em uma série de expansões de Taylor de primeira ordem, com base em uma solução conhecida e introduzir perturbações devidas ao casco e às ondas. Assim, fatores de ordens superiores são considerados irrelevantes.

A maioria dos métodos de solução para painéis de Rankine aplicados em superfícies livres não-lineares disponíveis atualmente adotam a linearização de Dawson (1977) para as condições de contorno da superfície livre. No método de Dawson, a linearização é realizada ao redor do escoamento de um bordo do casco, assumindo que o mesmo seja simétrico no plano longitudinal zx . As condições de contorno cinemáticas e dinâmicas são linearizadas em função das perturbações, que são devidas às ondas. As condições de contorno da superfície livre devem satisfazer a superfície livre inicialmente desconhecida. Mas para que seja possível uma solução direta, as condições são transferidas e resolvidas para a superfície livre conhecida. Para uma solução consistente, termos de transferência correspondentes deverão ser incorporados às condições de contorno. A linearização de Dawson pura é tida como inconsistente, já que ela despreza esses termos de transferência. Entretanto, aplicações práticas por Raven (1996) e Janson

(1997) mostraram que o método de Dawson é tão ou mais estável que outros métodos de linearização mais consistentes. Na convergência, a inconsistência da linearização não é mais relevante.

A elevação da superfície livre ζ e o potencial de velocidade ϕ são expandidos à primeira ordem em séries de Taylor com base na solução conhecida Φ . As expansões são então introduzidas às condições de contorno da superfície livre, desprezando contribuições de ordens mais altas em ζ e ϕ ou termos mistos de ordens mais altas. Finalmente, as condições de contorno cinéticas e dinâmicas linearizadas são combinadas, resultando em uma formulação com termos de velocidades conhecidas e desconhecidas e suas derivadas.

Uma vez que o novo potencial de velocidade ϕ é determinado, a elevação da superfície livre é obtida pela condição de contorno linearizada da superfície livre:

$$\zeta(x, y) = \frac{1}{2} F_n^2 \left[1 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 - 2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right] \quad (61)$$

onde Φ é o potencial de velocidade da solução-base conhecida.

3.6.4 Condições de Irradiação e de Popa Transom

Além das condições já apresentadas, é necessária uma condição de irradiação, o que implicará na dissipação da velocidade de perturbação causada pela presença do casco no fluido, à medida que a distância do casco r tende ao infinito:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} |\vec{\nabla} \phi'| = 0 \quad (62)$$

Segundo Heimann (2005), em uma solução de regime estacionário, mais uma condição de irradiação é necessária, para prevenir a propagação de ondas acima do casco. Entretanto, essa condição não é formulada explicitamente nos métodos de painéis de Rankine. Ela é aplicada implicitamente pelo método

numérico, por exemplo, ao aplicar um esquema de diferenciação na direção do escoamento para o cálculo das derivadas numéricas, e/ou aplicando uma variação dos pontos de controle da superfície livre na direção do escoamento, em conjunto com o chamado método dos painéis elevados. No *Software SHIPFLOW*, ambos os métodos são aplicados simultaneamente.

Se um navio possui uma popa do tipo transom, uma condição especial é necessária para modelar a separação do escoamento na alheta (de acordo com a condição de Kutta) e o comportamento do escoamento logo atrás da popa transom.

Mais algumas condições de contorno serão aplicadas no caso de águas restritas ao fundo (pouca folga abaixo da quilha) e aos bordos (paredes do canal). Em escoamentos não-viscosos, tipicamente uma condição de Neumann, por exemplo, uma condição de fluxo normal nulo é aplicada nesses contornos.

3.6.5 Distribuição de Singularidades

Funções potenciais são introduzidas pela distribuição de singularidades nos contornos do domínio do escoamento, essencialmente o casco e a superfície livre de ondas. A menos que seja aplicada a função de Green para equações de onda, conhecida como singularidade de Havelock, o que inerentemente satisfaz a condição de contorno linearizada da superfície livre, sendo então necessária apenas a distribuição de singularidades no casco. Segundo Heimann (2005), as singularidades (por exemplo, fontes ou dipolos) já satisfazem a equação de Laplace (55).

Normalmente, singularidades de fontes são distribuídas ao longo do domínio do escoamento e são integradas, resultando no potencial de perturbação:

$$\phi' = \iint_{S_D} -\frac{\sigma_q}{r_{pq}} dS \quad (63)$$

onde σ_q é a densidade de fontes por unidade de área no ponto q na superfície de contorno S_D , e r_{pq} é a distância do ponto q , onde está localizada a fonte, a um ponto arbitrário p onde o potencial será computado.

Substituindo (63) na condição de contorno cinemática do casco (60) o resultado é a equação integral de Fredholm do segundo tipo, que serve como uma relação explícita para as densidades desconhecidas de fontes no casco. Substituindo (63) na condição de contorno da superfície livre linearizada combinada (se existir uma superfície livre), o resultado são relações adicionais na superfície livre desconhecida. Então, uma solução simultânea de ambas as relações resulta nas procuradas e a priori desconhecidas densidades de fontes no casco e na superfície livre.

3.6.6 Discretização pelo Método de Painéis

Uma solução numérica requer a discretização dos contornos do domínio do escoamento, essencialmente o casco e uma parte significativa da superfície livre de ondas. Métodos de painéis discretizam os contornos em painéis triangulares ou quadráticos.

Métodos de painéis para computar o escoamento potencial ao redor de corpos tridimensionais foram desenvolvidos por Hess e Smith (1962). Eles introduziram painéis quadráticos planos com uma distribuição constante de singularidades de modo a aproximar o problema dos valores de contorno. Assim, os painéis quadráticos planos são gerados a partir dos pontos de entrada, sendo equivalentes aos pontos de deslocamento, que são dispostos ao longo das seções do casco e curvas de perfil, localizados diretamente na superfície do casco. Entretanto, é impossível conectar os pontos de entrada por painéis quadráticos planos ao longo da superfície curva do casco sem a ocorrência de espaçamentos entre as extremidades dos painéis.

No método original de Hess e Smith, os painéis quadráticos planos são determinados a partir dos pontos de entrada, de forma que os vértices dos painéis estão pelo menos o mais próximo possível da ordenação dos pontos de entrada, e que a direção normal aos painéis seja uma boa aproximação da normal à superfície real do casco.

As condições de contorno são aplicadas a cada painel, em um ponto de controle do painel, que no método original é um ponto que não induz velocidade no seu próprio plano. Como esta determinação requiere a solução adicional de equações não-lineares simultâneas, usualmente esse ponto é aproximado como sendo o centroide do painel. Mais tarde, Hess (1972, 1979) estendeu o método a painéis curvos de ordens mais altas com uma distribuição linear de singularidades através dos painéis e para as superfícies elevadas.

Como uma consequência da discretização do problema dos valores de contorno, as equações integrais são transformadas em somatórios, resultando em uma relação explícita para as densidades desconhecidas de fontes nos painéis σ_j :

$$\sum_{j=1}^{N_{FS}} \sigma_j A_{ij} = B_i \quad i = 1, \dots, N_{FS} \quad (64)$$

onde A_{ij} indica o coeficiente de influência do painel j à velocidade no painel i , B_i é o termo não-homogêneo ao painel i . N_{FS} é o número total de painéis, incluindo os painéis do casco e da superfície livre. Os coeficientes de influência A_{ij} são determinados através das velocidades induzidas X_{ij} , Y_{ij} e Z_{ij} nas suas respectivas direções e, no caso da parte da superfície livre, pelas velocidades e derivadas de velocidade da solução-base. X_{ij} , Y_{ij} e Z_{ij} são quantidades geométricas puras, representando a porção induzida do painel j à velocidade do painel i nas direções x , y e z , respectivamente.

O domínio da superfície livre é discretizado pelos painéis de Rankine. A condição de contorno linearizada é satisfeita de uma maneira discreta nos pontos de colocação dos painéis da superfície livre. Desta maneira, a elevação da superfície livre é avaliada de uma maneira discreta com a elevação do ponto de colocação i , dado pela condição de contorno linearizada da superfície livre (61):

$$\left\{ \begin{aligned} \zeta_i &= \frac{1}{2} F_N^2 [1 + \Phi_{xi}^2 + \Phi_{yi}^2 + \Phi_{zi}^2 - 2(\Phi_{xi}\Phi_{xi} + \Phi_{yi}\Phi_{yi} + \Phi_{zi}\Phi_{zi})] \\ i &= N_H + 1, \dots, N_{FS} \end{aligned} \right. \quad (65)$$

com $\Phi_x = \partial\Phi/\partial x$, etc. e $N_H < i \leq N_{FS}$ para os painéis da superfície livre.

3.6.7 Solução Numérica

A equação (65) estabelece um sistema linear de equações para as densidades desconhecidas de fontes nos painéis do casco e da superfície livre. Mas, já que a condição da superfície livre será aplicada na a priori desconhecida superfície livre, um esquema de solução iterativa é usado. Em cada iteração o problema do valor de contorno é linearizado com base na solução da iteração anterior. O procedimento é o seguinte:

1. Computar uma solução-base, por exemplo, adotando uma condição de Neumann homogênea no plano longitudinal (linha de centro do navio) na superfície livre não-perturbada;
2. Usar as velocidades do passo anterior para calcular a elevação da superfície livre a partir da condição dinâmica linearizada da superfície livre (58) na superfície livre não-perturbada;
3. Mover os painéis da superfície livre para a nova superfície livre calculada no passo anterior;
4. Mover a última solução conhecida do escoamento para a panelização ajustada da superfície livre do passo anterior, sem ser recalculado;
5. Resolver o problema do valor linearizado de contorno de acordo com (12) na superfície livre atual;
6. Aplicar a solução do passo anterior para ajustar a elevação da superfície livre de acordo com a condição dinâmica linearizada da superfície livre;
7. Continuar a partir do passo 3 até a convergência.

Uma convergência consistente é necessária para a máxima variação de onda, para a máxima variação de densidades de fontes e, se for possível o livre ajuste, para o trim e o afundamento do casco em sucessivas iterações.

Segundo Janson (1997), a resistência de onda é calculada a partir da solução convergida pela integração dos componentes da pressão longitudinal ao longo do casco.

3.7 TEORIA DE OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA

Nesta seção é apresentada a formulação matemática genérica de um problema de otimização hidrodinâmica de um casco. Na configuração de um código de otimização são utilizadas variáveis de projeto e condições de contorno, ou restrições, para a caracterização do problema. As variáveis de projeto são responsáveis por controlar a variação da geometria do casco durante o processo de otimização, e as restrições, podendo ser do tipo de igualdade ou desigualdade, são responsáveis por limitar essas variações, de forma que caso uma geometria candidata atinja um determinado intervalo de variação definido como indesejável, esta será descartada durante o processo.

De acordo com Bagheri (2014), a função a ser maximizada ou minimizada por estes parâmetros é tida como a função-objetivo, sendo o seu valor um critério determinante da eficiência da metodologia de otimização proposta. Se um problema de otimização utiliza apenas uma função-objetivo, esta otimização é denominada de objetivo único, e se utiliza duas ou mais funções-objetivo, é denominada multi-objetiva. Uma formulação padrão de um problema de otimização é apresentada a seguir:

$$\text{Otimizar: } F(\bar{x}) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (66)$$

$$\text{Sujeito à: } \begin{cases} h_i(\bar{x}) = 0 & i = 1, \dots, q \\ g_i(\bar{x}) \leq 0 & i = 1, \dots, p \end{cases} \quad (67)$$

onde $f_i(\bar{x})$ é uma função-objetivo, m é o número de funções-objetivo, q é o número de restrições de igualdade, p é o número de restrições de desigualdade e $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n) \in \mathcal{F} \subseteq S$ é uma solução individual. O conjunto $S \subseteq \mathbb{R}^n$ define o espaço de investigação e o conjunto $\mathcal{F} \subseteq S$ define um espaço de investigação viável. O espaço de investigação S é definido como um retângulo n -dimensional em $\mathbb{R}^n$, ou seja, determinado pelas restrições mínimas ($l(i)$) e máximas ($u(i)$) aplicadas:

$$l(i) \leq x_i \leq u(i) \quad 1 \leq i \leq n \quad (68)$$

As restrições definem o espaço de investigação viável, ou seja, se o vetor solução $\bar{x}$ está em concordância com as restrições de igualdade $h_i(\bar{x})$ e com as restrições de desigualdade $g_i(\bar{x})$, ele está contido no espaço viável.

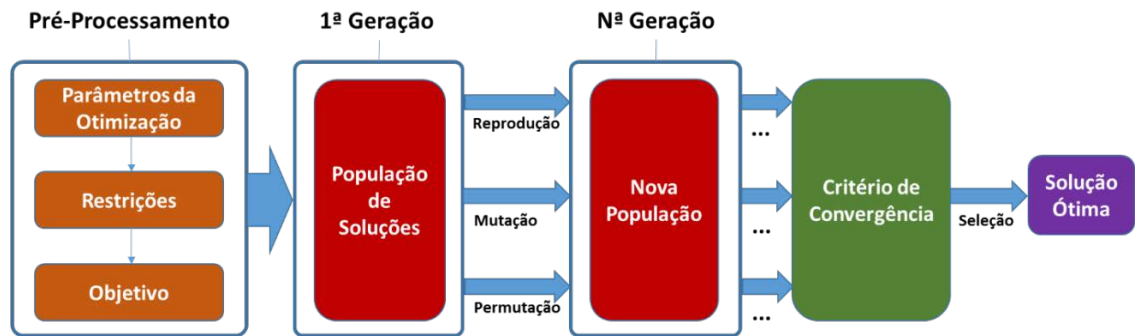
3.8 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO EVOLUTIVOS E GENÉTICOS

Dentre os vários tipos de algoritmos de otimização, um dos mais utilizados atualmente por sua versatilidade são os algoritmos evolutivos. Baseados em uma série de mecanismos de evolução biológica observados na natureza, os algoritmos evolutivos podem ser utilizados em várias áreas distintas, por tratarem de objetos abstratos de uma população.

Na área de algoritmos evolutivos, um dos subtipos desenvolvidos mais recentemente é o dos algoritmos genéticos, como o NSGA-II. Inspirados pela teoria evolutiva de Darwin, estes algoritmos se baseiam no processo da seleção natural, seguindo o princípio da “sobrevivência do mais apto”, ou seja, intervalos de variações de parâmetros que influenciam positivamente o resultado final são conservados durante o processo de otimização.

Por exemplo, consideremos uma função-base a ser minimizada. Um conjunto de soluções candidatas (“população”) são geradas aleatoriamente, sendo a qualidade (“aptidão”) de cada uma delas avaliada pela função-objetivo dentro do domínio do problema, configurando uma medição abstrata de aptidão. Desta forma, as melhores soluções são escolhidas para conceber a próxima geração com a aplicação de operadores de recombinação (“*crossover*”) ou mutação. O operador de recombinação é utilizado de forma a gerar novas soluções candidatas a partir das já existentes, onde duas ou mais soluções (“genitores”) são escolhidas a partir da população e algumas de suas partes são permutadas, gerando um ou mais descendentes. O operador de mutação é utilizado de forma a gerar um descendente a partir da modificação de algumas partes de uma solução candidata. A aplicação dos operadores de recombinação e mutação ocasiona a competição de um conjunto de novas soluções candidatas com as candidatas anteriores por um lugar na próxima geração, de acordo com as suas aptidões. Um esquema de um algoritmo genético é ilustrado na figura 3.8.

Figura 3.8. Esquema de um Algoritmo Genético



Este processo pode ser repetido até que uma solução com suficiente qualidade de parâmetros (“aptidão”) seja obtida, ou até que limite de tempo computacional definido seja atingido. A aplicação dos operadores probabilísticos de recombinação e mutação possibilita o aprimoramento dos valores de aptidão em populações consecutivas.

Segundo Eiben e Smith (2003), as variáveis de um algoritmo genético são divididas em duas categorias: variáveis-objeto e variáveis genéticas. No domínio do problema, estas variáveis são geralmente representadas como vetores de valor real, já que este tipo de algoritmo é normalmente utilizado para parâmetros contínuos. Uma representação de uma variável em um algoritmo genético é dada a seguir:

$$\langle x_1, \dots, x_n \rangle \quad (69)$$

onde x_1 é a variável-objeto.

Em mutações neste tipo de variável, cada vetor (“gene”) é suscetível a modificações pela probabilidade de mutação (variável genética) dentro dos limites definidos pelas restrições mínimas e máximas. A metodologia de mutação para $i \in \{1, \dots, n\}$ é a seguinte:

$$\langle x_1, \dots, x_n \rangle \rightarrow \langle x'_1, \dots, x'_n \rangle \quad (70)$$

onde $x_1, x'_1 \in [l(i), u(i)]$.

A recombinação dispersa é um dos principais tipos de recombinação utilizada em algoritmos genéticos. Este tipo de recombinação gera um vetor binário aleatório, de forma que genes selecionados de uma primeira solução candidata tem um valor vetorial igual a um (1), e os selecionados de uma segunda tem um valor igual a zero (0). O modelo de seleção (μ, λ) (onde as soluções genitoras μ não competem com as descendentes λ para passar à nova geração) apresenta algumas vantagens sobre o seu competidor, o modelo de seleção genética $(\mu + \lambda)$ (onde as melhores soluções μ são selecionadas para competir com as soluções λ), mas o modelo $(\mu + \lambda)$ é um mecanismo de seleção elitista que conserva as melhores soluções de cada geração.

4 RECURSOS COMPUTACIONAIS

4.1 GEOMETRIA

Os cascos base a serem analisados foram modelados a partir dos planos de linha fornecidos, primeiramente tratados no *Software* AutoCAD versão 2018, como ilustrado na figura 4.1, e modelados tridimensionalmente no Inventor Professional versão 2018, ambos *Softwares* CAD amplamente utilizados ao redor do mundo para as mais amplas aplicações de engenharia.

O protótipo do casco tridimensional foi exportado no formato genérico IGES para importação no *Software* de análise e simulação SHIPFLOW, sendo apenas o bordo de boreste (BE), de acordo com as configurações padrões para a simulação de escoamentos simétricos, como ilustrado na figura 4.2. Para efeitos de redução da complexidade da malha a ser gerada e consequente redução da probabilidade de ocorrência de erros nas iterações, as bolinas e o convés na região da proa originalmente existentes no protótipo foram removidas, já que essas superfícies não são objeto de análise na otimização pretendida.

Figur.4.1. Plano de Linhas do Protótipo da LE-M no AutoCAD 2018

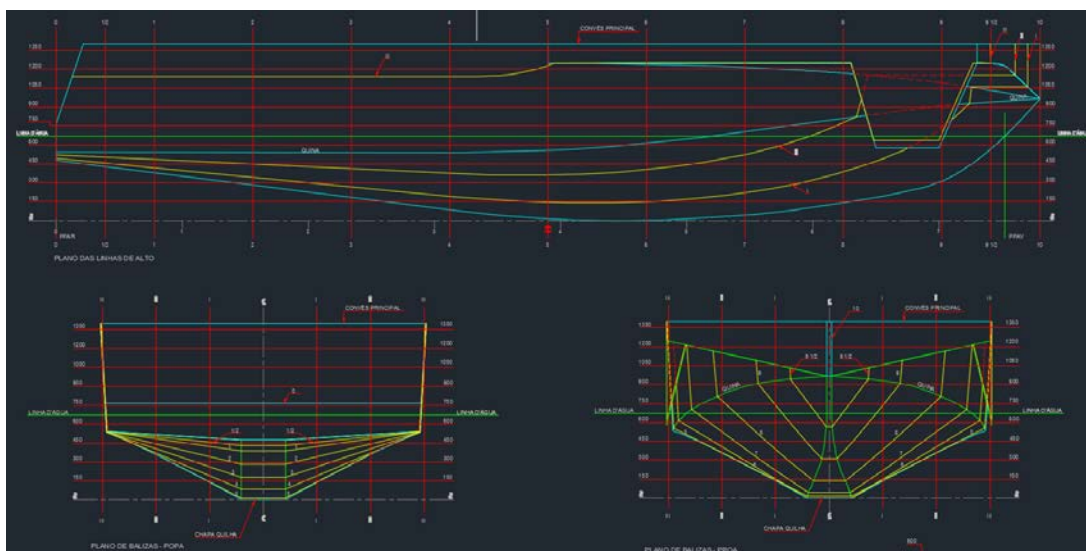
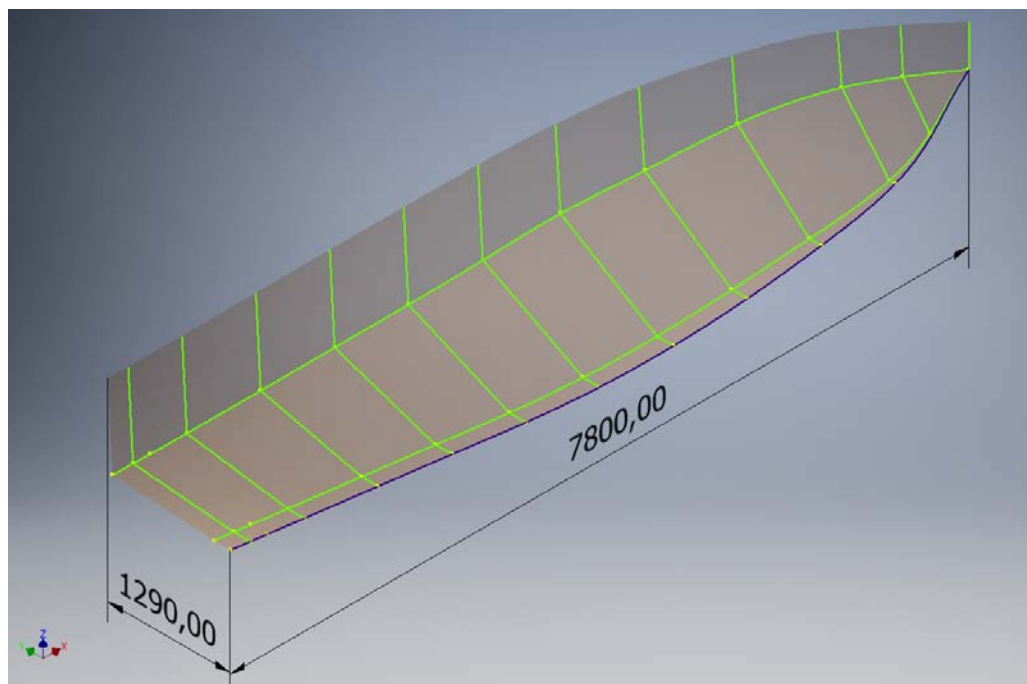


Figura 4.2. Casco Tridimensional da LE-M (BB) no Inventor Professional 2018



4.2 ESCOAMENTO

O *Software* CAESES é uma plataforma CAD integrada com ferramentas de simulação e otimização em uma só interface. Desta forma, na versão atual, 4.3.1, projetos e estudos de engenharia podem ser realizados na mesma plataforma, desde a concepção em CAD até posteriores simulações e otimizações.

O *Software* SHIPFLOW é um código especialmente projetado para o cálculo hidrodinâmico de navios e otimização em CFD, estando integrado à interface do *Software* CAESES. O SHIPFLOW é dividido em módulos para computar a superfície livre de escoamento potencial, a camada limite ao redor do casco, efeitos de escoamento viscoso e arrasto. O método de geração de malha é automatizado na sua configuração padrão, mas oferece vários mecanismos de controle, permitindo a modificação dos parâmetros de entrada e saída pelo usuário.

Na versão atual, 6.3.02, são fornecidos mecanismos de controle da interface, como a modificação dos dados de entrada e saída da geometria dos painéis, modificação dos coeficientes de influência dos cálculos e parâmetros para

o controle da execução dos módulos. A seguir serão descritos os módulos do *Software SHIPFLOW*, suas principais capacidades e funcionalidades, na ordem em que são acessados pelo programa.

4.2.1 Descrição dos Módulos

Nesta seção os módulos componentes do código do SHIPFLOW serão apresentados, assim como as suas principais capacidades e funcionalidades.

4.2.1.1 Módulo XMESH

O XMESH é um gerador de painéis para o módulo de escoamento potencial XPAN. O XMESH pode ser executado como um programa em separado para checar a panelização do casco ou da superfície livre antes que a computação do escoamento potencial seja executada.

O módulo XMESH também é executado durante a computação do escoamento potencial, quando iterações não-lineares ou de trim/afundamento são realizadas e a panelização é atualizada a cada iteração. Pontos fora do casco também podem ser gerados utilizando o módulo XMESH, sendo utilizados em computações de escoamento potencial quando os resultados são apresentados para o fluxo em tais pontos.

4.2.1.2 Módulo XPAN

O XPAN é o módulo responsável pelo cálculo de escoamento potencial ao redor de corpos tridimensionais baseado no método de Rankine, um método de distribuição de singularidades em painéis na superfície.

Diversas configurações de escoamento podem ser analisadas, considerando ou não a influência de uma superfície livre, a computação de uma malha isolada para simular a separação ao redor de uma popa do tipo transom, assim como fixar ou não os movimentos de afundamento (*heave*) e trim. Múltiplas velocidades de teste e direções de escoamento podem ser simuladas, com a opção de

consideração da influência do propulsor através de superfícies de levantamento, efeitos de águas rasas e escoamentos em canais com dimensões restritas.

Os métodos de cálculo podem ser pré-configurados, com a utilização de painéis de primeira ordem ou ordens superiores e condições de contorno lineares ou não-lineares para a superfície livre. O fluxo pode ser calculado apenas para um bordo, para cascos simétricos, ou para a embarcação global, no caso de cascos assimétricos ou cálculos considerando a influência do propulsor, quando em número ímpar. Além disso, os valores de velocidade e pressão podem ser calculados em pontos especificados fora do casco.

No pós-processamento, várias características do escoamento ao redor de cascos podem ser acessadas e analisadas, como a resistência de ondas por integração de pressões ou por cortes transversais de onda, e os padrões de elevação de ondas, seja na linha d'água ou em cortes transversais e longitudinais a distâncias especificadas do casco. Os contornos de pressão e vetores de velocidade ao redor do casco podem ser delimitados, juntamente com valores das variações de afundamento, trim, forças de sustentação e de arrasto induzido.

O XPAN cria um arquivo de dados que é acessado pelo XBOUND, XGRID e XCHAP. Este arquivo contém todos os resultados da computação do escoamento potencial necessários para a execução do XBOUND e XCHAP no método zonal.

4.2.1.3 Módulo XBOUND

O XBOUND é um módulo para a computação da camada limite. As equações de integração do momento para a camada limite são resolvidas ao longo de linhas de corrente, traçadas pelo cálculo do escoamento potencial, acessadas através do arquivo de dados gerado pelo XPAN.

O XBOUND também é capaz de computar a camada limite laminar e a transição para a camada limite turbulenta para casos mais simples, com um ponto ou linha de estagnação definidos. Os cálculos podem ser realizados para uma superfície lisa ou para uma superfície com uma rugosidade especificada.

Entre as características da camada limite que podem ser computadas no XBOUND, estão a espessura da mesma, do deslocamento e do momento. O fator de forma da embarcação também é fornecido, assim como o coeficiente friccional, que é deduzido através da fricção integrada sobre uma região especificada do casco. Sob parâmetros pré-definidos pela configuração padrão ou pelo usuário, a transição entre o escoamento laminar e turbulento também é calculada.

O XBOUND cria um arquivo de dados que é acessado pelo XCHAP. Este arquivo contém todos os resultados da computação da camada limite necessários para a execução do XCHAP no método zonal.

4.2.1.4 Módulo XGRID

O XGRID é o módulo responsável pela geração da malha para as simulações de escoamento viscoso no XCHAP.

A configuração padrão de concentração de elementos é mais alta na região próxima ao casco e em planos no eixo x próximos às linhas de singularidade e na região da popa, onde os efeitos de viscosidade e interação com o propulsor são mais atuantes, demandando um maior refino para a convergência dos cálculos do XCHAP. Entretanto, quaisquer áreas especificadas da malha podem ser refinadas ou engrossadas pelo usuário na pré-configuração.

Em cascos com uma popa transom, uma malha adicional é criada nessa área para o XCHAP. Para cascos assimétricos, a malha deve ser espelhada, demandando mais tempo computacional. O módulo é compatível com cascos com patilhão duplo, mas não reconhece demais apêndices.

4.2.1.5 Módulo XCHAP

O XCHAP é um código de volumes finitos que resolve as equações médias de Navier-Stokes por Reynolds (RANS, Reynolds-Averaged Navier-Stokes) e também utiliza vários modelos de turbulência (EASM, $k-\omega$ BSL, $k-\omega$ SST). O cálculo pode ser realizado pelo método global ou zonal. O módulo pode reconhecer malhar sobrepostas.

As condições de contorno de entrada são geradas pelos resultados fornecidos pelo XPAN e XBOUND quando o método zonal é utilizado. O módulo também pode utilizar malhas estruturadas definidas por blocos, providas de um gerador externo de malha. Estas malhas podem ser tanto o casco completo, sem que nenhuma malha do XGRID seja necessária, quanto malhas apêndices que são adicionadas à malha do XGRID.

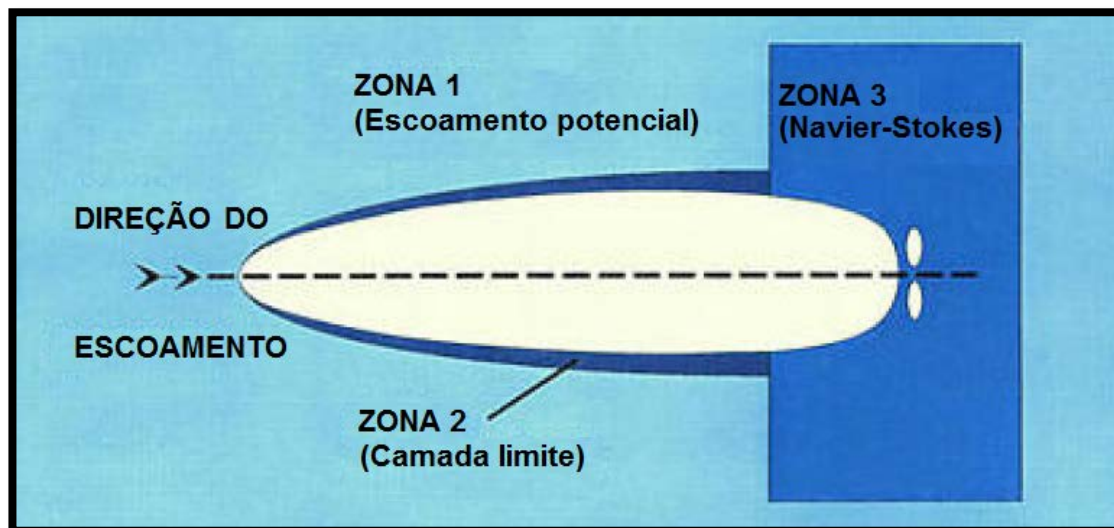
Após a computação, várias grandezas podem ser acessadas e analisadas no pré-processamento, como os campos de velocidade e pressão. Também são fornecidos os valores da energia cinética turbulenta, coeficiente de fricção local e de resistência de fricção e pressão para a parte do casco coberta pela malha. Ao final, é fornecido o valor da resistência total e seus componentes, utilizando os resultados dos módulos XPAN, XBOUND e XCHAP.

4.2.2 Esquema de Separação Zonal do Escoamento em Torno do Casco

Em sua configuração padrão, o *Software* SHIPFLOW divide o escoamento em três zonas, atribuindo cada módulo a uma zona onde o seu efeito hidrodinâmico é predominante, de forma a otimizar o tempo computacional e mantendo uma precisão satisfatória dos resultados. O esquema zonal é ilustrado na figura 4.3.

Para a obtenção de resultados mais consistentes, pode-se executar o módulo para o cálculo do escoamento viscoso ao longo de todo o casco (método global), mas o tempo computacional demandado inviabiliza a realização deste método para fins práticos.

Figura 4.3. Esquema de Separação Zonal do Escoamento do Software SHIPFLOW.



Fonte: FLOWTECH Int. AB (adaptado).

4.2.2.1 Zona 1 (Escoamento Potencial)

Na zona 1, é realizado o cálculo do escoamento potencial. A panelização é realizada pelo módulo XMESH, pelo método dos painéis de Rankine, com condições de contorno lineares ou não-lineares para a superfície livre, com posição de flutuação dinâmica ajustável.

Os dados e coeficientes relativos ao fluxo potencial (linhas de fluxo e contornos de pressão e velocidade) e a elevação da superfície livre (CW e perfil do trem de ondas) são calculados pelo módulo XPAN, de acordo com os dados da panelização, fornecidos pelo XMESH.

4.2.2.2 Zona 2 (Escoamento da Camada Limite)

Na zona 2, é realizado o cálculo da camada limite. O módulo responsável pela modelagem e cálculo da camada limite laminar e/ou turbulenta é o XBOUND. As equações integrais de momento para a camada limite são calculadas ao longo de linhas de escoamento, determinadas a partir do cálculo do escoamento fluido potencial. O XBOUND pode calcular uma camada limite

laminar e a transição para uma camada limite turbulenta para casos mais simples, com um ponto ou linhas de estagnação bem definidos.

Os cálculos podem ser realizados tanto para superfícies sem atrito, quanto para superfícies com uma rugosidade especificada. Nos dados de saída, várias quantidades e coeficientes relativos à camada limite são especificados, como espessura da camada limite, fator de forma, coeficiente de fricção, etc., tanto para análise isolada, quanto para posterior acesso do módulo XCHAP, para a realização dos cálculos viscosos no método zonal.

4.2.2.3 Zona 3 (Escoamento Viscoso)

Na zona 3, é realizado o cálculo das equações RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), que determinam o escoamento sob influência da viscosidade.

A resolução das equações RANS irá fornecer a velocidade e pressão médias. Já que os termos flutuantes de velocidade e pressão são geralmente bem menores em amplitude, apenas os termos médios são suficientes para uma aproximação satisfatória.

5 METODOLOGIA DE ANÁLISE

No presente trabalho, é proposta a otimização da hidrodinâmica do casco da LE-M, de modo a reduzir a resistência de ondas R_{WP} e a resistência de ondas transversais $R_{WP\ trans}$. Desta forma, consequentemente haverá redução na amplitude das ondas geradas pelo casco, na resistência ao avanço e no consumo de combustível. Tais resultados configuram benefícios ambientais, econômicos e sociais, através da preservação das encostas dos rios, do barateamento do custo operacional da LE-M e da consequente oferta à população ribeirinha de mais uma opção de transporte escolar eficiente e adequado.

A partir dos dados do plano de linhas do atual protótipo da LE-M, é gerado um modelo numérico de superfícies no *Software* Autodesk Inventor Pro 2018. Posteriormente esta geometria é exportada para o *Software* CAESES no formato IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*, um formato geral aberto que traduz um sólido ou superfícies em linhas de texto, geralmente aceito pela maioria dos *Softwares* CAD). Após a importação, as superfícies são traduzidas em linhas de *offsets* pelo *Software* integrado SHIPFLOW, um formato mais adequado para a sua posterior análise zonal, de escoamento potencial e viscoso, de uma série de velocidades, abrangendo a velocidade de projeto e a velocidade máxima estipulada em projeto (8, 10, 13, 15, 18, 20, 23 e 25 km/h), de forma a se obter a curva de resistência característica do casco em uma condição de reboque. Estes resultados são validados com comparações com dados experimentais de uma prova de rio realizada com o protótipo em escala real da LE-M.

Com a curva de resistência do casco da LE-M, é realizada a simulação de uma versão modificada da mesma, com o intuito de se realizar a validação do código. A validação se dará pela comparação dos resultados de perfis de ondas e resistência total obtidos de ambos os cascos, com os resultados de simulações realizadas no *Software* ANSYS Fluent, com as mesmas geometrias e intervalo de velocidades, publicadas no artigo “*Methodology for Improvement of the Hydrodynamic Efficiency of an Amazon School Boat Utilizing a CFD Tool*” de MAIA et al (2017). Desta forma, será possível a comparação dos resultados com eventuais testes experimentais de reboque em tanques de prova, ou com provas de

mar com o protótipo em escala real, que não foram realizados no presente trabalho por restrições de tempo e recursos.

Após a validação do código, será apresentado o procedimento de otimização do casco da LE-M para a velocidade de projeto, com a utilização do algoritmo genético multi-objetivo NSGA-II, presente de forma nativa na interface CAESES. Através deste método, uma população de geometrias distintas é gerada, com base em intervalos de variação de parâmetros previamente determinados. A cada geração, as geometrias que mais se aproximarem do objetivo proposto podem sofrer permutação ou mutação, de acordo com a probabilidade determinada. Deste modo, a cada geração as geometrias são sucessivamente modificadas, até a convergência do casco ótimo final. Os parâmetros utilizados na otimização foram a resistência de onda R_{WP} e a resistência de ondas transversais $R_{WP\ trans}$ como objetivos e a variação do deslocamento como restrição.

5.1 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA

Nesta seção é apresentado um fluxograma com o detalhamento das principais fases da metodologia de simulação, englobando desde o cálculo do escoamento por separação zonal até o procedimento de otimização para a seleção da solução final. A estrutura do fluxograma é apresentada na figura 5.1.a e 5.1.b.

Figura 5.1.a. Fluxograma da Metodologia

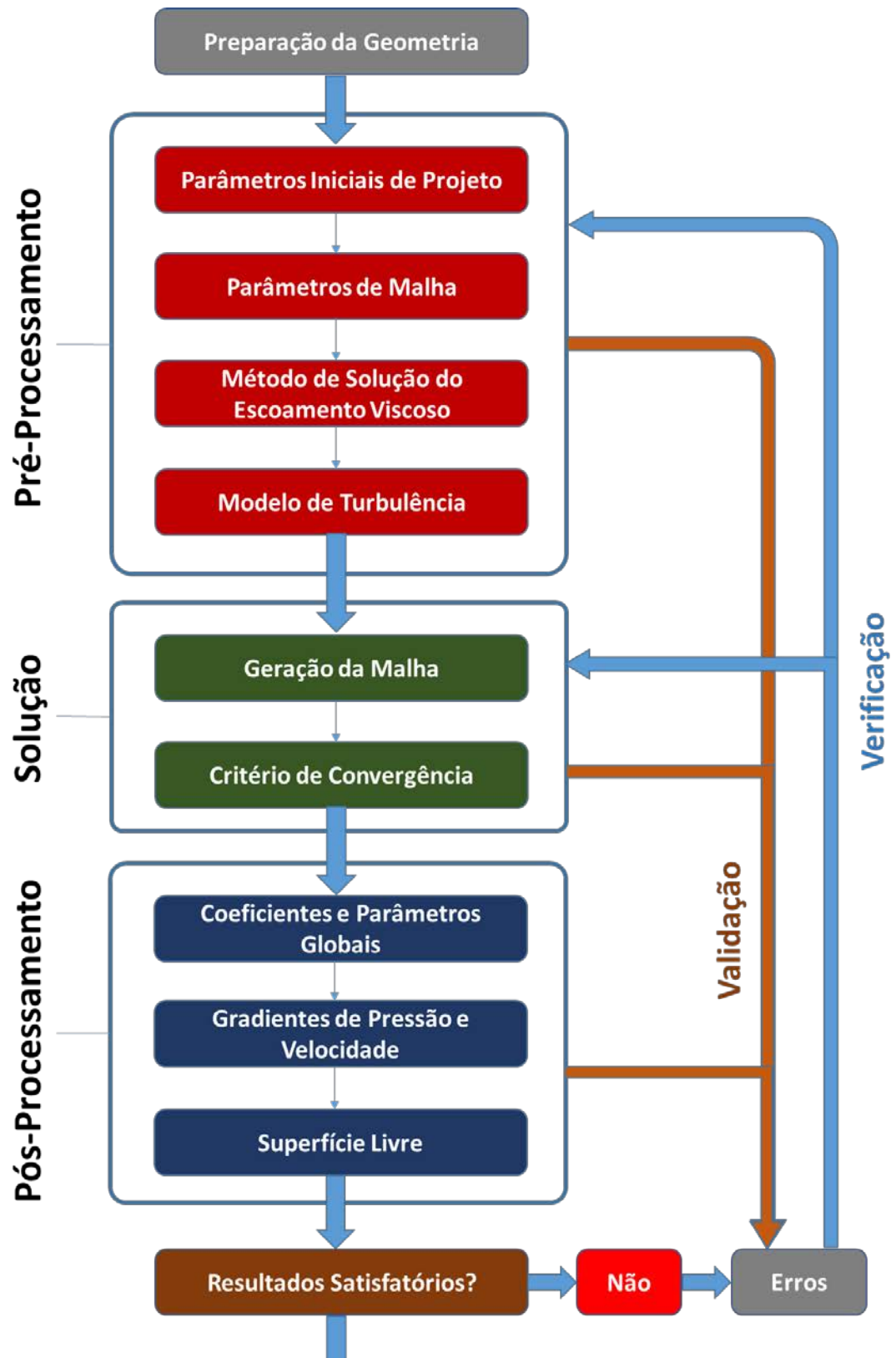
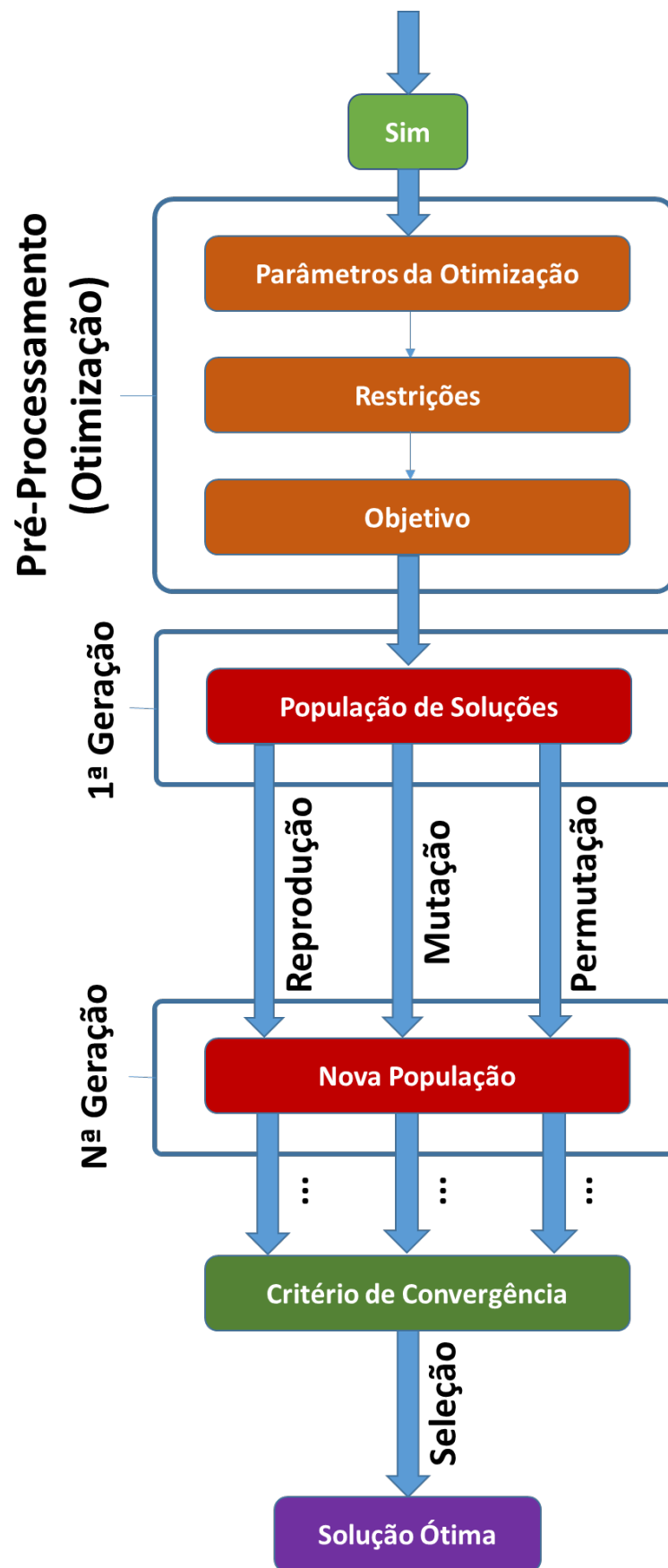


Figura 5.1.b. Fluxograma da Metodologia



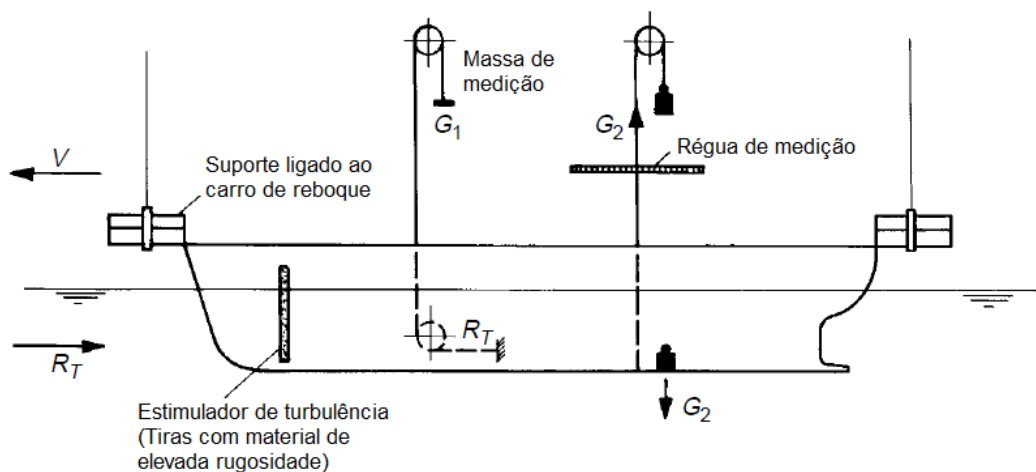
6 SIMULAÇÕES REALIZADAS

Na presente seção são apresentados os procedimentos realizados no sentido de caracterizar o problema de modelagem e simulação nas plataformas propostas. O detalhamento das configurações e dos parâmetros utilizados em cada etapa também é destacado.

As simulações em questão são baseadas em ensaios em um tanque de provas com um casco simétrico, onde a resistência total ao avanço a ser calculada (R_t) considera o casco em uma condição de reboque, ou seja, a um calado fixo, com restrição para movimentos livres de trim (rotação em torno do eixo Y, movimento de *pitch*) e de afundamento (movimentação longitudinal ao longo do eixo Z, movimento de *heave*), dando origem à hipótese de um escoamento simétrico em relação ao plano XZ.

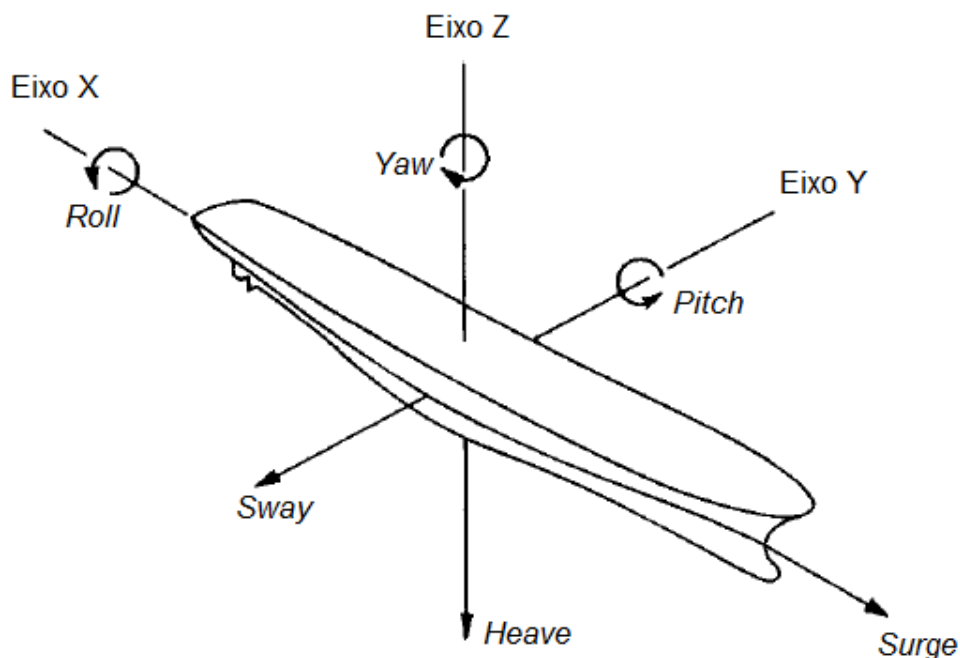
Desta forma, apenas um bordo da embarcação é simulado, ocorrendo uma economia de tempo e recursos computacionais empregados em comparação com a simulação do casco completo. Ao final do cálculo, o escoamento é espelhado para a obtenção do valor total de resistência. Um esquema para um teste em um tanque de provas é ilustrado na figura 6.1, e os graus de liberdade de uma embarcação são ilustrados na figura 6.2.

Figura 6.1. Esquema para Teste de Resistência em Tanque de Provas



Fonte: BERTRAM, 2000 (adaptado)

Figura 6.2. Os Seis Graus de Liberdade de uma Embarcação



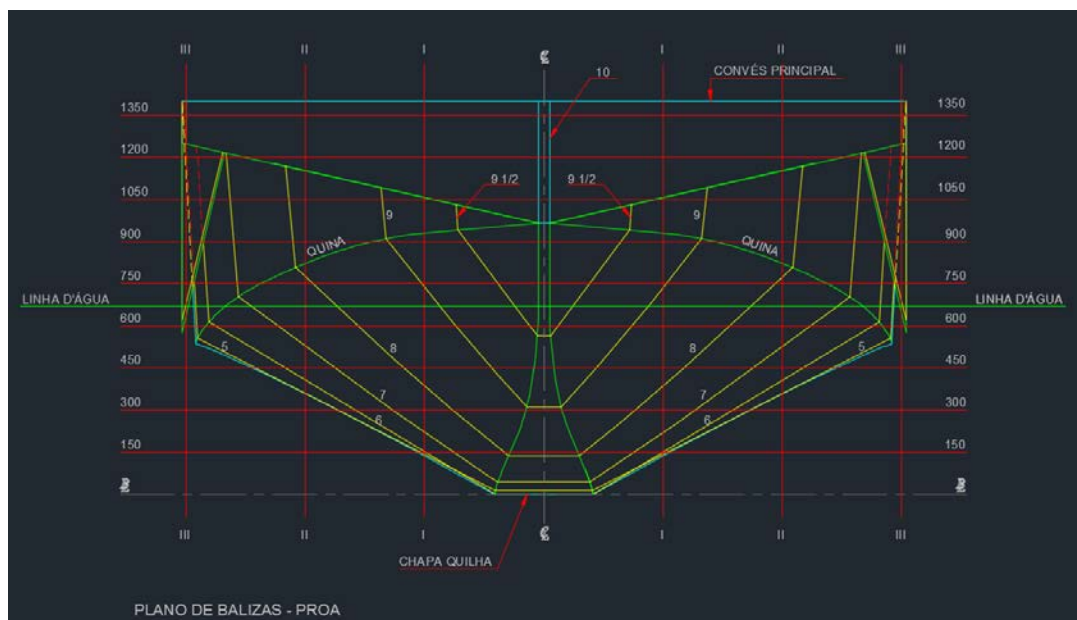
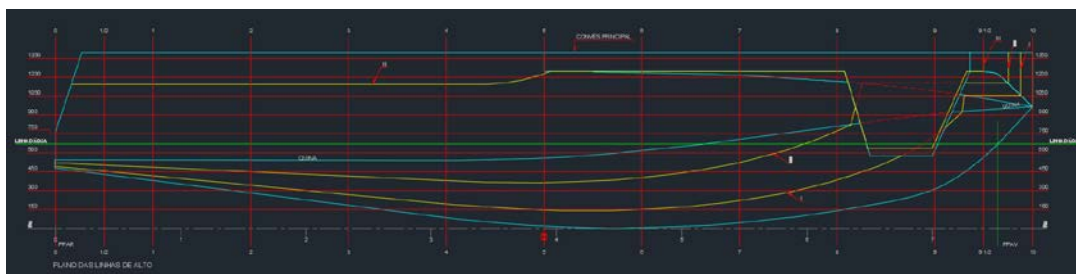
Fonte: BERTRAM, 2000 (adaptado)

6.1 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO – ESQUEMA DE SEPARAÇÃO ZONAL

6.1.1 Geometria

O tratamento da geometria é a fase inicial do processo de simulação, onde curvas e pontos são gerados de forma a representar o objeto de estudo na forma de superfícies ou sólidos, de acordo com a configuração determinada pelo usuário. A fidelidade da representação da geometria pode influir nas próximas fases, como na geração da malha ou até mesmo nos resultados finais, dependendo do efeito ou área a ser analisada.

No presente estudo, foram usados como base para a modelagem os planos de linhas da LE-M, ilustrados nas figuras 6.3 e 6.4, e as suas dimensões principais na tabela 6.1. As linhas foram tratadas no *Software AutoCAD* e posteriormente utilizadas como base para a modelagem do casco tridimensional no *Software Inventor Pro*.

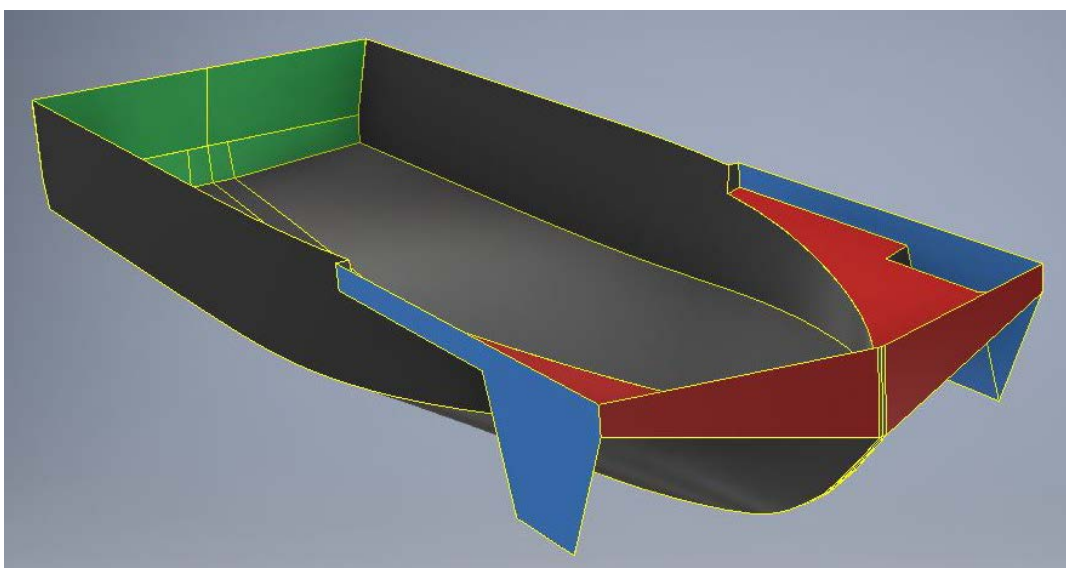
Figura 6.3. Plano de Balizas da Proa da LE-M**Figura 6.4. Plano das Linhas de Alto da LE-M****Tabela 6.1. Dimensões Principais da LE-M**

Comprimento total (L)	7,80 m
Comprimento entre Perpendiculares (Lpp)	7,52 m
Boca moldada (B)	2,58 m
Pontal moldado (D)	1,40 m
Calado de projeto	0,67 m

Importante salientar que o convés na região da proa e a bolina representados nas linhas foram removidos do modelo tridimensional, pois em cálculos preliminares, essas regiões de geometria complexa não foram devidamente reconhecidas pelo gerador de malha do SHIPFLOW, resultando em erros de cálculo. O modelo preliminar com os apêndices é ilustrado na figura 6.5.

Como o objetivo da simulação é a redução da resistência de geração de ondas pela modificação das linhas das obras vivas do casco, a remoção destes apêndices não influirá significativamente no resultado final. A função principal do convés de proa é o ganho de área útil no convés, principalmente para facilitar o embarque e desembarque de passageiros, e o da bolina, teoricamente seria a redução da geração de ondas divergentes, mas esse efeito ainda não foi experimentalmente comprovado, assim como se a redução dessa geração de ondas compensa o acréscimo de resistência friccional. O modelo tridimensional gerado no Inventor Pro é representado na figura 6.6.

Figura 6.5. Casco da LE-M Preliminar, com a Bolina em Azul, o Convés de Proa em Vermelho e a Popa Transom em Verde

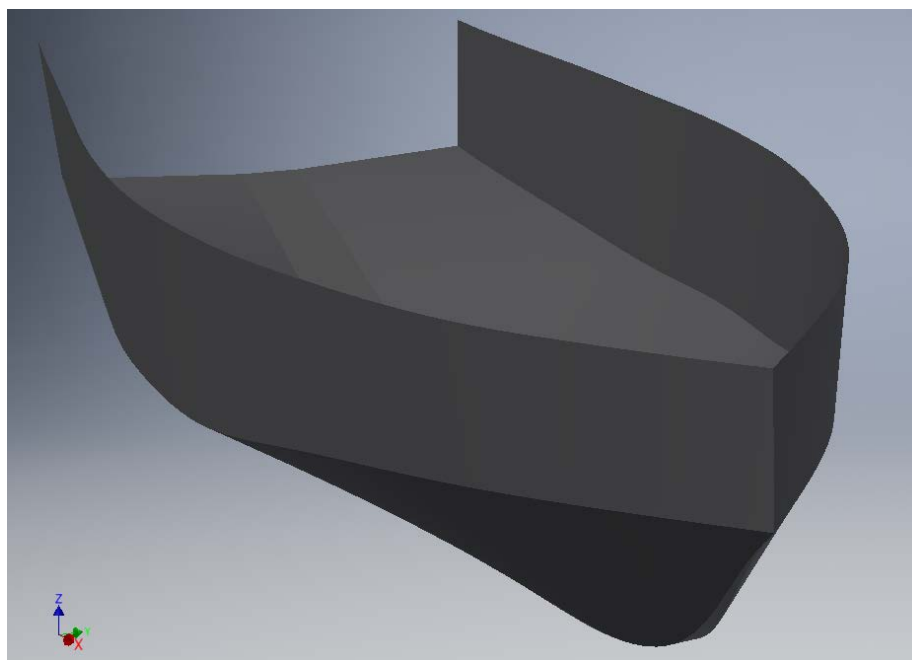


A superfície da popa transom também foi removida pelo motivo de não ser necessária para a geração da malha, pois na configuração padrão do SHIPFLOW, uma malha sobreposta é gerada nesta região de forma a evitar erros de interpolação do fundo à superfície livre. Outro ponto importante nesta etapa é a construção do modelo de acordo com a orientação padrão aceita pelo SHIPFLOW, de forma a evitar problemas futuros de referenciamento da geometria. Desta forma, a origem dos eixos cartesianos deve estar posicionada na linha de centro, alinhada com a popa da embarcação, o sentido positivo do eixo X

com o comprimento, o sentido positivo do eixo Y com a boca, sentido BB (bombordo) e o sentido positivo do eixo Z com o pontal.

Com a construção do modelo tridimensional finalizada, a geometria deve ser exportada em um formato adequado para o tipo de simulação proposta. O SHIPFLOW aceita vários tipos de formato, destacando-se o formato aberto IGES para simulações em esquema zonal, e o formato de base triangular STL para uma simulação do tipo global, onde é necessária uma malha com um alto grau de refinamento para a minimização de erros. Para este caso, a geometria foi exportada no formato IGES padrão, apenas com o bordo de bombordo (BB), ao se considerar a hipótese da simetria do escoamento em relação ao plano XZ.

Figura 6.6. Modelo Tridimensional da LE-M no Inventor Pro (ambos os bordos)

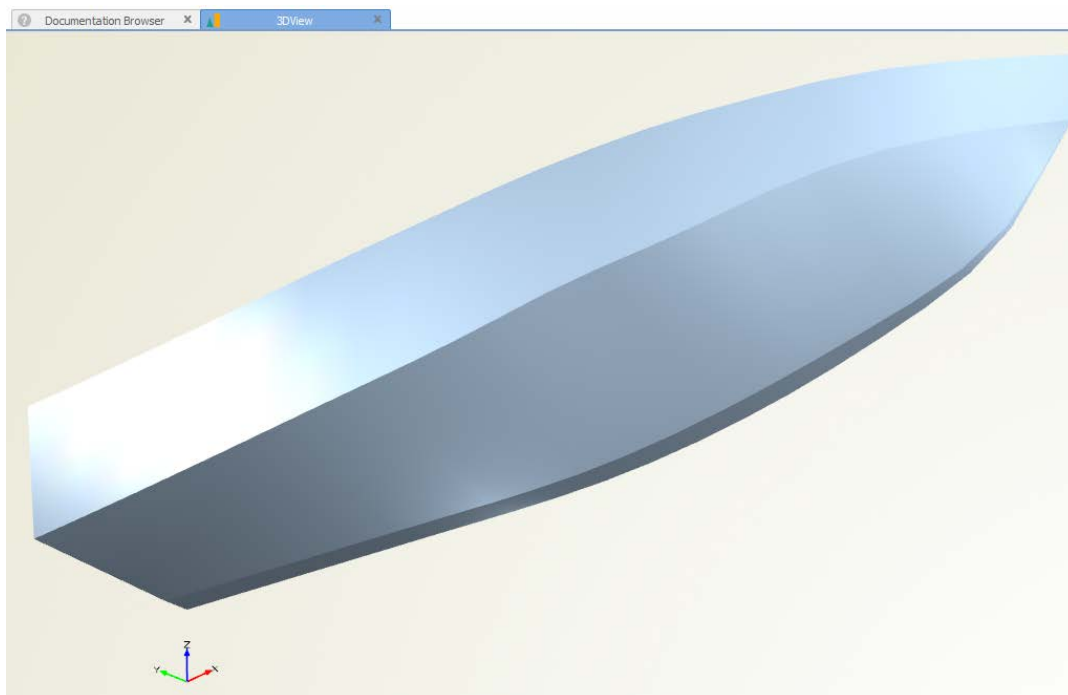


6.1.2 Importação da Geometria e Pré-Processamento

O arquivo da geometria, já salvo no formato IGES, é importado pelo menu da interface do CAESES, através da opção “IGES (Subset, Deprecated)”, onde poderá ser visualizado na janela 3D View, ilustrada na figura 6.7. Caso o modelo não tenha sido construído de acordo com o referenciamento aos eixos indicado na seção anterior, este deve ser corrigido de acordo, atribuindo os respectivos valores

aos subcomandos (*keywords*, palavras-chave), do comando *offset* do módulo XFLOW. A árvore de comandos é ilustrada na figura 6.8.

Figura 6.7. Janela 3DView do CAESES, Casco no Formato IGES (BB)



Para cada tipo de arquivo que pode ser importado, há uma palavra-chave específica do comando *offset* para determinar o endereço do arquivo-base. Com a entrada da palavra-chave, o módulo XFLOW reconhece a geometria e a converte automaticamente em *offsets* (balizas) separadas por regiões de proa (*bow*), casco principal (*main* ou *hull*) e popa (*tran*, para uma popa do tipo transom ou *stern*), que é o formato nativo do *Software* para a posterior geração da malha. Após a conversão, cada grupo deve ser especificado com a sua respectiva palavra-chave no comando de configuração dos parâmetros do casco *hulltype* do módulo XFLOW. O casco convertido em balizas é ilustrado na figura 6.9.

Figura 6.8. Árvore de Comandos para o Cálculo Zonal

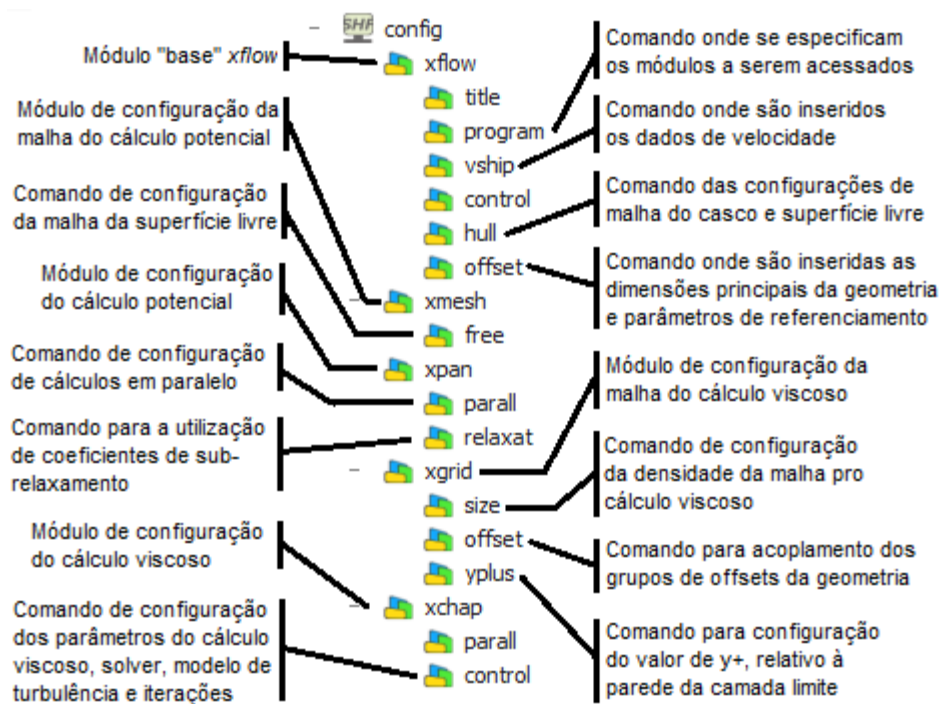
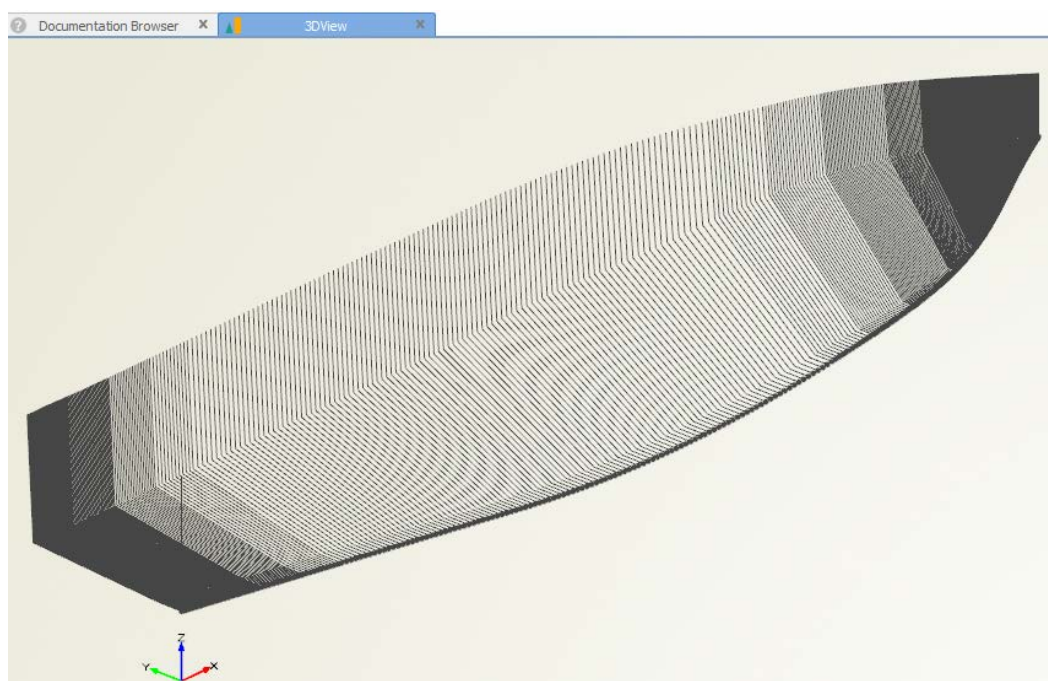


Figura 6.9. Janela 3DView do CAESSES, Casco Convertido em *offsets*



Após a importação da geometria e referenciamento, passa-se à fase de pré-processamento, que é a configuração de todos os parâmetros da simulação. No

módulo XFLOW, são determinadas as características principais da embarcação que serão utilizadas como base pelos outros módulos.

No comando *vship* é especificada a velocidade do ensaio, cujo formato nativo é a entrada do número de Froude F_n e do número de Reynolds R_e . A velocidade também pode ser especificada em metros por segundo, mas deve ser atrelada a um valor de comprimento de referência, escala de modelo, propriedades do fluido e gravidade, para o cálculo do F_n e R_e . No presente trabalho, foram simuladas as velocidades de 8, 10, 13, 15, 17 e 20 km/h, correspondendo aos números de Froude de 0,25 a 0,63. As velocidades de 23 e 25 km/h ($F_n = 0,73$ e $0,79$) também foram simuladas, mas não foi possível a convergência dos cálculos, mesmo com a variação dos parâmetros de malha e a utilização de fatores de sub-relaxamento. A possível causa da não-convergência nesses valores seria pela elevada ocorrência de fenômenos na superfície livre regidos pela viscosidade, nesta faixa de números de Froude acima de 0,7, como a quebra de ondas na região da proa e spray.

No comando *hulltype* são definidas as características do casco para a geração da malha, como tipo de casco (monocasco, catamarã, trimarã, etc.), densidade de painéis, elementos e singularidades, superposição de malha para popa transom (para evitar a redução de qualidade na área da popa) e aplicação de superfície livre de ondas para o cálculo potencial. Para cada velocidade, foram simuladas as três opções padronizadas de densidade de malha, grossa (*coarse*), média (*medium*) e fina (*fine*), que serão discutidas mais adiante. Como os cálculos potenciais apresentaram dificuldade de convergência ao se aproximarem do regime de semiplaneio, devido ao aparecimento de fenômenos regidos em maior parte pela viscosidade, diferentes valores de densidade de singularidades por painel (*fdens*) foram utilizados de forma a se atingir a convergência dos resultados. A janela de configurações do comando *hulltype* é ilustrada na figura 6.10, e os valores de *fdens* por velocidade são apresentados na tabela 6.2.

Figura 6.10. Janela de Configuração do Comando *hulltype*

The image shows a software window titled "hulltype" with a light blue header. Below the header, there are six configuration rows, each with a label, a value field, and two small icons (a red 'x' and a question mark). The rows are: "shiptype" with value "mono", "h1gr" with value "main", "fsflow" with an empty field, "tran" with an empty field, "xmdens" with value "medium", and "fdens" with value "0.5".

No módulo XMESH, é utilizado o comando de configuração da malha da superfície livre *free*, subcomando *df1*, que representa a taxa padrão de densidade de painéis na superfície livre e na popa transom adimensionalizada pela L_{pp} . De forma a auxiliar na convergência dos cálculos, esse valor foi variado a cada velocidade, juntamente com o *fdensi*, de acordo com recomendações do suporte técnico. Os valores de *df1* utilizados por velocidades são apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.2. Valores de *fdens* e *df1* por Velocidade.

Velocidade (Km/h)	F_n	<i>fdens</i>	<i>df1</i> (% da L_{pp})
8	0,254	0,5	0,05
10	0,318	0,5	0,05
13	0,413	0,5	0,05
15	0,476	0,5	0,05
17	0,540	0,3	0,07
20	0,635	0,2	0,09

No módulo XPAN, o cálculo potencial foi configurado de forma a se utilizar quatro núcleos de processamento paralelamente, no subcomando *nthread* do comando *parall*. Na velocidade de 20 km/h ($F_n = 0,63$), foi necessária a aplicação de um fator de sub-relaxamento de 0,1 na densidade de singularidades por painel, subcomando *rfsour*, comando *relaxat*, de forma a se atingir a convergência do cálculo.

No módulo XGRID, também foram utilizadas as três configurações padronizadas de refinamento de malha para cada velocidade, tratadas adiante. Relativo à configuração da função de parede, segundo a W.S. Atkins Consultants (2009), o intervalo apropriado de y^+ (distância adimensional do primeiro plano à parede do sólido) seria entre 11 e 100, sendo preferencialmente maior que 30. Desta forma, foi definido o valor médio de 40 para y^+ .

No módulo XCHAP, o cálculo viscoso também foi configurado de forma a se utilizar quatro núcleos de processamento paralelamente e o método de solução escolhido foi o padrão para o cálculo zonal, o método da direção implícita alternada (ADI, *Alternating Direction Implicit*). As simulações não foram realizadas pelo método global (escoamento totalmente viscoso) por motivo de restrições de tempo útil de computação. Acerca do modelo de turbulência, foram escolhidos dois tipos para cada velocidade, o modelo padrão EASM (*Explicit Algebraic Stress Model*) e o κ - ω SST, de forma a se realizar um estudo de convergência de malha que será tratado a seguir.

6.1.3 Estudo de Sensibilidade para os Parâmetros da Malha e Modelos de Turbulência

Como as equações referentes ao método de painéis e à camada limite são mais simples para se atingir a convergência, o estudo de malha será concentrado na malha para o cálculo viscoso, que utiliza o método de volumes finitos, ou FVM (*Finite Volume Method*). O estudo de convergência da malha será realizado para uma variação da densidade de elementos e para a variação do modelo de turbulência.

O módulo XGRID utiliza uma malha estruturada hexaédrica, e o volume de controle utilizado tem a forma de um quarto de cilindro, já que foi adotada a condição de simetria no plano XZ. Para o tamanho do volume de controle, foram utilizados os valores padrões, com um raio de $3L_{pp}$, um comprimento de $1,3L_{pp}$, ilustrado na figura 6.11. Como foi utilizado o método de separação zonal do escoamento, a malha foi gerada da meia-nau até a popa da embarcação.

As condições de contorno são determinadas automaticamente nas superfícies limítrofes do volume de controle, de acordo com os parâmetros

especificados na etapa de pré-processamento. As condições adotadas são ilustradas na figura 6.12. Na região do casco a condição é de não-eskorregamento (*no-slip*), onde ocorre a principal interação com o fluido, sendo a velocidade do escoamento normal à superfície igual a zero e tangencialmente igual à velocidade da superfície. Nos planos de simetria (*symmetry*) e da superfície livre, a condição adotada é de eskorregamento (*slip*), onde os planos não interpõem resistência ao escoamento. Nos planos de entrada (*inlet*) e saída (*outlet*), a velocidade do escoamento é dada pela velocidade do teste especificada na etapa de pré-processamento.

Apesar do módulo permitir o detalhamento manual da malha através de zonas e modificação de parâmetros específicos, são oferecidas quatro configurações padrão de refino, *very coarse* (muito grossa), *coarse* (grossa), *medium* (média) e *fine* (fina). Para o estudo de convergência da malha, foram realizadas as simulações para cada velocidade com as configurações *coarse*, *medium* e *fine*, além da variação dos modelos de turbulência EASM e $k-\omega$ SST. A figura 6.13 ilustra o número de elementos para cada configuração, indo de 446.368 elementos na configuração *coarse* até 1.218.078 elementos na configuração *fine*, e as figuras 6.14 a 6.16 ilustram as malhas geradas por cada configuração.

Figura 6.11. Domínio de Controle da Simulação

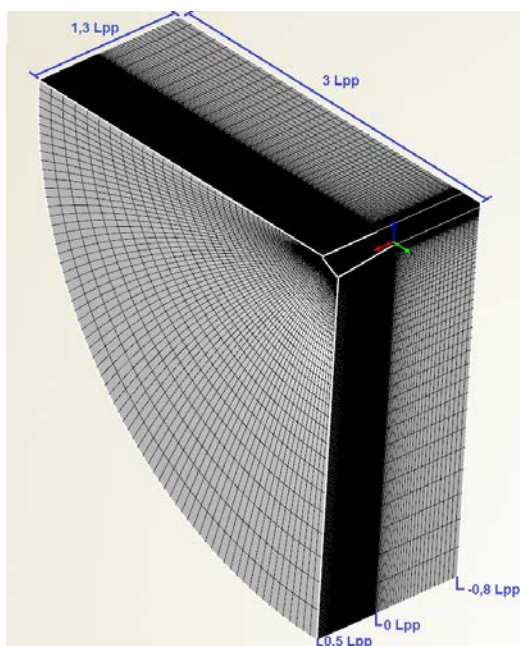


Figura 6.12. Regiões e Condições de Contorno

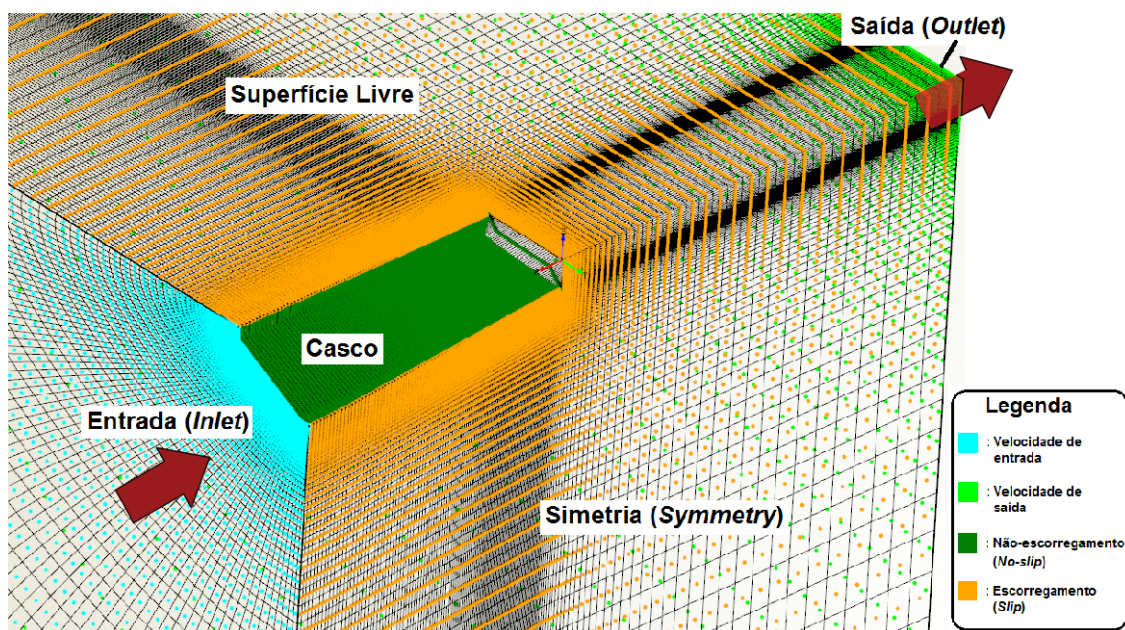


Figura 6.13. Número de Elementos por Densidade de Malha

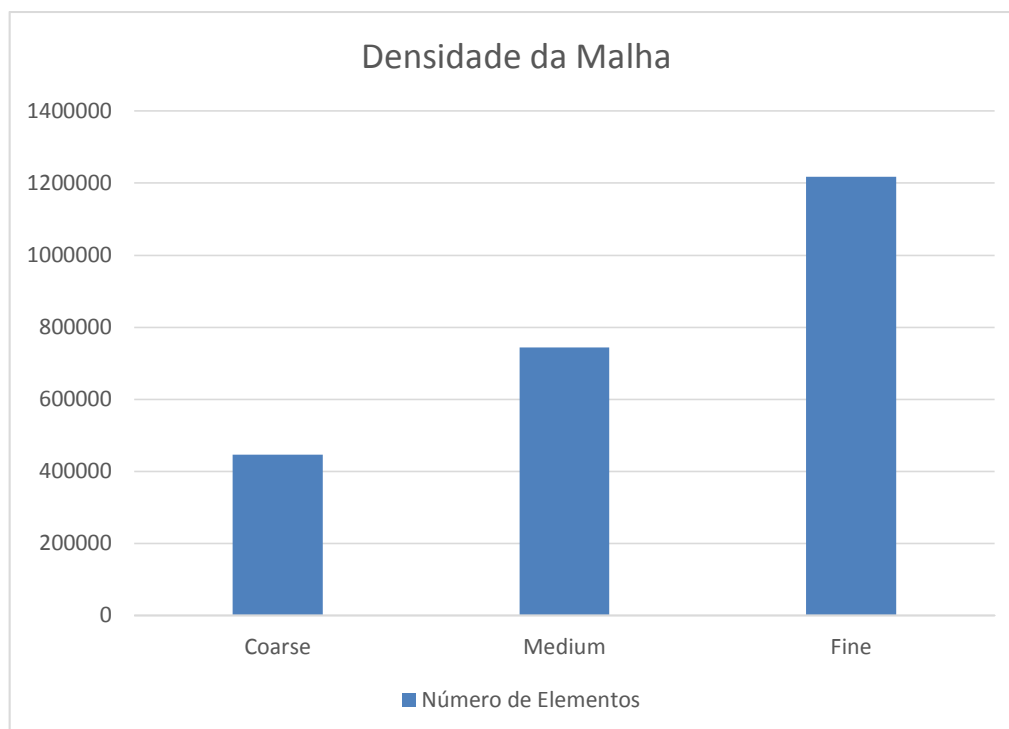


Figura 6.14. Malha Gerada na Configuração *coarse*, 446.368 Elementos

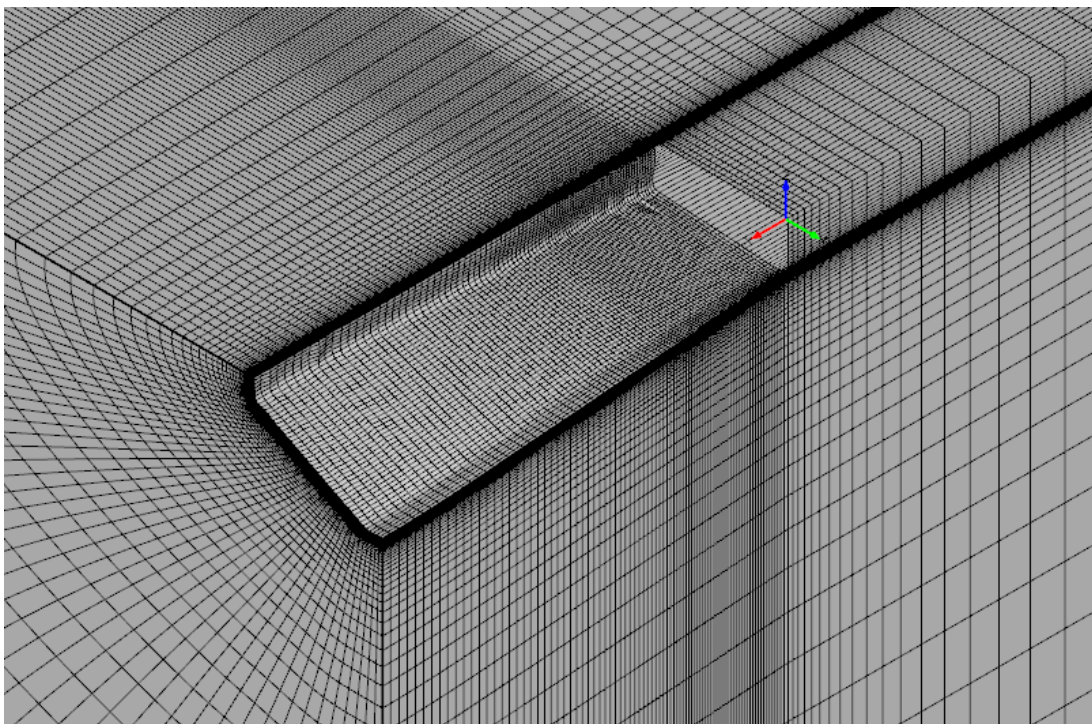


Figura 6.15. Malha Gerada na Configuração *medium*, 744.372 Elementos

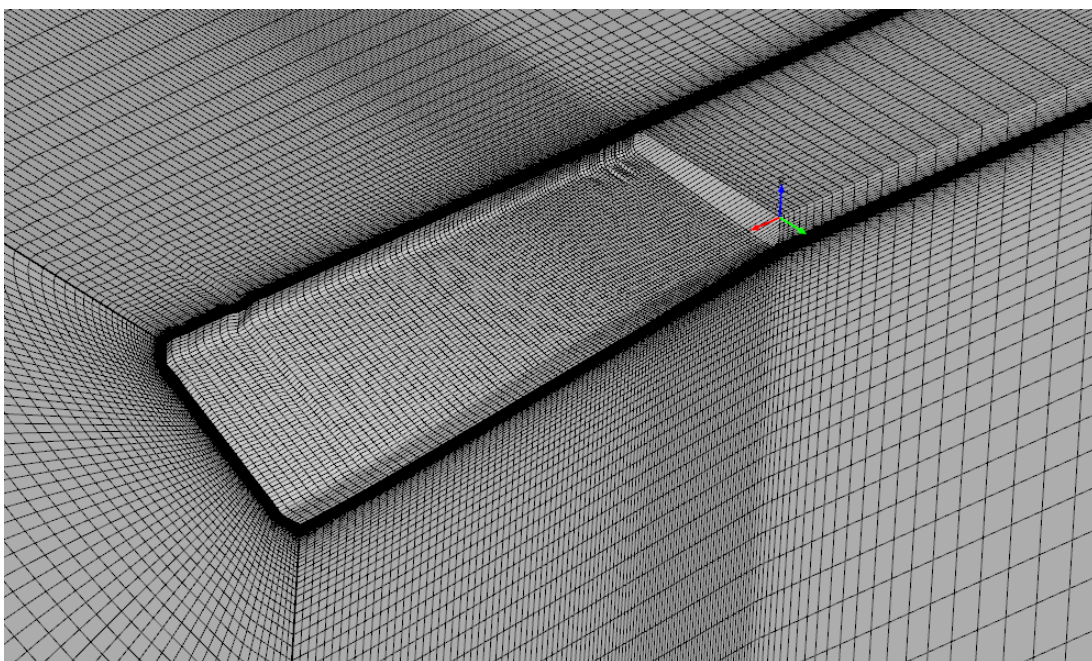
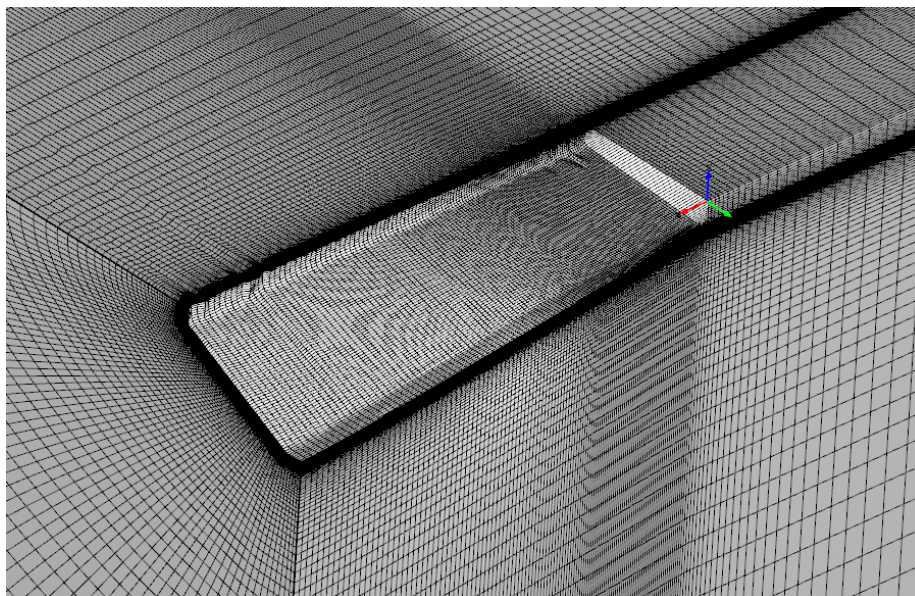
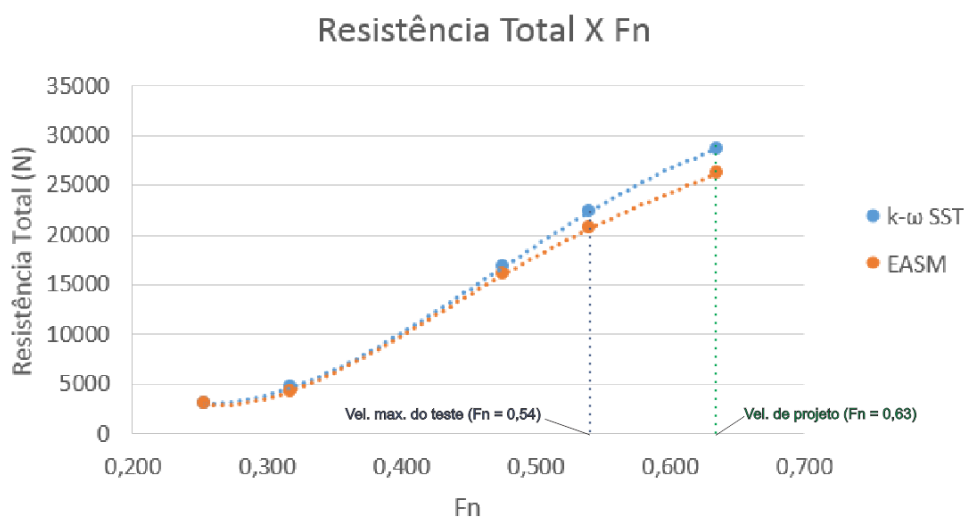


Figura 6.16. Malha Gerada na Configuração *fine*, 1.218.078 Elementos



Neste estudo de sensibilidade de parâmetros, para algumas velocidades a convergência não foi atingida, principalmente ao se utilizar o modelo $\kappa\text{-}\omega$ SST. Por esta instabilidade observada com o modelo $\kappa\text{-}\omega$ SST nas simulações, o modelo EASM foi utilizado como padrão para os cálculos de validação e otimização. Segundo o manual do usuário do SHIPFLOW, o modelo EASM também é o modelo mais avançado disponível no código, recomendado para este tipos de simulações. A figura 6.17 ilustra uma comparação entre os valores de resistência obtidos pelos dois métodos, com o restante das configurações mantidas iguais.

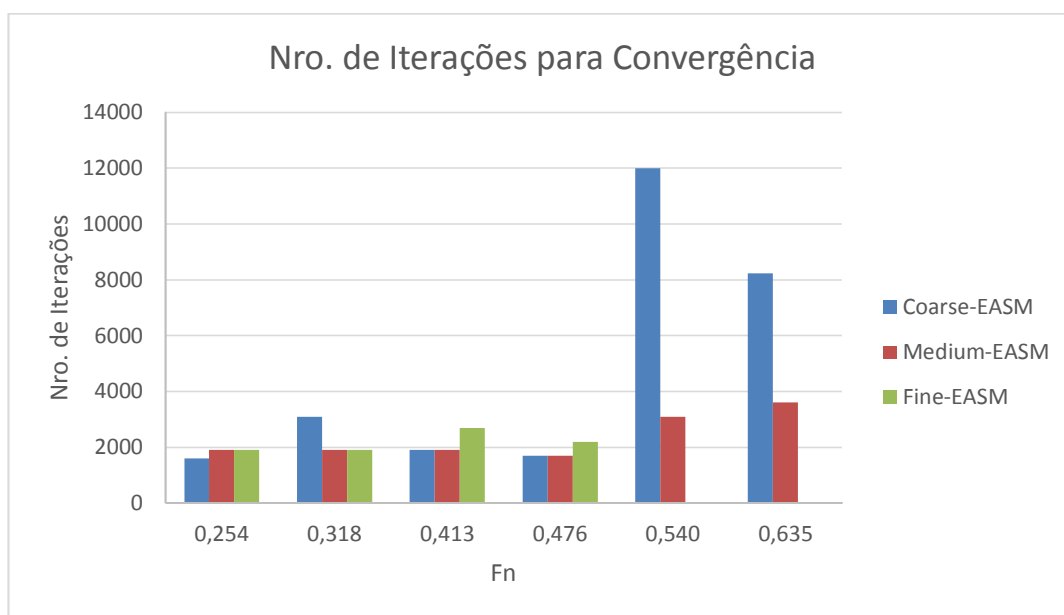
Figura 6.17. Resistência Total x F_n para os Modelos EASM e $\kappa\text{-}\omega$ SST



Pode-se observar que os valores obtidos pelo método κ - ω SST são ligeiramente maiores do que os do EASM a baixas velocidades, diferença esta que tende a aumentar conforme se eleva a velocidade dos testes. Os valores correspondentes ao $F_n = 0,41$ não foram incluídos porque a convergência não foi atingida para o modelo κ - ω SST. O critério de convergência utilizado foi a taxa de variação das forças nas últimas 100 iterações, sendo menor ou igual a 0,1% para a média de F_x (força no eixo x, resistência ao avanço) e abaixo de 1,0% para a parcela correspondente à pressão em F_x . A figura 6.18 ilustra o número de iterações necessárias para a convergência de cada malha na faixa de velocidades proposta.

O número de iterações para a convergência variou de 1600 a 12000, correspondendo a um tempo computacional de 2 a 13 horas por simulação, sendo que nas duas últimas velocidades ($F_n = 0,54$ e $F_n = 0,63$) para a malha *fine*, as simulações não apresentaram características de aproximação da convergência mesmo após 20.000 iterações, ou mais de 20 horas. Três computadores de quatro núcleos cada foram utilizados nas simulações, dois com processadores AMD Phenom II X4 965 de 3,40 GHz e um Intel Core i7-3630QM de 2,40 GHz, cada um com 16 Gb de memória RAM.

Figura 6.18. Iterações para a Convergência de Cada Simulação



Para fins de validação da malha, foi escolhida a comparação dos valores de resistência obtidos com os dados da prova de rio realizada em 27/01/2017 com o protótipo em escala real da LE-M. As figuras 6.19 a 6.21 ilustram o protótipo e a condição de superfície livre registrada.

Figura 6.19. Protótipo da LE-M na Ocasão da Prova de Rio



Figura 6.20. Motor da LE-M, um MWM série 229 de 4 Cilindros



Figura 6.21. Trem de Ondas Divergentes a 17 km/h

Apesar de não ser possível a obtenção direta do valor de resistência ao avanço em uma prova de rio, pode-se obter uma estimativa através da formulação da potência instantânea, com os dados da velocidade instantânea e potência do motor (os valores de potência instantânea são obtidos ao se verificar a curva característica do motor de rotação x potência entregue):

$$Pot_{inst} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F \cdot \Delta S}{\Delta t} \quad (71)$$

onde a força F é dada em Newtons, o espaço S em metros, o tempo t em segundos e a potência instantânea Pot_{inst} em Watts.

Na referida prova foram registradas as velocidades de 13 e 17 km/h, assim como as respectivas rotações de 1800 e 2500 RPM, sendo esta última a rotação nominal máxima do motor. Por motivos de restrições de tempo e recursos, não foi possível a realização de novas provas, de forma a ser registrada uma faixa maior de velocidades para a geração de uma curva característica do protótipo, ficando a sugestão para trabalhos futuros. A tabela 6.3 ilustra os dados coletados na prova e os respectivos valores de resistência estimados.

Tabela 6.3. Dados da Prova de Rio e Valores de Resistência

Número de Froude	Velocidade		Rotação (RPM)	Potência Instantânea		Resistência (kN)
	(Km/h)	(m/s)		(hp)	(kW)	
0,41	13	3,61	1800	66	48	13,30
0,54	17	4,72	2500	73	54	11,44

Ao se comparar os valores de resistência da prova com os valores obtidos na simulação para os mesmos números de Froude, pode-se observar que para $F_n = 0,41$ o valor da simulação é cerca de 27% menor, enquanto que para $F_n = 0,54$, este valor é cerca de 75% maior. É de se esperar que os valores de resistência em simulação sejam menores, por se tratar de uma condição de reboque para o casco nu, como em $F_n = 0,41$, onde o acréscimo de 27% representa um valor realista para as perdas na transmissão e acoplamentos. Já para $F_n = 0,54$, onde a embarcação se encontra dentro da faixa de semiplaneio (ver figura 3.4), o acréscimo de 75% pode ser explicado pelo método de simulação escolhido, que não leva em consideração a redução da resistência pelo aparecimento da força de sustentação dinâmica, ao restringir o calado e consequentemente os movimentos livres de *pitch* e *heave*. Desta forma, ao adentrar o regime de semiplaneio com calado fixo, a resistência ao avanço se eleva a uma taxa exponencial.

Para uma validação mais sólida, sugere-se para trabalhos futuros que sejam realizados testes experimentais em tanques de prova, de forma que possam ser comparados de forma mais adequada com os resultados destas simulações. Um outro método seria a obtenção da curva característica experimental da LE-M para uma faixa maior de velocidades, através de mais provas de rio, assim como a realização de simulações de autopropulsão com liberdade para os movimentos de *pitch* e *heave*, onde os efeitos de sustentação dinâmica podem ser devidamente considerados.

6.1.4 Resultados das Simulações

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações de escoamento ao redor do casco da LE-M. Como já comentado anteriormente, foi utilizado o esquema de separação zonal do escoamento, já que este método oferece resultados satisfatórios em comparação com o método global, mas com uma demanda computacional bem menor.

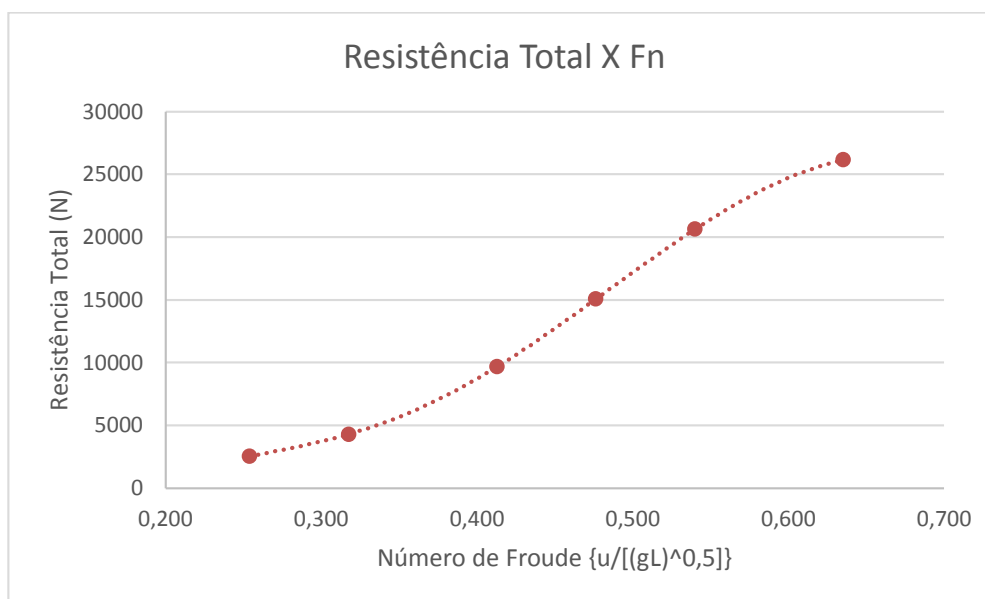
Após a análise de sensibilidade dos parâmetros da malha, foram escolhidas as configurações de refinamento *medium* e o modelo padrão de turbulência EASM como representativas do estudo (apenas a simulação para $F_n = 0,63$ foi realizada com a configuração de malha *coarse* e com a utilização de fator de sub-

relaxamento para a densidade de singularidades, pois a convergência não foi atingida para a malha *medium*). Os resultados para a resistência total são ilustrados na tabela 6.4 e na figura 6.22.

Tabela 6.4. Resultados de Resistência Total da LE-M

Vel. - Km/h	Vel. - m/s	F_n	R_n	Resistência total (N)
8	2,222	0,254	24074074,07	2550
10	2,777	0,318	30092592,59	4302
13	3,611	0,413	39120370,37	9680
15	4,166	0,476	45138888,89	15060
17	4,722	0,540	51157407,41	20620
20	5,555	0,635	60185185,19	26160

Figura 6.22. Curva de Resistência Total x F_n da LE-M

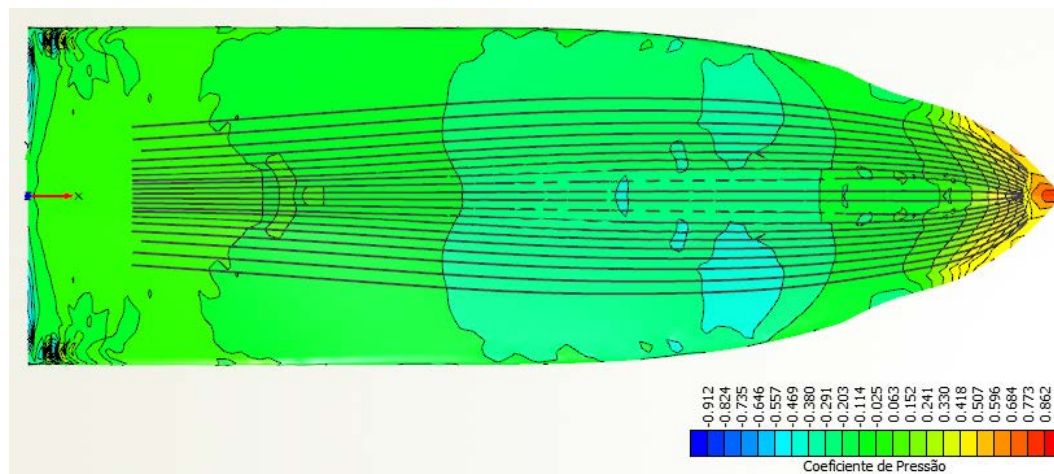


6.1.5 Análise do Escoamento

Ao ser realizada a análise da distribuição de pressão ao longo do casco juntamente com a representação das linhas de fluxo para cada velocidade, pode-se investigar a incidência do escoamento e a sua evolução rumo ao regime de semiplaneio. As distribuições de $F_n = 0,25$ (regime de deslocamento), $F_n =$

0,47 (imediatamente anterior ao limite de semiplaneio) e $Fn = 0,54$ (regime de semiplaneio) são ilustradas nas figuras 6.23 a 6.25.

Figura 6.23. Fundo da LE-M, Distribuição de Pressão e Linhas de Fluxo a $Fn = 0,25$



A $Fn = 0,25$, pode-se observar uma predominância de valores positivos dos coeficientes de pressão nas áreas da proa e da popa (excluindo-se a região da meia-nau, onde ocorre uma mudança de curvatura do casco), distribuição típica do regime de deslocamento onde a única força de sustentação atuante no casco é o empuxo, de natureza estática.

Figura 6.24. Fundo da LE-M, Distribuição de Pressão e Linhas de Fluxo a $Fn = 0,47$

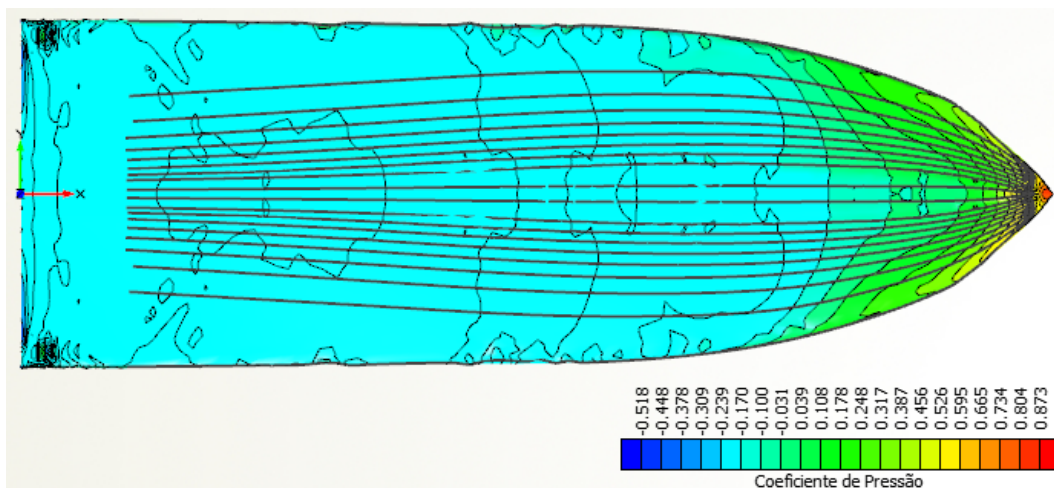
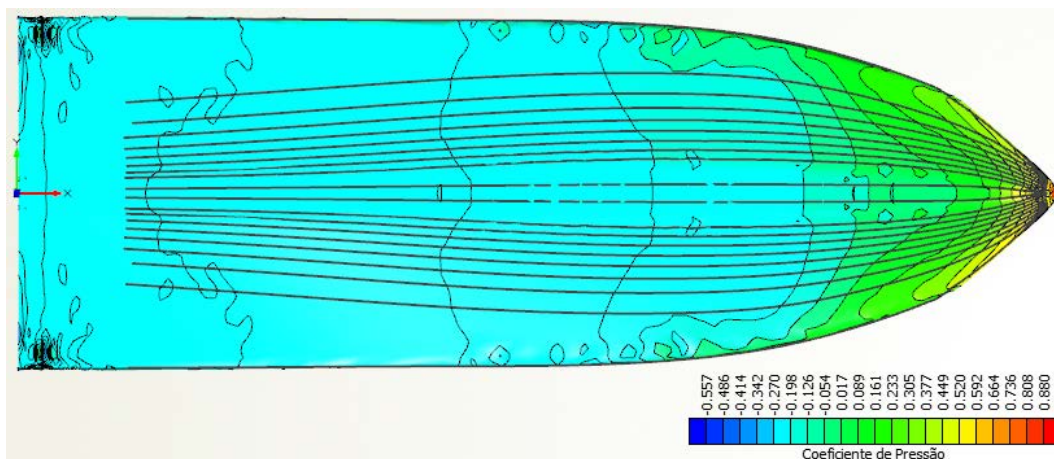


Figura 6.25. Fundo da LE-M, Distribuição de Pressão e Linhas de Fluxo a $Fn = 0,54$

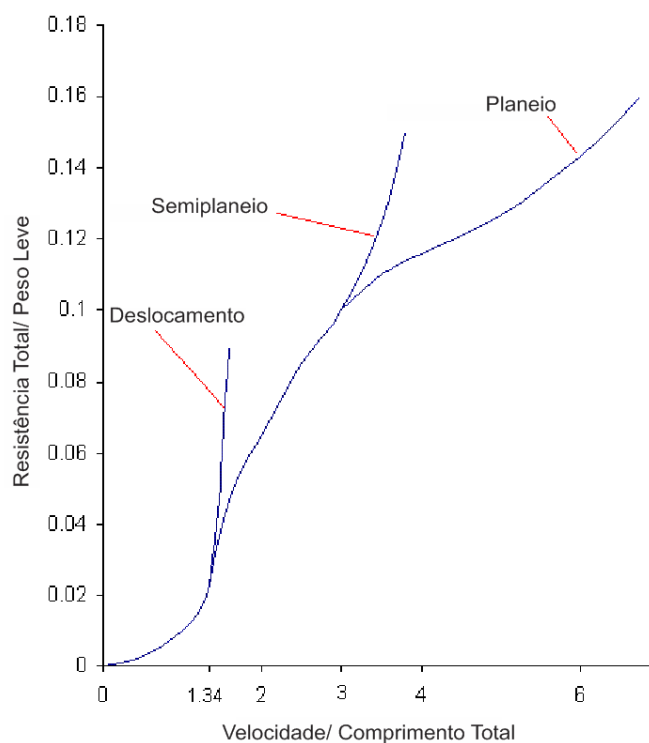
54



A $Fn = 0,47$ e a $Fn = 0,54$, a predominância é de valores negativos da maia-nau à popa, indicando as velocidades elevadas do fluxo incidente, onde o efeito de sustentação dinâmica já começaria a atuar na embarcação. Como a simulação realizada foi a calado fixo, a pressão da sustentação dinâmica não é representada, sendo a atual distribuição de pressão apresentada atrelada à velocidade do fluido incidente longitudinalmente.

Entretanto, em todas as velocidades, pode-se notar os elevados valores de pressão na região da proa, assim como a tendência das linhas de fluxo de se afastarem da linha de centro, principalmente nas amuras (ou bochechas, regiões a 45° da proa da embarcação) efeito ainda mais pronunciado a velocidades mais altas. Estas observações indicam uma configuração das linhas típica de um casco de deslocamento, normalmente mais “cheias”, onde para uma operação com valores de Fn geralmente maiores que 0,5, é imposta uma elevação a uma taxa exponencial da resistência ao escoamento do fluido, de natureza friccional, pela maior área de contato com o casco desde a área de primeiro encontro com o fluido (roda de proa), e de formação de ondas, pelo aparecimento de mais pontos de separação do escoamento ao longo destas linhas. Uma típica representação das relações das proporções resistência total/peso leve por velocidade/comprimento total de cascos de deslocamento, semiplaneio e planeio é dada na figura 6.26.

Figura 6.26. Resistência Total/Peso Leve x Velocidade/Comprimento Total para Cascos de Deslocamento, Semiplaneio e Planeio



Fonte: SAVITSKY, 2003 (adaptado)

Ante o apresentado, constata-se a ineficiência hidrodinâmica da LE-M, sendo as formas do casco inapropriadas para o regime de operação proposto em projeto. Consequentemente, as distâncias no eixo Y das linhas do casco de um plano imaginário ZX (ao longo da linha de centro) na região da proa foram definidas como variáveis do estudo de otimização apresentado no capítulo 7 a seguir.

6.1.6 Validação por Comparação com um Casco Modificado

De forma a validar os resultados deste estudo, os mesmos foram comparados com os resultados publicados no artigo “*Methodology for Improvement of the Hydrodynamic Efficiency of an Amazon School Boat Utilizing a CFD Tool*”, onde o casco da LE-M foi simulado para a mesma faixa de velocidades, e posteriormente foi proposta uma modificação na quilha de forma a reduzir a resistência ao avanço. O casco modificado também foi simulado no SHIPFLOW sob as mesmas configurações, sendo chamado de LE-M (Mod). A

modificação proposta na quilha é apresentada na figura 6.27. Os padrões de onda na superfície livre e as distribuições de pressão ao longo dos cascos da LE-M e da LE-M (Mod), resultados provenientes da parcela potencial do cálculo zonal, são ilustrados nas figuras 6.28 a 6.45, e as curvas de resistência total são ilustradas na figura 6.46.

Figura 6.27. Vista de Proa da LE-M à Direita, e da LE-M (Mod) à Esquerda, Sem as Bolinas e Com a Quilha Modificada no Formato de "V"

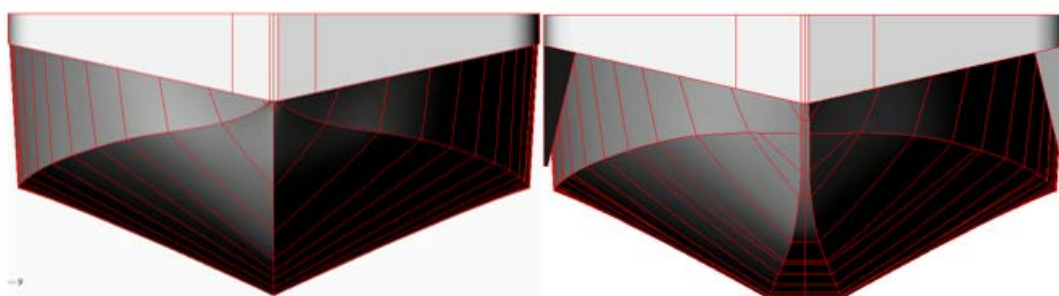


Figura 6.28. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,25$ (08 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)

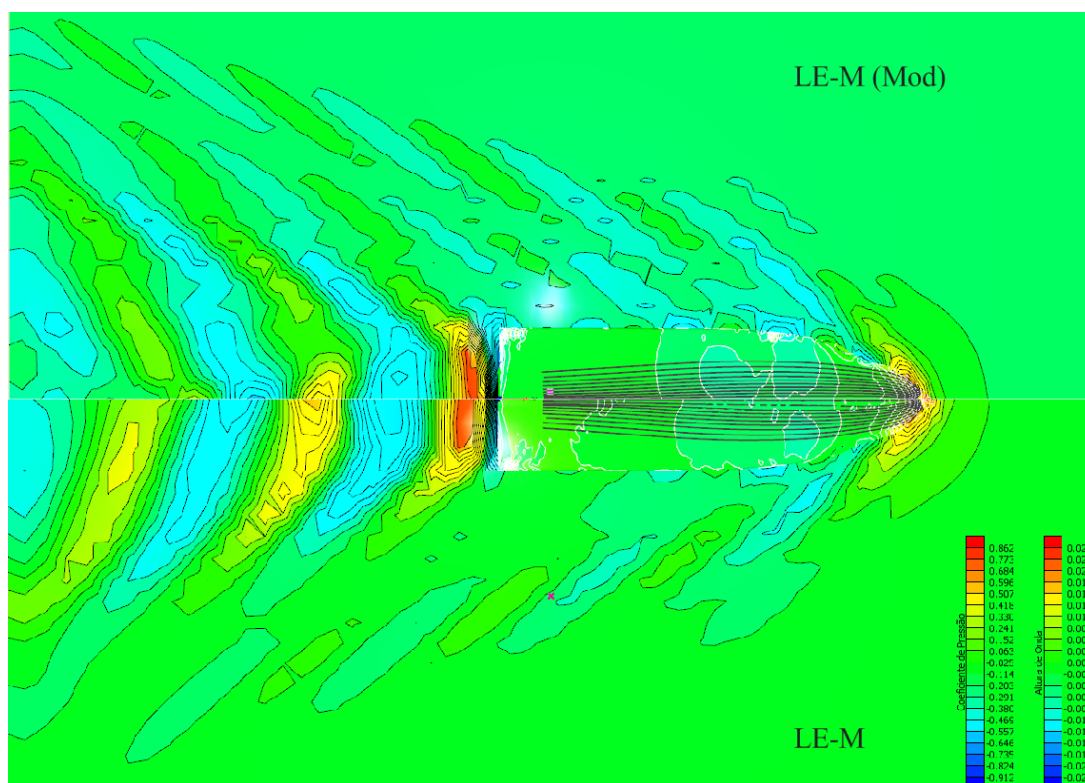


Figura 6.29. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,25$ (08 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)

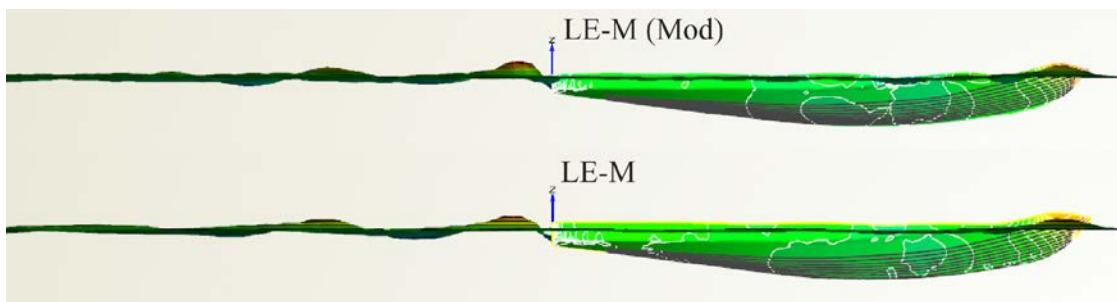
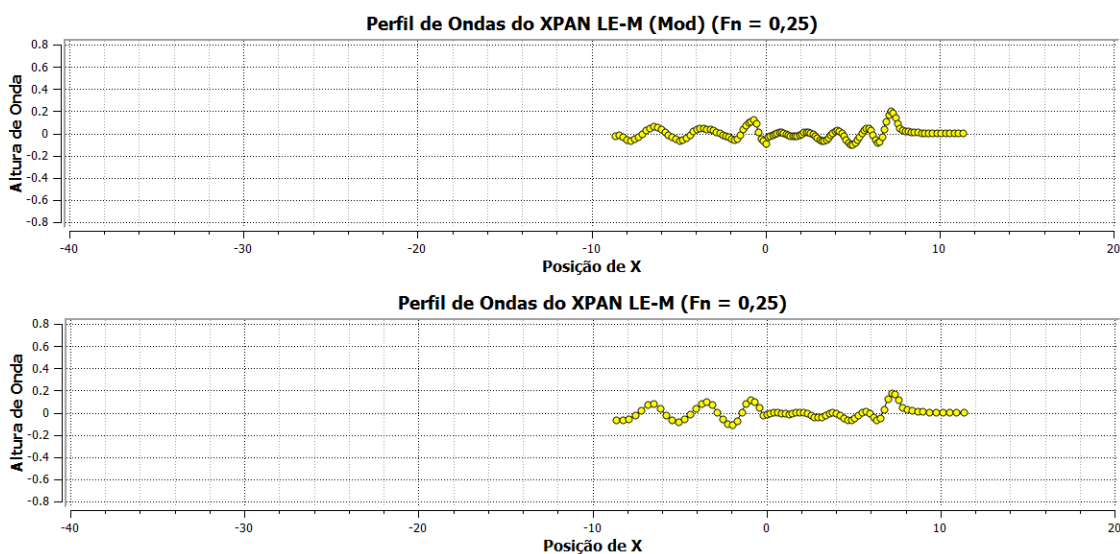


Figura 6.30. Padrão de Ondas a $F_n = 0,25$ (08 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)



Nesta velocidade de $F_n = 0,25$, pode-se observar na vista superior (figura 6.28) uma redução da pressão na região próxima à meia-nau para o casco LE-M (Mod), assim como um pequeno afastamento entre as linhas de fluxo, indicando um aprimoramento no escoamento nesta região. Na vista lateral (figura 6.29) e no perfil de ondas (figura 6.30), pode-se observar uma redução na amplitude e no comprimento das ondas geradas, tanto na região da proa, quanto na região após a popa, na esteira.

Figura 6.31. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,31$ (10 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)

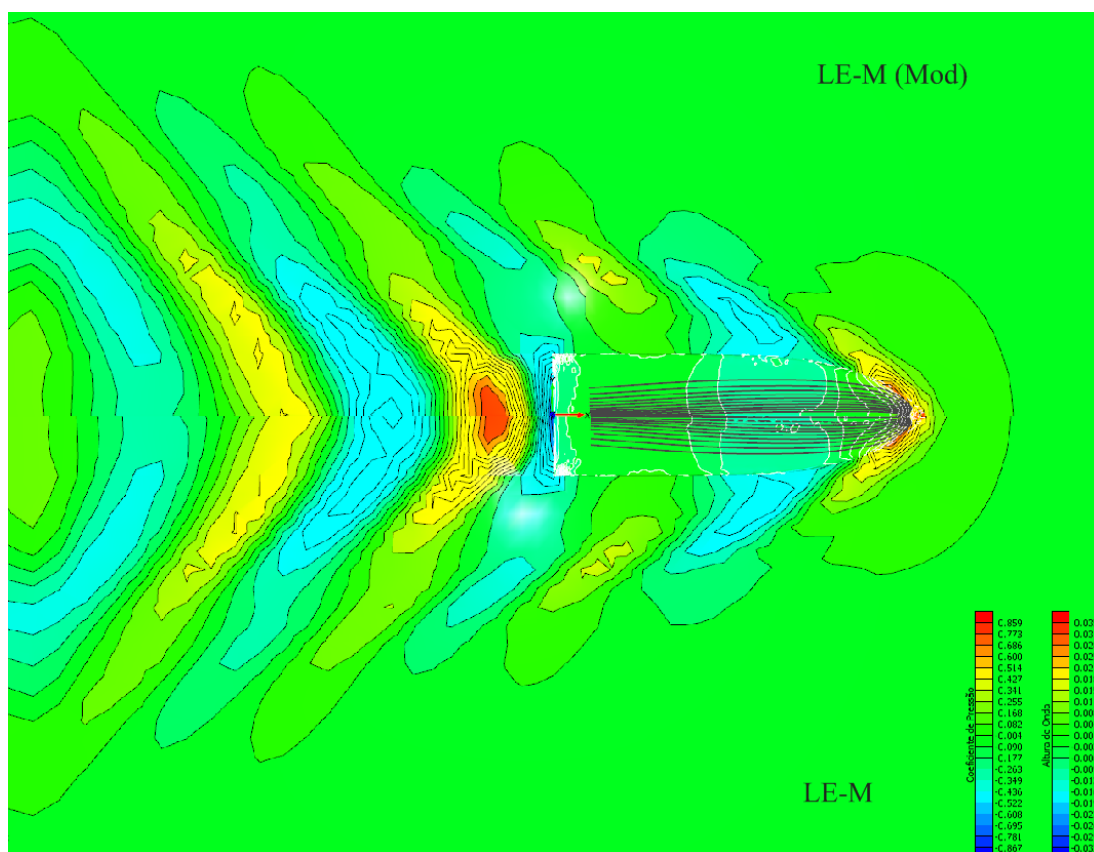


Figura 6.32. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,31$ (10 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)

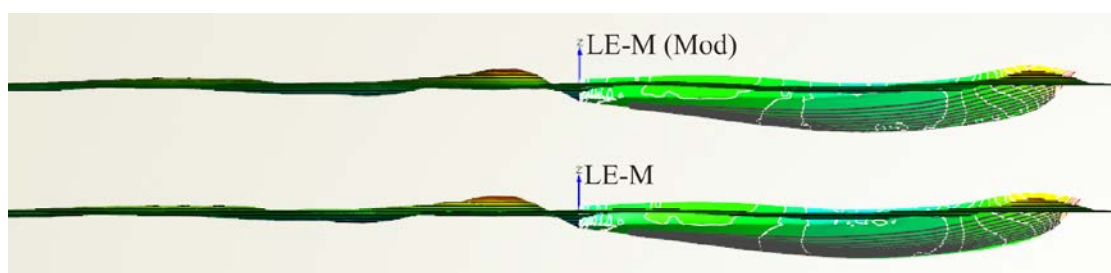


Figura 6.33. Padrão de Ondas a $F_n = 0,31$ (10 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)

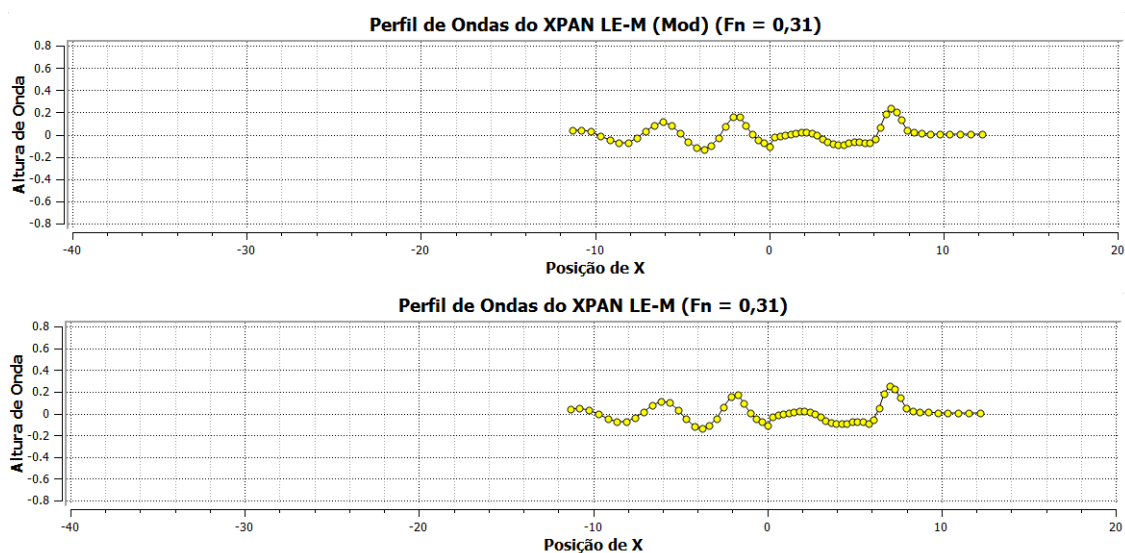


Figura 6.34. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,41$ (13 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)

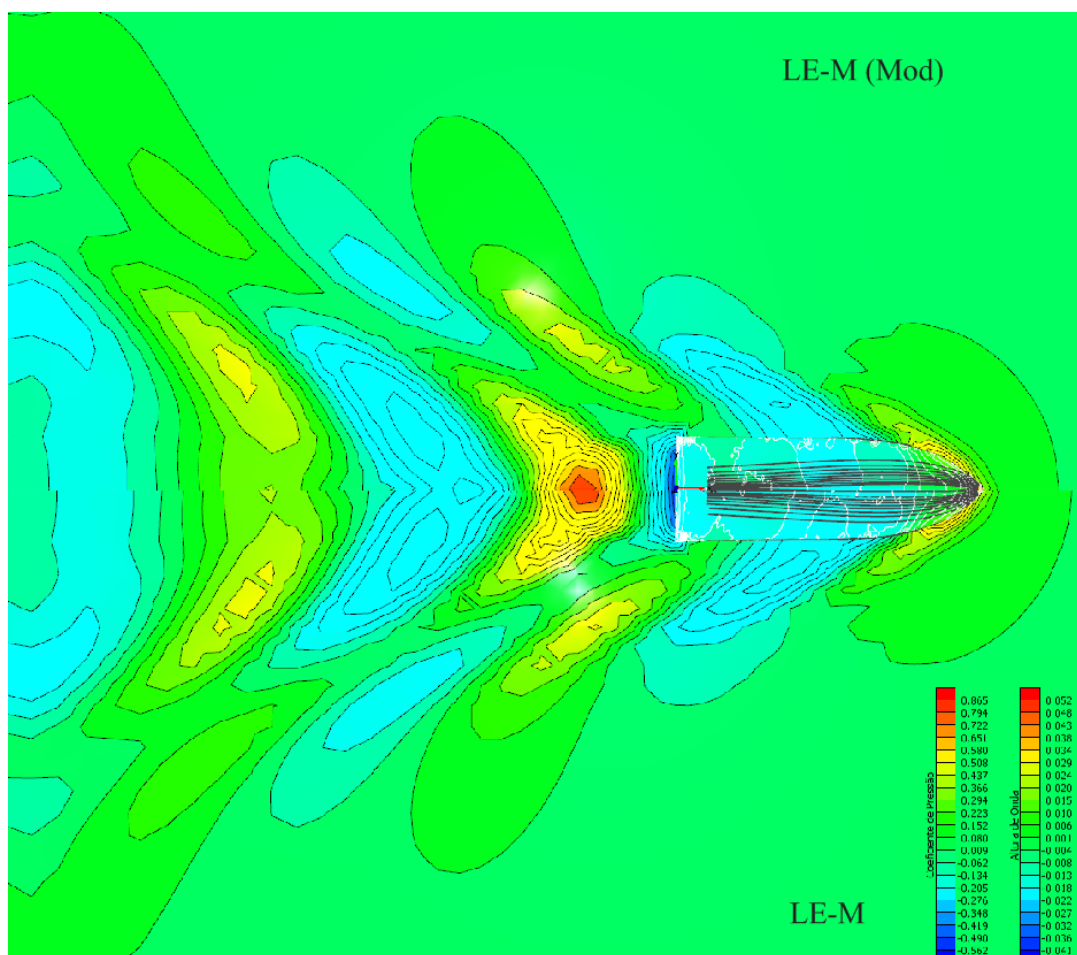


Figura 6.35. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,41$ (13 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)

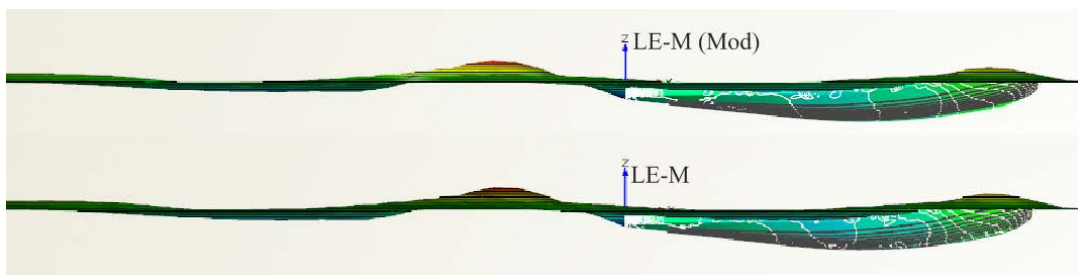
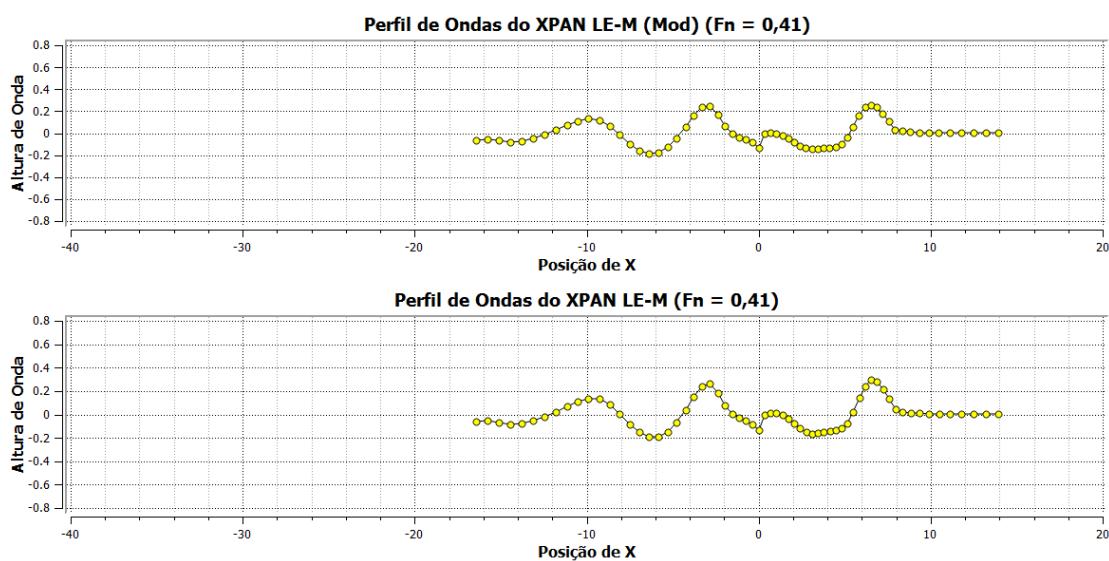


Figura 6.36. Padrão de Ondas a $F_n = 0,41$ (13 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)



Nas velocidades de $F_n = 0,31$ e $F_n = 0,41$, na vistas superiores (figuras 6.31 e 6.34), não é observada uma mudança expressiva na distribuição de pressão e no padrão de ondas para o casco LE-M (Mod), apesar de ocorrer uma redução dos comprimentos de onda, principalmente na região de proa. Nas vistas laterais (figuras 6.32 e 6.35) e no perfil de ondas (figuras 6.33 e 6.36), pode-se observar uma ligeira redução na amplitude das ondas geradas nas regiões da proa e de popa.

Figura 6.37. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,47$ (15 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)

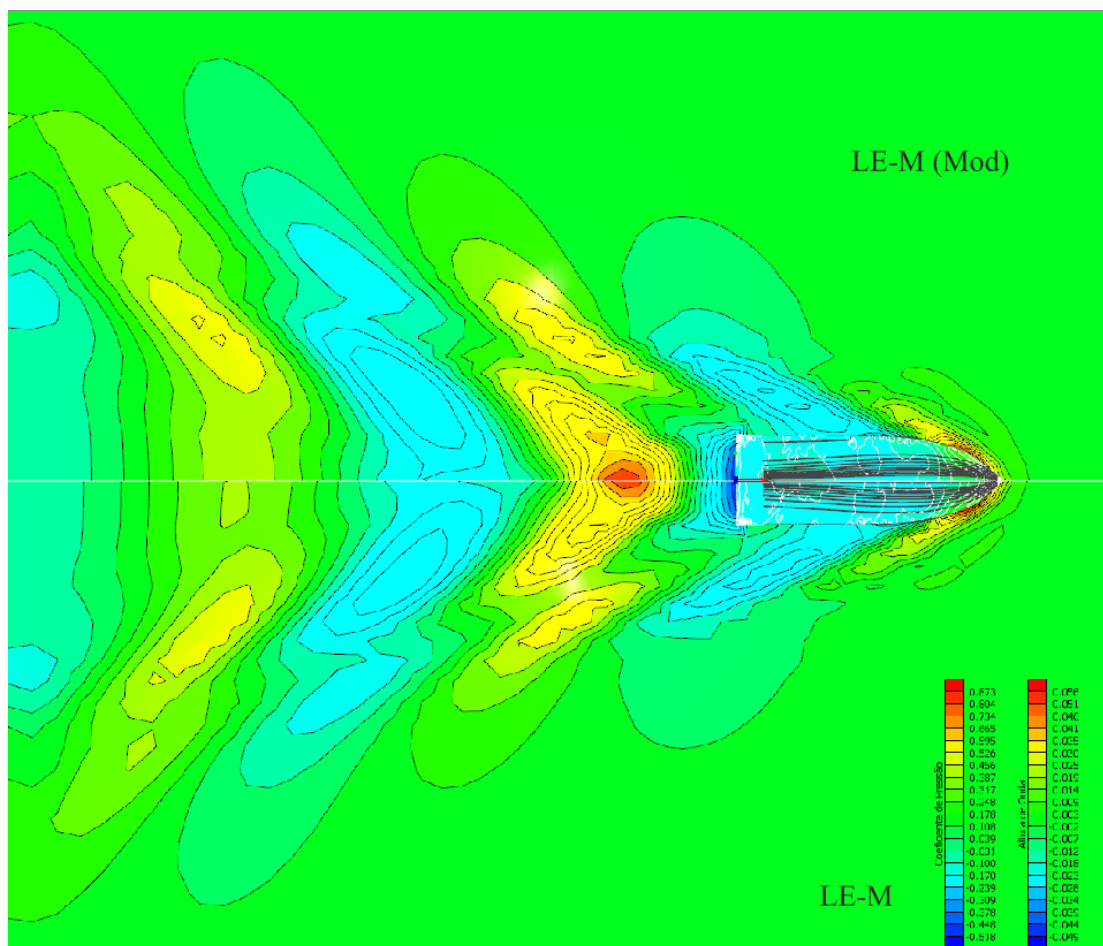


Figura 6.38. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,47$ (15 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)

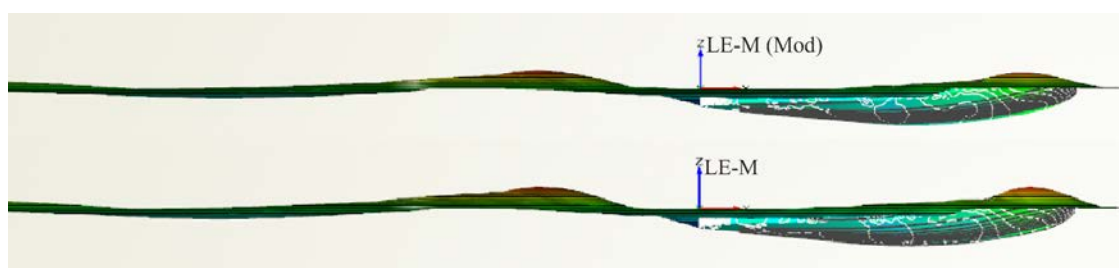
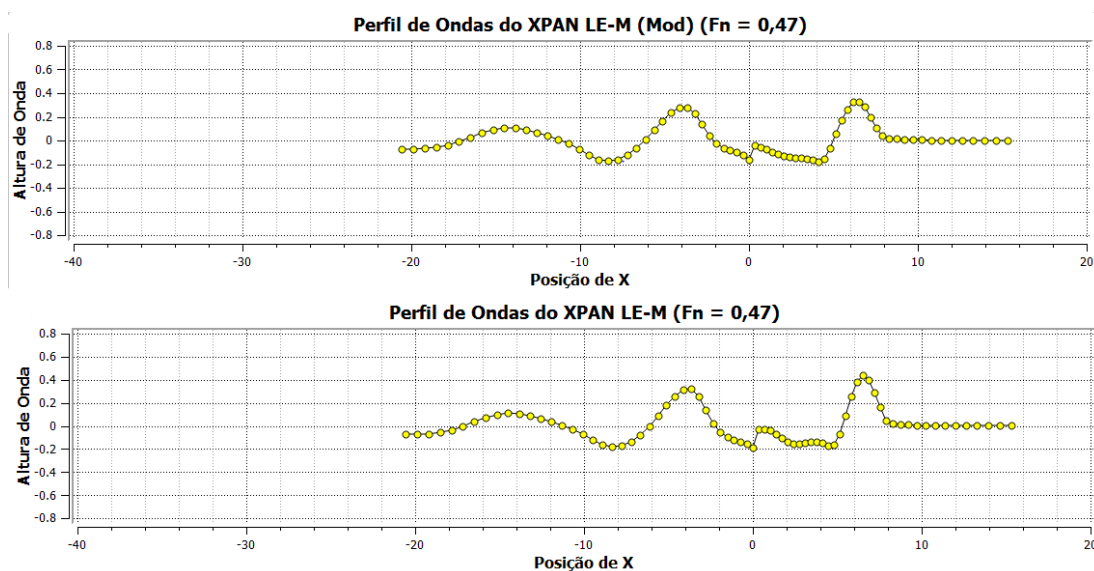


Figura 6.39. Padrão de Ondas a $F_n = 0,47$ (15 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)



Na velocidade de $F_n = 0,47$, na vista superior (figura 6.37), o padrão de ondas apresenta uma ligeira modificação para o casco LE-M (Mod), principalmente na região da proa. Na distribuição de pressão ao longo do casco não se observaram grandes modificações. Já na vista lateral (figura 6.38) e no perfil de ondas (figura 6.39), pode-se observar uma redução na amplitude das ondas geradas nas regiões da proa e da popa.

Figura 6.40. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,54$ (17 km/h), Para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)

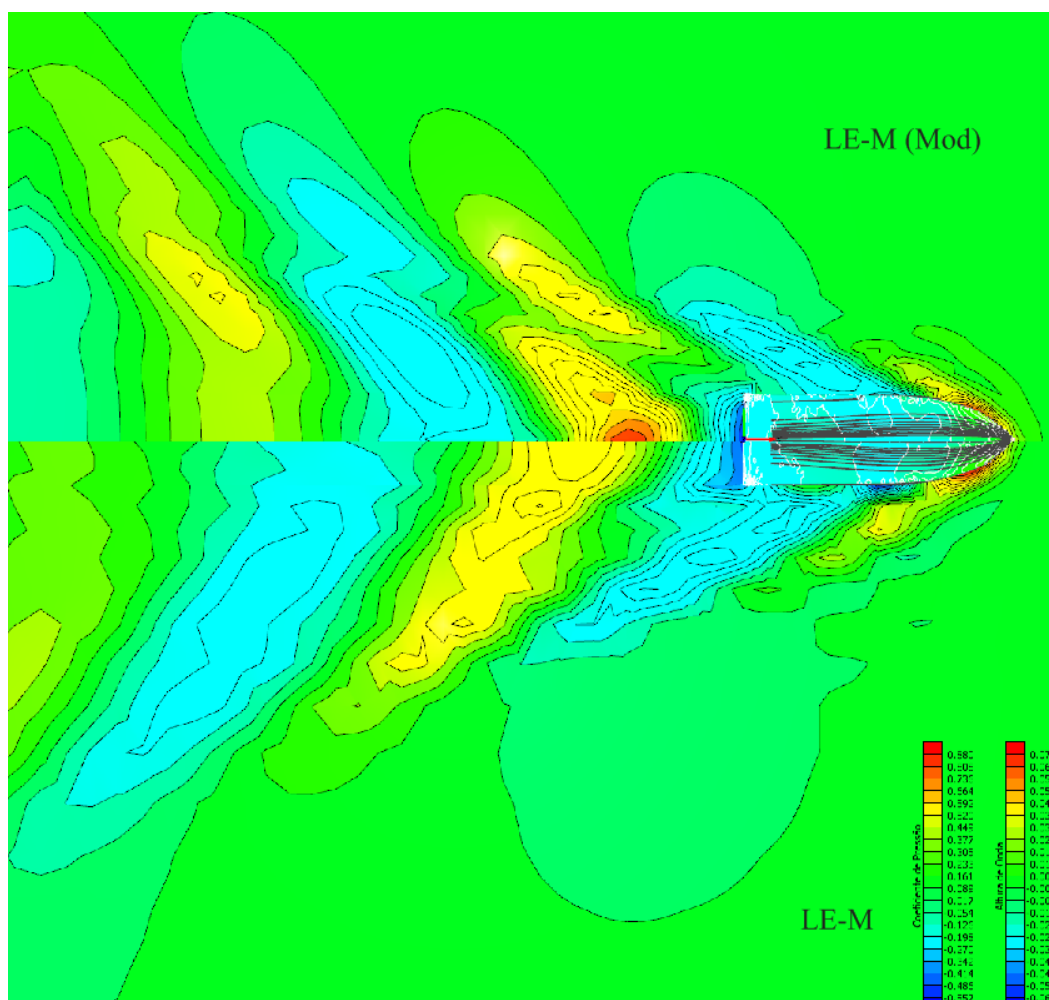


Figura 6.41. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,54$ (17 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)

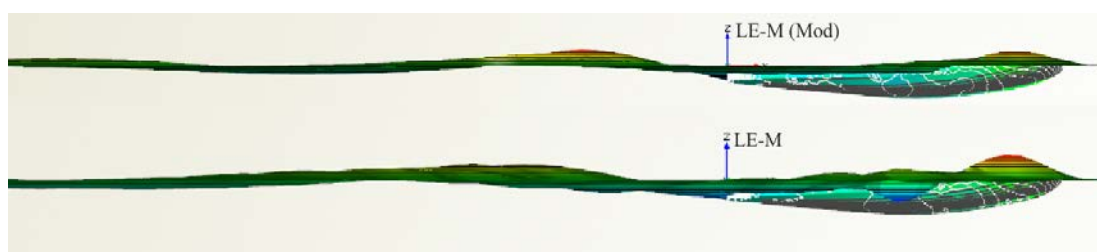
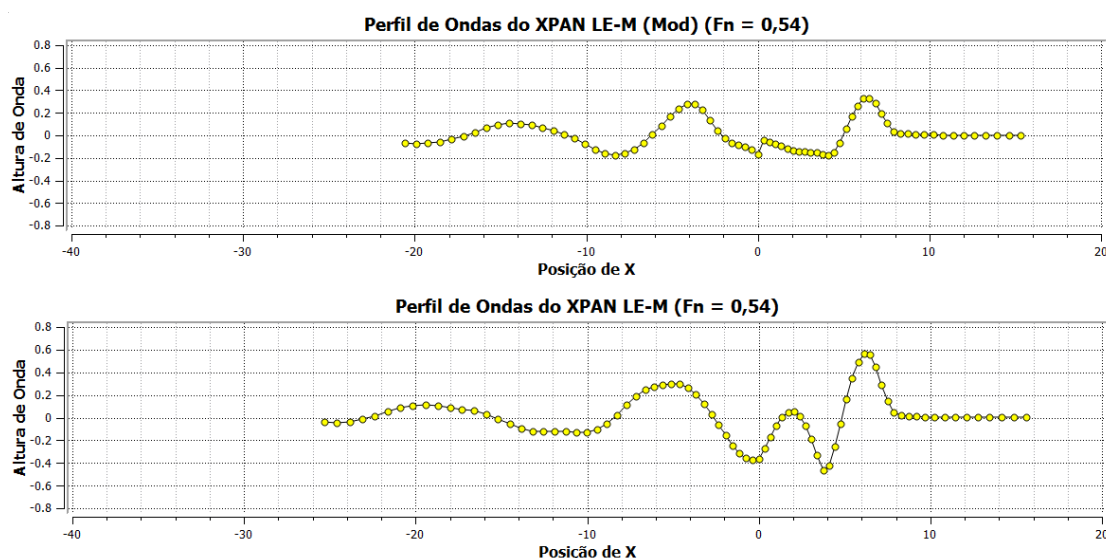


Figura 6.42. Padrão de Ondas a $F_n = 0,54$ (17 km/h), para LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)



Para a velocidade de $F_n = 0,54$, pode-se observar a maior variação de todos os parâmetros observados. Na vista superior (figura 6.40), nota-se uma massiva redução na emissão de ondas para o casco LE-M (Mod), além de significativa redução dos comprimentos de onda, tanto na região da proa, quanto na região de popa. Na vista lateral (figura 6.41) e no perfil de ondas (figura 6.42), pode-se observar uma grande redução na amplitude do trem de onda de forma geral, configurando uma grande redução na parcela residual da resistência total. Ademais, o perfil de ondas observado ao longo do casco da LE-M nesta velocidade apresenta grande similaridade com o perfil observado na prova de rio, com elevações de onda (ou cristas) na proa e na popa, e uma depressão (ou vale) significativo à meia-nau.

Figura 6.43. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Distribuição de Pressão ao Longo do Casco, a $F_n = 0,63$ (20 km/h), para a LE-M (abaixo) e LE-M (Mod) (acima)

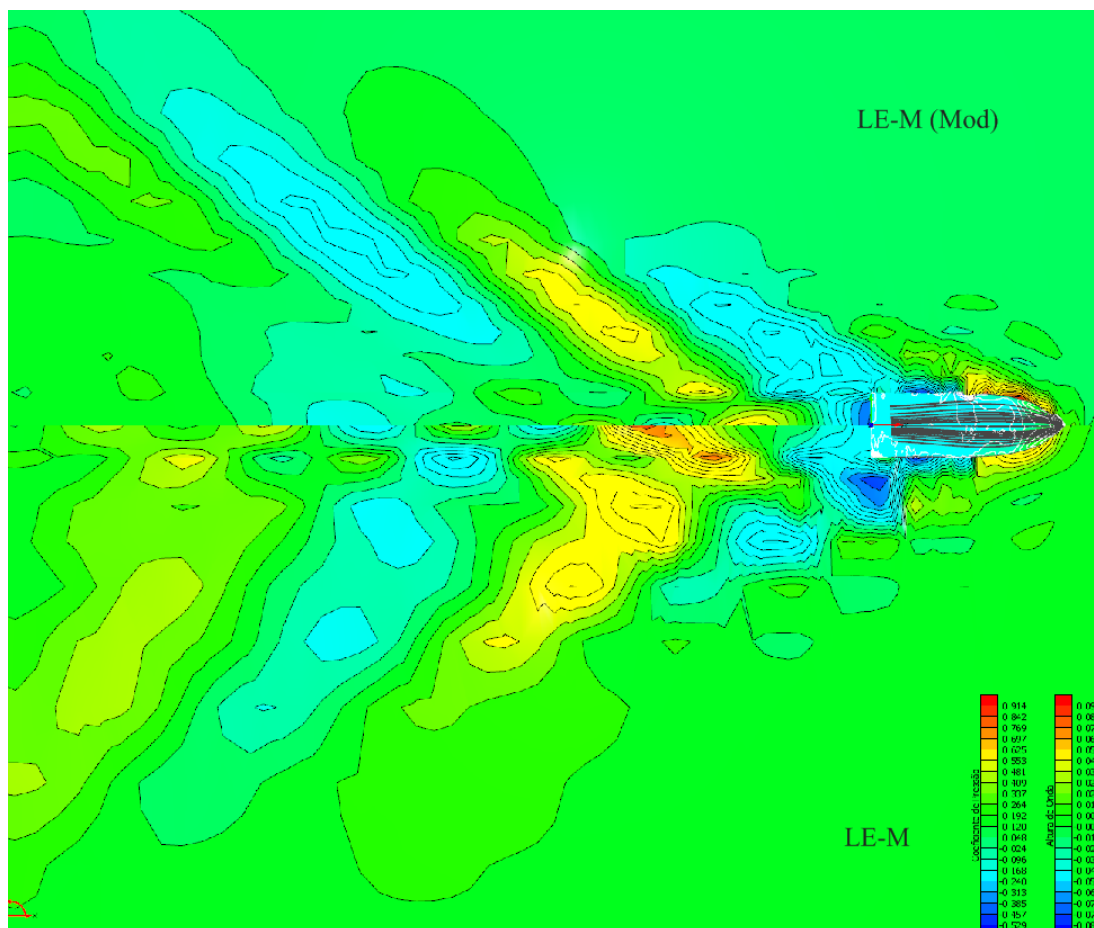
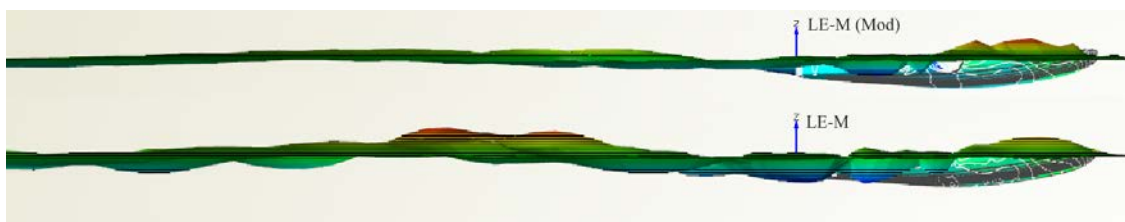


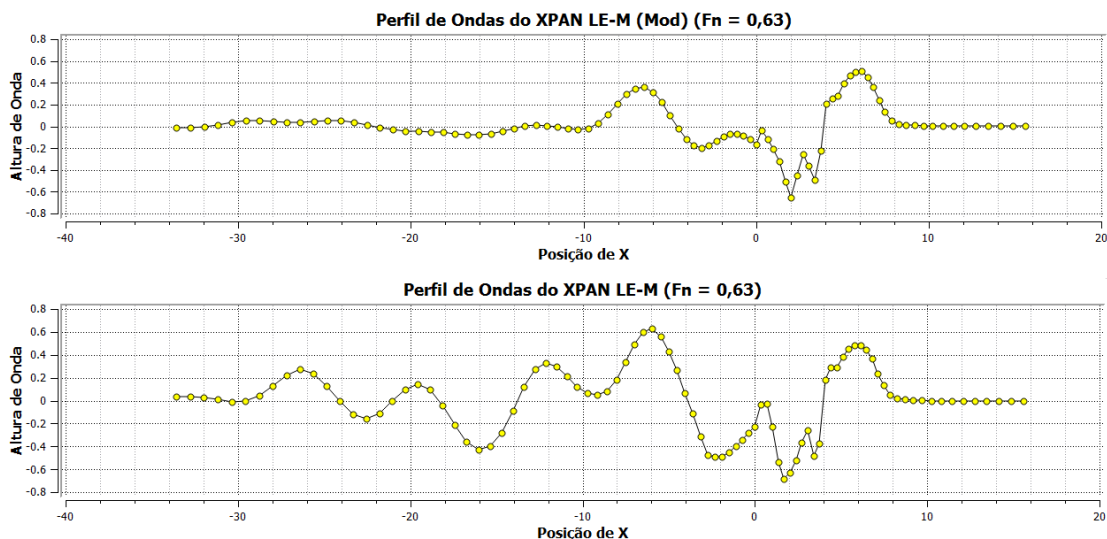
Figura 6.44. Vista Lateral do Padrão de Ondas na Superfície Livre, a $F_n = 0,63$ (20 km/h), Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)



Acerca da distribuição de pressão nos casos analisados, pode-se observar que o aumento da velocidade de incidência do escoamento ocasiona na redução do gradiente de pressão ao longo do casco. Pode-se notar a redução da incidência de ondas divergentes para a LE-M (Mod) em todas as velocidades analisadas (ainda que de forma pouco expressiva para as velocidades mais baixas), assim como a redução da amplitude das ondas de proa e do trem de ondas transversais após a

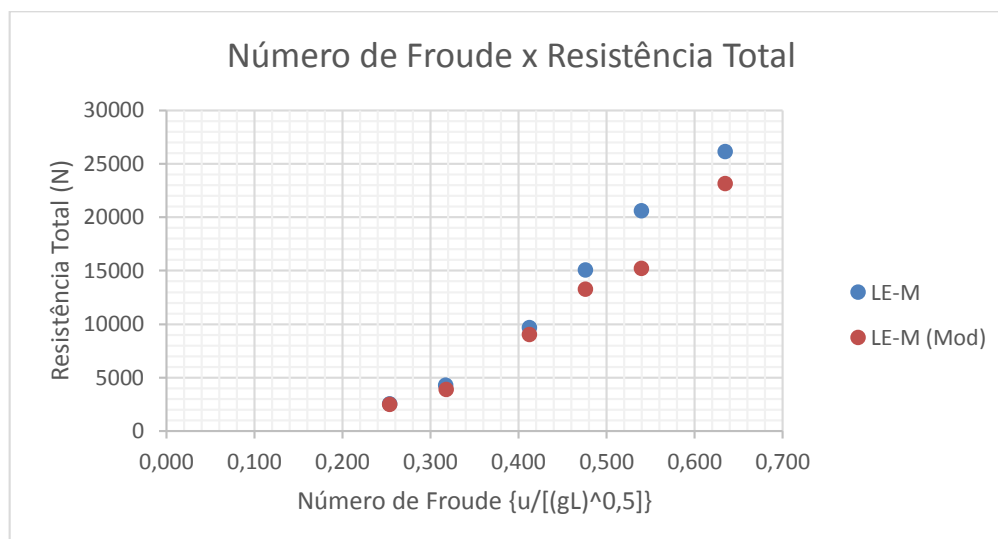
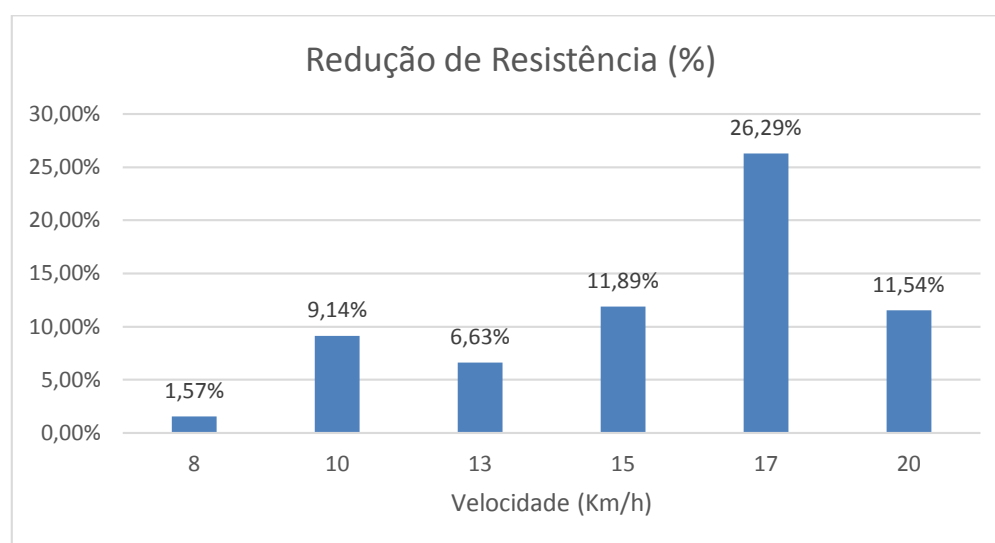
popa, coincidindo com a redução de R_{WP} e $R_{WP\ trans}$. Este efeito pode ser observado com mais expressividade para a velocidade de 17 km/h ($F_n = 0,54$).

Figura 6.45. Padrão de Ondas a $F_n = 0,63$ (20 km/h) Para a LE-M (abaixo) e a LE-M (Mod) (acima)



Para a velocidade de 20 km/h ($F_n = 0,63$), pode-se observar padrões anômalos de picos e vales de ondas, principalmente para a LE-M, possivelmente devido à aplicação dos fatores de sub-relaxamento. Para esta velocidade é recomendada a realização de mais um estudo de convergência, ou a simulação em regime global.

Para velocidades elevadas em regime de semiplaneio, tipicamente para $F_n > 0,50$, torna-se complexa a convergência da parcela potencial dos cálculos, principalmente devido ao aparecimento de fenômenos regidos principalmente pela viscosidade, como a quebra de ondas na proa. Assim, é recomendada a aplicação de fatores de sub-relaxamento para este regime.

Figura 6.46. Curva de Resistência Total por F_n da LE-M e LE-M (Mod)**Figura 6.47. Redução de Resistência para a LE-M (Mod), em Porcentagem**

Ao se comparar as curvas de resistência total, ilustradas na figura 6.46, pode-se notar que não há uma redução significativa da resistência para a LE-M (Mod) nas velocidades mais baixas. Ao analisar o gráfico das reduções de resistência em porcentagem, ilustrado na figura 6.47, nota-se uma redução mais expressiva, em torno de 26%, para a velocidade de 17 km/h ($F_n = 0,54$), e reduções menores, em torno de 12%, para as velocidades de 15 e 20 km/h ($F_n = 0,47$ e $F_n = 0,63$, respectivamente). Para a velocidade de 20 km/h era esperada uma redução mais considerável da resistência, efeito que pode ter sido influenciado pela aplicação dos fatores de sub-relaxamento.

7 ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO

O procedimento de otimização sugerido foi realizado de forma a minimizar as características de geração de ondas, representadas fisicamente pela resistência de ondas R_{WP} e pela resistência de ondas transversais $R_{WP\ trans}$. Por este objetivo, é satisfatória a análise de cada solução candidata pelo método potencial, sendo cada etapa de sub-otimização avaliada pela redução dos respectivos coeficientes de resistência de onda.

Como a modelagem do escoamento à velocidade de projeto, 20 km/h ($F_n = 0,63$), se mostrou de difícil conversão com os atuais parâmetros utilizados, tendo sido necessária a utilização de fatores de relaxamento que provavelmente alteraram significativamente os resultados, este estudo foi realizado para a velocidade máxima atingida na prova de rio, 17 km/h ($F_n = 0,54$). No total, sete estudos foram realizados com diferentes configurações de parâmetros, mas somente os dois melhores resultados são apresentados

7.1 PROCEDIMENTO

O método escolhido foi a variação delta de uma superfície de B-splines no plano XZ de forma a abranger as balizas (ou *offsets*) da proa, a área responsável pela formação das primeiras ondas divergentes. Desta forma, a variação se dá pela modificação da distância de pontos de controle no eixo Y, modificando consequentemente a disposição das balizas de forma aleatória, dentro dos limites pré-definidos. A figura 7.1 ilustra a superfície de B-splines criada como base.

A área de influência da superfície foi determinada longitudinalmente da roda de proa até 900 mm além da meia-nau, e verticalmente da quilha até uma altura de 1200 mm abrangendo a quina do casco, ou seja, de $x = 3,0\ m$ até $x = 7,8\ m$ e de $y = 0,0\ m$ até $y = 1,2\ m$. Foram criados 9 x 8 pontos de controle, dos quais 15 deles foram escolhidos como variáveis da otimização, agrupados em 3 linhas, inferior (*lower*), média (*middle*) e superior (*higher*), como ilustrado na figura 7.2.

Figura 7.1. Superfície de B-splines utilizada nas simulações

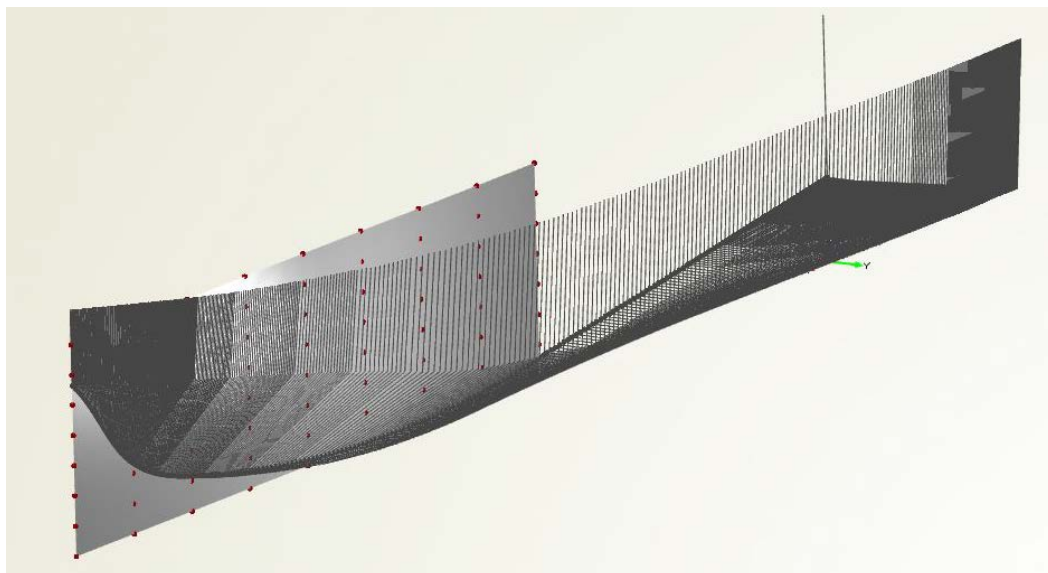
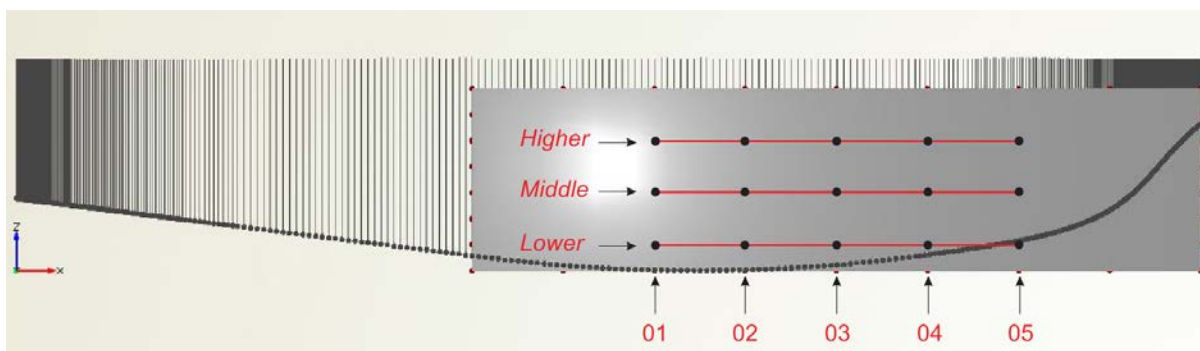


Figura 7.2. Pontos de Controle



7.2 PARÂMETROS E RESTRIÇÕES

7.2.1 Primeira Simulação – OP4

No primeiro estudo, denominado OP4, o intervalo de variação foi atrelado às linhas, cada uma contendo cinco pontos de controle. Desta forma foram consideradas três variáveis-objeto no estudo OP4. As probabilidades de mutação e permutação, as variáveis genéticas, foram definidas em 1% e 90%, respectivamente. Para a restrição do número de soluções candidatas, foram considerados 5 indivíduos por população com 20 gerações, mais 60 indivíduos adicionais, totalizando em 160 simulações. Como restrições foram considerados o

deslocamento, de forma que este não fosse reduzido em mais de 0,2 m³ por questões de estabilidade ($\nabla > 6,72$ m³), e o próprio valor dos coeficientes de resistência de ondas, para a desconsideração de possíveis valores negativos. Esses parâmetros são sumarizados na tabela 7.1.

Tabela 7.1. Parâmetros e Retrições do Estudo OP1

Variáveis-objeto (Variação, m)	Variáveis Genéticas (Probabilidade)	Restrições (Deslocamento, m ³)	Objetivos
$-0,5 \leq \text{Linha "higher"} \leq 0,5$	Mutação: 0,01	$\nabla > 6,72$	Min: C_{wp}
$-0,5 \leq \text{Linha "middle"} \leq 0,5$	Permutação: 0,9	$C_{wp} > 0$	Min: $C_{wp \text{ trans}}$
$-0,5 \leq \text{Linha "lower"} \leq 0,5$	-	$C_{wp \text{ trans}} > 0$	-

7.2.2 Segunda Simulação – OP6

No segundo estudo, denominado OP6, o intervalo de variação foi atrelado a cada ponto de controle independentemente. Desta forma foram consideradas quinze variáveis-objeto no estudo OP6.

Tabela 7.2. Parâmetros e Restrições do Estudo OP6

Variáveis-objeto (Variação, m)	Variáveis Genéticas (Probabilidade)	Restrições (Deslocamento, m ³)	Objetivos
$-0,3 \leq Hr1 \leq 0,3$	Mutação: 0,01	$\nabla > 6,72$	Min: C_{wp}
$-0,3 \leq Hr2 \leq 0,3$	Permutação: 0,9	$C_{wp} > 0$	Min: $C_{wp \text{ trans}}$
$-0,3 \leq Hr3 \leq 0,3$	-	$C_{wp \text{ trans}} > 0$	-
$-0,3 \leq Hr4 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Hr5 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Md1 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Md2 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Md3 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Md4 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Md5 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Lr1 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Lr2 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Lr3 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Lr4 \leq 0,3$	-	-	-
$-0,3 \leq Lr5 \leq 0,3$	-	-	-

As probabilidades de mutação e permutação, as variáveis genéticas, foram definidas em 1% e 90%, respectivamente. Para a restrição do número de soluções candidatas, foram considerados 10 indivíduos por população com 40 gerações, mais 79 indivíduos adicionais, totalizando em 479 simulações. Como restrições foram considerados as mesmas anteriores, o deslocamento, de forma que este não fosse reduzido em mais de $0,2 \text{ m}^3$ por questões de estabilidade, e o próprio valor dos coeficientes de resistência de ondas, para a desconsideração de possíveis valores negativos. Esses parâmetros são sumarizados na tabela 7.2.

Neste estudo o número de parâmetros e indivíduos foi aumentado de forma a se obter uma maior variação geométrica com uma melhor qualidade de parâmetros. O intervalo de variação das variáveis-objeto foi reduzido de $-0,5 \text{ m}$ a $0,5 \text{ m}$ para $-0,3 \text{ m}$ a $0,3 \text{ m}$, pois valores próximos dos limites no estudo OP4 ocasionaram em grandes deformidades na continuidade das linhas do casco.

7.3 RESULTADOS

Esta seção abordará as tendências de convergência de parâmetros para as simulações realizadas, assim como as soluções ótimas escolhidas. Para ambos os estudos, o processo de otimização começa a procurar por soluções a partir do valor inicial dos parâmetros (zero).

7.3.1 Primeira Simulação – OP4

No estudo OP4 foram simulados um total de 160 cascos, sendo que 77 destes violaram as restrições (pontos vermelhos nos gráficos a seguir) ou não atingiram a convergência do cálculo potencial, resultando em falha (xis vermelhos). O estudo total durou cerca de nove horas. As figuras de 7.3 a 7.12 ilustram as tendências de convergência dos parâmetros.

Figura 7.3. Nro. da Simulação x Parâmetro "higher"

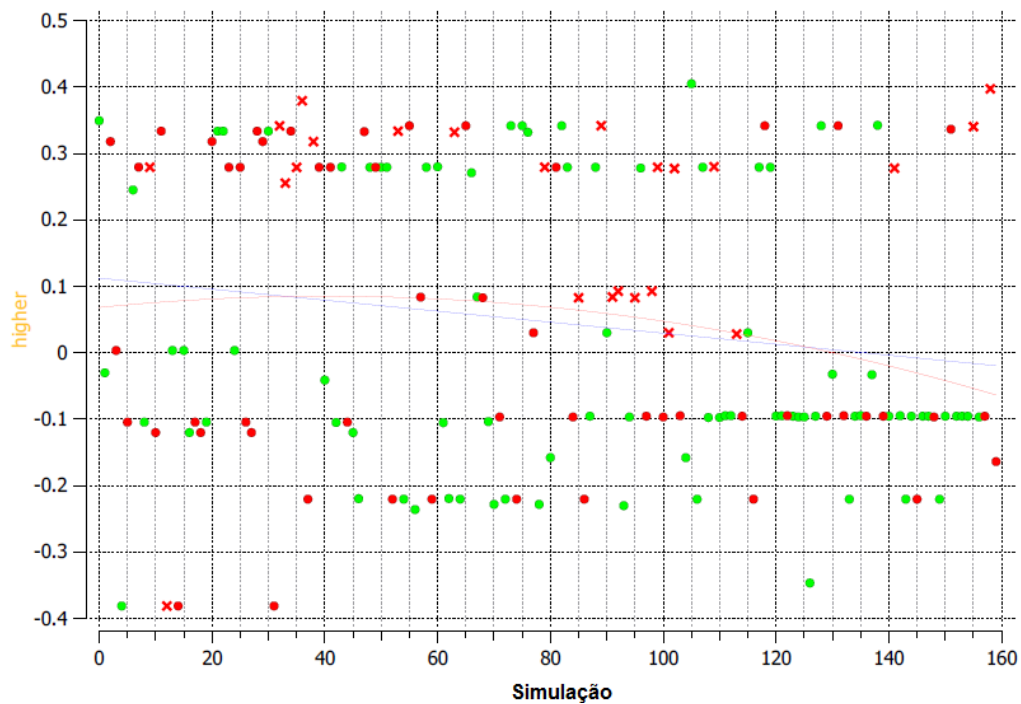


Figura 7.4. Nro. da Simulação x Parâmetro "middle"

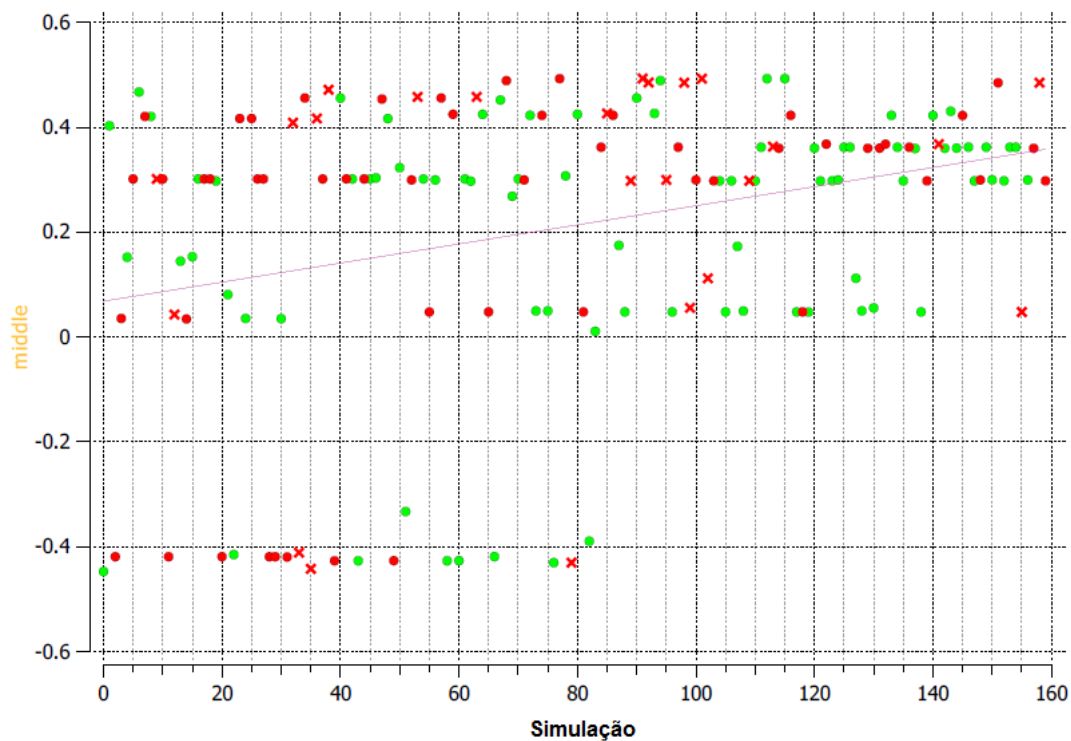
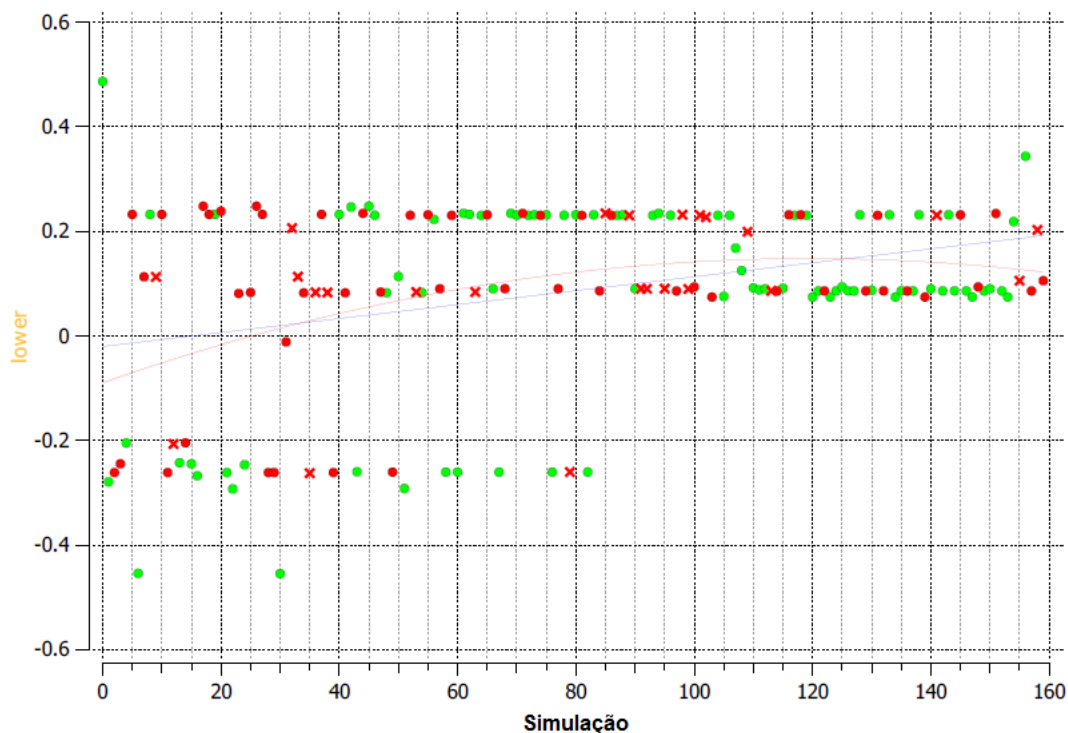


Figura 7.5. Nro. da Simulação x Parâmetro "lower"



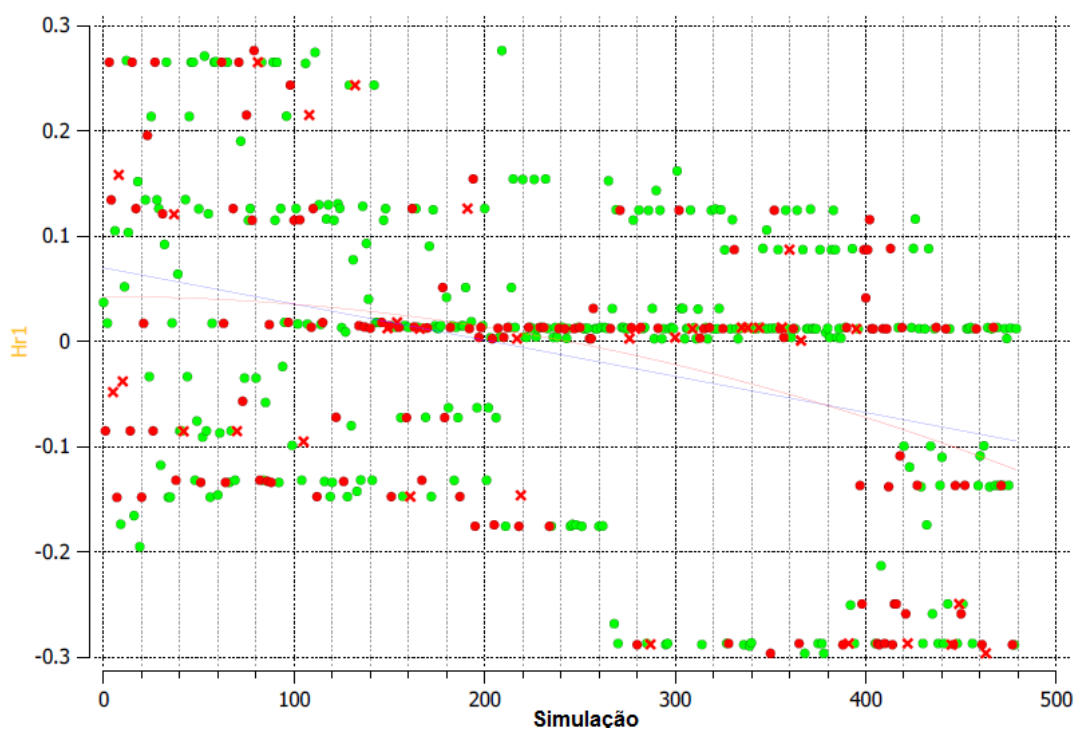
A convergência dos valores do parâmetro *higher* (figura 7.3) ao longo da simulação se concentra em torno de dois eixos principais, 0,3 e -0,1, mas ao se aproximar dos últimos casos, a convergência mantém-se no sentido do eixo -0,1. Essa convergência em -0,1 ocorre possivelmente pelo aparecimento de vários cascos que resultaram em falha de simulação ao redor do valor 0,3, provavelmente pela combinação com outros valores próximos ao limite dos outros parâmetros, resultando em descontinuidades nos cascos.

Os valores do parâmetro *middle* (figura 7.4) começam de forma dispersa, com algumas simulações falhas acima do valor de 0,4, provavelmente por violarem a restrição de deslocamento com valores elevados. Entretanto, a simulação converge em direção a este valor no final. Os valores do parâmetro *lower* (figura 7.5) apresentaram principalmente uma alternância entre 0,1 e 0,2 durante toda a simulação, indicando que não houve convergência a um único valor para este parâmetro.

7.3.2 Segunda Simulação – OP6

No estudo OP6 foram simulados um total de 479 cascos, sendo que 164 destes violaram as restrições (pontos vermelhos nos gráficos a seguir) ou não atingiram a convergência do cálculo potencial, resultando em falha (xis vermelhos). O estudo total durou cerca de quinze horas. As figuras de 7.6 a 7.10 ilustram as tendências de convergência de alguns dos parâmetros.

Figura 7.6. Nro da Simulação x Parâmetro Hr1



O valores de Hr1 (figura 7.6) apresentaram uma grande dispersão no início da simulação, posteriormente estabilizando em torno do eixo zero. Ao final da simulação, a tendência muda para valores inferiores e se mantém até o final, indicando que a convergência não foi atingida para esse parâmetro. Já para Hr3 (figura 7.8), ocorre um princípio de convergência em torno do valor -0,2, mas a grande maioria dos resultados se situam no eixo de 0,1 no restante da simulação, indicando uma rápida convergência. Em Hr2 (figura 7.7), os valores os valores ficam “presos” principalmente em torno dos eixos de 0,1 e 0,3 do início ao final da simulação, não ocorrendo a convergência para este parâmetro.

Figura 7.7. Nro da Simulação x Parâmetro Hr2

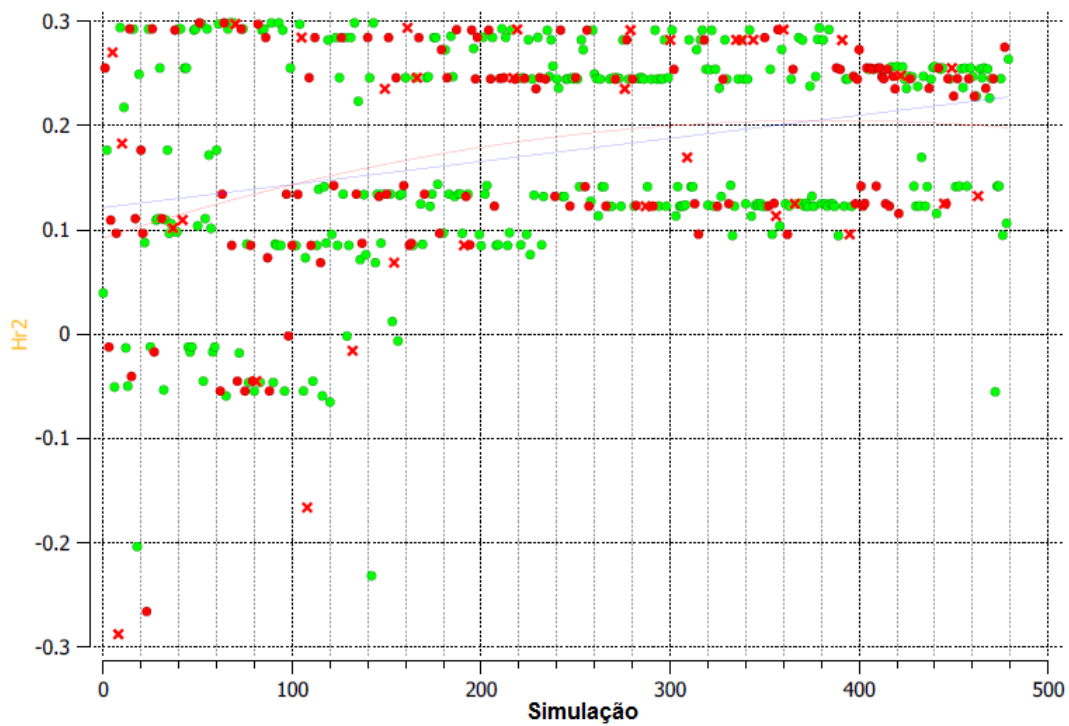


Figura 7.8. Nro da Simulação x Parâmetro Hr3

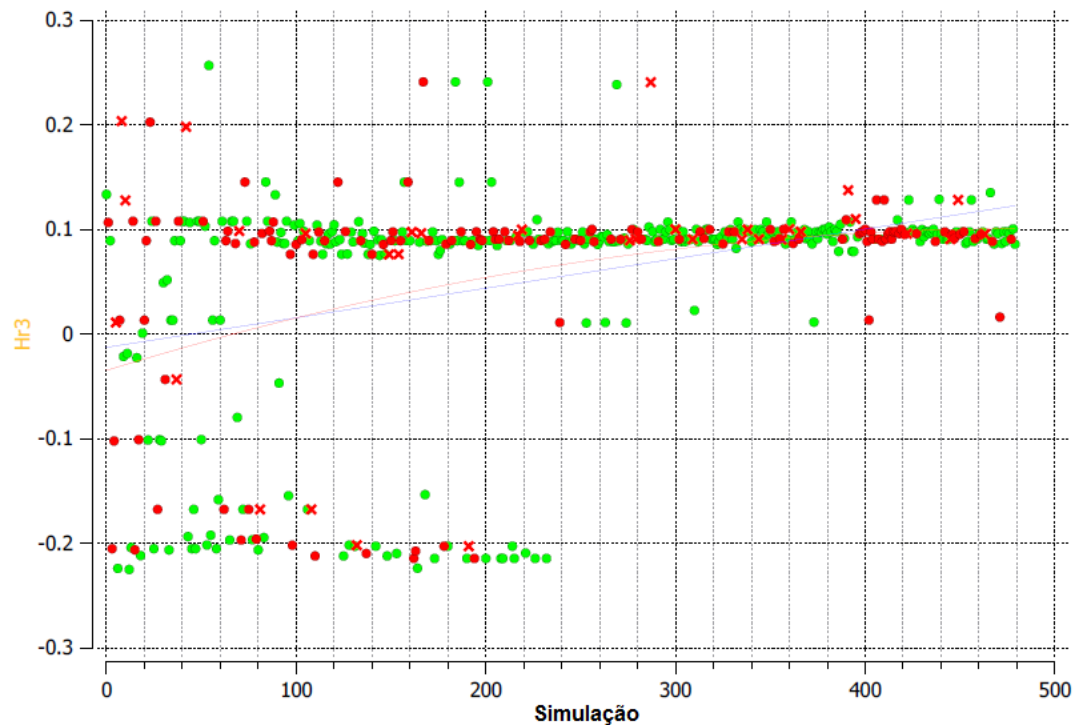
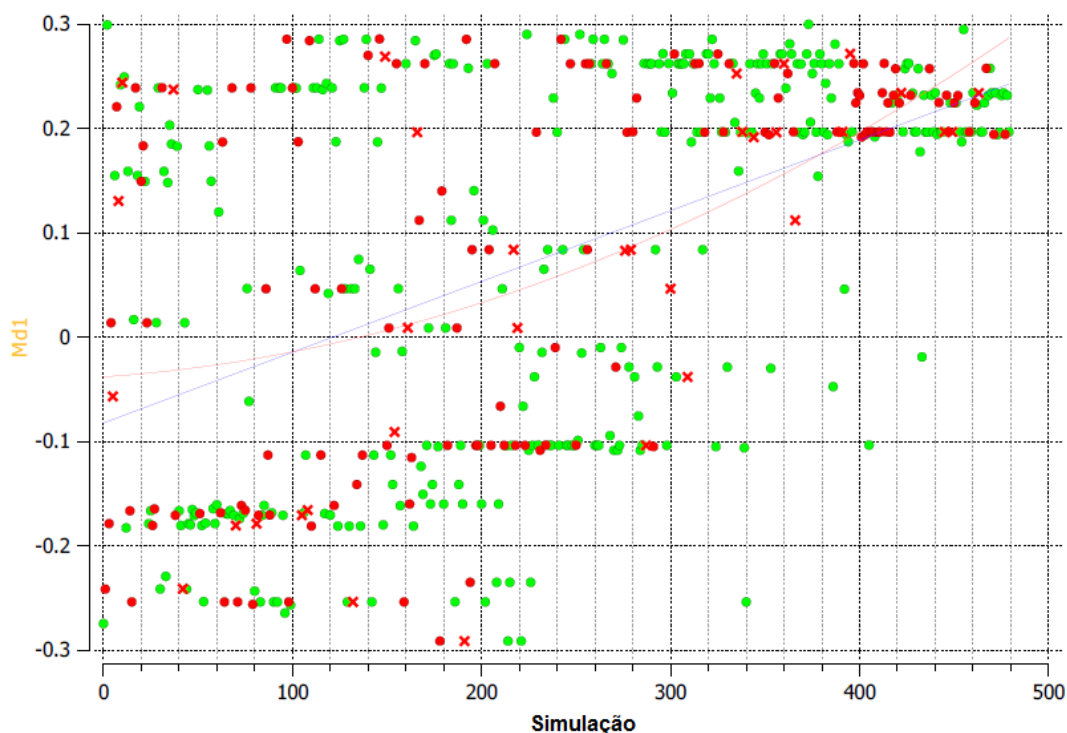


Figura 7.9. Nro da Simulação x Parâmetro Md1



Para o parâmetro Md1 (figura 7.9), ocorre uma das mais altas dispersões observadas, indicando a dependência dos valores de outros parâmetros na influência na função-objetivo. Apesar de ocorrer uma tendência para o limite superior, é recomendada uma investigação mais extensa para identificar uma convergência mais conclusiva nesse parâmetro. Em Md2 (figura 7.10), a linha de tendência permanece próxima do principal eixo, entre 0 e -0,1, mas devido ao aparecimento de outros eixos de valores superiores e inferiores em diferentes seções da otimização. Para uma convergência mais conclusiva é recomendada a simulação de mais casos.

Para Lw5 (figura 7.11), a maioria dos casos se estabilizam em dois valores espelhados desde o início da simulação, em torno de -0,15 e 0,15, apesar do eixo inferior apresentar menos casos de falhas de simulações e restrições desrespeitadas. Como este ponto está localizado na parte mais baixa analisada, próximo da roda de proa, hidrodinamicamente faz sentido que os melhores resultados estejam na parte inferior, de forma a afilar a proa e facilitar o escoamento. Já para os valores superiores, uma explicação seria a combinação com outros valores de pontos subsequentes que, mesmo aumentando a área de

contato inicial e aumentando a resistência friccional, ocorreria um efeito de cancelamento de ondas similar a um bulbo (no caso de um regime de deslocamento).

Figura 7.10. Nro da Simulação x Parâmetro Md2

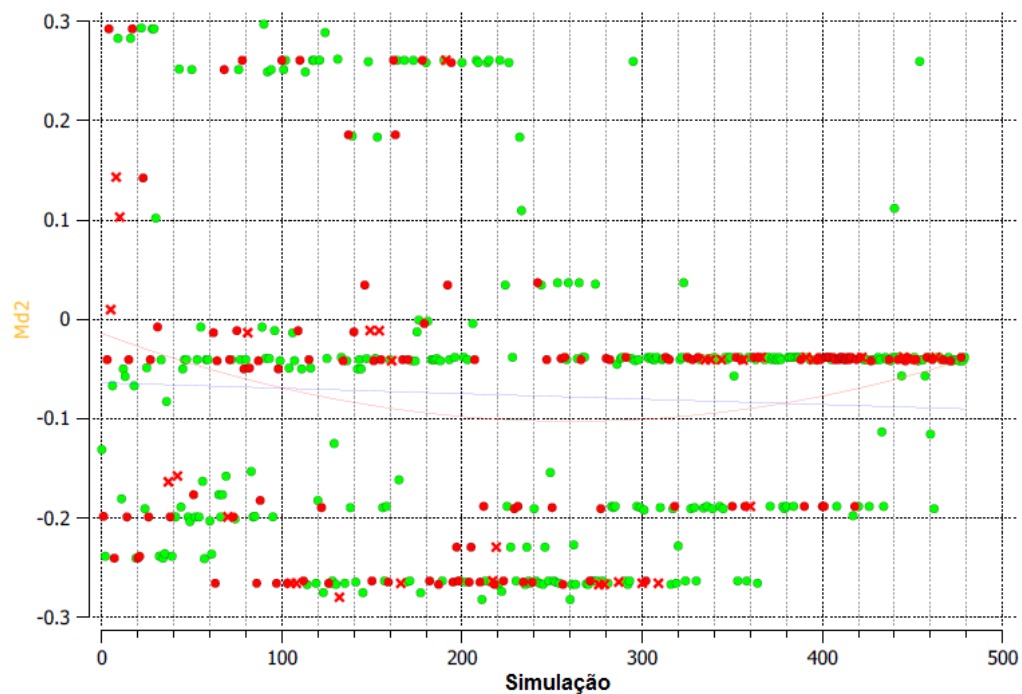


Figura 7.11. Nro da Simulação x Parâmetro Lw5

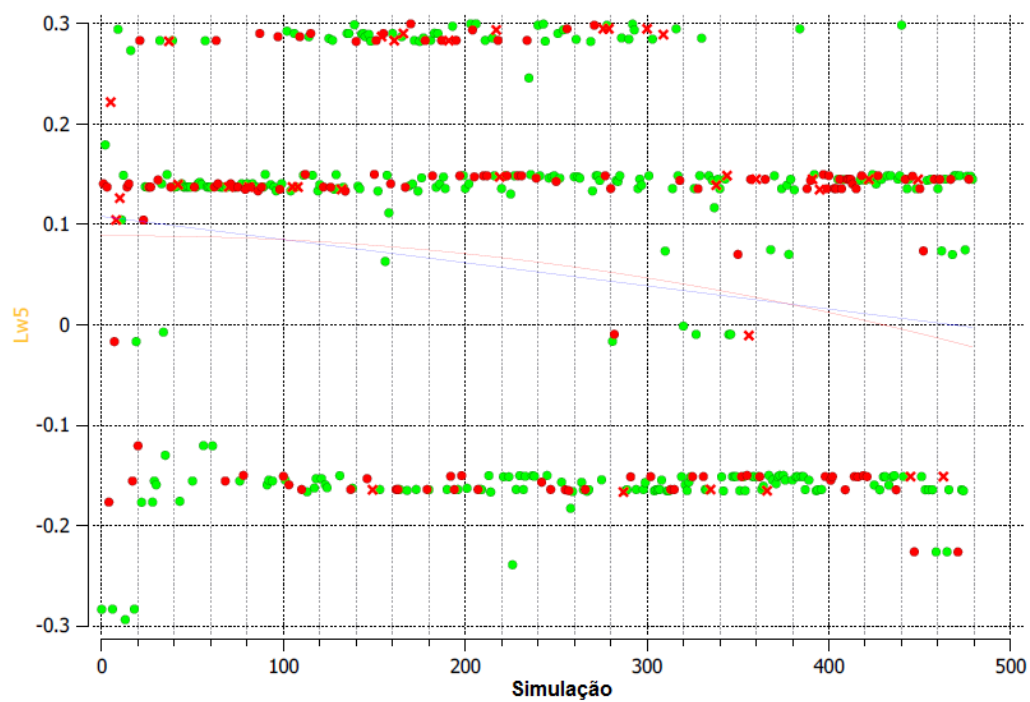
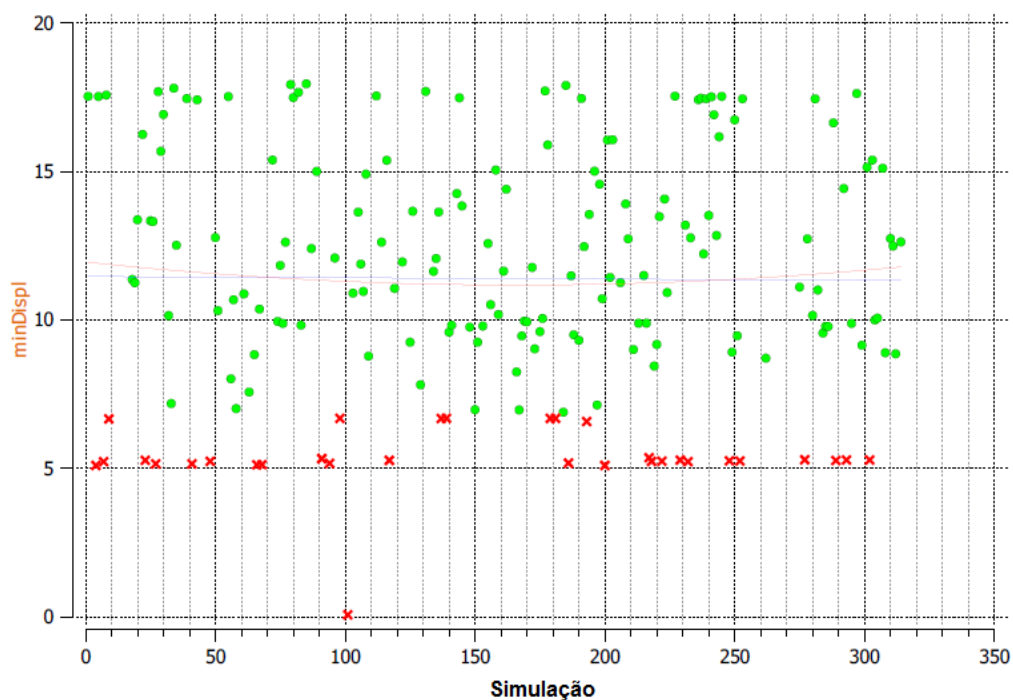


Figura 7.12. Nro da Simulação x Restrição minDispl



A distribuição dos valores de deslocamento nos casos (figura 7.12) apresenta uma grande variedade de valores. Neste caso, os xis vermelhos representam valores inferiores ao limite do deslocamento, violando a restrição determinada.

7.3.3 Discussão dos Cascos Ótimos

Nesta seção serão apresentados os cascos que apresentaram a maior redução dos coeficientes de onda em cada estudo, assim como a comparação com o casco original e a discussão das tendências geométricas observadas.

Na simulação OP4, o casco que apresentou a maior redução dos coeficientes de onda foi o modelo des0013, representado em *offsets*, em comparação com o casco da LE-M nas figuras 7.13 e 7.14.

Figura 7.13. Vista Frontal dos *Offsets* de Proa da LE-M, à BE, e da des0013, à BB

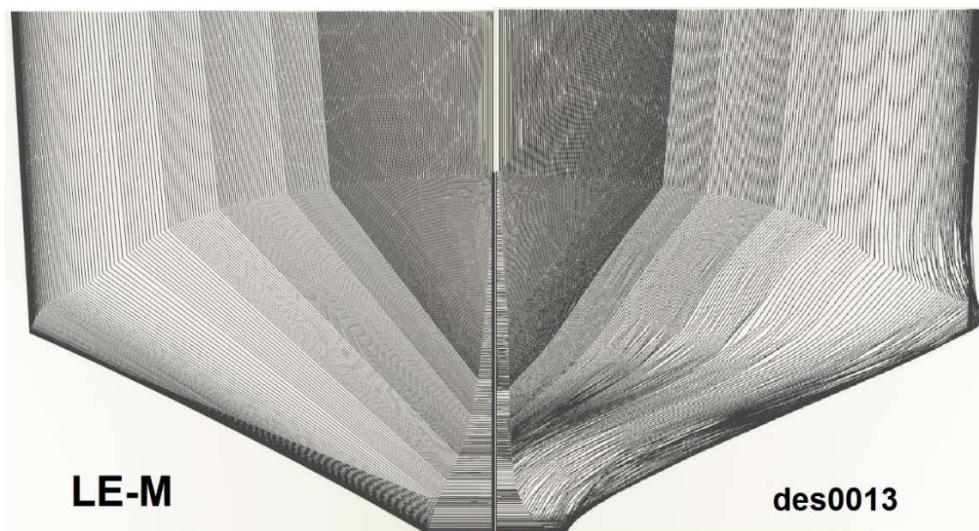
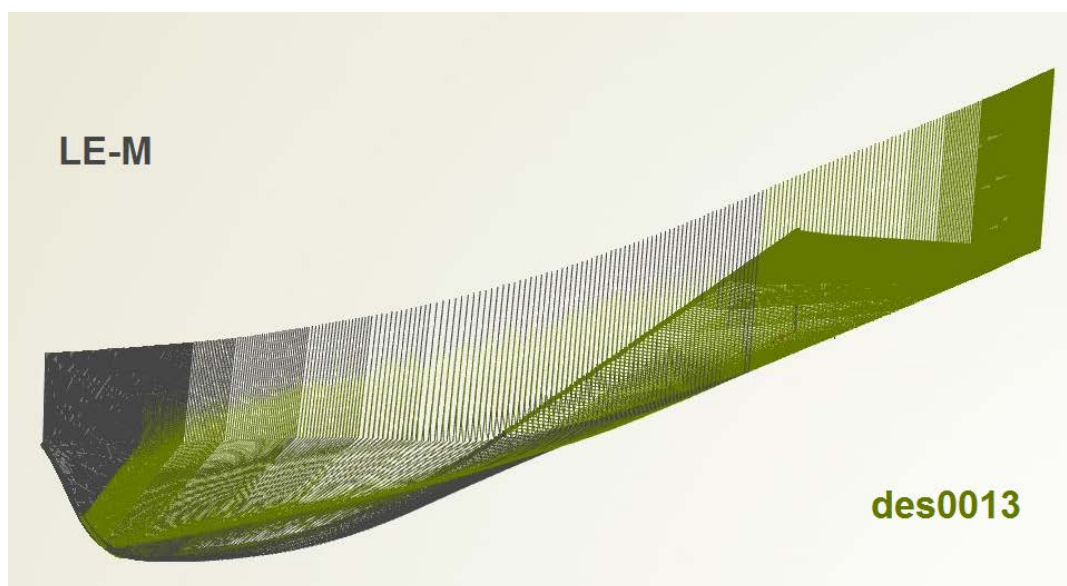


Figura 7.14. *Offsets* de BB sobrepostos, da LE-M em cinza, e da des0013 em verde



Na figura 7.12, apesar das *offsets* da popa estarem representadas em verde, não houve modificação nesta área, sendo a mesma configuração de *offsets* nesta área para ambos os *designs*.

Na simulação OP6, o casco candidato que apresentou a maior redução dos coeficientes de onda foi o modelo des0371, representado em *offsets*, em comparação com o casco da LE-M nas figuras 7.15 e 7.16.

Figura 7.15. Vista Frontal dos Offsets de Proa da LE-M, à BE, e da des0371, à BB

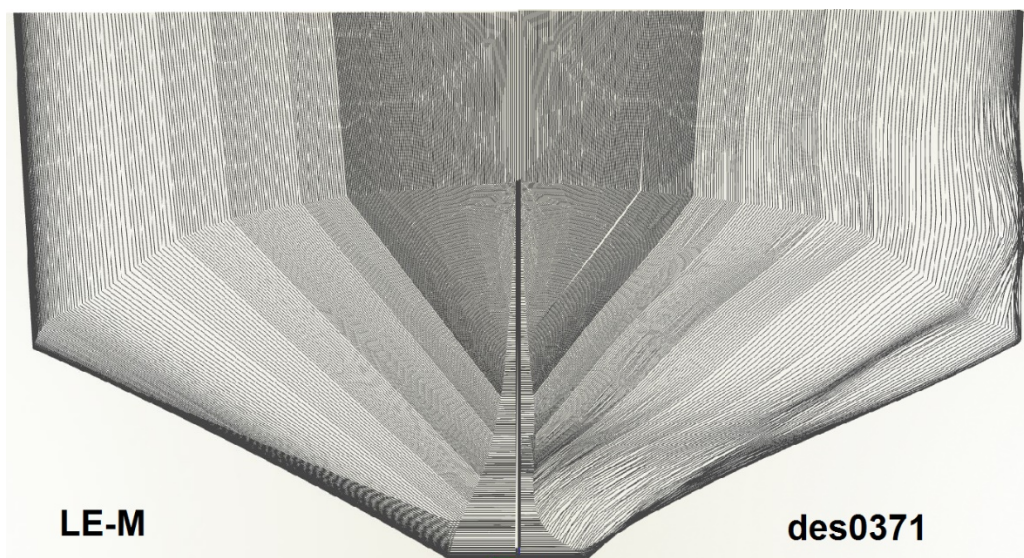
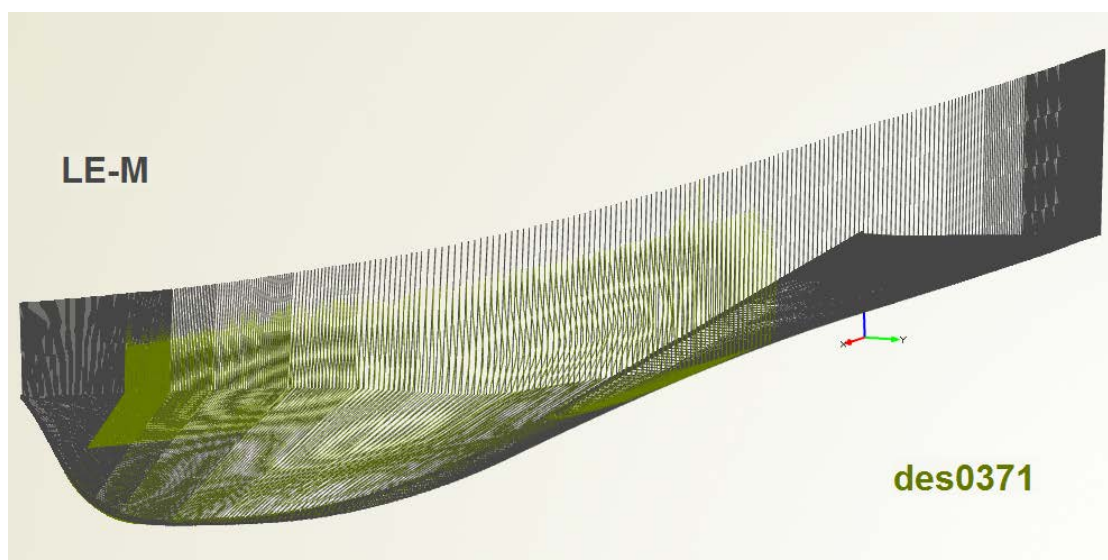


Figura 7.16. Offsets de BB sobrepostos, da LE-M em cinza, e da des0013 em verde



Pode-se perceber em ambos os cascos a tendência à concavidade do fundo, de forma a facilitar o escoamento de entrada do fluido e uniformizar os gradientes de pressão nesta área, teoricamente reduzindo as parcelas de resistência de ondas e de pressão viscosa da resistência total ao avanço. Consequentemente esta tendência observada acaba por atenuar as formas “cheias” da proa da embarcação, característica típica de um casco de deslocamento, previamente indicada como uma das principais causas da elevada resistência residual da LE-M, cuja redução foi tratada como função-objetivo nos presentes estudos de otimização. Apesar desta tendência ter sido esperada, ela não ocorreu de forma tão expressiva,

indicando que um próximo estudo pode ser realizado com foco nos parâmetros e intervalos que se mostraram mais influentes em relação à ocorrência deste efeito.

A figura 7.17 ilustra esta tendência

Após a seleção dos cascos des0013 e des0371, foi realizada a simulação pelo esquema de separação zonal do escoamento com as mesmas configurações dos cálculos apresentados no capítulo 6, de forma a serem comparados os resultados de resistência e perfil de ondas com os dados da LE-M. Estes resultados são ilustrados na tabela 7.3 e nas figuras de 7.18 a 7.21.

Figura 7.17. Tendência à Concavidade do Fundo nos *Designs*

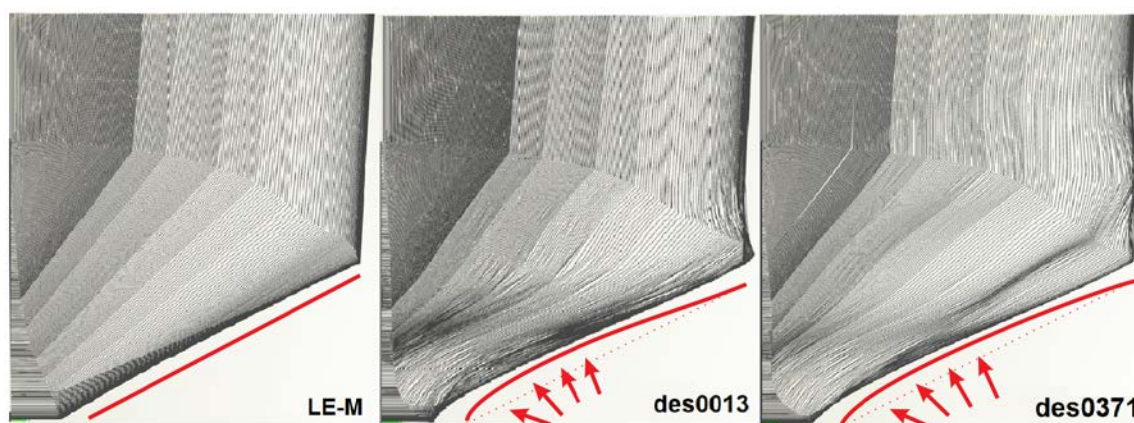


Tabela 7.3. Valores de Resistência da LE-M, des0013 e des0371

	LE-M	des0013	des0371
Área molhada, S (m ²):	0,311	0,323	0,317
Resist. Friccional, R_f (kN):	0,84	0,91	1,09
Resist. de Pressão Viscosa, R_v (kN):	10,07	9,43	9,16
Resist. Ondas, R_{wp} (kN):	10,54	10,50	10,43
Resist. Total, R_t (kN):	20,62	19,93	19,59
Redução em R_t:	-	3,35%	5,00%

Figura 7.18. Vista Superior, Comparação dos Perfis de Onda da LE-M e des0013

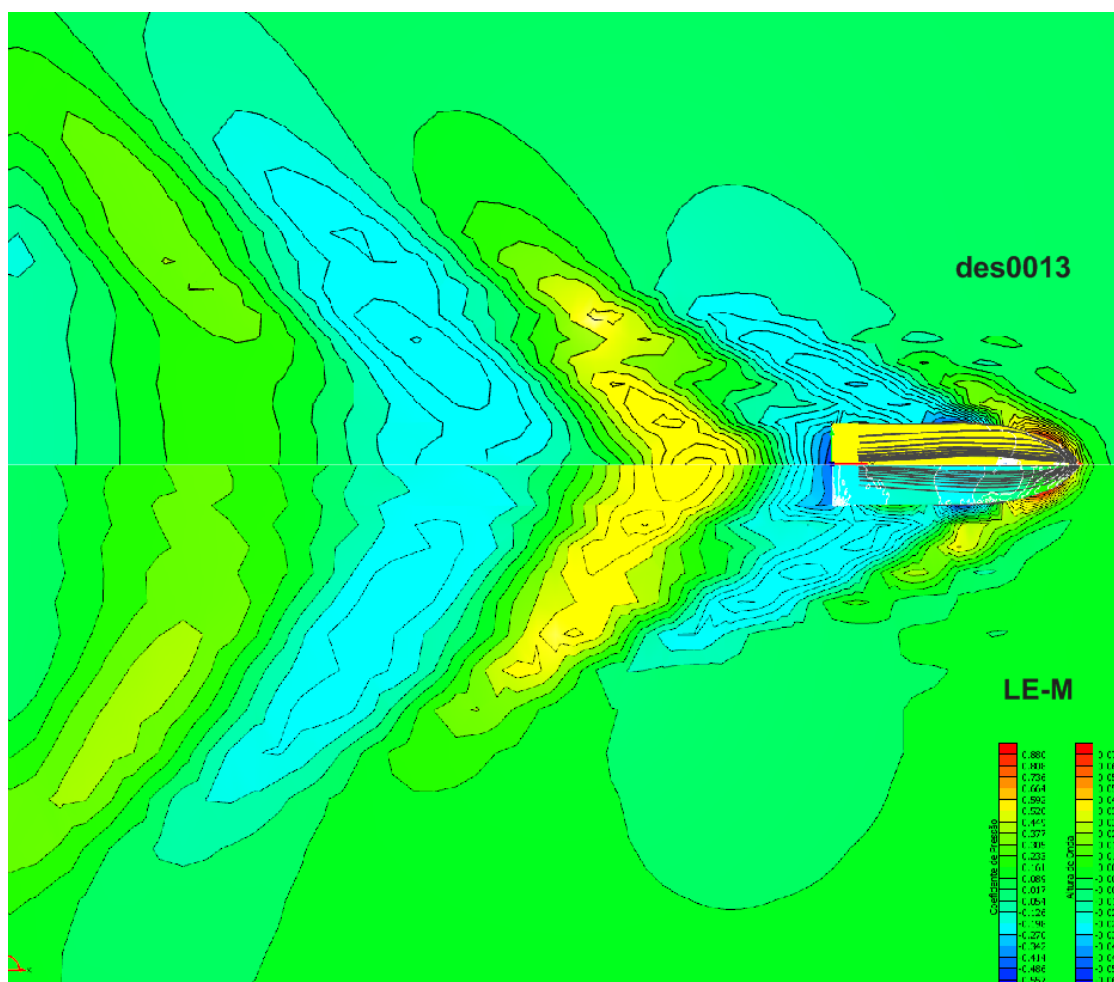


Figura 7.19. Vista Lateral, Comparação dos Perfis de Onda da LE-M e des0013

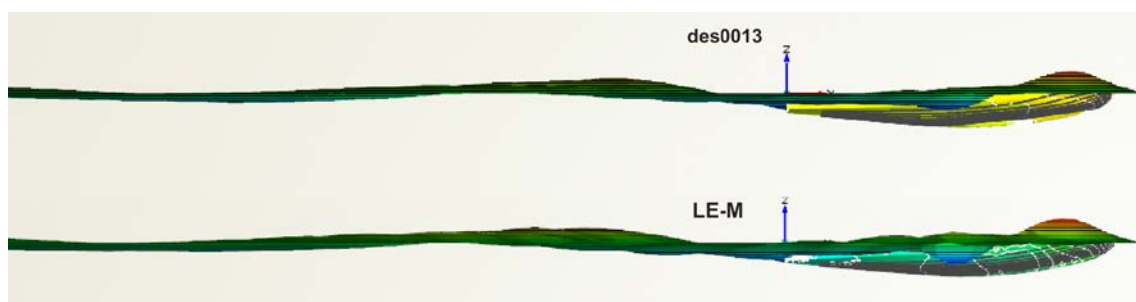


Figura 7.20. Vista Superior, Comparação dos Perfis de Onda da LE-M e des0371

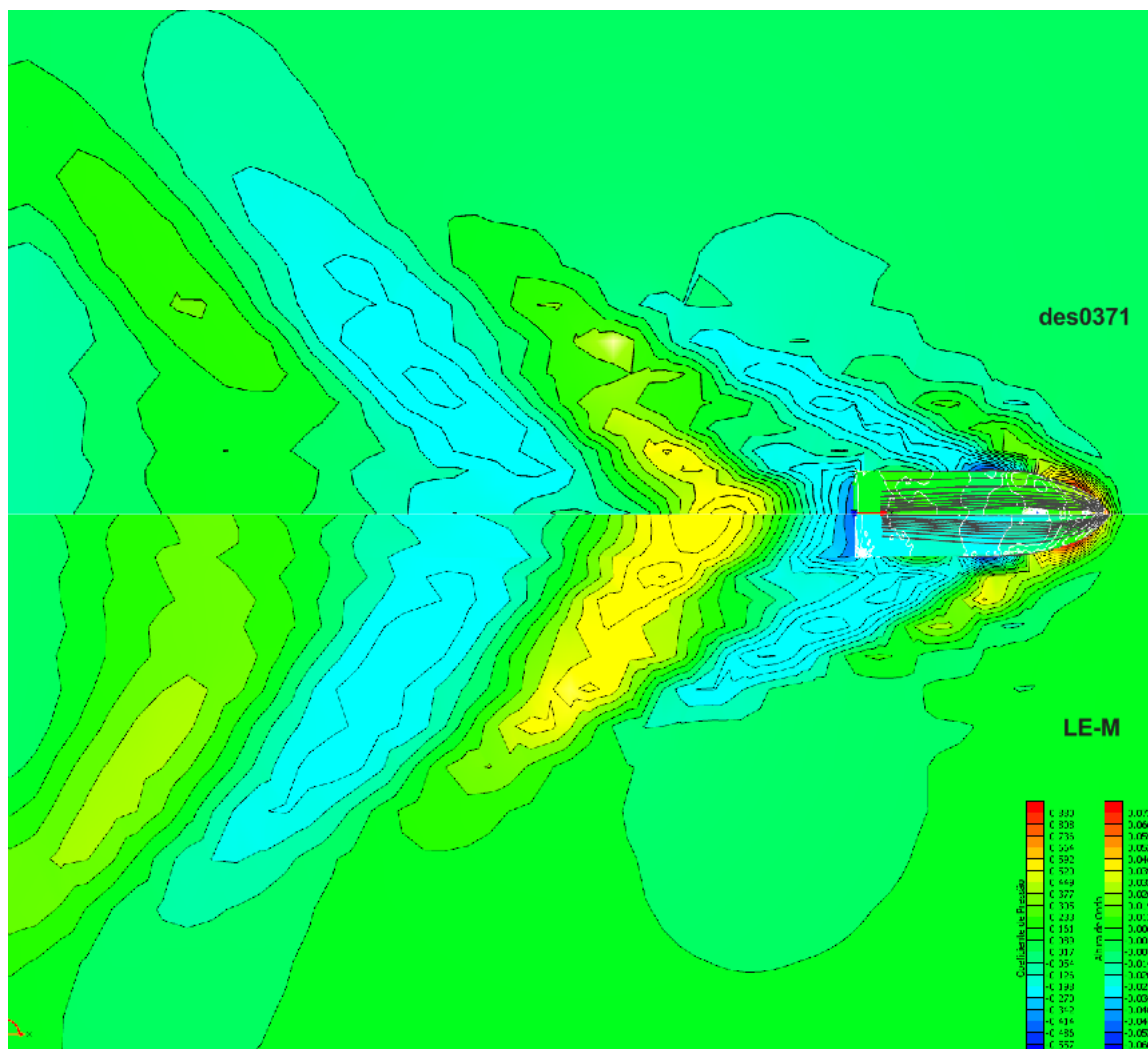
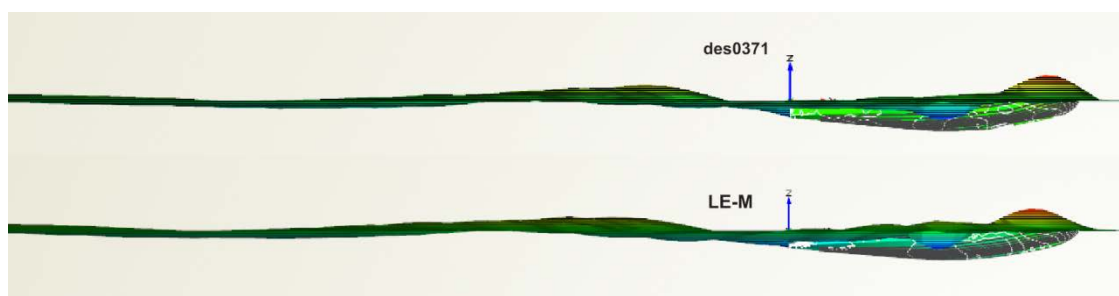


Figura 7.21. Vista Superior, Comparação dos Perfis de Onda da LE-M e des0371

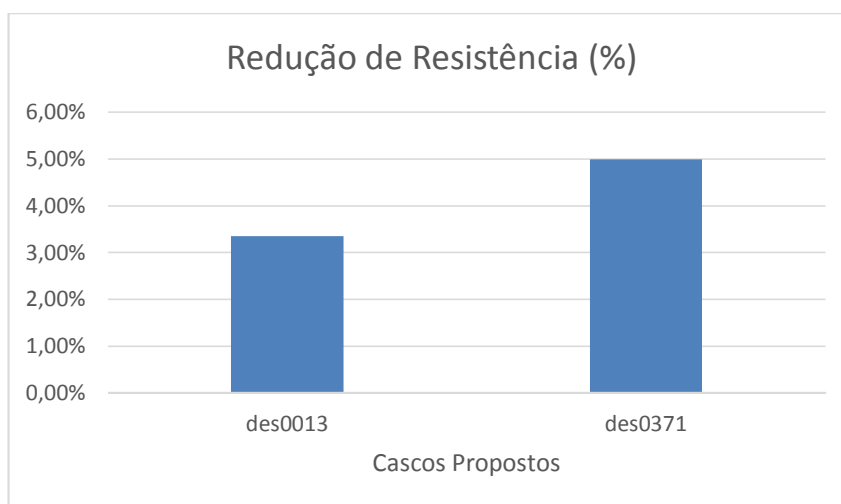


Pode-se observar o aumento da área molhada, S , em ambos os *designs*, e consequentemente o aumento da resistência friccional, R_f . Apesar do aumento mais acentuado de S no casco des0013, houve um maior acréscimo em R_f no casco des0371, possivelmente pelo surgimento de uma protuberância, ou

descontinuidade positiva nas linhas do casco acima da quina, na altura e linha dos pontos Hr1 e Hr2, e de um cavado, ou descontinuidade negativa abaixo da quina, na altura e linha do ponto Md2. Ao analisar os gráficos de convergência destes pontos, ilustrados nas figuras 7.6, 7.7 e 7.10, pode-se perceber que a convergência dos mesmos não foi atingida ao final da simulação, ficando aos valores “presos” em dois ou mais eixos. Ao realizar uma posterior análise de convergência destes pontos com um maior tempo computacional, é de se esperar que estas descontinuidades nas linhas sejam atenuadas e os valores de resistência apresentem uma redução ainda maior.

Como esperado pela observação da tendência à concavidade, houve a redução da resistência residual, sendo aqui detalhada nas resistências de pressão viscosa, R_v , e de ondas, R_{wp} , em ambos os casos (lembrando que ambos os coeficientes de resistência de ondas analisados na otimização, C_{wp} e $C_{wp\ trans}$, estão embutidos na parcela da resistência de ondas R_{wp}). Mesmo com o aparecimento das referidas descontinuidades, a redução da resistência residual foi mais acentuada no casco des0371, possivelmente pela maior concavidade na parte inferior do casco (em relação com o casco des0013), região onde há uma maior concentração de linhas de fluxo do escoamento, não sendo afetadas majoritariamente pelas descontinuidades. Ao analisar os perfis de ondas, pode-se notar a redução da amplitude e da emissão de ondas divergentes e convergentes, sendo esse efeito mais pronunciado no des0371.

Figura 7.22. Redução de Resistência dos Cascos Propostos



Feitas as devidas considerações sobre os resultados, observa-se que o casco 0371 apresentou uma redução na resistência total de 5,00%, enquanto o casco 0013 apresentou uma redução de 3,35%, como ilustrado na figura 7.22. Essa diferença pode ser explicada pelas configurações de cada estudo, onde no estudo OP6 o número de cascos analisados foi três vezes maior que no OP4, além do número de parâmetros considerados ter sido cinco vezes maior.

Ainda que ambos os estudos tenham apresentado reduções na resistência total, como esperado, estes valores podem ser aprimorados com a realização um estudo adicional com um maior número de casos e/ou modificação de intervalos de variáveis, de forma que a convergência dos parâmetros que apresentaram oscilação seja atingida.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a comparação dos resultados obtidos na simulação da série de velocidades ($F_n = 0,25 \sim 0,63$) proposta para o casco da LE-M e da LE-M (Mod), utilizando o *software* SHIPFLOW, com os dados do artigo “*Methodology for Improvement of the Hydrodynamic Efficiency of an Amazon School Boat Utilizing a CFD Tool*”, que foi realizado com a mesma série de velocidades para as mesmas geometrias dos cascos no *software* Fluent, pode-se observar a concordância das reduções de resistência na maior parte das velocidades entre os dois *softwares*, tendo ocorrido a validação dos cálculos do estudo nesta referida seção.

Entretanto, na última velocidade analisada, $F_n = 0,63$, foram observados padrões anômalos no padrão de ondas, indicando que os resultados para esta velocidade provavelmente não estão fisicamente coerentes. É sugerido o recálculo desta velocidade com uma variação dos parâmetros de geração malha e/ou dos coeficientes de relaxamento. Na validação por comparação com os dados experimentais, por estimativa de potência, também houve concordância entre os resultados, mas a mesma não pôde ser dita conclusiva pela quantidade de dados experimentais disponíveis não ser suficiente para a construção de uma curva característica experimental da LE-M.

Após as referidas simulações, o escoamento ao redor do casco pôde ser analisado, e então parâmetros do casco influentes nas características hidrodinâmicas do mesmo foram definidos. Com base nesses parâmetros, estudos de otimização foram conduzidos na plataforma CAESES, utilizando o algoritmo genético NSGA-II, de forma a atingir a redução da resistência de ondas através da configuração dos coeficientes C_{wp} e $C_{wp\ trans}$ como parâmetros-objetivo. Após diversas configurações de variáveis da otimização, foi atingida uma redução máxima de 5,00% na resistência total da LE-M, resultado que atesta que os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos.

Após a análise das tendências de modificação geométrica do casco nos estudos de otimização, infere-se que este valor de redução pode ser aprimorado com a realização de estudos adicionais, com um maior número de casos e

modificação de intervalos específicos de parâmetros que se mostraram influentes, mas não atingiram a convergência no presente estudo.

8.1 PROPOSIÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Postas as considerações finais, é proposta a realização das linhas de estudo e trabalhos futuros:

- Realização de ensaios experimentais em tanque de provas com um modelo em escala da LE-M a calado fixo, de forma que a curva de resistência obtida possa ser confrontada com os resultados das simulações, resultando em uma validação mais robusta;
- Execução de simulações numéricas em CFD em condição de autopropulsão, de modo que os resultados obtidos possam ser devidamente comparados com os resultados das provas de mar com o protótipo em escala real da LE-M;
- Realização de mais provas de mar com o protótipo em escala real da LE-M, de forma que os dados de uma série de velocidades possam ser registrados. Deste modo, uma curva de resistência experimental pode ser obtida a fim de se realizar a comparação com os valores das simulações de autopropulsão;
- Considerando a tendência de modificação geométrica do casco, é proposta a continuação dos estudos de otimização para investigação dos parâmetros que apresentaram maior influência na redução da resistência de ondas, com um maior número de casos e modificação de intervalos de variação, preferivelmente em uma máquina com maior poder computacional. Desta forma, a convergência dos parâmetros pode ser obtida mais facilmente, resultando em um casco com uma redução de resistência ainda maior;
- Estudar a influência da bolina de proa no escoamento ao redor do casco e na geração de ondas através de simulações em CFD. Desta forma, a atuação da bolina em relação a estes efeitos poderá ser quantificada, definindo se a intendida função de redução da parcela

residual na resistência total compensa o aumento de área molhada e consequente aumento da resistência friccional;

- Estudar a variação da resistência total da LE-M com outras configurações de casco para a mesma geometria (mesmas curvas) através de simulações em CFD, por exemplo, um configuração de catamarã ou um casco com degraus;
- Realizar um estudo de otimização com o casco LE-M (Mod) e analisar a variação da resistência total. Provavelmente a somatória dos efeitos do casco com fundo quinado e com concavidade resultará em uma redução da resistência total ainda maior.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABT, C.; HARRIES, S. **A new approach to integration of CAD and CFD for naval architects.** In *6th International Conference on Computer Applications and Information Technology in Maritime Industries (COMPIT)*. Italia, Cortona, 2007.
- BAGHERI, H.; GHASSEMI, H.; DEHGHANIAN, A. **Optimizing the seakeeping performance of ship hull forms using genetic algorithm.** International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav), e-ISSN: 2083-6481, 2014.
- BAGHERI, H.; GHASSEMI, H. **Optimization of wigley hull form in order to ensure the objective functions of the seakeeping performance.** Journal of Marine Science and Application, ISSN: 1671-9433, 2014.
- BERTRAM, V. **Practical ship hydrodynamics.** Butterworth-Heinemann, 2000.
- BLASIUS, H., **Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung.** Z. Angew. Math. Phys. Journal, e-ISSN: 1420-9039, p-ISSN: 0044-2275, p. 1-37, 1908.
- BRADSHAW, P. **The turbulence structure of equilibrium boundary layers.** Cambridge University Press, 1967.
- CERQUEIRA, L. L. De; RUGGERI, F; SAMPAIO, C. M. **Numerical investigation of scale effect and turbulence models on form factor.** In *XXII COPINAVAL - IPIN*. Argentina, Buenos Aires, 2011.
- CHAKRAVARTHY, S. R.; OSHER, S. **A new class of high accuracy TVD schemes for hyperbolic conservation laws.** Paper 85-0363, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal (AIAA), e-ISSN: 1533-385X, 1985.
- COELHO, D. F. **Avaliação do comportamento hidrodinâmico de uma lancha escolar utilizando CFD.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará. Brasil, Belém, 2016.
- COURANT, R.; ISAACSON, E.; REES, M. **On the solution of nonlinear hyperbolic differential equations by finite differences.** Communications on Pure and Applied Mathematics Journal, e-ISSN: 1097-0312. 1952.

DAWSON, C. W. **A practical computer method for solving ship-wave problems.** 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics. EUA, Berkeley, 1977.

DYKE, M. V. **Perturbation methods in fluid mechanics.** Parabolic Press, Incorporated, 1975.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to evolutionary computing.** 1^a edição, Springer, Natural Computing Series, 2003.

EGGERS et al. **An assessment of some experimental methods for determining the wavemaking characteristics of a ship form.** Transactions of the SNAME, Vol. 75, 1967.

GRIEBEL, M. et al. **Numerical simulation in fluid dynamics: A practical introduction.** Society for Industrial and Applied Mathematics. EUA, Philadelphia, 1998.

GRINBERG, M.; PADOVEZI, C.; TACHIBANA, T.; **Utilização de ensaios com modelos em escala reduzida para definição de formas otimizadas de navios.** In *XXII COPINAVAL - IPIN*. Argentina, Buenos Aires, p. 28, 2011.

GUHA, A.; FALZARANO, J. **Application of multi objective genetic algorithm in ship hull optimization.** Ocean Systems Engineering, e-ISSN: 2093-677X, 2015.

HEIMANN, J., **CFD based optimization of the wave making characteristics of ship hulls.** Tese de doutorado em Engenharia (Dr.) – Universidade Técnica de Berlin. Alemanha, Berlin, 2005.

HELLSTEN, A. **Some Improvements in Menter's $k - \omega$ SST Turbulence Model.** In 29th Fluid Dynamics Conference. EUA, Albuquerque, 1998.

HESS, J. L.; SMITH, A. M. O. **Calculation of the non-lifting potential flow about arbitrary three-dimensional bodies.** Relatório nro. E.S. 40622, Douglas Aircraft Co., Inc. USA, Long Beach, 1962.

HESS, J. L. **A higher order panel method for three-dimensional potential flow.** Relatório nro. N62269-77-C0437, Douglas Aircraft Co., Inc. USA, Long Beach, 1979.

HOLTROP, J. **Statistical analysis of performance test results.** In *International Shipbuilding Progress*. ISP-1977-2427001, p. 23-28, 1977.

HUTCHISON, B. L.; HOCHKIRCH, K. **CFD hull form optimization of a 12,000 cu.yd (9175m³) dredge.** In *10th International Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures (PRADS'07)*. USA, Houston, 2007.

IERVOLINO, L. **Estudo da resistência ao avanço de uma embarcação de planeio de 20 pés: abordagem computacional baseada em CFD.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil, Joinville, p. 88, 2015.

JANSON, C. E. **Potential flow panel methods for the calculation of free-surface flows with lift.** Tese de Ph.D., School of Mechanical and Vehicular Engineering, Chalmers University of Technology. Gotemburgo, Suécia, 1997.

LORD KELVIN alias THOMSON, W. **Deep sea ship-waves.** *Philosophical Magazine*, Series 6, Vol. 11, p. 1-25, 1906.

KUMAR, S.; HEIMANN, J.; HUTCHISON, B.; FENICAL, S. **Ferry wake wash analysis in San Francisco bay.** The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine Journal, ISBN: 9780784408346. In *the Eleventh Triannual International Conference: Ports 2007, 30 Years of Sharing Ideas 1977-2007*. USA, San Diego, 2007.

LARSSON, L.; JANSON, C. E.; BROBERG, L.; REGNSTRÖM, B. **SHIPFLOW User's Manual, Release 6.3.** FLOWTECH Int. AB, Gothenburg, Sweden, 2017.

LARSSON, L.; JANSON, C. E.; BROBERG, L.; REGNSTRÖM, B. **XCHAP theoretical manual.** FLOWTECH Int. AB, Gothenburg, Sweden, 2007.

LARSSON, L.; JANSON, C. E.; BROBERG, L.; REGNSTRÖM, B. **Optimization of ship sterns for best propulsive efficiency.** FLOWTECH Int. AB, Gothenburg, Sweden, 2015.

LARSSON, L.; JANSON, C. E.; BROBERG, L.; REGNSTRÖM, B. **Performance in waves.** FLOWTECH Int. AB, Gothenburg, Sweden, 2015.

LARSSON, L.; JANSON, C. E.; BROBERG, L.; REGNSTRÖM, B. **Flow Computations behind Vortex Generator**. FLOWTECH Int. AB, Gothenburg, Sweden, 2015.

LARSSON, L.; JANSON, C. E.; BROBERG, L.; REGNSTRÖM, B. **Hull optimization with Lackenby**. FLOWTECH Int. AB, Gothenburg, Sweden, 2015.

LARSSON, L.; JANSON, C. E.; BROBERG, L.; REGNSTRÖM, B. **Improvement of Aftbody Hull Form**. FLOWTECH Int. AB, Gothenburg, Sweden, 2015.

LARSSON, L.; JANSON, C. E.; BROBERG, L.; REGNSTRÖM, B. **Bulb shape optimization**. FLOWTECH Int. AB, Gothenburg, Sweden, 2015.

LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture**. 2^d ed. USA, Jersey City, 1988.

MAISONNEUVE, J.; HARRIES, S.; MARZI, J.; RAVEN, H.; VIVIANI U.; PIPO, H. **Towards optimal design of ship hull shapes**. 8th, International marine design conference; IMDC 2003; Athens, Greece, 2003.

MENTER, F. R., **Zonal two equation k- ϵ turbulence models for aerodynamic flows**. Paper 93-2906, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal (AIAA), e-ISSN: 1533-385X. In *24th Fluid Dynamics Conference*. USA, Orlando, 1993.

MERCI, B.; VIERENDEELS, J.; REIMSLAUGH, K.; DICK, E. **Computational treatment of source terms in two-equation turbulence models**. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal (AIAA), e-ISSN: 1533-385X, 1985.

MOLLAND, A. F. et al. **Ship resistance and propulsion practical estimation of propulsive power**. Cambridge University Press, 2011.

PATANKAR, S. V., **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, Hemisphere Washington, DC, 197 p, 1980.

PRANDTL, L., **Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung**. p. 484-491. In *Verhandlungen 3. Int. Math. Kongr. Alemanha, Heidelberg*, 1904.

PRANDTL, L., **Zur berechnung der Grenzschichten.** Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM), e-ISSN: 1521-4001, p. 77-82, 1938.

PRANDTL, L., **Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung.** p. 484-491. Em *Verhandlinger 3. Int. Math. Kongr.* Alemanha, Heidelberg, 1904.

PRANDTL, L., **Zur berechnung der Grenzschichten.** Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM), e-ISSN: 1521-4001, p. 77-82, 1938.

RAVEN, H.C. **A solution method for the nonlinear ship wave resistance problem.** Tese de Ph.D., Technische Universiteit Delft. Holanda, 1996.

RUGGERI, F.; NOGUEIRA, M. C.; ARAUJO, M. F. B. P. de; SAMPAIO, C. M. **Comparação entre programas de CFD aplicados à avaliação da parcela viscosa de resistência ao avanço de modelos de embarcações.** In *23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore (SOBENA)*. Brasil, Rio de Janeiro, 2010.

SAHOO, P. K.; BROWNE, N. A.; SALAS, M. **Experimental study of wave resistance of high-speed round bilge catamaran forms.** In *4th International Conference on High-Performance Marine Vehicles (HIPER'04)*. Itália, Roma, 2004.

SAVITSKY, D. **On the subject of high-speed monohulls.** In *Greek Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*. Grécia, Atenas, 2003.

SHALLEN, S. V. **Study of hydrodynamic flow around a vessel for powering and wave pattern.** IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, p. 42-48. In *International Conference on Emerging Trends in Engineering & Management (ICETEM)*. India, Tamilnadu, 2016.

SHARMA, S. D. **A comparison of the calculated and measured free-wave spectrum of an Inuid in steady motion.** In *Seminar on Theoretical Wave Resistance*. Proceedings, p. 201-257. USA, Ann Arbor, 1963.

SHARMA, S. D. **An attempted application of wave analysis techniques to achieve bow-wave reduction.** In *6th Symposium on Naval Hydrodynamics*. ONR/ACR-136. USA, Washington D.C., 1966.

TACHIBANA, T.; ARAUJO, A. V. C.; PACHA, R. **Lancha escolar fluvial para transporte de escolares com segurança.** In *XXIV Congreso Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuaria (COPINAVAL)*. Uruguai, Montevideu, 2015.

TACHIBANA, T.; MAIA, H. W. S.; DA CRUZ, F. C. et al. **Methodology for improvement of the hydrodynamic efficiency of an amazon school boat utilizing a CFD tool.** In *XXV Congreso Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuaria (COPINAVAL)*. Panamá, Cidade do Panamá, 2017.

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e propulsão: Engenharia de máquinas marítimas.** ENIDH, 2012.

VISONNEAU, M. **A step towards the numerical simulations of viscous flows around ships at full scale – Recent achievements within the European Union project EFFORT.** Marine CFD. UK, Southampton, 2005.

VANGBO, P. **CFD in conceptual ship design.** Tese de mestrado em Marine Systems Design, Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Noruega, Trondheim, 2011.

WS ATKINS CONSULTANTS. **Best practice guidelines for marine applications of computational fluid dynamics.** In *MARNET-CFD Workshop*. Kanazawa Institute of Technology, Japão, Nonoichi, 2009.

YOUSEFI, R.; SHAFAGHAT, R.; SHAKERI, M. **Hydrodynamic analysis techniques for high-speed planning hulls.** Applied Ocean Research, ISSN: 0141-1187, 2013.

ZOU, L.; LARSSON, L.; ORYCH, M. **Verification and validation of CFD predictions for a maneuvering tanker.** In *9th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD)*. China, Shanghai, 2010.

10 ANEXOS

O *Software* de CFD para embarcações SHIPFLOW possui vários módulos, cada um responsável por uma parte da computação do escoamento, como descrito no capítulo 04. O objetivo deste capítulo é de apresentar estudos de caso que utilizam técnicas de otimização relacionadas com este trabalho, realizados em embarcações reais. Os casos abordados são:

- Otimização da popa de um graneleiro para ganho de eficiência propulsiva;
- Otimização de um casco pelo método de Lackenby;
- Otimização do formato do bulbo de proa de uma embarcação do tipo Ro-Ro (Roll on/roll off).

10.1. OTIMIZAÇÃO DA POPA DE UM GRANELEIRO PARA GANHO DE EFICIÊNCIA PROPULSIVA

Em um processo de otimização automatizada, o casco ótimo para uma determinada operação é encontrado de acordo com os intervalos de parâmetros determinados como objetivos e restrições. Esta é uma ferramenta poderosa a serviço do Engenheiro de Projeto, tornando possível o desenvolvimento de formas de casco ainda mais eficientes. Conhecimento e experiência são necessários para definir as variações e restrições da geometria, assim como para encontrar a melhor combinação entre cascos otimizados para diferentes velocidades, calados e outras condições determinadas. A otimização automatizada pode ser vista como uma extensão do uso tradicional do CFD.

A otimização automatizada foi aplicada com sucesso primeiramente em otimizações de proa para minimizar a resistência de ondas. A otimização da popa requer mais poder computacional. Outra dificuldade é a atuação de dois efeitos principais nesta área, a resistência e a eficiência do propulsor, que determina a eficiência da embarcação. As primeiras otimizações de popa consideraram apenas a resistência em condição de reboque, enquanto a eficiência do propulsor era estimada pelas características da esteira. Esta técnica geralmente não resulta em valores satisfatórios. FLOWTECH (2015) apresenta um método que aprimora a eficiência do navio ao minimizar diretamente a potência entregue ao propulsor.

O tempo computacional demandado para o cálculo da resistência e de autopropulsão foi reduzido significativamente na versão 6 do SHIPFLOW. O método apresentado nesta seção pode ser realizado em pequeno cluster ou em uma workstation em um período de tempo razoável.

DESCRIÇÃO DO CASO

Para este caso o Graneleiro Japonês JBC (*Japanese Bulk Carrier*) da *Tokyo Workshop* 2015 foi utilizado como o casco base para as otimizações. Este caso foi desenvolvido para a validação de computações de resistência e autopropulsão, assim como a comparação dos resultados de otimização em escala real e reduzida. Os dados do navio-base são apresentados na tabela 10.1.

Tabela 10.1 Características Principais, Escala Real

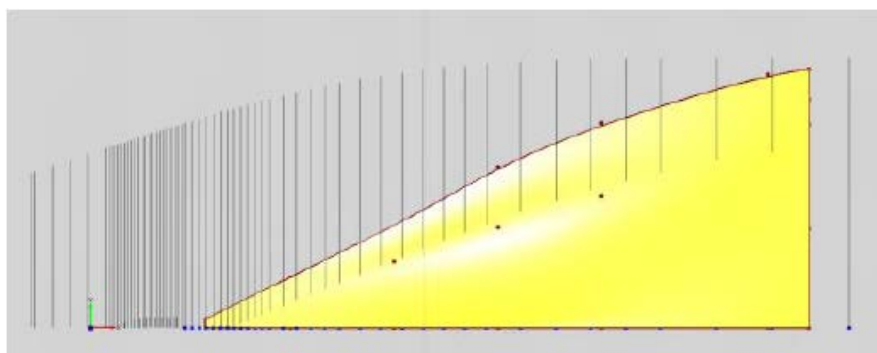
Comprimento da linha d'água	L_{WL} (m)	285,00
Boca máxima da linha d'água	B_{WL} (m)	45,00
Pontal	D (m)	25,00
Calado	T (m)	16,50
Deslocamento	∇ (m ³)	178.369,90
Coeficiente de bloco	CB	0,858
Velocidade	$Nós$ (kts)	14,5
Número de Froude	Fn	0,142

OTIMIZAÇÕES

O objetivo deste estudo é de realizar otimizações da popa do navio com base na resistência e na potência entregue ao propulsor, comparando os resultados de ambos os métodos. O *Software* CAESES da FRIENDSHIP-SYSTEMS foi utilizado para realizar as variações geométricas nas balizas e as otimizações em si. O módulo de cálculo RANS para o escoamento viscoso XCHAP do SHIPFLOW 6.0 foi utilizado para a computação dos valores de resistência e autopropulsão.

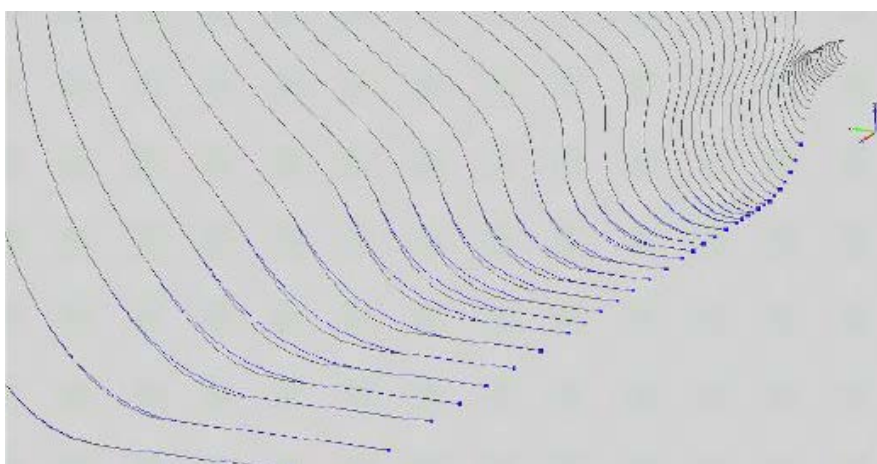
Uma técnica parcialmente paramétrica foi escolhida para as modificações do formato do casco. A configuração foi realizada de forma que as seguintes características do casco, raio do bojo, perfil da linha da quilha no bosso do eixo, largura do patilhão e largura das seções acima do patilhão pudessem ser controladas por alguns parâmetros. Cada uma das quatro características era controlada por superfícies de transformação delta. A figura 10.1 mostra uma transformação delta de superfície para a modificação do raio do bojo, e na figura 10.2, um exemplo da mudança resultante nas balizas. O algoritmo genético NSGA-II foi escolhido para a otimização. Este método analisa um grande intervalo de resultados, sem que as iterações fiquem presas em mínimos locais.

Figura 10.1. Transformação Delta de Superfície para Modificação do Raio do Bojo



Fonte: FLOWTECH, 2015

Figura 10.2. Modificação Resultante nas Balizas



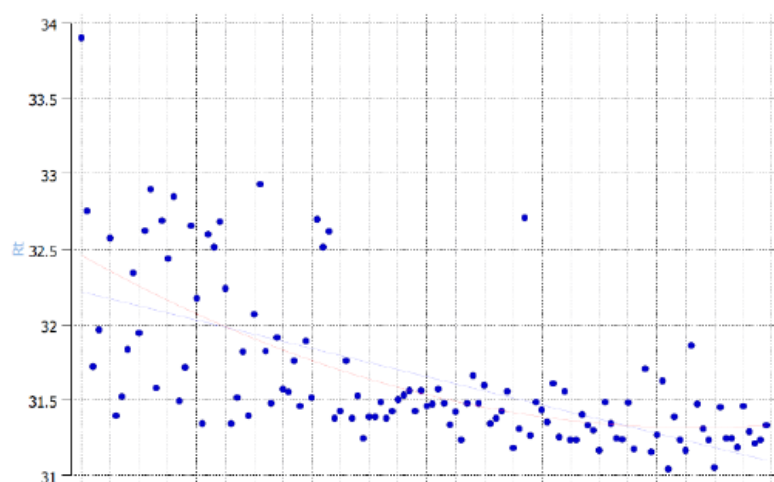
Fonte: FLOWTECH, 2015

OTIMIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA

A primeira otimização foi configurada de forma a minimizar a resistência em condição de reboque. A malha criada no módulo XGRID para os cálculos RANS consistia de 1,2 milhões de elementos, correspondendo à opção de refinamento de malha “FINE” do SHIPFLOW. A superfície original do casco foi importada em um arquivo do tipo IGES. Depois das modificações realizadas, a nova superfície foi exportada para o SHIPFLOW, que computou a nova malha automaticamente.

A computação total durou 15 minutos por caso em uma workstation (1x Intel i7 5960X, 8 núcleos, 3,0 GHz). Cerca de 120 modificações foram investigadas no total (5 gerações com uma população de 24 cada). A figura 10.3 mostra o histórico de otimizações realizadas para as condições determinadas.

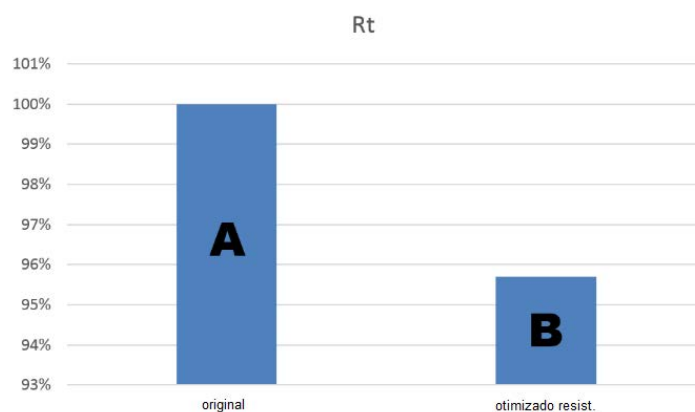
Figura 10.3. Histórico de Otimizações (R_t x tempo)



Fonte: FLOWTECH, 2015

A resistência total para o casco otimizado foi reduzida em 4%. Nenhuma restrição foi considerada e o deslocamento foi reduzido em 0,4%. Essa redução é representada na figura 10.4, sendo A o casco original e B o casco otimizado em função da resistência.

Figura 10.4. Comparação das Resistências Totais (R_t) do Casco Original (A) e do Casco Otimizado para Resistência Mínima (B)



Fonte: FLOWTECH, 2015 (adaptado)

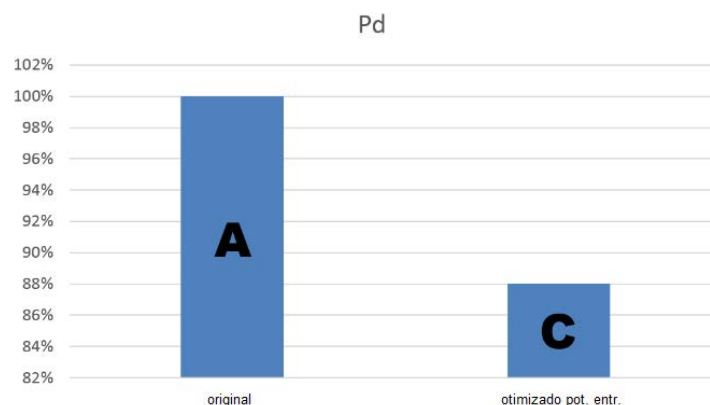
OTIMIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA AUTOPROPULSÃO

A segunda otimização foi realizada de forma a minimizar a potência entregue ao propulsor (P_d) na condição de autopropulsão na escala do modelo. O modelo da linha de sustentação para o propulsor do módulo XCHAP no SHIPFLOW foi utilizado nas computações de escoamento. A malha foi criada automaticamente a partir de um arquivo IGES com um maior refinamento ao redor da popa, totalizando em 3 milhões de elementos, correspondendo à opção de refinamento “MEDIUM” do SHIPFLOW.

O número elevado de células se deve à sobreposição de malhas requerida pelo modelo da linha de sustentação, assim como pela condição aplicada de assimetria, ou seja, ambos os bordos do casco são computados. A otimização foi calculada para 4 gerações, consistindo em uma população de 24 cada. Quatro casos foram computados em paralelo em um cluster de quatro nós, equipado com 2x Intel Xeon X5675, com 2x6 núcleos cada. O CAESES *Resource Manager* foi utilizado para a distribuição das tarefas. A otimização durou cerca de 24 horas.

A potência entregue ao propulsor foi reduzida em 10% no casco otimizado, como apresentado na figura 10.5, sendo o original o casco A, e o otimizado para a potência entregue ao propulsor o casco C. Nenhuma restrição foi aplicada nesse caso e o deslocamento foi reduzido em 0,4%, igualando-se ao casco B.

Figura 10.5. Comparação das Potências Entregues ao Propulsor (P_d) do Casco Original (A) e do Casco Otimizado para Potência Mínima (C)

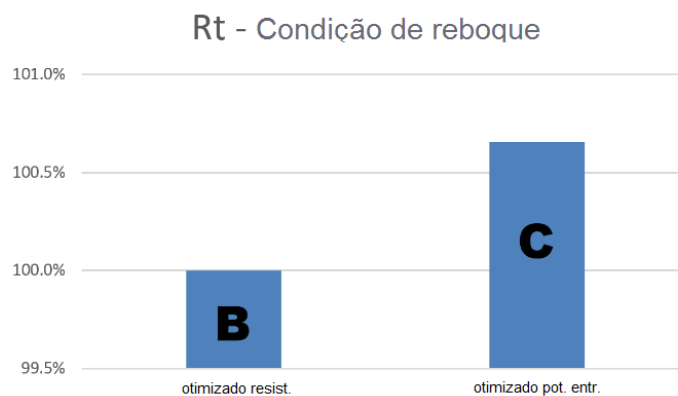


Fonte: FLOWTECH, 2015 (adaptado)

Comparações

Após as otimizações para cada condição, os cascos foram recomputados em ambas as condições e posteriormente comparados. A figura 10.6 ilustra o resultado da recomputação para a condição de reboque, comparando as resistências do casco C, otimizado para a potência entregue ao propulsor P_d , e do casco B, otimizado para a resistência total R_t . Como já esperado, o casco B apresentou um valor de resistência mais baixo.

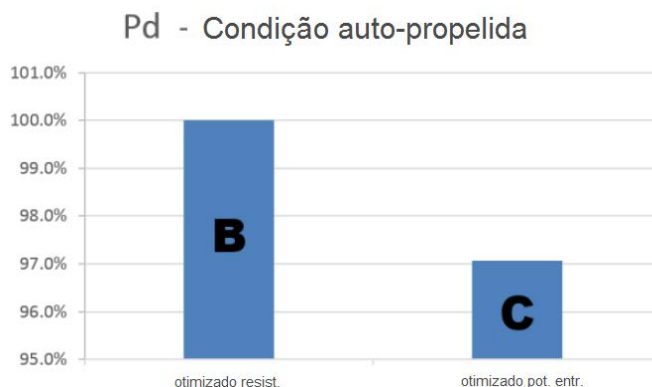
Figura 10.6. Resistência Total dos Cascos B e C



Fonte: FLOWTECH, 2015 (adaptado)

De forma similar, a condição de autopropulsão foi recomputada para ambos os cascos otimizados. Na figura 10.7, é ilustrada a comparação entre as potências entregues ao propulsor do casco B e do casco C. A comparação mostra claramente que a eficiência propulsiva elevada do casco C compensa a sua resistência elevada na condição em reboque, quando comparado com o casco B.

Figura 10.7. Potência Entregue ao Propulsor dos Cascos B e C



Fonte: FLOWTECH, 2015 (adaptado)

Esses procedimentos de otimização para a forma de casco demonstram que a condição auto-propelida gera os melhores resultados. Neste exemplo, o ganho em potência propulsiva do casco C foi alto o bastante para compensar o aumento de resistência. Com o uso de ferramentas CFD, o formato de casco ótimo para uma determinada aplicação pode ser investigado sucessivamente sem custos adicionais, ao contrário de um tanque de provas físico.

Além dos custos, outra desvantagem do uso de tanques de prova é que os efeitos de escala devem ser levados em consideração no pós-processamento das medições. Este tratamento é feito baseado em fórmulas empíricas e na experiência de testes em si. Nessas considerações e suposições empíricas, várias incertezas são introduzidas nos resultados. A correção de escala da esteira baseada nesses métodos dificilmente gera resultados satisfatórios, pois mesmo cascos similares geometricamente, mas em escalas diferentes, geram padrões distintos de esteira.

Com o *Software* SHIPFLOW, o problema do efeito de escala pode ser resolvido ao se computar o escoamento em um número de Reynolds adequado,

obtendo-se uma distribuição de esteira próxima à realidade, sem a necessidade da aplicação das correções mencionadas. Nesta parte do caso, serão comparados os resultados das otimizações em escala real e reduzida.

OTIMIZAÇÃO EM ESCALA REAL E REDUZIDA

Nesta seção, o *Software* CAESES foi utilizado para as variações geométricas e o módulo XCHAP do SHIPFLOW 6.0 para as otimizações em condição de autopropulsão em escoamento viscoso. A mesma técnica parcialmente paramétrica foi utilizada para as modificações de forma e parâmetros do casco, juntamente com os mesmos intervalos de variação como restrições. O algoritmo genético NSGA-II foi utilizado de forma a gerar resultados mais consistentes. Entretanto, desta vez a otimização foi realizada para o número de Reynolds em escala real.

RESULTADOS

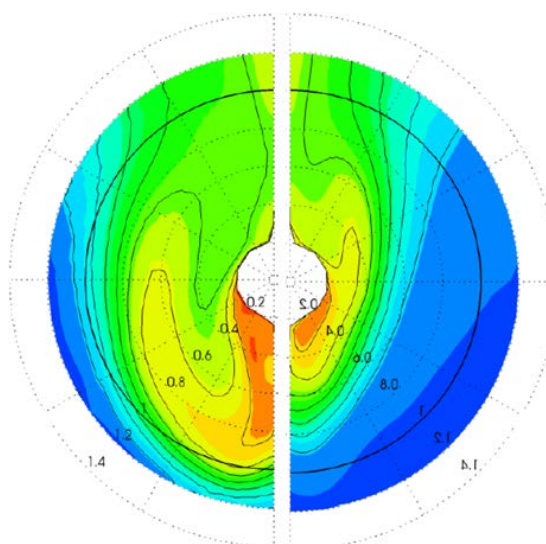
O efeito de escala entre o R_n do modelo, $7,46 * 10^6$ e o R_n do navio em escala real, $2,10 * 10^9$ é significativo, como representado na figura 10.8. A camada limite onde o propulsor opera é bem menos espessa em escala real. Um tanque de provas pode prover medições para a escala do modelo, enquanto o perfil da esteira na escala real pode ser apenas estimado. Com uma diferença tão significativa, é preferível que uma otimização de casco seja feita em um escoamento com número de Reynolds em escala real.

Como esperado, as otimizações em valores altos e baixos de R_n resultaram em formatos distintos de cascos, como representado na figura 10.9, onde o casco C em azul foi otimizado na escala do modelo e o casco D em vermelho na escala real. A maior discrepância ocorreu no perfil do bosso, mas também houveram diferenças nas seções mais à proa.

Na última etapa desta análise, todos os cascos otimizados (de A a D) foram recomputados e comparados em números de Reynolds em escala real e reduzida. Em uma das otimizações anteriores, o casco C resultou em uma menor P_d que o

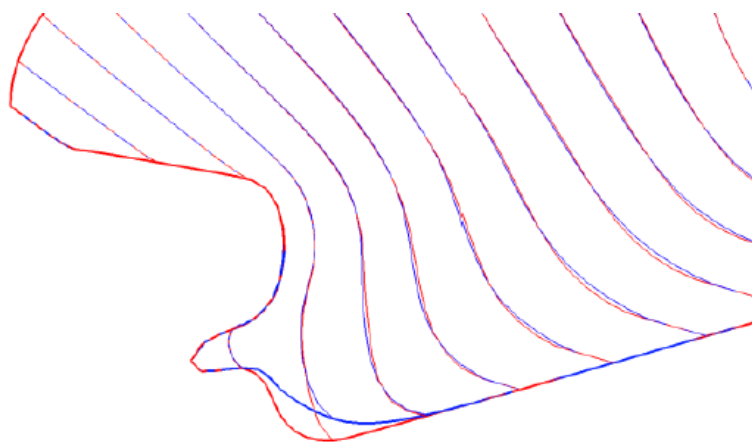
casco B, já que aquele foi otimizado em uma condição de autopropulsão. Entretanto, ambos foram otimizados em escala reduzida, apresentando resultados piores quando comparados com o casco D, que foi otimizado diretamente em escala real (figura 10.10). Já quando as computações são realizadas em escala reduzida, o casco D apresenta uma P_d mais elevada que a do casco C, mas menor que a do casco B (figura 10.11). Este resultado demonstra que não é possível otimizar cascos devidamente em escala reduzida.

Figura 10.8. Perfil da Esteira do Casco D nas Escalas do Modelo (Esquerda) e do Navio Real (Direita)

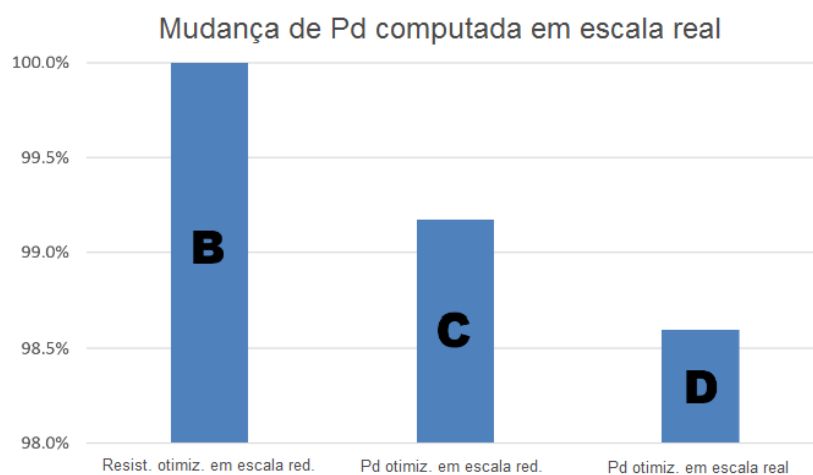


Fonte: FLOWTECH, 2015

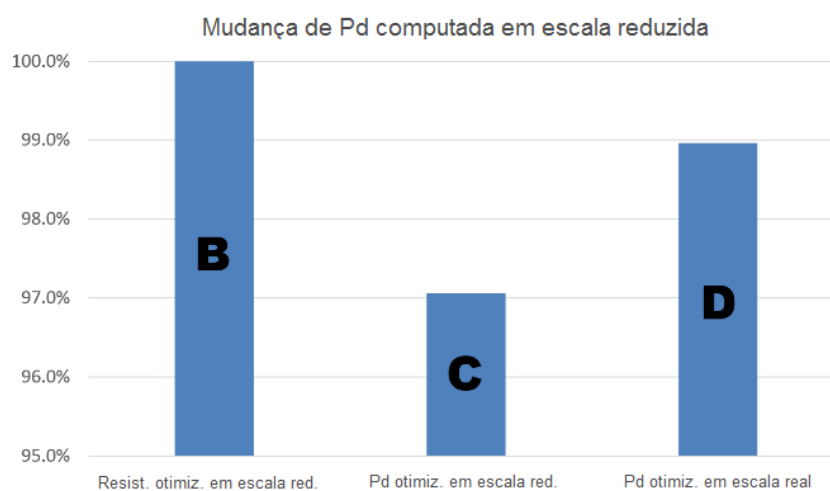
Figura 10.9. Cascos Otimizados C (Azul) e D (Vermelho)



Fonte: FLOWTECH, 2015

Figura 10.10. Mudança da Pd em Escala Real

Fonte: FLOWTECH, 2015 (adaptado)

Figura 10.11. Mudança da Pd em Escala Reduzida

Fonte: FLOWTECH, 2015 (adaptado)

CONCLUSÕES

As análises realizadas em CFD mostraram que os resultados mais robustos de otimização para a área da popa foram obtidos nas condições de autopropulsão e escoamento em escala real. O perfil da esteira onde o propulsor atua muda drasticamente com o aumento do número de Reynolds. Desta forma, os melhores resultados são alcançados com uma otimização direta em escala real, não sendo

necessária a aplicação de nenhum método de consideração dos efeitos de escala, como nos testes em tanques de provas.

Conclusões e recomendações:

- Otimização de cascos em condição de autopropulsão gera resultados mais robustos;
- A otimização em CFD em condição de escala real é o futuro do projeto de navios;
- O *Software* SHIPFLOW é uma ferramenta eficiente para otimizações em condições de autopropulsão em escala real;
- A modelagem parcialmente paramétrica através do CAESES permite a modificação de parâmetros do casco com flexibilidade e controle, tanto local quanto globalmente;
- SHIPFLOW e CAESES proporcionam um ótimo ambiente para otimizações hidrodinâmicas.

Diferentemente dos testes em escala reduzida, existem poucos dados de validação, de baixa qualidade, para testes em escala real. Métodos de análise em CFD podem ser verificados e validados numericamente para a escala real, mas dados de melhor qualidade para validação ainda são necessários para se atingir um nível satisfatório de confiabilidade dos resultados.

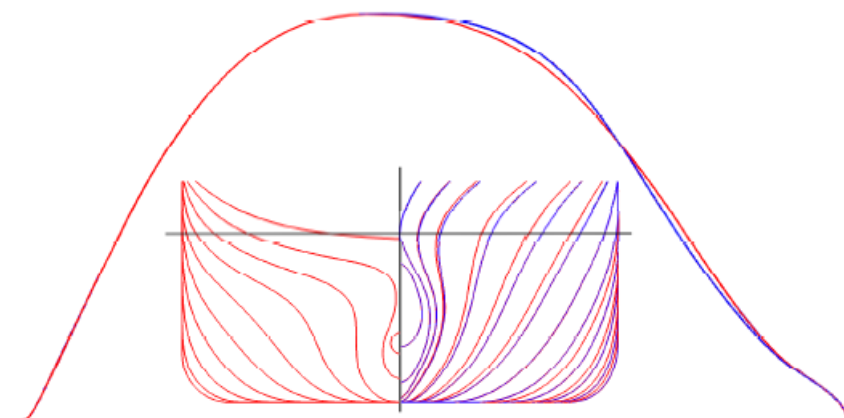
10.2 OTIMIZAÇÃO DE UM CASCO PELO MÉTODO DE LACKENBY

Em projetos de novos cascos de navios, uma questão constante a que o projetista se atém durante o processo é como modificar a geometria de um casco de forma a aprimorar a sua performance hidrodinâmica. Esta seção demonstra o uso do *Software* SHIPFLOW no refinamento das linhas de um casco no estágio de projeto inicial, com a variação da curva das áreas seccionais e centro de carena do casco baseada na transformação de Lackenby.

DESCRIÇÃO DO CASO

Os métodos de escoamento potencial já estão bem estabelecidos nos casos de simulações de resistência e padrão de ondas. Neste projeto, as balizas da proa de um navio do tipo porta-contêineres foram otimizadas com o objetivo de reduzir a resistência de formação de ondas utilizando a transformação de Lackenby. Os resultados da simulação foram posteriormente validados com dados experimentais do navio existente. O plano de linhas e a curva de áreas seccionais são ilustrados na figura 10.12, sendo as linhas vermelhas as linhas originais, e as azuis as linhas do formato otimizado. A otimização foi realizada para um $F_n = 0,24$

Figura 10.12. Balizas e Curva de Áreas Seccionais do Navio Pré e Pós Otimização



Fonte: FLOWTECH, 2015

COMPUTAÇÕES

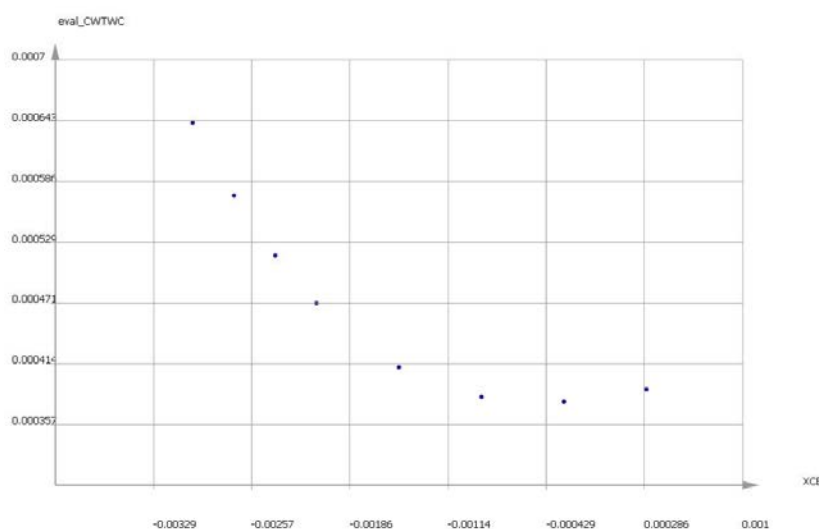
O processo foi configurado a partir de um arquivo de comandos e um arquivo de *offsets* (arquivo de dados com as coordenadas dos pontos das linhas) existentes, relacionados com a embarcação existente. A aplicação da transformação de Lackenby ficou restrita às linhas da parte da proa da embarcação, mas excluindo o bulbo. O algoritmo Nelder Mead Simplex foi utilizado na otimização por ser se mostrado um código robusto para esse tipo de aplicação. A posição longitudinal do centro de carena foi escolhida como uma variável de projeto, e a sua variação foi delimitada para entre -0,3% a +0,3% da L_{pp} . O valor da resistência de ondas cruzadas foi determinado como o objetivo do

cálculo, que foi realizado automaticamente para cada geometria variante, sendo gravados separadamente em uma tabela para posterior comparação. O padrão de onda resultante foi calculado pelo pós-processador do módulo de cálculo potencial XPAN.

RESULTADOS

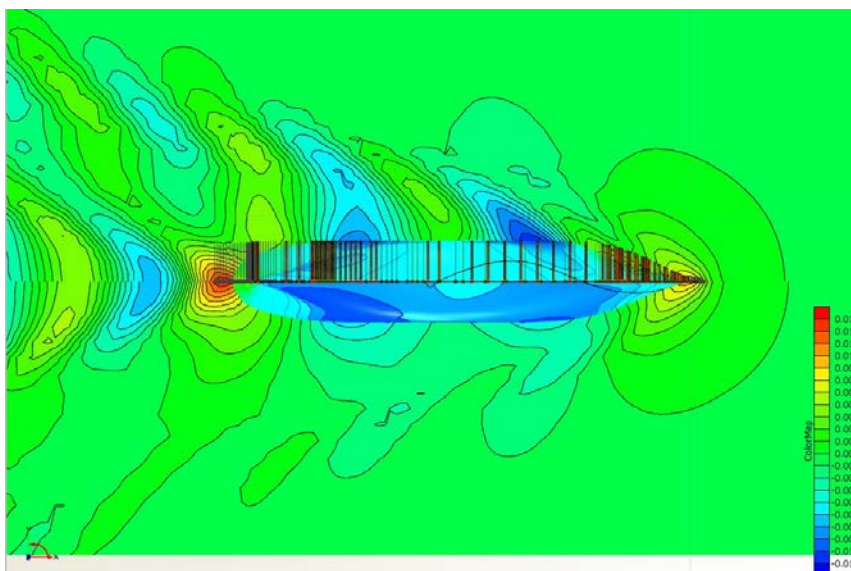
Como o casco original em questão já havia sido projetado em função da velocidade, era esperado que os resultados do casco otimizado pelo SHIPFLOW não se distanciassem muito dos originais. A otimização começou a partir do limite mínimo estipulado da variável de projeto, que estava distante do projeto original. Entretanto, o método Simplex convergiu em direção ao valor mínimo depois de alguns poucos passos, resultando ao final em uma boa concordância com o projeto original. O histórico das otimizações é ilustrado na figura 10.13, mostrando a rapidez na convergência e a consistência dos resultados. Também foi observada a redução da incidência de ondas divergentes, como ilustrado na figura 11.14.

Figura 10.13. Resistência de Ondas Cruzadas (CWTWC) x Posição Longitudinal do Centro de Carena (XCB)



Fonte: FLOWTECH, 2015

Figura 10.14. Comparação dos Perfis de Onda Gerados pela Geometria Original (acima) com uma das Geometrias Otimizadas (abaixo)



Fonte: FLOWTECH, 2015

CONCLUSÕES

O *Software* SHIPFLOW mostrou-se uma ferramenta eficiente para a seleção de novos designs gerados pela transformação de Lackenby e um módulo de otimização, já integrados no código. A interface do usuário permite a modificação de vários parâmetros, integrando as capacidades de pré e pós processamento. As ferramentas para modificação do formato do casco, otimização e análise em CFD podem ser acessadas no mesmo ambiente de forma eficiente.

10.3 OTIMIZAÇÃO DO FORMATO DE UM BULBO

A proa bulbosa, um design largamente utilizado e validado, é um meio efetivo para redução da resistência de um navio. Um bulbo reduz a resistência ao induzir a interferência destrutiva das ondas do bulbo com as ondas da proa, ao formar ondas de mesma amplitude e fase contrária nesta região (em um caso ótimo), reduzindo a resistência viscosa ao tornar o escoamento ao redor do casco mais regular. A diferença de fase dos dois sistemas de ondas é determinada pelo posicionamento do bulbo, e a amplitude das ondas do bulbo pelo volume

deslocado pelo mesmo. Entretanto, o projeto de um bulbo otimizado ainda é uma tarefa complexa, pois não há uma ferramenta de projeto específica para este fim que gere automaticamente a posição e volume ótimos de um bulbo. A presente seção demonstra o processo de análise pelo qual um projetista pode definir um bulbo otimizado para uma embarcação utilizando o *Software* SHIPFLOW.

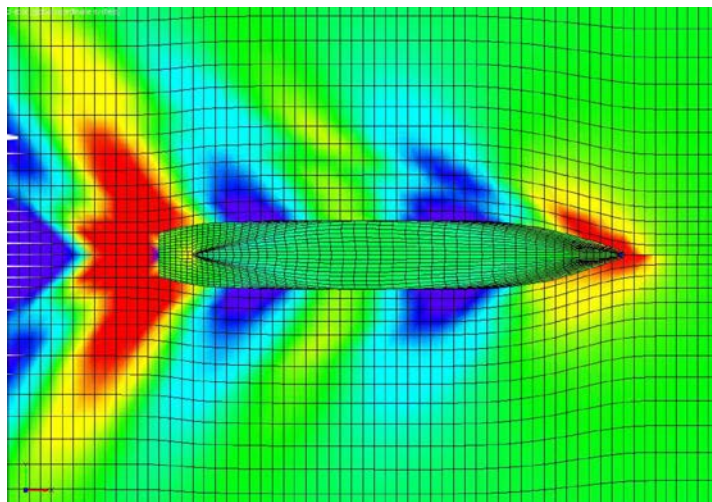
DESCRIÇÃO DO CASO

Um procedimento típico de otimização da proa bulbosa de um navio do tipo Ro-Ro é apresentado para um $F_n = 0,28$, incluindo transposições verticais e longitudinais da posição do bulbo por meio de transformações paramétricas semi-automatizadas.

COMPUTAÇÕES

O módulo de cálculo potencial XPAN é usado para simular o padrão de ondas na superfície livre e calcular a resistência de geração de ondas, como ilustrado na figura 10.15. O formato do bulbo é modificado com a utilização de funções de transformação Delta nas direções vertical e longitudinal, baseados em curvas parametrizadas de forma a suavizar a modificação do formato do bulbo a cada alteração. O método Nelder Mead Simplex é utilizado para encontrar a solução ótima de acordo com as restrições determinadas.

Figura 10.15. Padrão de Ondas na Superfície Livre e Malhas Geradas



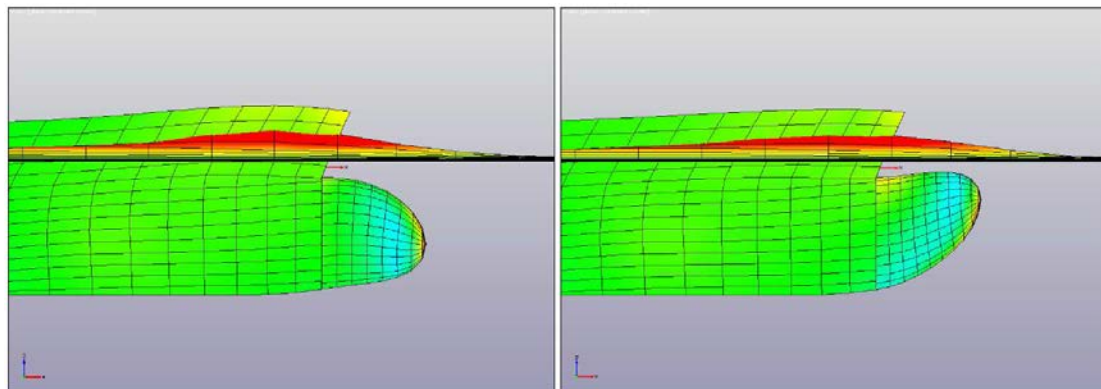
Fonte: FLOWTECH (2015)

RESULTADOS

Os resultados da otimização para cada design são apresentados em forma de tabela na interface do *Software*, atreladas a cada arquivo de saída com os detalhes da corrida e o padrão de onda na superfície livre em visualização em 3D, gerados pelo cálculo potencial. A comparação dos designs variantes pode ser feita na própria árvore de modificações na interface, com a exibição dos padrões de onda correspondentes lado a lado. Uma análise mais detalhada pode ser realizada utilizando os dados dos resultados na tabela, ou com a utilização de gráficos que podem ser plotados com os parâmetros definidos pelo usuário.

O resultado da otimização mostrou uma mudança significativa no padrão de ondas quando o comprimento do bulbo é modificado. Um bulbo com uma extensão mais longa se mostrou mais eficiente no cancelamento das ondas, entretanto, devido às restrições de comprimento do navio e ao aumento da área molhada, o comprimento do bulbo teve que ser restringido em detrimento de uma análise mais detalhada sobre os efeitos da variação da posição vertical, volume e forma do bulbo. Na figura 10.16 dois designs com diferentes posições verticais da extremidade do bulbo são comparados, por exemplo. O bulbo da direita, cuja extremidade está quase emergindo da superfície à velocidade zero, apresentou uma maior redução na resistência e na amplitude da onda de proa gerada, como pode ser observado.

Figura 10.16. Comparação Entre Dois *Designs* Variantes do Bulbo



Fonte: FLOWTECH (2015)

CONCLUSÕES

A interface conjunta dos *Softwares* CAESES e SHIFLOW se mostrou robusta e prática, gerando resultados precisos e de alta sensibilidade para modificações mínimas na geometria, possibilitando a realização de projetos desde o início, modificações em um projeto já existente ou um estudo de otimização paramétrica, tudo em uma mesma interface.

10.4 COMANDOS DE CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES - MÉTODO DE SEPARAÇÃO ZONAL

Nesta seção são apresentados os comandos de configuração das simulações realizadas para cada velocidade da LE-M e da LE-M (Mod), pelo método de separação zonal do escoamento.

SIMULAÇÃO $F_n = 0,25$

```
xflow
title( title = "LEM_SS_zonal_025" )
program( all )
vship( fn = 0.254172, rn = 24074074.07 )
hull( mono, h1gr = "main", fsflow, tran, medium, fdens = 0.5 )
offset( file = "as_off_LEM_SS", lpp = 7.8, xaxdir = -1, ysign = 1,
xori = 7.8, zori = 0.67 )
end
```

```

xmesh
free( grno = 2, df1 = 0.05 )
end

xpan
parall( nthread = 4 )
end

xgrid
size( medium )
offset( h1gr = "main", fbgr = "bow" )
yplus( ytarget = 40 )
end

xchap
parall( nproc = 4 )
control( start, maxit = 5000, adi, easm )
end

```

SIMULAÇÃO Fn = 0,31

```

xflow
title( title = "LEM_SS_zonal_031" )
program( all )
vship( fn = 0.317715, rn = 30092592.59 )
hull( mono, h1gr = "main", fsflow, tran, medium, fdens = 0.5 )
offset( file = "as_off_LEM_SS", lpp = 7.8, xaxdir = -1, ysign = 1,
xori = 7.8, zori = 0.67 )
end

xmesh
free( grno = 2, df1 = 0.05 )
end

xpan
parall( nthread = 4 )
end

xgrid
size( medium )
offset( h1gr = "main", fbgr = "bow" )
yplus( ytarget = 40 )
end

xchap
parall( nproc = 4 )
control( start, maxit = 5000, adi, easm )
end

```

SIMULAÇÃO Fn = 0,41

```

xflow
title( title = "LEM_SS_zonal_041" )
program( all )
vship( fn = 0.413029, rn = 39120370.37 )
hull( mono, h1gr = "main", fsflow, tran, medium, fdens = 0.5 )
offset( file = "as_off_LEM_SS", lpp = 7.8, xaxdir = -1, ysign = 1,
xori = 7.8, zori = 0.67 )
end

xmesh
free( grno = 2, df1 = 0.05 )
end

xpan
parall( nthread = 4 )
end

xgrid
size( medium )
offset( h1gr = "main", fbgr = "bow" )
yplus( ytarget = 40 )
end

xchap
parall( nproc = 4 )
control( restart, maxit = 5000, adi, easm )
end

```

SIMULAÇÃO Fn = 0,47

```

xflow
title( title = "LEM_SS_zonal_047" )
program( all )
vship( fn = 0.476572, rn = 45138888.89 )
hull( mono, h1gr = "main", fsflow, tran, medium, fdens = 0.5 )
offset( file = "as_off_LEM_SS", lpp = 7.8, xaxdir = -1, ysign = 1,
xori = 7.8, zori = 0.67 )
end

xmesh
free( grno = 2, df1 = 0.05 )
end

xpan
parall( nthread = 4 )
end

```

```

xgrid
size( medium )
offset( h1gr = "main", fbgr = "bow" )
yplus( ytarget = 40 )
end

xchap
parall( nproc = 4 )
control( start, maxit = 6000, adi, easm )
end

```

SIMULAÇÃO $Fn = 0,54$

```

xflow
title( title = "LEM_SS_zonal_054" )
program( all )
vship( fn = 0.540115, rn = 51157407.41 )
hull( mono, h1gr = "main", fsflow, tran, medium, fdens = 0.3 )
offset( file = "as_off_LEM_SS", lpp = 7.8, xaxdir = -1, ysign = 1,
xori = 7.8, zori = 0.67 )
end

xmesh
free( grno = 2, df1 = 0.07 )
end

xpan
parall( nthread = 4 )
end

xgrid
size( medium )
offset( h1gr = "main", fbgr = "bow" )
yplus( ytarget = 40 )
end

xchap
parall( nproc = 4 )
control( start, maxit = 12000, adi, easm, verbose = 2 )
end

```

SIMULAÇÃO $Fn = 0,63$

```

xflow
title( title = "LEM_SS_zonal_063" )
program( all )

```

```

vship( fn = 0.635429, rn = 60185185.19 )
hull( mono, h1gr = "main", fsflow, tran, medium, fdens = 0.2 )
offset( file = "as_off_LEM_SS", lpp = 7.8, xaxdir = -1, ysign = 1,
xori = 7.8, zori = 0.67 )
end

```

```

xmesh
free( grno = 2, df1 = 0.09 )
end

```

```

xpan
parall( nthread = 4 )
relaxat( rfsour = 0.1 )
twcut( on )
end

```

```

xgrid
size( medium )
offset( h1gr = "main", fbgr = "bow" )
yplus( ytarget = 40 )
end

```

```

xchap
parall( nproc = 4 )
control( start, maxit = 5000, adi, easm )
end

```