

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

ELISA REGO MENDES

PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO OTIMIZADA DE UM PROPULSOR DA SÉRIE B

Joinville

2015

ELISA REGO MENDES

PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO OTIMIZADA DE UM PROPULSOR DA SÉRIE B

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

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2015

PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO OTIMIZADA DE UM PROPULSOR DA SÉRIE B

ELISA REGO MENDES

Esta monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Joinville (SC), 04/Dezembro/2015.

Banca Examinadora:

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr.Eng.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Minioli, Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

“Vá firme à direção das suas metas,
porque o pensamento cria, o desejo atrai
e a fé realiza.”

Lauro Trevisan.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me guiou para que eu conseguisse atingir meus objetivos.

Apesar de sempre ter como objetivo a formação acadêmica em Eng. Naval, por ter passado no vestibular da Faculdade Estadual de Santa Catarina, decidi cursar Eng. Mecânica e em seguida especializar em na área Naval, já que as Faculdades que possuíam o curso de Eng. Naval ficavam longe de Santa Catarina, em estados onde o custo de vida era mais alto e as vagas do curso eram disputadíssimas.

Como nada na minha vida acontece por acaso, depois de dois anos e meio em Joinville, já insatisfeita com o curso de Eng. Mecânica, a Faculdade Federal de Santa Catarina cria um novo campus em Joinville que possui o curso que sempre quis. Com certeza, se tivesse passado no vestibular de Eng. Mecânica na UFSC, na qual o curso fica no campus de Florianópolis, cidade que residia minha família, não teria interrompido o curso e me mudado para outra cidade para estudar outra engenharia. Mas Deus escreve por linhas tortas, e apesar de não ter percebido na hora, hoje tenho certeza que fui guiado por ele, para hoje estar me formando o curso dos sonhos.

Agradeço a todo o corpo docente da UFSC e os funcionários que tornaram possível a implementação desses cursos, ainda que com poucos recursos, e quase nenhuma infraestrutura, pelo menos a “infraestrutura prometida”, que até hoje está longe de ser concluída. Além de terem sido peça fundamental para vencer obstáculos como greves e mudanças inesperadas de currículos que exigiram contratações de última hora, mudança de calendário acadêmico entre outras atividades.

Agradeço ao meu orientador que me guiou para realização desse trabalho, mesmo estando em estados diferentes. Com poucas palavras, através de telefonemas e mails, conseguia clarear as nuvens pretas de dúvidas que sobrevoavam minha cabeça.

Agradeço ao meu colega de trabalho que me encorajou e ajudou a desvendar os “mistérios e frescuras” do Excel.

Agradeço a minha amada mãe que sempre me apoiou em tudo na minha vida e apostou nos meus estudos me dando suporte para que fosse possível estudar em outra cidade, estagiar em outro estado e fazer intercâmbios e cursos para aprender outras línguas.

Agradeço meus amigos de faculdade que viraram noites estudando comigo e até tiraram dúvidas de cálculos pelas redes sociais e muitas vezes foram a minha família em Joinville, companheiros de almoços, compras de supermercado, seriados, etc.

Agradeço as minhas companheiras de apartamento, minhas calouras preferidas, que além de dividirem as contas, as tarefas da casa e me ajudarem resolver alguns problemas em relação ao apartamento e condomínio ainda tiveram que aguentar meu “filho”, Coxi (cachorro Yorkshire), também conhecido como “Mudeuso”, que algumas vezes era um tanto quanto irritante quando latia demais.

Agradeço ao apoio dos meus amigos que conheci no ensino médio e até hoje mantenho amizade apesar de morar em cidades diferentes e até em estado diferente. Sei que são amigos para a vida toda e sempre acreditaram no meu potencial, embora constantemente tenha sofrido “bullying” por ser a última a me formar.

RESUMO

O correto dimensionamento do propulsor é uma das etapas mais importantes no projeto de uma embarcação, visto sua influência direta no desempenho e no custo operacional da embarcação. O propulsor mais utilizado é o hélice, que pode ter diversas formas, finalidades e dimensões. Atualmente, as séries sistemáticas são bastante usadas como técnica para determinação do hélice em todas as fases do projeto. Contudo além de exigir bastante conhecimento do projetista para definir parâmetros iniciais que resultem em hélices com alta eficiência para cada tipo/porte de embarcações, ainda deve-se atentar as restrições impostas pelos limites de cavitação.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que auxiliará o projetista na seleção de um hélice da Série de Wageningen, também chamada de Série B. Essa ferramenta, através de algoritmos de otimização, será capaz de encontrar, para um certo perfil de operação (resistência ao avanço e velocidade de operação) as características de um hélice da Série B que resultam na maior eficiência e que atende ao critério de cavitação.

Palavras-chave: Hélice, Sistema Propulsivo, Seleção do Propulsor, Série de Wageningen, Otimização.

ABSTRACT

The correct sizing of a propeller is one of the most important stages of a ship design, due to its direct influence on the performance and operational cost of the vessel. The most popular propeller is the helix which can be found in a variety of forms, proposes and dimensions. Nowadays, systematic series of propellers are presented as great techniques to determine the propeller in all stages of the design. However, it demands a good knowledge of the designer to define the initial parameters which results in high efficiency propeller for each type/size of vessel and if after the selection the helix is not approved in cavitation criteria, the selection must be redone.

This work presents the development of a computational tool which will provide support to the designer for the selection of a propeller of Wageningen Series also known as B Series. This tool, through optimization algorithms, will be able to find, for a specific operation (ship resistance and velocity) the characteristics of a helix of B series which results in major efficiency and fits the cavitation limits.

Key-words: Helix, Propulsion System, Propeller Selection, Wageningen Series, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Componentes da repetência da embarcação	15
Figura 2 - Funcionamento do hélice	19
Figura 3 - Bosso, plano do propulsor e linhas principais	20
Figura 4 - Perfil de seção de pá	22
Figura 5 - Passo do hélice.....	23
Figura 6 – Diagrama em águas livres	25
Figura 7 - número de pás e a razão de área considerada nos ensaios da Série B	26
Figura 8 – Aspecto geométrico das pás da Série B.	26
Figura 9 - Diagrama em águas livres de um hélice da série sistemática de Wageningen	27
Figura 10 - Representação polinomial dos coeficientes K_T e K_Q do hélice.....	28
Figura 11 - Características do escoamento ao longo da embarcação.	29
Figura 12 - Diagrama de Burril	32
Figura 13 - Representação esquemática da distância para hélices gêmeas.	34
Figura 14 - Representação esquemática da distância do hélice.....	35
Figura 15 - Ilustração sobre a otimização de problemas com restrição.....	36
Figura 16 - Display da planilha Seleção Otimizada de Um Propulsor da Série B	41
Figura 17 - Diagrama em águas livres correspondentes aos dados da tabela 6.....	42
Figura 18 - Sobreposição do gráfico com o diagrama de Burril.	47
Figura 19 - Procedimento de seleção do hélice	49
Figura 20 - Hélice de maior eficiência	50
Figura 21 – Ponto plotado no diagrama de Burril	52
Figura 22 - Ponto plotado no diagrama de Burril.....	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico dos pontos retirados do diagrama de Burril	46
Gráfico 2 - Gráfico apresentado pela planilha	53
Gráfico 3 - Gráfico apresentado pela planilha	54
Gráfico 4 - V=6Knots, D=30% e 2,5% de cavitação	57
Gráfico 5 - V=6Knots, D=50% e 2,5% de cavitação	57
Gráfico 6 - V=6Knots, D=70% e 2,5% de cavitação	58
Gráfico 7 - V=12Knots, D=30% e 2,5% de cavitação	59
Gráfico 8 - V=12Knots, D=50% e 2,5% de cavitação	59
Gráfico 9 - V=12Knots, D=50% e 5% de cavitação	60
Gráfico 10- V=18Knots, D=30% (10,5 e 2,5% de cavitação).....	61
Gráfico 11 - V=18Knots, D=30% e 20% de cavitação	62
Gráfico 12 - V=18Knots, D=50% e 10% de cavitação	62
Gráfico 13 - V=18Knots, D=50% e 20% de cavitação	63
Gráfico 14 - V=18Knots, D=70% e 20% de cavitação	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Limitações Método Holtrop	17
Tabela 2- Distância mínima recomendada para hélices gêmeas.	34
Tabela 3 - Dados de entrada hélice.....	39
Tabela 4 - Dados de entrada embarcação Holtrop.....	40
Tabela 5 - Dados de entrada embarcação resistência definida	40
Tabela 6 - Dados de entrada	43
Tabela 7 – Restrições da Série B	44
Tabela 9 - Tabela de aprovação ou reprovação do limite de cavitação	48
Tabela 10 – Resultado eficiência máxima Método tradicional X Planilha	50
Tabela 11 - Comparação de resultados Método Tradicional e Planilha	51
Tabela 12 - Ponto do hélice	52
Tabela 13 - Valores dos parâmetros e ponto do hélice.....	53
Tabela 14 - Dados das embarcações.....	56
Tabela 15 - Eficiência para porcentagem de cavitação e processo de otimização sem cavitação.(V=6Knots).....	58
Tabela 16 - Eficiência para porcentagem de cavitação e processo de otimização sem cavitação.(V=12Knots).....	60
Tabela 17 - Eficiência para porcentagem de cavitação e processo de otimização sem cavitação.(V=18Knots).....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	RESISTENCIA AO AVANÇO	15
2.1.1	CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO	16
2.1.2	MÉTODO DE HOLTROP E MENNEN	17
2.2	SISTEMA DE PROPULSÃO	18
2.2.1	FUNCIONAMENTO DO HÉLICE	19
2.2.2	GEOMETRIA DO HÉLICE	20
2.3	DIAGRAMA DE ÁGUAS LIVRES	24
2.4	SÉRIES SISTEMÁTICAS	25
2.4.1	SÉRIE DE WAGENINGEN	26
2.4.2	Polinômio de interpolação dos resultados experimentais da serie B	28
2.5	INTERAÇÃO CASCO-HÉLICE	28
2.6	CRITÉRIO DE CAVITAÇÃO	31
2.7	OTIMIZAÇÃO	35
2.7.1	Modelo de otimização para seleção do propulsor	36
3	METODOLOGIA	38
4	IMPLEMENTAÇÃO	39
4.1	DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL	42
4.1.1	DIAGRAMAS DE ÁGUAS LIVRES J DE OPERAÇÃO E EFICIÊNCIA DO HÉLICE.	
	42	
4.1.2	OTIMIZAÇÃO	44
4.1.3	HOLTROP	45
4.1.4	CAVITAÇÃO	45
4.2	ESTUDO DE APLICAÇÃO	48
4.3	VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS	55
4.3.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
	REFERÊNCIAS	66
1	ANEXO	68
2	APÊNDICE	69

1 INTRODUÇÃO

O propulsor de uma embarcação é responsável pela geração da força propulsiva encarregada de fazer com que a velocidade de operação desejada seja alcançada. (TONACIO, 2014). A escolha adequada de um sistema de propulsão é muito importante no projeto de uma embarcação. Um propulsor com baixo rendimento ou incapaz de produzir força suficiente para mover a embarcação como desejado, pode causar grandes prejuízos.

Segundo Trindade (2012), o hélice¹ é o sistema de propulsão mais utilizado em embarcações, entretanto, seu dimensionamento não é uma tarefa simples, deve atender a vários requisitos como: desempenho, eficiência, critério de cavitação entre outros. O método, atualmente, mais utilizado para o dimensionamento de um hélice é o das séries sistemáticas, que consiste em primeiramente estimar parâmetros geométricos que descrevem o propulsor e através de diagramas obtidos por ensaio experimental encontrar os parâmetros que retratam o seu desempenho (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011). Este método é eficiente, porém não garante a melhor escolha, pois depende da experiência de engenheiros e projetistas para determinar os parâmetros geométricos que representam o melhor desempenho do propulsor para uma dada embarcação em uma dada velocidade de serviço.

Técnicas de otimização destinam-se a obter o conjunto de parâmetros que determinam o menor (ou maior) valor de uma função objetivo, eventualmente sujeita a restrições. Por essa razão, a seleção do propulsor é um problema propício para ser resolvido com o emprego de técnicas de otimização.

O método de otimização para o dimensionamento do hélice garante, eventualmente, a melhor escolha do propulsor, eliminando a previsão inicial de dimensões e a análise dos diagramas, assegurando, maior eficiência e menor custo operacional devido ao melhor aproveitamento de combustível e baixo custo de manutenção.

É importante observar que as características de desempenho do casco do navio modificam o escoamento no entorno do propulsor, fazendo com que o problema de

¹ Em Engenharia Naval, tradicionalmente o termo hélice é usado no masculino, por se referir “ao propulsor do tipo hélice”.

dimensionamento do hélice seja um problema individualizado e característico de cada projeto realizado (LEWIS, 1988).

Nesta perspectiva, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um procedimento para seleção automatizada de um propulsor da série B. Para isso, desenvolveu-se uma aplicação em Excel que permitirá ao projetista naval selecionar automaticamente as características geométricas de um propulsor da Série B, que maximizam a eficiência, para um novo projeto de navio. Serão utilizados os resultados experimentais e polinômios que descrevem os resultados da série B; os quais são apresentados e discutido ao longo deste trabalho.

O procedimento de otimização empregado será o algoritmo presente na ferramenta Excel e que se adapta ao problema proposto. Os resultados serão analisados buscando aumentar a robustez do processo, discutindo se a maximização da eficiência representa um critério que estabelece a “melhor solução de projeto”.

As restrições de cavitação serão implementadas por meio dos critérios de Burril e das Normas estabelecidas por Sociedades Classificadoras, no que diz respeito à profundidade do propulsor, dado necessário para o cálculo do número de cavitação.

Por fim será apresentado um estudo paramétrico que visa determinar as características do propulsor otimizado para diferentes condições de resistência ao avanço e velocidade de serviço.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Desenvolver um procedimento de otimização que irá determinar as características geométricas usadas na seleção do hélice, que fornecem a melhor eficiência quando integrados ao casco da embarcação.

Objetivos Específicos

1. Compreender os diferentes parâmetros geométricos que descrevem o propulsor: passo, diâmetro, *rake*, *skew*, bordo de fuga, bordo de ataque e razão de área;
2. Modelar a interação casco-hélice;
3. Entender o procedimento de seleção do propulsor utilizando série sistemática;
4. Desenvolver um procedimento automatizado de seleção do propulsor da Série B visando à maximização da eficiência.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

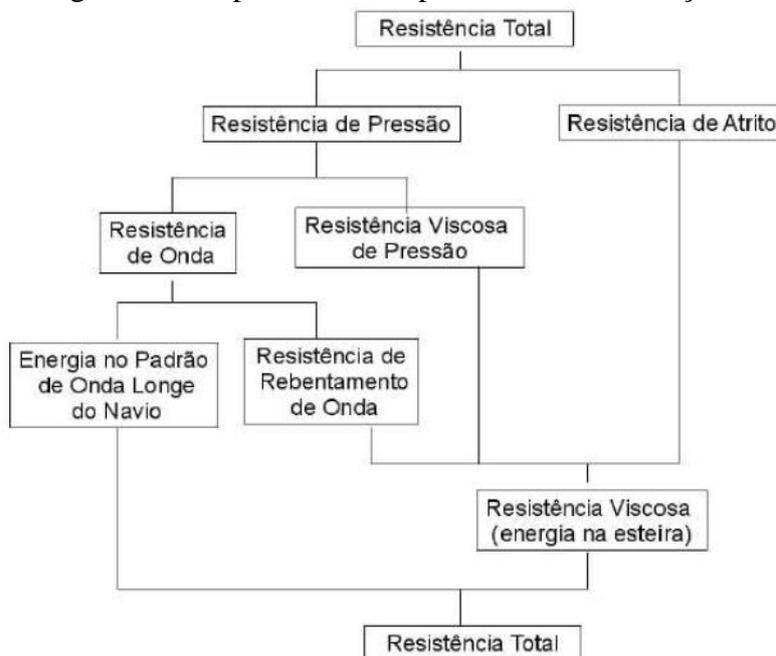
Neste capítulo são descritos os principais fundamentos teóricos que baseiam o procedimento desenvolvido, envolvendo resistência ao avanço, características do propulsor, integração casco-hélice, otimização e análise paramétrica.

2.1 RESISTENCIA AO AVANÇO

A primeira etapa para o projeto do sistema propulsivo e uma das mais importantes é a determinação da resistência ao avanço da embarcação.

A resistência ao avanço de um navio a uma velocidade constante é a força necessária para rebocar o navio a essa velocidade em águas tranquilas e é tradicionalmente decomposta de acordo com a figura 1. Seus principais componentes são explicados a seguir:

Figura 1- Componentes da resistência da embarcação



Fonte: Trindade (2012).

- Resistência de onda: perda de energia devido à formação de padrões de ondas criadas pela interação do casco e a água do mar (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

- Resistência de atrito: quando um corpo se move num fluido em repouso, uma fina camada de fluido adere ao corpo em movimento, ou seja, tem velocidade nula relativamente ao corpo. A variação de velocidade é elevada nas proximidades da superfície do corpo e diminui com o aumento da distância ao mesmo. É habitual convencionar-se para a definição da espessura da camada limite, a distância a partir da superfície do corpo até que a velocidade do fluido seja 1% da velocidade do corpo (TRINDADE, 2012, p. 24). Dentro da camada limite existe uma troca intensa de quantidade de movimento entre as partículas de fluido;
- Resistência viscosa de pressão: os efeitos viscosos do fluido geram uma distribuição de pressão na embarcação. Esta distribuição se opõe ao movimento do navio (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

A seguir são expostas outras componentes adicionais da resistência que devem ser consideradas (TRINDADE 2012, p.19):

- Resistência aerodinâmica: resistência ao avanço no ar da parte emersa do casco e superestruturas² do navio;
- Resistência adicional em mar com ondas: resistência resultante da ação de ondas incidentes sobre a estrutura do navio;
- Resistência adicional devido aos apêndices (propulsor, leme, eixo em contato com a água, isto é, componentes imersos que não fazem parte do casco do navio).

2.1.1 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Existem diversos métodos para o cálculo da resistência da embarcação, podendo ser empírico, experimental ou numérico.

A abordagem experimental “baseia-se no teste de modelos em escala reduzida para extrair informação que possa ser extrapolada para a escala do navio” (TRINDADE, 2010, p.7). Padovezi (1997) ressalta que apesar dos ensaios de resistência ao avanço da

² Superestrutura é a construção feita sobre o convés principal, estendendo-se ou não de um bordo a outro da embarcação.

embarcação serem de simples execução, a precisão das medidas e a extrapolação de seus resultados para a escala real requerem cuidados especiais.

Segundo Trindade (2012), a simulação numérica é feita através do emprego da mecânica de fluidos computacional para a simulação de escoamentos em torno do casco, porém ainda é considerada pela indústria como pouco precisa na previsão da resistência da embarcação ou da força propulsiva de um hélice, embora seja cada vez mais importante em determinados passos do processo de projeto.

“Os métodos de regressão utilizam uma larga base de dados de embarcações distintas para fornecer correlações empíricas para o cálculo da resistência ao avanço” (SCHOEPING, 2014, p.18). Os resultados obtidos são depois expressos sob a forma de constantes, fórmulas, tabelas ou gráficos. Um dos métodos mais famosos e que será abordado nesse trabalho é o método de Holtrop e Mennen, que será discutido a seguir.

2.1.2 MÉTODO DE HOLTROP E MENNEN

Holtrop, realizou uma análise de regressão estatística a partir dos modelos e resultados do NSMB (“Netherlands Ship Model Basin”). O objetivo deste estudo foi desenvolver uma formulação teórica simplificada para o cálculo da resistência dos navios e os efeitos de escala entre os modelos e protótipo (BRINATI, 2010, p.29).

O método foi considerado insuficiente quando combinações não convencionais dos parâmetros principais eram usadas. Ao ajustar o modelo numérico original, para dados obtidos em casos específicos, o método resultou numa formulação com uma faixa maior de aplicação e sua extensão permitiu a melhora da predição da potência de navios de altos coeficientes de blocos com razões baixas de L/B e de navios com complexo arranjo de apêndices e popa “transom”³ submersa (HOLTROP, MENNEN, 1982, p.166).

Para que este método possa ser utilizado, o navio deverá apresentar os parâmetros dentro da faixa de valores apresentadas na tabela 1.

Tabela 1- Limitações Método Holtrop

³ Parte reta da popa (região traseira) da embarcação.

Parâmetro	Limitações	
	Máxima	Mínima
Cp	0,55	0,85
L/B	3,9	14,9
B/T	2,1	4,0
Fn	0,05	1,0

Fonte: Brinati (2010).

A resistência da embarcação pelo método de Holtrop pode ser calculada pela fórmula a seguir:

$$R_T = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (1)$$

Onde:

R_T : resistência ao avanço da embarcação;

R_F : resistência de fricção de uma placa plana;

$(1 + k_1)$: fator de forma estabelece a relação de forma entre o arrasto⁴ de uma placa plana e aquele obtido com o casco da embarcação;

R_{APP} : resistência devido à presença dos apêndices;

R_W : componente de resistência de onda;

R_B : resistência devido à presença do bulbo⁵;

R_{TR} : componente de resistência devido ao espelho de popa (transom);

R_A : resistência de correlação representa a parcela de perda de energia devido ao arrasto do ar.

2.2 SISTEMA DE PROPULSÃO

Toda embarcação necessita um propulsor cuja finalidade é a geração de uma força propulsiva. Dentre as diversas soluções propulsivas, o hélice simples é o mais utilizado para essa finalidade.

A questão do projeto de hélices está satisfatoriamente solucionada. As ferramentas teóricas apresentam resultados muito próximos daqueles verificados em escala reduzida e real (PADOVEZI, 1997).

⁴ Arrasto é a força que faz resistência ao movimento de um objeto sólido através de um fluido (líquido ou gás).

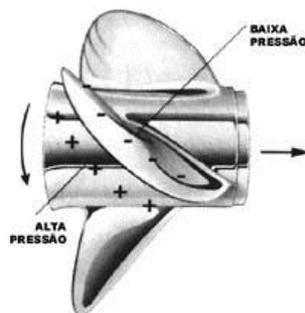
⁵ Apêndice, situado na proa (frente) e da embarcação e abaixo da superfície da água, que possui uma forma projetada para reduzir a resistência ao deslocamento do navio na água.

Ainda segundo Padovezi (1997), as eficiências máximas dos hélices projetados hoje em dia, pouco diferenciam dos hélices da antiguidade, sua evolução ocorreu principalmente nas formas desenvolvidas para minimizar e controlar o fenômeno da cavitação e as vibrações induzidas pelo propulsor e tornar possível o entendimento e otimização da integração dos hélices ao casco.

2.2.1 FUNCIONAMENTO DO HÉLICE

Para melhor entendimento, considera-se que o hélice da Figura 2 está girando de cima para baixo e da esquerda para a direita.

Figura 2 - Funcionamento do hélice

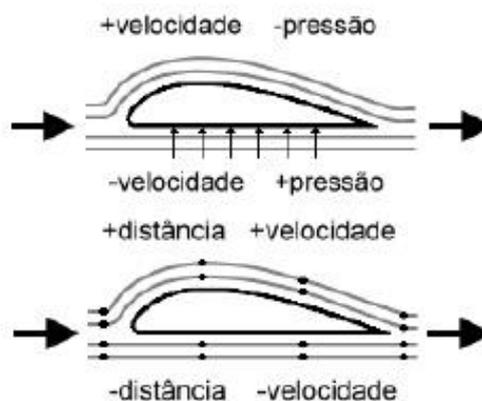


Fonte: Nasseh (1999).

“Neste caso a pá empurra a água do mesmo modo como você faz com a mão quando está nadando [...] é exatamente isto que também acontece com o movimento da pá de um hélice. Este movimento cria uma diferença de pressão entre os dois lados da pá: uma pressão positiva empurrando a pá no lado de baixo e uma pressão negativa puxando a pá no lado de cima. Este efeito ocorre em todas as pás ao mesmo tempo, com cada pá puxando e empurrando água ao mesmo tempo [...]” (NASSEH, 1999, p. 98).

A diferença de pressão é, portanto, o principal responsável pela geração da força propulsiva. Essa diferença se dá pela geometria da pá do hélice, assim como ocorre na asa de um avião. A Figura 2 exemplifica essa geração de força.

Fig. 2 – Diferença de pressão em uma asa.



Fonte: Sampaio (2011).

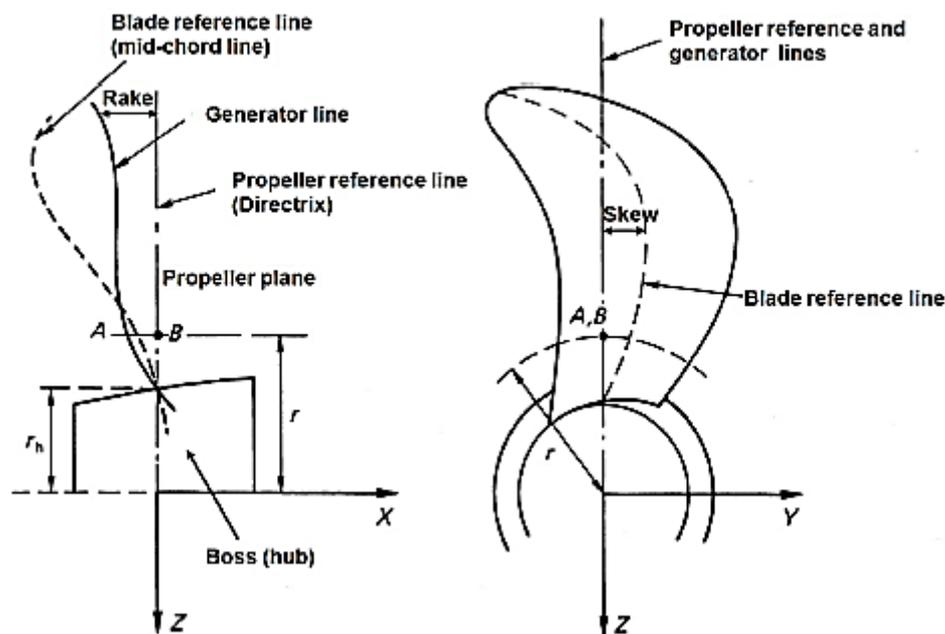
“A parcela de ar que passa por cima, ou seja, pelo extradorso, tem de percorrer uma maior distância em relação a que passa por baixo, mas as duas parcelas devem se encontrar novamente no bordo de fuga e ao mesmo tempo. Para que isso seja possível, o ar que passa por cima é acelerado e, conseqüentemente, a pressão estática desta parcela é reduzida em relação à pressão da que passa por baixo. Essa diferença de pressão faz com que a asa seja empurrada para cima gerando assim sustentação e permitindo que aeronaves mais pesadas que o ar possam voar (SAMPAIO, 2011)⁶.”

2.2.2 GEOMETRIA DO HÉLICE

“O propulsor é composto por um bosso no centro (hub ou boss) e um número de pás (Z) ao redor. A localização das pás ao longo da circunferência do bosso é definida pelas linhas diretrizes (*directrix*), essas sempre igualmente espaçadas, partindo do eixo axial (x) e perpendicular ao mesmo.”(TONACIO,2014, p.14). A Figura 3 apresenta o plano do hélice, que é definido como o plano que contém as diretrizes, perpendicular ao eixo, o bosso e as linhas principais.

Figura 3 - Bosso, plano do propulsor e linhas principais

⁶ SAMPAIO, H. *Blog Fl 145: aviação e informação*. 2011. Disponível em: <<https://fl145.wordpress.com/>>. Acessado em 28 de maio de 2015.



Fonte: Tonacio (2014).

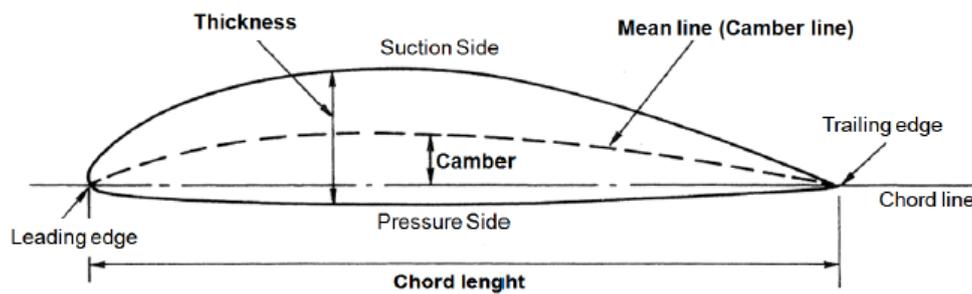
Outra linha importante é a linha de referência da pá (*Blade reference line* ou *mid-chor line*), formada pelos pontos centrais (na metade da corda) de cada seção radial (TONACIO, 2014, p.15).

A pá do propulsor se forma a partir da linha geradora (*generator line*) e a distância que a separa da própria linha diretriz é conhecida como *rake*, que pode variar radialmente (TONACIO, 2014). Segundo Padovezi (1997), o *rake*, apresentado na Figura 3, é uma forma de aumentar a distância da ponta das pás ao casco ou aumentar o diâmetro do hélice possível de ser instalado na popa da embarcação.

Segundo Tonacio (2014), *skew*, também apresentado na Figura 3, é definido como o máximo ângulo possível, centrado no eixo, entre dois pontos da *blade reference line*, conforme ilustrado na Figura 4. Apesar de mostrarem certa redução de eficiência, os hélices com *skew* apresentam redução das vibrações induzidas pelo propulsor e dos níveis de cavitação quando este opera em campos não uniformes de velocidades (PADOVEZI, 1997).

As pás possuem dois lados: o dorso (*suction side*), onde a força de sustentação é gerada, e a face (*pressure side*), e dois bordos: o de ataque (*leading edge*), linha frontal das pás, e o de fuga (*trailing edge*), aresta atrás das pás, que são unidos pela linha chamada corda (*chord*). Esses termos são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Perfil de seção de pá



Fonte: Tonacio (2014).

O hélice possui ainda parâmetros que são usados no processo de seleção do propulsor da embarcação e são apresentados a seguir:

- Número de pás (Z);
- Diâmetro (D);
- Passo do hélice (P);
- Área do disco (A_0);
- Área expandida (A_E);
- Relação entre área do disco e área expandida (A_E/A_0);
- Área Projetada (A_p);

A) Número de Pás (Z):

Segundo Trindade (2012), número de pás é um parâmetro importante no que diz respeito a vibrações. Esse número geralmente se encontra entre 4 e 7. Quanto maior o número de pás, menor a vibração, porém, maior o custo de fabricação.

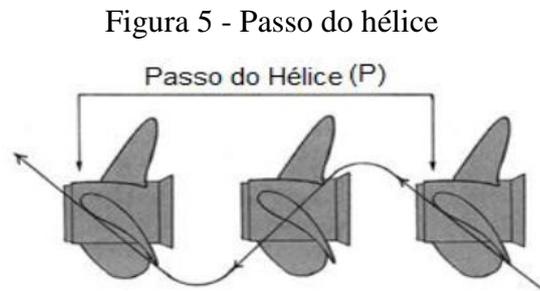
B) Diâmetro (D):

Segundo Padovezi (1997), o diâmetro do hélice é limitado pela região onde vai ser instalado devendo ficar totalmente imerso para que não ocorra aeração⁷ e sua eficiência é diretamente proporcional ao carregamento específico nas pás, ou seja, quanto maior o diâmetro do hélice, maior sua eficiência.

C) Passo do hélice (P):

⁷ Recolhimento de ar pelas pás do hélice.

Passo do hélice é a distância longitudinal percorrida por um ponto do hélice uma rotação completa, como mostrado na Figura 5. Ao dividir essa distância pelo diâmetro do hélice, temos a razão passo diâmetro (P/D) (PINHEIRO, 2014).



Fonte: Pinheiro (2010).

D) Área do disco (A_0);

A área do disco é a área (circular) total projetada pelo hélice durante o funcionamento. É dada pela seguinte fórmula:

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

E) Área expandida (A_E);

A área expandida é dada pela soma das áreas das faces das pás. Segundo Padovezi (1997), a área das pás de um hélice tem influencia sobre dois aspectos importantes: em princípio, quanto menor a área das pás, menores as perdas por atrito (arrasto) e maior a eficiência do hélice; por outro lado, quanto menor a área da pá, maior a sua suscetibilidade ao fenômeno de cavitação.

F) Relação entre área do disco e área expandida (A_E/A_0);

Segundo Trindade (2012), são valores típicos para a razão de área expandida $0,3 < A_0/A_E < 1,5$. Razões superiores a 1 significam que o hélice tem pás sobrepostas.

G) Área projetada (A_p);

Área projetada é a área da projeção das pás num plano normal ao eixo do hélice. Padovezi (1997) utiliza a equação a seguir para calcular a área projetada.

$$A_p = A_E(1,067 - 0,229P/D) \quad (3)$$

2.3 DIAGRAMA DE ÁGUAS LIVRES

O desempenho do hélice é avaliado através de ensaios em águas livres, também conhecido como “open water test”. O modelo em escala reduzida do hélice é deslocado com velocidade de avanço V_a em um fluido em repouso e condições apropriadas de semelhança. São medidos valores da força propulsiva (T) e binário (Q) para vários regimes de funcionamento e depois de adimensionalizados constituem o “diagrama em águas livres” (TRINDADE, 2012).

A força propulsiva (T) e o binário (Q) dependem das seguintes variáveis:

- Velocidade de avanço V_a ;
- Velocidade de rotação η ;
- Massa específica do fluido ρ ;
- Viscosidade cinemática do fluido ν ;

Aplicando a análise dimensional, expressando a dependência dos coeficientes de força propulsiva e de binário dos seguintes grupos adimensionais:

- Coeficiente de avanço, $J = \frac{V_a}{\eta D}$; (4)

- Número de Reynolds, $R_e = \frac{\eta D^2}{\nu}$; (5)

- Obtêm-se as seguintes expressões para os referidos coeficientes adimensionais:

- Coeficiente de força propulsiva, $K_T = \frac{T}{\rho \eta^2 D^4}$; (6)

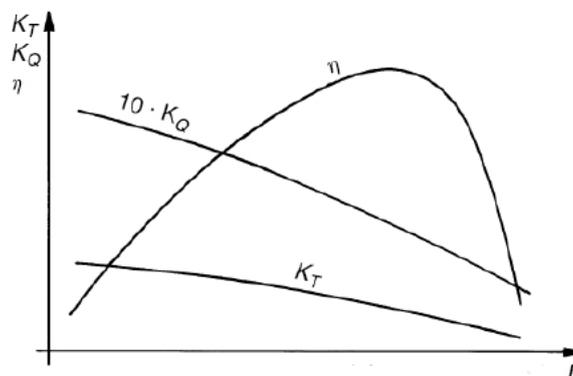
- Coeficiente de binário, $K_Q = \frac{Q}{\rho \eta^2 D^5}$; (7)

A Figura 6 apresenta um exemplo de diagrama de um hélice ensaiado em águas abertas, e mostra a variação dos coeficientes da força propulsiva, K_T , e de binário K_Q , com o coeficiente de avanço, J e a curva de eficiência do propulsor.

A eficiência do propulsor expressa em termos dos coeficientes adimensionais pode ser calculada pela fórmula a seguir:

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (8)$$

Figura 6 – Diagrama em águas livres



Fonte: Trindade (2012).

“As curvas traçadas nestes diagramas servem principalmente para a otimização do hélice e determinação do ponto de funcionamento. Na prática, já não são utilizadas aquelas representações gráficas no projeto de hélices, mas sim os polinômios representativos daquelas evoluções para permitir o cálculo computacional. As tabelas têm cerca de 50 coeficientes para polinômios relativos a serie sistemática de hélices de Wageningen” (TRINDADE, 2012, p. 46).

2.4 SÉRIES SISTEMÁTICAS

Uma série sistemática de hélices é o conjunto de hélices obtidos através da variação sistemática de parâmetros geométricos do próprio hélice. Os objetivos principais dessas séries são permitir ao projetista compreender os principais parâmetros que influenciam no desempenho do hélice, a ocorrência de cavitação e a criação de diagramas que facilitam na seleção das características do hélice mais adequado á sua aplicação (TRINDADE, 2012).

As séries sistemáticas permitem a seleção, isto é, a escolha do hélice que melhor se adequa a embarcação. Não se trata do projeto do hélice em si, pois a geometria do hélice (skew, rake, bordo de fuga, bordo de ataque) já está determinada.

O projeto da geometria do propulsor exige a realização de ensaios ou simulações CFD para determinar o desempenho do propulsor. Esse procedimento requer muito tempo (além de ser ter um elevando custo) e não é apropriado para a fase conceitual ou preliminar de um projeto. Por essa razão usualmente nestas fases do

projeto, o projetista determina o propulsor por meio de um procedimento de seleção entre geometrias conhecidas e cujo desempenho é conhecido.

2.4.1 SÉRIE DE WAGENINGEN

A série de Wageningen, também conhecida como série B, será a série sistemática adotada nesse trabalho, por ser uma das mais populares e a mais utilizada, pois cobre uma ampla faixa de aplicações e possui um grande número de estudos publicados (Brinati, 2010). A faixa de aplicações da série é apresentada a seguir:

- Número de pás: $2 \leq Z \leq 7$.
- Razão de área expandida: $0,3 \leq A_E/A_o \leq 1,05$;
- Razão passo-diâmetro: $0,5 \leq P/D \leq 1,4$.

Nesta série foram ensaiados cerca de 120 propulsores variando-se o número de pás, a razão de área expandida/área do disco e razão passo diâmetro. Na Figura 7 são mostrados o número de pás e a razão de área considerada durante os ensaios. A razão passo diâmetro permanece constante desde a extremidade da pá até metade do raio do hélice, onde passa a ser reduzida como mostra a Figura 8 de forma que no bosso razão de passo seja 80% do valor inicial (LEWIS, 1988).

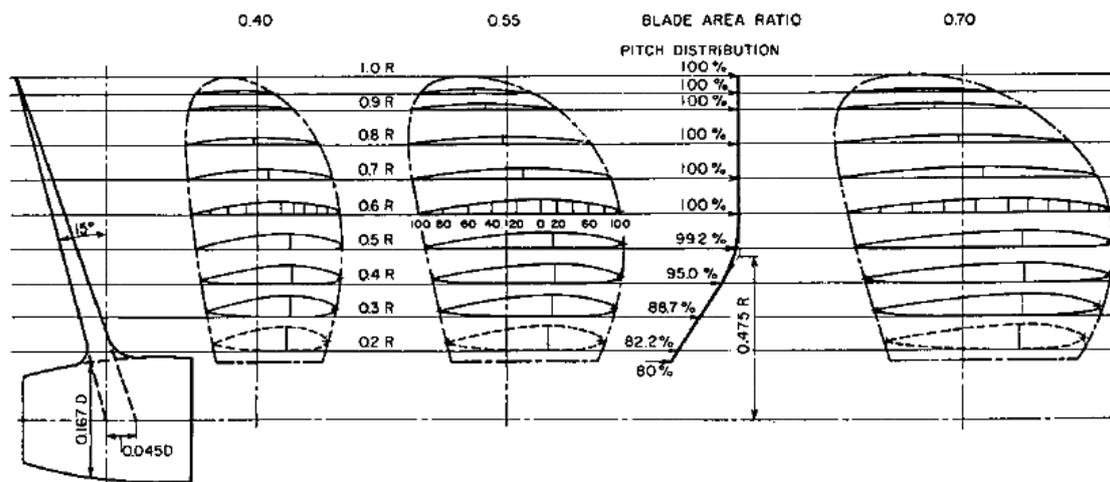
A nomenclatura dos hélices dessa série é representada primeiramente pela letra B, simbolizando a série, em seguida aparecem o número de pás e a razão de área expandida. Exemplo: Hélice B- 4.85 (hélice da série B, com quatro pás e razão de área de 0,85).

Figura 7 - número de pás e a razão de área considerada nos ensaios da Série B

Blade number Z	Blade area ratio A_E/A_o									
2	0.30									
3		0.35		0.50		0.65		0.80		
4			0.40		0.55		0.70		0.85	1.00
5				0.45		0.60		0.75		
6					0.50		0.65		0.80	1.05
7						0.55		0.70		0.85

Fonte: Lewis (1988).

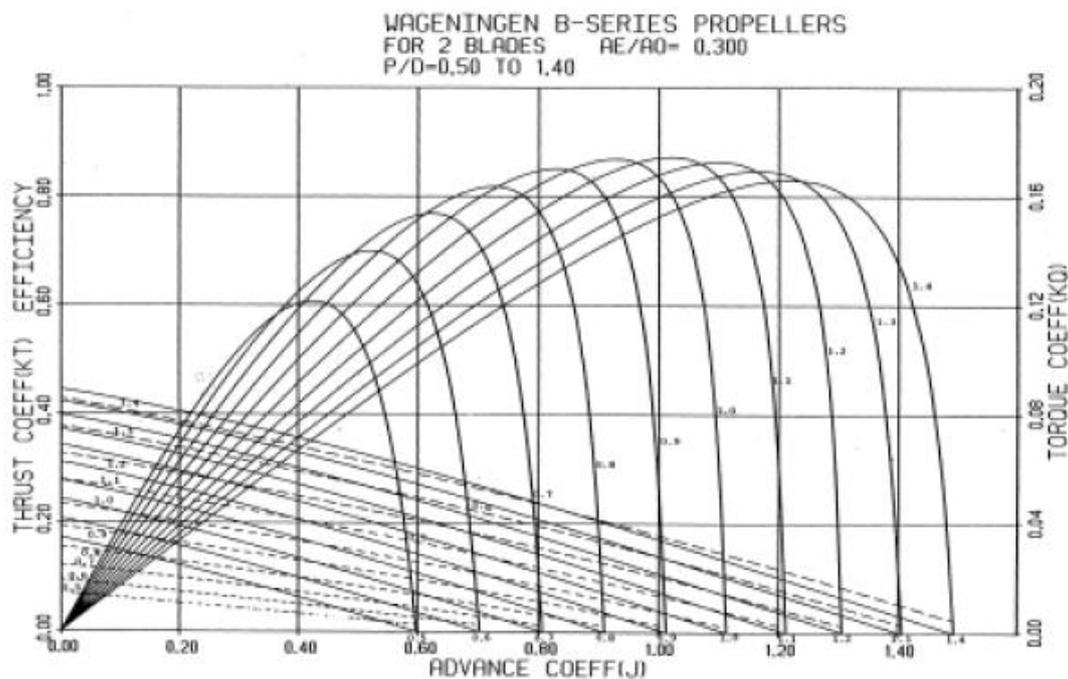
Figura 8 – Aspecto geométrico das pás da Série B.



Fonte: Lewis (1988).

Os diagramas são formulados com as curvas características dos diagramas de águas livres, cada curva corresponde á uma razão passo-diâmetro diferente. A Figura 9 apresenta um diagrama para hélices da série B com 2 pás, razão de área de 0,3 e relação passo-diâmetro variando entre 0,5 até 1,4.

Figura 9 - Diagrama em águas livres de um hélice da série sistemática de Wageningen



Fonte: Trindade (2012).

2.4.2 Polinômio de interpolação dos resultados experimentais da série B

Os diagramas da série B, além de apresentarem pequenos erros experimentais, também apresentaram uma inconstância do número de Reynolds durante e os ensaios em águas abertas.

A fim de eliminar esses erros, Van Oossanen elaborou, através de análises de regressão da Série B, expressões analíticas para o empuxo (K_T) e o torque (K_Q), que servem até hoje, como auxílio para uma seleção preliminar de um hélice da Série B (LEWIS, 1988). A Figura 10 apresenta os polinômios gerados pela análise de regressão, a tabela com os seus coeficientes está disponível no Anexo 1.

Figura 10 - Representação polinomial dos coeficientes K_T e K_Q do hélice

$$K_{T-helice} = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v} \cdot (J)^s \cdot (P/D)^t \cdot (A_E/A_o)^u \cdot (Z)^v$$

$$K_{Q-helice} = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v} \cdot (J)^s \cdot (P/D)^t \cdot \left(\frac{A_E}{A_o}\right)^u \cdot (Z)^v$$

Fonte: Brinati (2010).

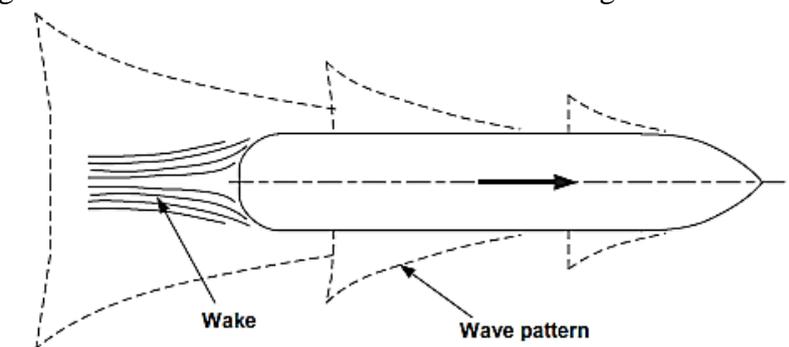
Esses polinômios serão utilizados na implementação computacional, para o desenvolvimento da ferramenta que permitirá a seleção otimizada do hélice.

2.5 INTERAÇÃO CASCO-HÉLICE

Os cascos são projetados de acordo com a finalidade da embarcação, podendo apresentar vários formatos, mais bojudos ou mais delgados. Portanto, a seleção de um propulsor será única para cada embarcação, tendo em vista a perturbação do fluido causada pela passagem do casco.

“Observa-se na passagem de uma embarcação sobre as águas, duas características no escoamento do fluido: um padrão de ondas se movimentando ao longo do casco e uma região de escoamento turbulento que cresce ao longo do comprimento da embarcação e se prolonga atrás do casco na forma de esteira” (HOLTROP, MENNEN, 1982, p.12, tradução nossa). Essas características estão representadas na Figura 11.

Figura 11 - Características do escoamento ao longo da embarcação.



Fonte: Molland; Turnock; Hudson (2011).

Uma das consequências da esteira é que o propulsor avança relativamente à água a uma velocidade ‘ V_a ’, chamada de velocidade de avanço, que é diferente da velocidade de operação da embarcação (LEWIS, 1988). Para relacionar a velocidade de operação da embarcação e a velocidade de avanço é empregado um coeficiente de esteira (w), apresentada na equação abaixo (Brinati, 2010).

$$V_a = V_s(1 - w) \quad (9)$$

Holtrop (1978), desenvolveu um modelo empírico para o cálculo do coeficiente de esteira, para hélice único e outro para hélices gêmeas apresentados a seguir:

$$w(\text{hélice único}) = 0,3C_B + 10C_V C_B - 0,1$$

$$w(\text{hélices gêmeas}) = 0,3095C_B + 10C_V C_B - 0,23 \frac{D}{\sqrt{BT}}$$

Onde:

C_B : coeficiente de bloco da embarcação;

D: diâmetro do hélice

B: boca da embarcação

T: calçado da embarcação

C_V : coeficiente de resistência viscosa.

Para o cálculo do propulsor mediante as séries sistemáticas, são usados os diagramas em águas livres. Uma vez definido o diâmetro do hélice e adotado valores para os parâmetros de projeto (P/D , Z e A_e/A_o), o hélice está especificado. A variação

desses parâmetros fornecem várias opções de hélices. Seleciona-se aquele que produz empuxo (T) necessário, operando dentro dos limites aceitáveis de cavitação e com maior eficiência (BRINATI, 2010).

Como as curvas do diagrama de águas abertas são adimensionais, para garantir que o hélice é capaz de produzir o empuxo requerido, deve-se calcular a curva de resistência do casco (adimensionalizada) para o qual o hélice está sendo projetado e encontrar o propulsor que forneça o melhor ponto de operação para a embarcação em questão. O ponto de operação J é obtido através do cruzamento da curva de empuxo do propulsor (K_T hélice) com a curva de resistência do casco (K_T casco) (MONTEIRO, DANTAS, 2014). Essa curva pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$(K_T)_{casco} = \frac{R_T(1+MR)}{(1-t)\rho V_a^2 D_{max}^2} J^2 \quad (10)$$

Onde:

R_T : Resistência do casco da embarcação (calculada na velocidade de serviço da embarcação V_s);

V_a : Velocidade de avanço da embarcação;

MR : Margem de resistência, leva em consideração as condições médias do casco e mar; em geral situa-se entre 0,15 e 0,25;

t: coeficiente de redução da força propulsora;

ρ : massa específica da água do mar;

D_{max} : Diâmetro máximo do hélice;

J: coeficiente de avanço.

Segundo Brinati (2010), o coeficiente “t”, conhecido como coeficiente de redução da força propulsora, reflete num entendimento equivocado de que ocorre redução de empuxo ao invés de aumento da resistência com a operação do hélice na popa do navio.

A força propulsiva T é avaliada a partir do ensaio de resistência realizado sem hélice. A presença do hélice provoca um aumento na resistência da embarcação devido ao aumento da velocidade do escoamento e diminuição da pressão na popa do navio (TRINDADE, 2012). A relação $(1/(1-t))$, é o fator de aumento da resistência da embarcação devido a presença do propulsor.

Holtrop (1978), também desenvolveu um modelo empírico para o cálculo do coeficiente de redução da força propulsora, para hélice único e para hélices gêmeas apresentados a seguir:

$$t(\text{hélice único}) = 0,001979 \frac{L}{(B - BC_{P1})} + 1,0585c_{10} - 0,00524 - 0,1418 \frac{D^2}{BT} + 0,0015C_{stern}$$

- $C_{10} = \frac{B}{L}$, quando $\frac{L}{B} > 5,2$
- $C_{10} = 0,25 - \frac{0,003328402}{\frac{B}{L} - 0,134615385}$, quando $\frac{L}{B} < 5,2$
- $C_{P1} = 1,45 C_P - 0,315 - 0,0225lcb$

$$t(\text{hélices gêmeas}) = 0,325C_B - 0,1885 \frac{D}{\sqrt{BT}}$$

C_B : coeficiente de bloco da embarcação;

L: comprimento da embarcação;

D: diâmetro do hélice;

B: boca da embarcação;

T: calcado da embarcação;

C_{stern} : coeficiente de forma do casco da embarcação;

C_P : coeficiente prismático da embarcação.

2.6 CRITÉRIO DE CAVITAÇÃO

A água se transforma em vapor a 100° C, porém se a pressão atmosférica for baixa, a mesma passa ao estado de vapor em uma temperatura bem menor.

A alta velocidade de rotação do hélice gera regiões com baixa pressão onde eventualmente podem ser formadas bolhas de vapor d'água. Esse processo é definido como cavitação (NASSEH, 1999).

Quando essas bolhas caminham para uma região de pressão superior a pressão de vapor, elas são comprimidas e implodem causando erosão nas pás do hélice, além de gerar ruído e vibração.

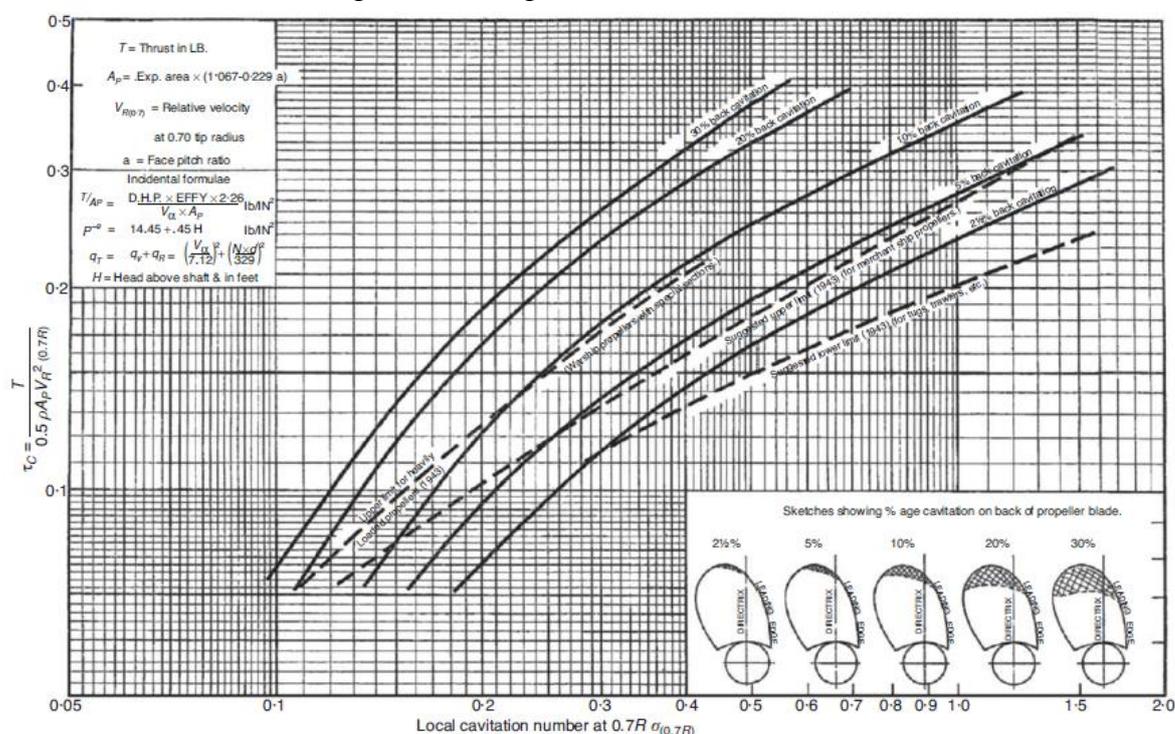
O fenômeno de cavitação é indesejável, pois implica na perda de força propulsiva, além de danificar as pás acarretando em manutenção ou até mesmo a substituição do propulsor. Uma das formas mais práticas de evitar problemas relacionados com cavitação é avaliação da porcentagem de cavitação do propulsor

operando na condição de serviço. Essa avaliação usualmente é feita utilizando o diagrama de Burril.

Burril criou um diagrama com dados gerados através de ensaios em túneis de cavitação e em escala real de hélices de geometrias variadas relacionando o coeficiente de Burril (τ_c) e o número de cavitação (σ) (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011). A Figura 12 apresenta o diagrama de Burril.

Através do diagrama de Burril, não é possível evitar a cavitação, pode-se apenas estimar a quantidade de cavitação presente nas pás. (PADOVEZI, 1997).

Figura 12 - Diagrama de Burril



Fonte: Molland; Turnock; Hudson (2011).

O coeficiente de Burril é calculado por:

$$\tau_c = \frac{R_T}{(1-t)0,5\rho V_R^2 A_p} \quad (11)$$

V_R é o valor da velocidade local a 0,7 do raio do hélice. Ele compõe a velocidade do fluido com a velocidade radial causada pela rotação do propulsor. Seu valor pode ser calculado pela fórmula a seguir:

$$V_R = \sqrt{V_a^2 + (0,7\pi\eta D)^2} \quad (12)$$

O número de cavitação (σ) pode ser calculado por:

$$\sigma = \frac{\rho gh + P_{atm} - P_v}{0,5 \rho V_R^2} \quad (13)$$

Onde:

P_{atm} : pressão atmosférica (101.000 N/m^2).

P_v : pressão de vapor da água salgada (para um projeto preliminar, pode-se considerar 3000 N/m^2).

h : profundidade do propulsor.

Fluido comprimido contra o fundo do casco gera hora uma força (região comprimida pela passagem da pá) hora ausência de força (região não comprimida pela instante entre duas pás). Essa força oscila com frequência igual a frequência de rotação do propulsor vezes o número de pás, e pode causar vibração na estrutura do navio.

As sociedades classificadoras possuem normas para garantir a segurança da embarcação. No que diz respeito ao hélice, a Loyd's Register possui uma norma⁸ para definir o espaço mínimo entre o hélice e o casco da embarcação, para hélices gémeas, isto é embarcações que possuem dois hélices iguais, a fim de apresentar níveis de vibração aceitáveis. A Tabela 2 apresenta os cálculos dessa distância de acordo com o número de pás do hélice e as características da embarcação e a Figura 13 é uma representação esquemática da mesma.

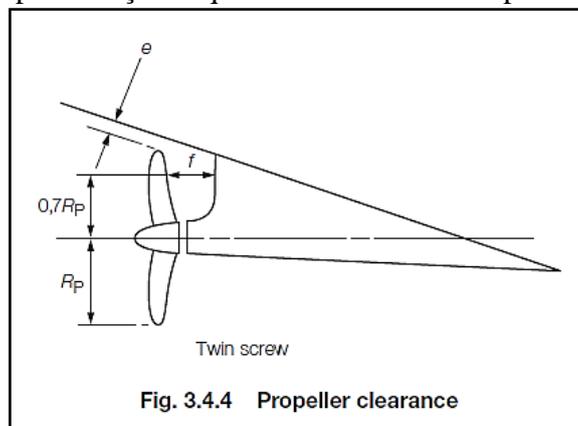
⁸ Norma 4.14. Loyd's Register. Rules and Regulations for the classification of Ships. Part 3, Chapter 3, Janeiro 2015.

Tabela 2- Distância mínima recomendada para hélices gêmeas.

Number of blades	Hull clearances for twin screw, in metres, see Fig. 3.4.4	
	<i>e</i>	<i>f</i>
3	1,20 <i>K d_P</i>	1,20 <i>K d_P</i>
4	1,00 <i>K d_P</i>	1,20 <i>K d_P</i>
5	0,85 <i>K d_P</i>	0,85 <i>K d_P</i>
6	0,75 <i>K d_P</i>	0,75 <i>K d_P</i>
Minimum value	3 and 4 blades, 0,20 <i>d_P</i> 5 and 6 blades, 0,18 <i>d_P</i>	0,15 <i>d</i>
Symbols		
<i>L_R</i> and <i>C_B</i> are as defined in Ch 1,5.2		
$K = \left(0,1 + \frac{L_R}{3050}\right) \left(\frac{3,48C_B P_s}{L_R^2} + 0,3\right)$		
<i>t_R</i> = thickness of rudder, in metres measured at 0,7 <i>R_P</i> above the shaft centreline		
<i>P_s</i> = designed power on one shaft, in kW		
<i>R_P</i> = propeller radius, in metres		
<i>d_P</i> = propeller diameter, in metres		
NOTE The above recommended minimum clearances also apply to semi-spade type rudders.		

Fonte: Loyd's Register (2015).

Figura 13 - Representação esquemática da distância para hélices gêmeas.

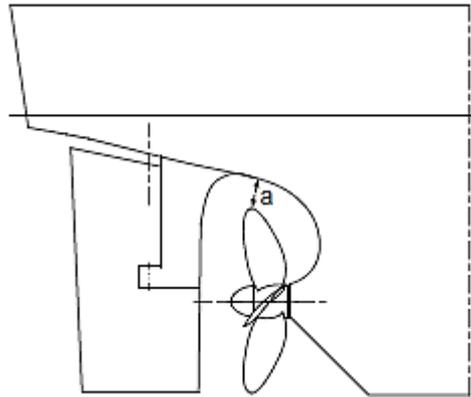


Fonte: Loyd's Register (2015).

Quando se trata de apenas um hélice, para um projeto preliminar do propulsor, uma distância de 20% do diâmetro do hélice é aceitável (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011). Dessa forma a profundidade do hélice será obtida pela equação (14). A figura 14 representa essa distância.

$$h = 0,2D + \frac{D}{2} \quad (14)$$

Figura 14 - Representação esquemática da distância do hélice



Fonte: Molland; Turnock; Hudson, (2011).

2.7 OTIMIZAÇÃO

Pode-se definir o processo de otimização como a busca automática, sistemática e dirigida para obter a melhor solução dentro do universo de soluções existentes.

A otimização é feita através de métodos numéricos que selecionam dentre as alternativas que satisfazem o modelo de projeto, um valor máximo ou mínimo (ótimo), do critério específico, função objetivo, que deve refletir adequadamente o que é realmente importante para o projetista (AUGUSTO, 1996).

A formulação básica dos problemas de otimização é composta pela função objetivo, variáveis de projeto e quando necessárias, as restrições do projeto.

Ainda, segundo Augusto (1996), a função objetivo é uma função escalar das variáveis de projeto que por sua vez, são aquelas que caracterizam o projeto e precisam ser definidas pelo engenheiro ou projetista. Essa função pode ser definida genericamente como:

$$f(X) = (x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n)$$

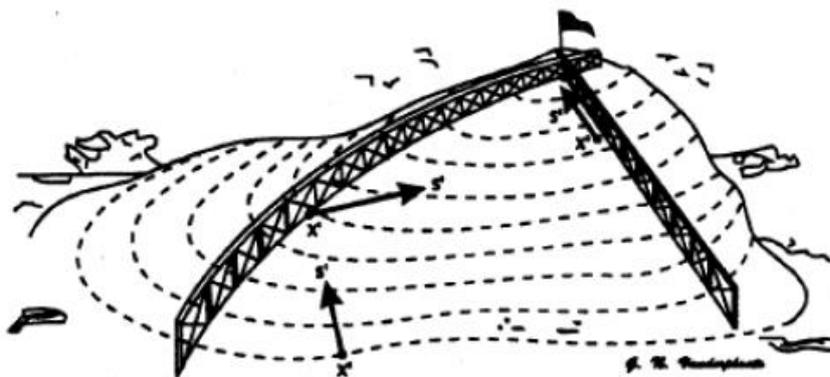
O ponto X que apresenta o mínimo ou máximo da função objetivo dentro de toda região possível delimitada pelas restrições, é denominado mínimo ou máximo global, já o ponto que apresenta o máximo ou mínimo de uma sub-região, é denominado mínimo ou máximo local. (TANCREDI, 2008).

“As variáveis de projeto, ou variáveis de decisão, são aquelas que caracterizam o projeto e precisam ser definidas pelo engenheiro ou projetista.” (AUGUSTO, 1996).

Os problemas práticos de projeto geralmente estão sujeitos a uma série de restrições.

“Para melhor entender a existência de restrições, considere-se a analogia com a escalada de uma montanha; imagine-se que durante a subida encontram-se obstáculos como cercas e grandes pedras que não fazem parte da topologia do terreno em si e que não permitem caminhar sempre no sentido de inclinação máxima, como mostrado na Figura 15. Esses obstáculos representam as restrições e exigirão que se façam grandes desvios para chegar ao pico da montanha; eventualmente, eles nem permitem que se chegue ao pico, pois esse objetivo pode se encontrar em uma parte inacessível do terreno.” (TANCREDI, 2008, p.28-29).

Figura 15 - Ilustração sobre a otimização de problemas com restrição



Fonte: Silva (2007).

2.7.1 Modelo de otimização para seleção do propulsor

Para a otimização do propulsor deseja-se maximizar a sua eficiência, variando os parâmetros de projeto (número de pás (Z), razão de área (A_E/A_0) e razão passo diâmetro (P/D). Trata-se de um problema com restrições, onde as restrições são os valores máximos e mínimos permitidos pela série sistemática utilizada, os limites de cavitação e o empuxo mínimo necessário.

Dessa forma, o modelo matemático de otimização para a seleção do propulsor de uma embarcação é:

$$\text{Max } F(\bar{x}) = \max \eta \left(Z, \frac{P}{D}, \frac{A_E}{A_0} \right)$$

Ou seja, a função objetivo é:

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q}$$

Onde:

$$K_T \text{ hélice} = \sum c_j^s (P/D)^t (A_E/A_0)^u Z^v$$

$$K_Q = \sum c_j^s (P/D)^t (A_E/A_0)^u Z^v$$

Obs: seus respectivos coeficientes estão presentes na Tabela do Anexo 1.

- As restrições dessa função são aquelas impostas pela Série B e pelos limites de cavitação, dessa forma, temos como restrição:
- $G1(\bar{x}): Z \geq 2$
- $G2(\bar{x}): Z \leq 7$
- $G3(\bar{x}): Z = \text{inteiro}$
- $G4(\bar{x}): \frac{P}{D} \leq 1,4$
- $G5(\bar{x}): \frac{P}{D} \geq 0,5$
- $G6(\bar{x}): \frac{Ae}{Ao} \leq 1,05$
- $G7(\bar{x}): \frac{Ae}{Ao} \geq 0,3$
- $G8(\bar{x}): Kt_{casco} = Kt_{helice}$
- $G9(\bar{x}): \text{Cavitação} \left(Z, \frac{P}{D}, \frac{Ae}{Ao} \right) < \text{Limite de Cavitação}$

3 METODOLOGIA

Devido à natureza do problema, optou-se por uma pesquisa do tipo exploratória. Para Selltiz et al (1967, p. 63), o objetivo da pesquisa exploratória

[...] é proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. [...] estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Seu planejamento é, portanto, bastante flexível, de modo que possibilite a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado.

Nesta perspectiva, um estudo bibliográfico é realizado a fim de compreender o funcionamento do hélice, sua geometria e todos os parâmetros que influenciam na sua eficiência, bem como a interação casco-hélice e o processo de seleção de propulsor pelo método das séries sistemáticas, em especial a série B.

Através dos polinômios que descrevem os resultados da série B e atendendo os critérios de cavitação e restrições das Normas estabelecidas por Sociedades Classificadoras, será desenvolvido um processo de otimização que permitirá a seleção automatizada do propulsor.

O mecanismo de seleção será desenvolvido por meio de uma das seguintes técnicas de otimização: a determinística, quando é possível prever todos os passos através de um ponto de partida conhecido, ou a aleatória, onde o caráter aleatório de vários processos é simulado.

A ferramenta utilizada para a implementação dessas técnicas será o programa Excel, que possui recursos suficientes para a aplicação de técnicas de otimização no modelo de integração casco-hélice desenvolvido com base nas equações empíricas descritas na fundamentação teórica e nos dados referentes a Série B.

Com a finalidade de verificar a coerência da ferramenta construída, um estudo de aplicação será realizado a fim de comparar os resultados obtidos pelo método tradicional com o novo método desenvolvido.

Por fim, uma análise paramétrica será realizada com o objetivo de observar como os parâmetros de projeto do hélice variam de acordo com a velocidade de operação e resistência ao avanço da embarcação e o diâmetro do hélice (relacionado ao calado da embarcação). Também é observada a eficiência máxima obtida e a porcentagem de cavitação.

4 IMPLEMENTAÇÃO

A ferramenta construída no Excel é uma planilha capaz encontrar o J de operação, a eficiência do hélice e verificar se o mesmo atende ao critério de cavitação, além de possuir a opção otimizar, na qual será possível encontrar a melhor combinação possível dos parâmetros de projeto: razão passo diâmetro, número de pás e razão de área que irão maximizar a eficiência do propulsor o qual possuirá o limite de cavitação aceitável, definido pelo projetista. Trata-se de uma seleção otimizada de um propulsor da série B que atende ao critério de cavitação.

Para isso, o usuário deverá inserir dados do propulsor da embarcação para a qual o hélice está sendo selecionado. A Tabela 3 abaixo mostra os dados de entrada do hélice.

Tabela 3 - Dados de entrada hélice

DADOS DE ENTRADA		
DADOS HÉLICE		
Número de propulsores		-
Razão Passo Diâmetro (P/D)		-
Área expandida (A_e/A_0)		-
Número de pás (Z)		-
Diâmetro Máximo		m
Coef. de redução da força propulsora (t)		-
Coefficiente de esteira (w)		-
Margem de Resistência (MR)		-

Fonte: Autor (2015).

A função da escolha do número de propulsores se deve ao fato de que em alguns casos a força exigida para movimentar a embarcação é tão grande de tal forma que são necessários mais propulsores.

Numa próxima versão da planilha, poderão ser implementados modelos empíricos para o cálculo dos coeficientes de redução da força propulsora e de esteira.

Um dos dados de entrada da embarcação é a resistência ao avanço do casco o qual o usuário poderá escolher se deseja que a planilha encontre esse valor pelo método de Holtrop ou se deseja inserir diretamente o valor já determinado por ele. Contudo, os dados de entrada da embarcação mudam para cada caso. Os botões HOLTROP e REST. DEFINIDA são responsáveis por mostrar ao usuário uma tabela apenas com os dados necessários para essa ação. As Tabelas 4 e 5 mostram os dados que deverão ser

inseridos para o cálculo da resistência ao avanço por Holtrop e para inserção manual do valor de resistência ao avanço, respectivamente.

Tabela 4 - Dados de entrada embarcação Holtrop

RESISTÊNCIA PLANILHA HOLTROP		Unidades
Velocidade de operação		Knots
Resistência ao avanço		kN
Comprimento da linha d'água (Lwl)		m
Boca (B)		m
Calado a frente (Proa) (Tf)		m
Calado a ré (popa) (Ta)		m
Coefficiente de Bloco (Cb)		-
Coefficiente da Secção Mestra (Cm)		-
Área molhada total de apêndices (Sapp)		m ²
Coefficiente da Área de linha d'água (Cwp)		-
bTranson		m
lcb		-
zTranson		m
Área do Bulbo Transversal (Abt)		m ²
Posição vertical do centro do bulbo (hB)		-
Coefficiente da forma da popa (Cstern)		0

Fonte: Autor (2015).

Tabela 5 - Dados de entrada embarcação resistência definida

RESISTÊNCIA AO AVANÇO DEFINIDA		Unidades
Velocidade de operação		Knots
Resistência ao avanço		kN

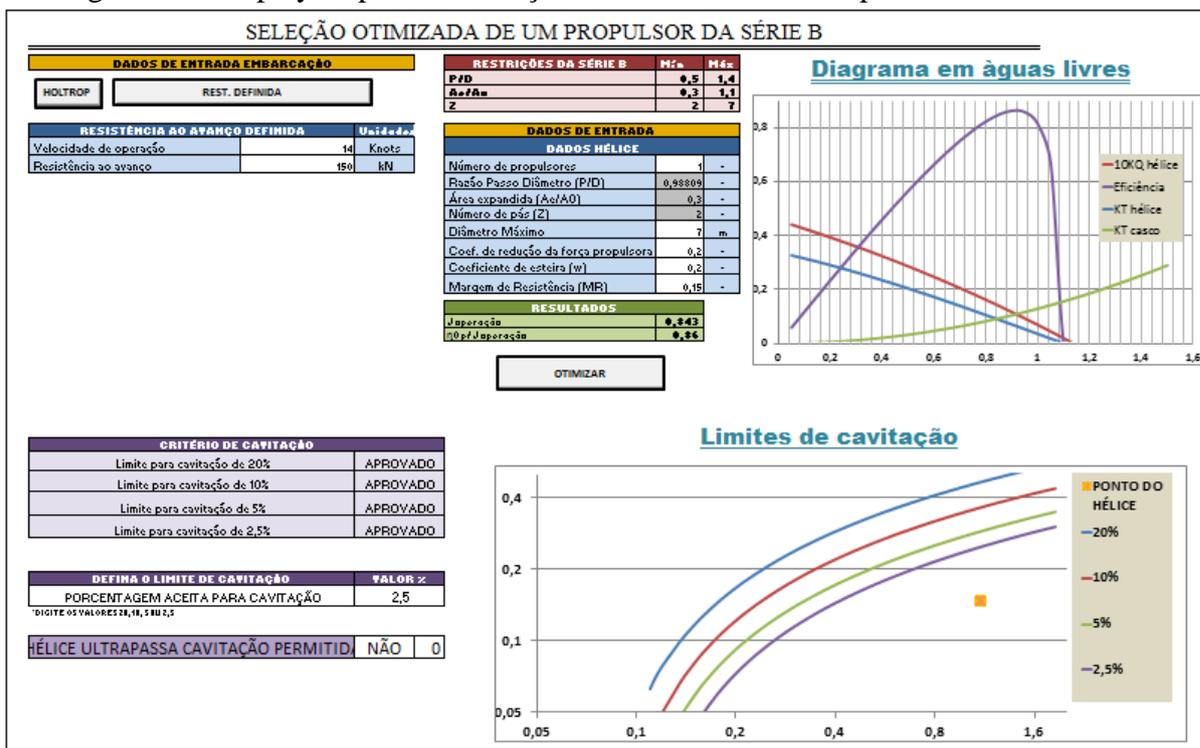
Fonte: Autor (2015).

O projetista que utilizará a ferramenta terá acesso à aba Display (Figura 16), onde será possível visualizar:

- As tabelas para inserir os dados de entrada do hélice e a da embarcação, com seus respectivos botões HOLTROP e REST. DEFINIDA;
- As restrições dos hélices da série B;
- O diagrama de águas livres correspondente ao conjunto de parâmetros digitados;
- Os resultados encontrados do J de operação e eficiência do hélice;
- O botão OTIMIZAR;
- Um gráfico com os limites de cavitação e o ponto correspondente ao hélice selecionado;
- Uma tabela para inserir o limite que o projetista considera aceitável (20, 10, 5 ou 2,5%);

- Uma tabela apresentando a aprovação ou reprovação do hélice para cada critério de cavitação;
- Uma mensagem dizendo se o Hélice ultrapassa ou não o limite de cavitação definido.

Figura 16 - Display da planilha Seleção Otimizada de Um Propulsor da Série B



Fonte: Autor (2015).

Vale ressaltar que o método de seleção do hélice utilizado é válido para todos os tipos de embarcações, exceto para submarinos, pois as condições de operação do hélice de um submarino diferem muito das condições de operação do hélice de embarcações de superfície, além disso para o submarino, a característica mais importante é a baixa emissão sonora, tendo prioridade sobre a eficiência do propulsor.

Contudo, o cálculo da resistência ao avanço disponível na planilha, abrange apenas as embarcações deslocantes devido às restrições do método usado.

4.1 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

4.1.1 DIAGRAMAS DE ÁGUAS LIVRES J DE OPERAÇÃO E EFICIÊNCIA DO HÉLICE.

A série sistemática utilizada nesse trabalho é a série de Wageningen ou Série B, responsável por reproduzir vários diagramas que auxiliam a seleção do propulsor mais adequado para cada caso.

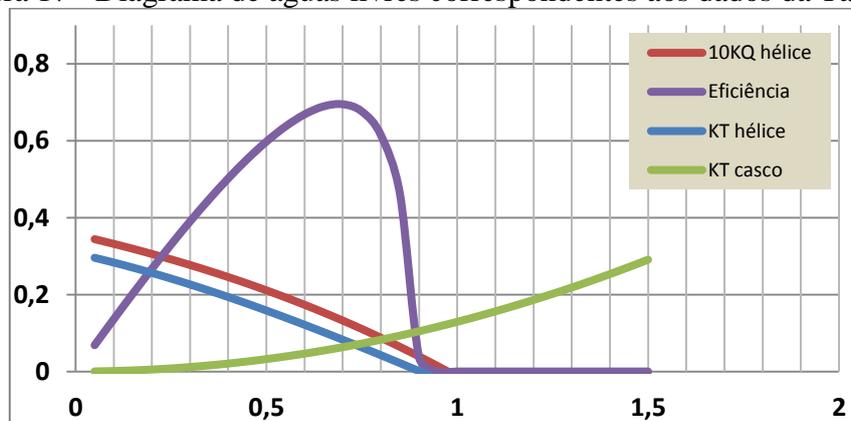
Para o início do desenvolvimento computacional, os polinômios apresentados na Figura 8 e seus respectivos coeficientes mostrados na Figura 9, foram colocados em uma planilha do Excel.

Os valores de J foram determinados como variando entre 0,05 a 1,5, com intervalo de 0,05 e foram calculados os valores de K_T e K_Q para cada valor de J considerado. A relação passo diâmetro (P/D), área expandida (A_E/A_0) e número de pás (Z) foram estipulados aleatoriamente, atendendo aos limites impostos pela série.

Paralelamente aos cálculos do K_T e K_Q da hélice, são realizados os cálculos do K_T -casco e da eficiência do hélice (η_0), também em função de J , pelas fórmulas (10) e (8) respectivamente.

Depois de inseridas todas as fórmulas na planilha, obtemos o diagrama de águas livres, isto é, um gráfico com quatro curvas: K_T e K_Q do hélice, K_T -casco e eficiência do propulsor. Os valores de K_Q do hélice são multiplicados por 10 para melhor visualização no gráfico. A Figura 17 apresenta o diagrama de águas livres obtido para os dados apresentados na Tabela 6.

Figura 17 - Diagrama de águas livres correspondentes aos dados da Tabela 6



Fonte: Autor (2015).

Tabela 6 - Dados de entrada

RESISTÊNCIA AO AVANÇO DEFINIDA		Unidades
Velocidade de operação	14	Knots
Resistência ao avanço	150	kN
DADOS HÉLICE		
Número de propulsores	1	-
Razão Passo Diâmetro (P/D)	0,8	-
Área expandida (A_E/A_0)	0,4	-
Número de pás (Z)	3	-
Diâmetro Máximo	7	m
Coef. de redução da força propulsora (t)	0,2	-
Coeficiente de esteira (w)	0,2	-
Margem de Resistência (MR)	0,15	-

Fonte: Autor (2015).

O ponto de operação do hélice é determinado como sendo o ponto onde a curva K_T -casco cruza com a curva K_T do hélice, dessa forma estamos levando em conta a interação casco-hélice. O valor de J correspondente a esse ponto é o J de operação, e neste ponto o empuxo gerado pelo propulsor corresponde ao exato valor do empuxo requerido pelo casco para andar a velocidade estipulada na análise.

A fórmula do K_T do hélice pode ser obtida através de regressão quadrática⁹, já que os expoentes de J apresentados na Figura 9 variam de 0 a 2, isto é, e os parâmetros (P/D, A_E/A_0 e Z) são dados de entrada, K_T do hélice pode ser representado como uma equação de segundo grau em função de J. Da mesma forma podemos encontrar a equação da curva K_T -casco. Sendo assim, podemos igualar as duas fórmulas, resultando em apenas uma equação de segundo grau igual à zero. A solução positiva, obtida por Bhaskara, da equação de segundo grau formada pelas curvas K_T -casco e K_T do hélice é o J de operação. Matematicamente temos:

- 1º Passo: após a inserir os parâmetros do projeto, temos a seguinte equivalência:

$$K_T \text{ hélice} = \sum cJ^s (P/D)^t (A_E/A_0)^u Z^v, \text{ torna-se } K_T \text{ hélice} = aJ^2 + bJ + c.$$

- 2º Passo: após a inserção de dados, a fórmula K_T casco também fica apenas em função de J, podendo ser representada dessa forma: $K_T \text{ casco} = dJ^2$.

⁹ A regressão quadrática é feita através do comando “proj.lin”, selecionando os valores de K_T do hélice e os valores de J e J^2 correspondentes, em colunas separadas.

- 3º Passo: igualar as funções obtidas e encontrar o valor de J por Bhaskara.

$$aJ^2 + bJ + c = dJ^2 \rightarrow (a-d)J^2 + bJ + c = 0$$

- 4º Passo: O J de operação será o J positivo que satisfaz a equação acima.

Através do ponto de operação calcula-se pela fórmula (8) a eficiência correspondente ao propulsor selecionado.

É importante ressaltar que ao calcular K_T do hélice para valores de J variando de zero á 1,5, são encontrados valores negativos, que fazem parte do cálculo do J de operação e influenciam erroneamente o resultado, pois um valor negativo para K_T do hélice significa uma força na mesma direção do movimento da embarcação e não contrária, ou seja, estaria indicando que existe uma força que “empurra” a embarcação, o que na verdade não acontece. A fim de solucionar este impasse, fez-se necessário anular as eficiências nas quais os valores de K_T do hélice resultam em números negativos e a regressão quadrática feita para encontrar a equação do K_T do hélice se limitou até o valor de J anterior ao J que anula o K_T do hélice.

4.1.2 OTIMIZAÇÃO

Para a seleção otimizada do hélice foi usada a ferramenta “Solver¹⁰” do Excel no método evolutionary. Primeiramente foram colocadas as restrições para as variáveis: passo diâmetro (P/D), área expandida (A_0/A_E) e número de pás (Z) como mostra a Tabela 7. O número de pás foi restringido como um número inteiro.

Tabela 7 – Restrições da Série B

RESTRICÇÕES DA SÉRIE B	Mín	Máx
P/D	0,5	1,4
Ae/Ao	0,3	1,1
Z	2	7

Fonte: Autor (2015).

¹⁰ Com a ferramenta solver você pode localizar um valor ideal de (máximo ou mínimo), sujeito a restrições ou limites, para uma fórmula em uma célula chamada de célula objetivo. O Solver trabalha com um grupo de células chamadas de variáveis de decisão, que são ajustadas para satisfazer as restrições e produzir o resultado desejado para a célula objetivo.

Para incluir a cavitação na otimização foi feita uma restrição da seguinte forma: o projetista irá definir o limite aceitável de cavitação (20, 10, 5 ou 2,5%), na célula de restrição aparecerá o número 0 (zero) caso o limite de desejado seja aprovado, isto significa que o hélice apresenta menos porcentagem de cavitação que a definida, e aparecerá o número 1 caso o limite seja reprovado. Foi definido na ferramenta solver que essa célula de restrição deve ser igual a zero, ou seja, o propulsor deve ter o limite de cavitação definido aprovado.

Foi gravado uma macro do processo e atribuído ao botão OTIMIZAR, dessa forma, quando o projetista apertar o botão, a ferramenta solver irá executar a macro programada e através de algoritmos heurísticos de otimização irá fazer várias iterações e encontrar a melhor combinação dos parâmetros que satisfaça o critério de cavitação e maximize a eficiência.

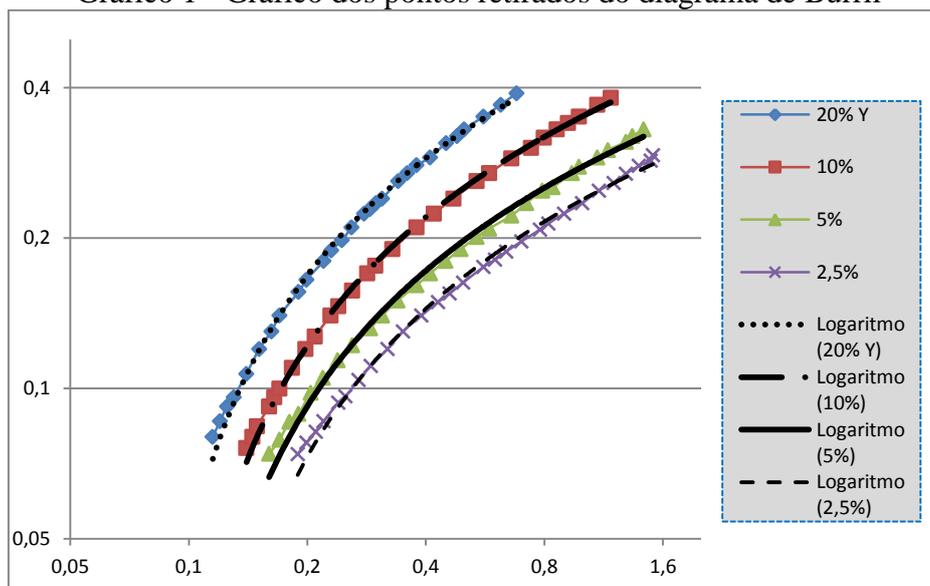
4.1.3 HOLTROP

Como comentado anteriormente, através do botão HOLTROP, é possível obter a resistência do casco da embarcação calculada pelo método de Holtrop e Mennen. Esse cálculo é feito através da planilha Holtrop 1984 Method, cuja implementação foi realizada pelo professor Thiago Pontin Tancredi e depende das características da embarcação apresentadas anteriormente na tabela 4.

4.1.4 CAVITAÇÃO

Conforme apresentado anteriormente, é possível conferir se o hélice selecionado está dentro dos limites aceitos de cavitação estabelecidos pelo diagrama de Burril. Para a implementação computacional da cavitação, foram retirados 28 pontos, apresentados na Tabela 8, das curvas de 20, 10, 5 e 2,5% de cavitação do diagrama. Esses pontos foram plotados em um gráfico, em escala logarítmica, onde o eixo X representa o número de cavitação (σ) e o eixo Y representa o coeficiente de Burril (τ_c). O gráfico obtido é apresentado a seguir, no qual são mostrados os pontos extraídos do diagrama de Burril e as respectivas linhas de tendência logarítmicas determinadas pelo Excel

Gráfico 1 - Gráfico dos pontos retirados do diagrama de Burril



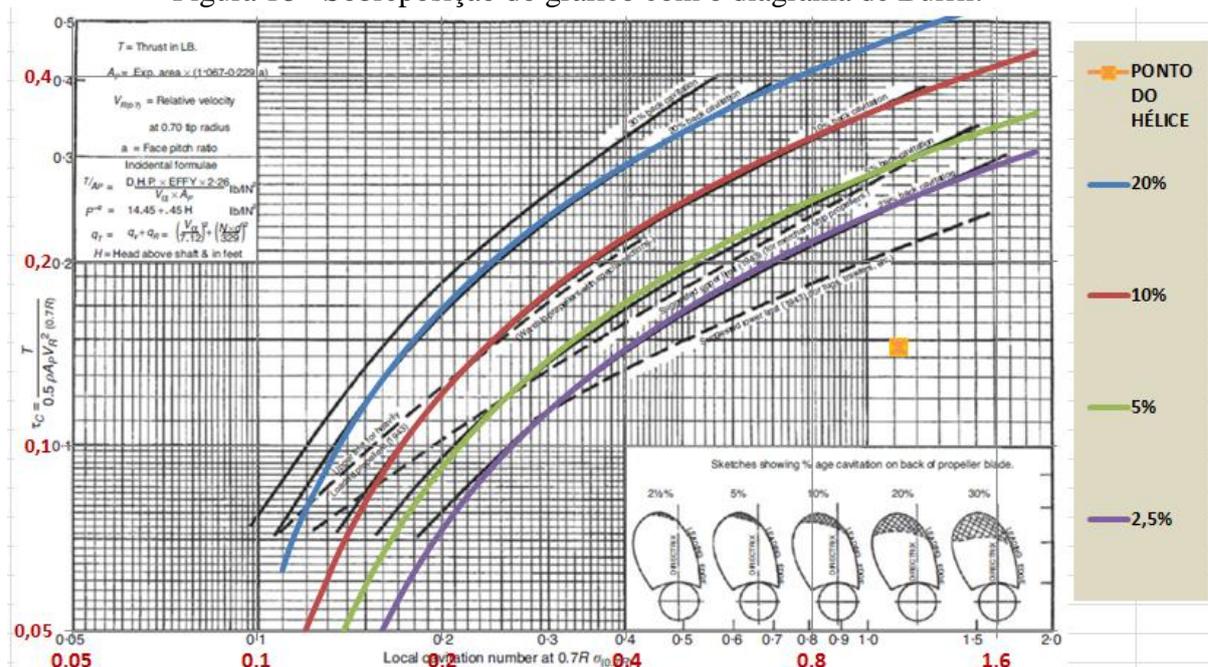
Fonte: Autor (2015).

Com a ajuda da ferramenta “linha de tendência” do programa Excel, é possível obter a equação de cada uma das linhas de tendência mostradas no Gráfico 1. As equações que melhor representam as curvas são do tipo logarítmica e são apresentadas a seguir:

- $Y_{20\%} = 0,17838 \cdot \ln(x) + 0,4481$
- $Y_{10\%} = 0,1422 \cdot \ln(x) + 0,3507$
- $Y_{5\%} = 0,1154 \cdot \ln(x) + 0,278$
- $Y_{2,5\%} = 0,103 \cdot \ln(x) + 0,2388$

A fim de conferir se as curvas geradas a partir das equações logarítmicas representam suficientemente bem o diagrama de Burril, foi plotado um novo gráfico a partir dessas equações, variando o termo X de 0 a 1,85 com intervalo de 0,02 e em seguida o gráfico gerado foi sobreposto ao diagrama original de Burril (Figura 18). Constatou-se que as equações encontradas representam de forma satisfatória a representação do critério de cavitação.

Figura 18 - Sobreposição do gráfico com o diagrama de Burril.



Fonte: Autor (2015).

Ao inserir os dados de entrada do hélice o coeficiente de Burril (τ_c) e o número de cavitação (σ) são calculados e são apresentados no gráfico como “ponto do hélice”. Para que a planilha possa conferir automaticamente se o propulsor possui porcentagens de cavitações aceitáveis, o valor do número de cavitação do hélice é substituído no lugar de x em cada equação; se o coeficiente de Burril do hélice (τ_c) for menor que o y obtido pela substituição do x , então o hélice apresenta porcentagens de cavitação menores que a estabelecida pela equação. Para melhor entendimento, a seguir é apresentado, de forma matemática, esse raciocínio que é aplicado para todas as porcentagens de cavitação.

Raciocínio matemático:

- 1º Passo: Cálculo Ponto do hélice (σ , τ_c);
- 2º Passo: Substituição de x pelo número de cavitação;
Exemplo: ($Y_{20\%} = 0,17838 \cdot \ln(\sigma) + 0,4481$)
- 3º Passo: comparação do resultado $Y_{20\%}(\sigma)$ com τ_c ;
- 4º Passo: se $\tau_c < Y_{20\%}(\sigma)$, então o hélice está aprovado no critério de cavitação de 20%, isto é, apresenta menos de 20% de cavitação.

A fim de simplificar a interpretação dos limites de cavitação para o usuário da planilha, a Tabela 8 aparecerá no display e indicará a aprovação ou reprovação do propulsor para cada porcentagem de cavitação.

Tabela 8 - Tabela de aprovação ou reprovação do limite de cavitação

CRITÉRIO DE CAVITAÇÃO	
Limite para cavitação de 20%	APROVADO
Limite para cavitação de 10%	APROVADO
Limite para cavitação de 5%	REPROVADO
Limite para cavitação de 2,5%	REPROVADO

Fonte: Autor (2015).

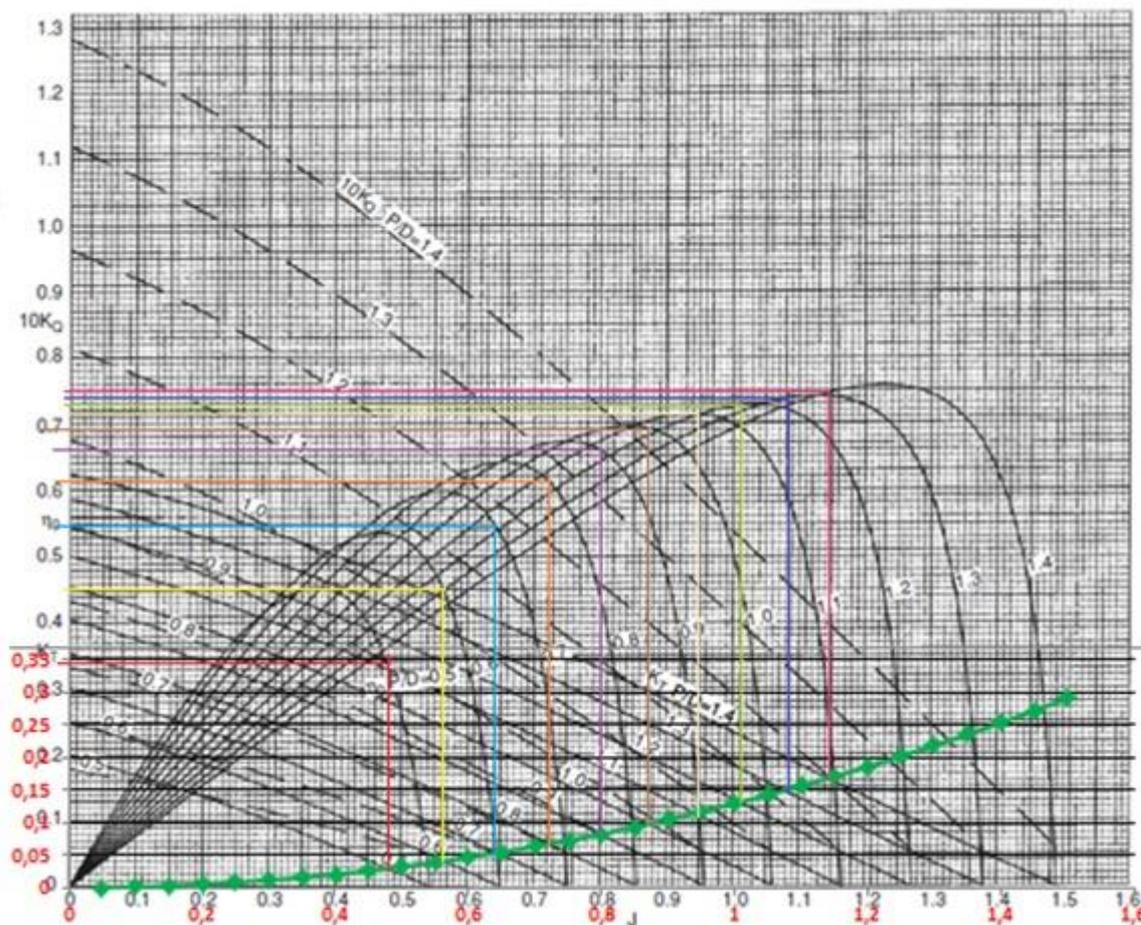
4.2 ESTUDO DE APLICAÇÃO

Com a finalidade de verificar a coerência da planilha construída, um hélice da série B foi selecionado pelo método tradicional e seu resultado foi comparado com o resultado obtido através dessa nova ferramenta.

Primeiramente o gráfico KT_{casco} em função de J foi traçado no Excel utilizando os mesmos dados da Tabela 6 e a fórmula (10). Em seguida, foi escolhido aleatoriamente um diagrama de águas livres, neste caso, foi o diagrama Wageningen B4.70 que corresponde a hélices com 4 pás e razão de área correspondente a 0,70.

Para encontrar o J de operação, o gráfico KT_{casco} foi sobreposto ao diagrama escolhido e linhas foram traçadas, com o auxílio do programa Paint, nos pontos de encontro entre a curva do KT_{casco} e as curvas $KThélice$ (cada curva corresponde a um valor de P/D). A Figura 19 mostra o procedimento descrito.

Figura 19 - Procedimento de seleção do hélice



Fonte: Autor (2015).

As linhas seguem até cruzar com a curva de eficiência equivalente ao mesmo P/D da curva K_{thélice}, cruzado anteriormente. Por exemplo, a linha vermelha corresponde ao cruzamento do K_{casco} com o K_{thélice} para um P/D=0,5, para encontrarmos a eficiência devemos continuar essa linha até o cruzamento com a curva de eficiência para o mesmo P/D, ou seja P/D =0,5.

Depois de traçadas todas as linhas relacionadas a todos os valores de P/D, selecionamos o maior valor de eficiência encontrado. Pelo gráfico podemos notar que esse valor é aproximadamente 0,76 (linha rosa), representando um P/D=1,4 e J_{operação}=0,50. A Figura 20 apresenta uma melhor visualização desses valores.

Figura 20 - Hélice de maior eficiência



Fonte: Autor (2015).

Assim sendo, pelo método tradicional foi selecionado um hélice com 4 pás, $Ae/Ao=0,7$, $P/D= 1,4$, $J_{operação}= 1,15$ e $\eta_0= 0,76$. Esses valores foram inseridos na planilha e o resultado do $J_{operação}$ e eficiência foram muito similares como mostra a tabela 9.

Tabela 9 – Resultado eficiência máxima Método tradicional X Planilha

Método tradicional				Planilha			
P/D	1,4	J operação	1,15	P/D	1,4	J operação	1,14
Ae/Ao	0,7	η_0 p/ J operação	0,76	Ae/Ao	0,7	η_0 p/ J operação	0,77
Z	4			Z	4		

Fonte: Autor (2015).

Outra forma de verificar a coerência da planilha é definir o J de operação e a eficiência para cada razão passo diâmetro, isto é, para cada linha colorida traçada no gráfico e verificar se os resultados obtidos pela planilha correspondem. A Tabela 10 apresenta a comparação dos valores obtidos pelo método tradicional e pela planilha. O erro relativo foi calculado pela seguinte fórmula 15.

$$E_{rel(\%)} = \frac{x - x_V}{x_V} 100 \quad (15)$$

Onde:

X: valor encontrado pela planilha;

X_V : valor verdadeiro (valor encontrado pelo método tradicional).

Tabela 10 - Comparação de resultados Método Tradicional e Planilha

MÉTODO TRADICIONAL			PLANILHA	ERRO	
P/D	0,5	J operação	0,47	0,48	-2,1%
		η_0 p/ J operação	0,349	0,337	-3,4%
P/D	0,6	J operação	0,56	0,562	0,4%
		η_0 p/ J operação	0,45	0,455	1,1%
P/D	0,7	J operação	0,65	0,643	-1,1%
		η_0 p/ J operação	0,55	0,549	-0,2%
P/D	0,8	J operação	0,72	0,72	0,0%
		η_0 p/ J operação	0,62	0,619	-0,2%
P/D	0,9	J operação	0,8	0,796	-0,5%
		η_0 p/ J operação	0,67	0,669	-0,1%
P/D	1,0	J operação	0,86	0,869	1,0%
		η_0 p/ J operação	0,7	0,704	0,6%
P/D	1,1	J operação	0,95	0,94	-1,1%
		η_0 p/ J operação	0,73	0,727	-0,4%
P/D	1,2	J operação	1,01	1,009	-0,1%
		η_0 p/ J operação	0,74	0,742	0,3%
P/D	1,3	J operação	1,09	1,077	-1,2%
		η_0 p/ J operação	0,75	0,754	0,5%

Fonte: Autor (2015).

Podemos perceber que a planilha elaborada está bastante coerente. Se considerarmos os valores encontrados pelo método tradicional como exatos, encontramos um erro relativo de de menos de 1% tanto para o J de operação quanto para a eficiência. Porém existe uma grande probabilidade de o erro estar relacionado não à planilha, mas ao método tradicional por apresentar muitas variáveis difíceis de serem controladas, como por exemplo, a sobreposição do gráfico, cruzamento das linhas e até mesmo a leitura dos valores encontrados.

Para conferir se o critério de cavitação está coerente, o coeficiente de Burril (τ_c) e o número de cavitação (σ), foram calculados, pelas fórmulas (11) e (13) respectivamente, para o hélice selecionado pelo método tradicional, isto é, o hélice com

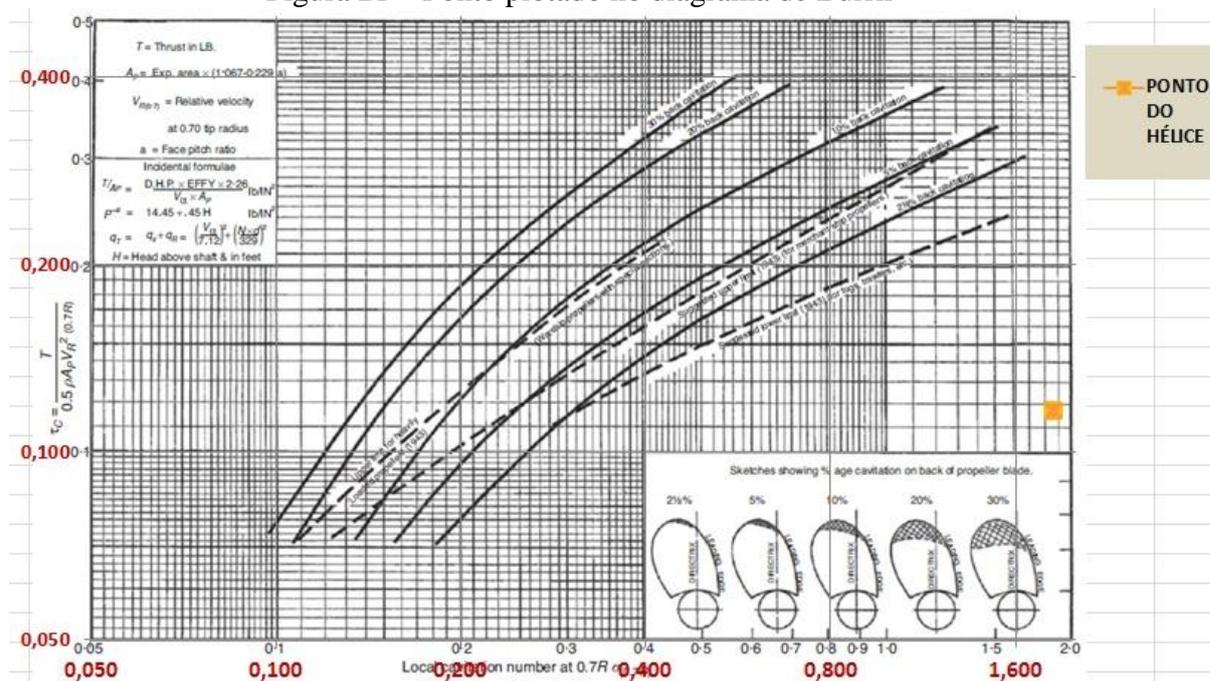
4 pás, $A_e/A_o=0,7$ e $P/D= 1,4$. O ponto obtido (σ , τ_c), apresentado na Tabela 11, foi então plotado no diagrama de Burril como mostra a Figura 21.

Tabela 11 - Ponto do hélice

PONTO DO HÉLICE	
σ	1,841
τ_c	0,117

Fonte: Autor (2015).

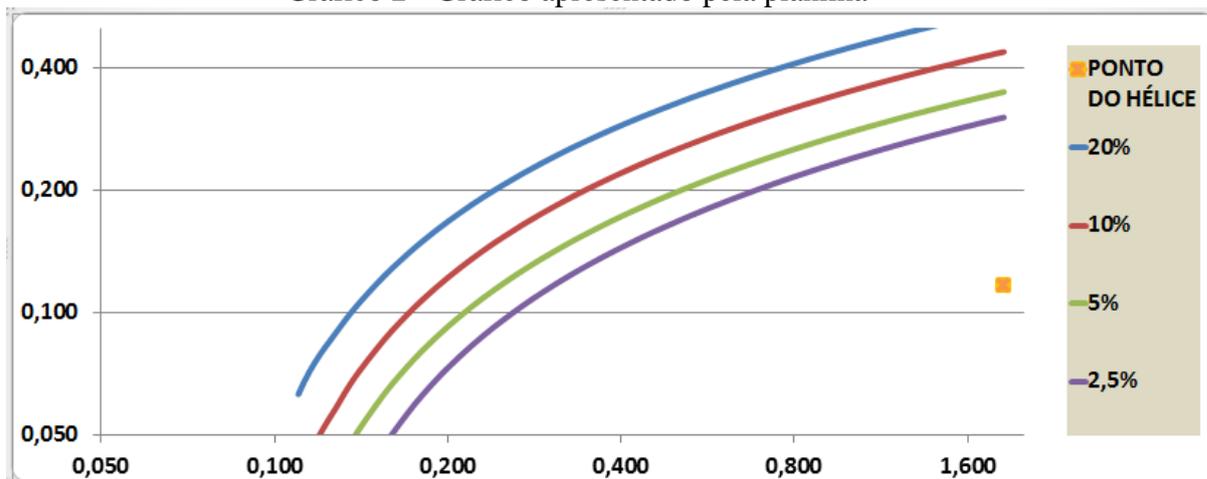
Figura 21 – Ponto plotado no diagrama de Burril



Fonte: Autor (2015).

Evidentemente, o ponto encontrado pela planilha, foi o mesmo calculado algebricamente por se tratarem das mesmas fórmulas, apenas serve como uma prova real para confirmar o correto uso das mesmas. Além disso, o gráfico apresentado na planilha, Gráfico 2, muito se assemelha ao diagrama de Burril.

Gráfico 2 - Gráfico apresentado pela planilha



Fonte: Autor (2015).

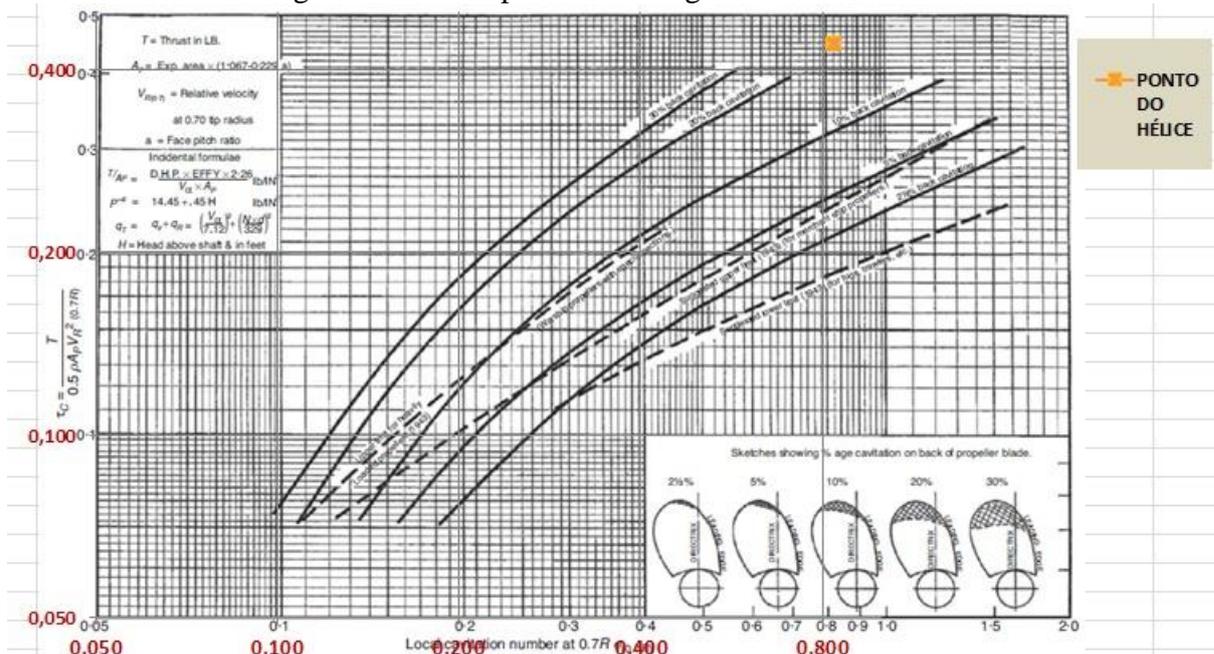
A fim de conferir fazer um novo estudo de aplicação, porém para um hélice que não satisfaz o critério de cavitação, foram alterados os valores de razão relação passo diâmetro (P/D), área expandida (A_E/A_0), número de pás (Z) e diâmetro máximo do hélice, de forma que o mesmo fosse reprovado em todos os limites de cavitação. A Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros de projeto e o ponto do hélice encontrado e a Figura 22 apresenta o ponto plotado no diagrama de Burril e o Gráfico 3 é gráfico obtido pela planilha.

Tabela 12 - Valores dos parâmetros e ponto do hélice.

Parâmetros do Projeto	
P/D	1,4
A_e/A₀	0,3
Z	2
D_{máx}	4
PONTO DO HÉLICE	
σ	0,834
τ_c	0,441

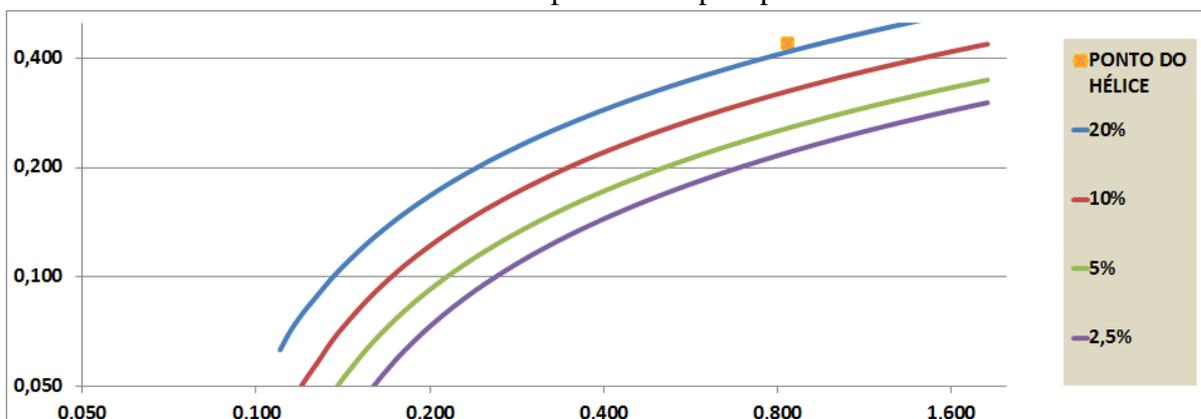
Fonte: Autor (2015).

Figura 22 - Ponto plotado no diagrama de Burril



Fonte: Autor (2015).

Gráfico 3 - Gráfico apresentado pela planilha



Fonte: Autor (2015).

Ao comparar o gráfico da planilha com o diagrama de Burril, podemos constatar a coerência da ferramenta desenvolvida e ainda perceber com maior facilidade que o hélice não atende ao critério de cavitação pela visualização do ponto na planilha do que pelo diagrama de Burril. Dessa forma, a ferramenta construída, além de facilitar o processo de seleção do hélice, possui uma probabilidade maior de ser mais precisa no que se refere a seleção do hélice.

4.3 VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS

As variações paramétricas têm por objetivo observar como os parâmetros de projeto do hélice variam de acordo com o diâmetro do hélice (relacionado ao calado da embarcação), velocidade de operação e resistência ao avanço da embarcação. Também é observado a eficiência máxima obtida e a porcentagem de cavitação.

Primeiramente foram estipuladas 3 velocidades diferentes (6, 12 e 18Knots) e 3 resistências ao avanço, que foram calculadas pela própria planilha através do método de Holtrop ao inserir dados de 3 embarcações de diferentes comprimentos. Também Foram determinados 3 diâmetros diferentes para o hélice de acordo com ao calado da embarcação (30, 50 e 70% do calado). O dados das embarcações, bem como suas respectivas resistências ao avanço, para cada velocidade e as relações de diâmetro do hélice são apresentadas na Tabela 13.

Ao todo foram feitas 108 simulações. Para cada combinação de velocidades e diâmetro do hélice (3 velocidades X 3 diâmetros = 9 combinações), foram encontrados através do botão otimizar, os parâmetros de projeto julgados ótimos sem considerar o critério de cavitação e também considerando o critério, foram encontrados os parâmetros ótimos para cada porcentagem de cavitação (20, 10, 5 e 2,5%). Essas simulações foram feitas para 3 embarcações diferentes, isto é para 3 resistências ao avanço diferentes.

Para melhor visualização, comparação e interpretação dos dados, foram plotados gráficos para cada combinação de velocidades e diâmetros do hélice e para cada critério de cavitação citados acima, todos os gráficos obtidos estão disponíveis no apêndice. Os gráficos relacionam os parâmetros ótimos obtidos (razão passo diâmetro (P/D), área expandida (A_E/A_0) e número de pás (Z)) e a eficiência máxima alcançada com a resistência da embarcação. Ao total, foram obtidos 45 gráficos que estão dispostos no anexo.

Tabela 13 - Dados das embarcações

ENERGY R		Dmáx	ENERGY R
Classe	Petroleiro	30%calado	6,756
Lpp	319	50%calado	11,26
Boca	60	70%calado	15,764
Calado Proa	22,52		
Calado Popa	22,52		
Coeficiente de bloco (Cb)	0,821	Resist. ao avanço	velocidades
Coeficiente da Secção Mestra (Cm)	0,995	329,87 (kN)	6Knots
Coeficiente da Área de linha d'água (Cwp)	0,889	1225,06 (kN)	12Knots
Deslocamento	362905	2993,88 (kN)	18Knots
CHANCE		Dmáx	CHANCE
Classe	Petroleiro	30%calado	3,798
Lpp	172	50%calado	6,33
Boca	32,2	70%calado	8,862
Calado Proa	12,66		
Calado Popa	12,66		
Coeficiente de bloco (Cb)	0,786	Resist. ao avanço	velocidades
Coeficiente da Secção Mestra (Cm)	0,993	105,20 (kN)	6Knots
Coeficiente da Área de linha d'água (Cwp)	0,869	405,00 (kN)	12Knots
Deslocamento	56474	1488,23 (kN)	18Knots
COMBI FREIGHTER 4850		Dmáx	COMBI FREIGHTER 4850
Classe	BULKER	30%calado	2,73
Lpp	89,77	50%calado	4,55
Boca	15,2	70%calado	6,37
Calado Proa	9,1		
Calado Popa	9,1		
Coeficiente de bloco (Cb)	0,381	Resist. ao avanço	velocidades
Coeficiente da Secção Mestra (Cm)	0,832	21,15 (kN)	6Knots
Coeficiente da Área de linha d'água (Cwp)	0,560	85,22 (kN)	12Knots
Deslocamento	4850	309,94 (kN)	18Knots

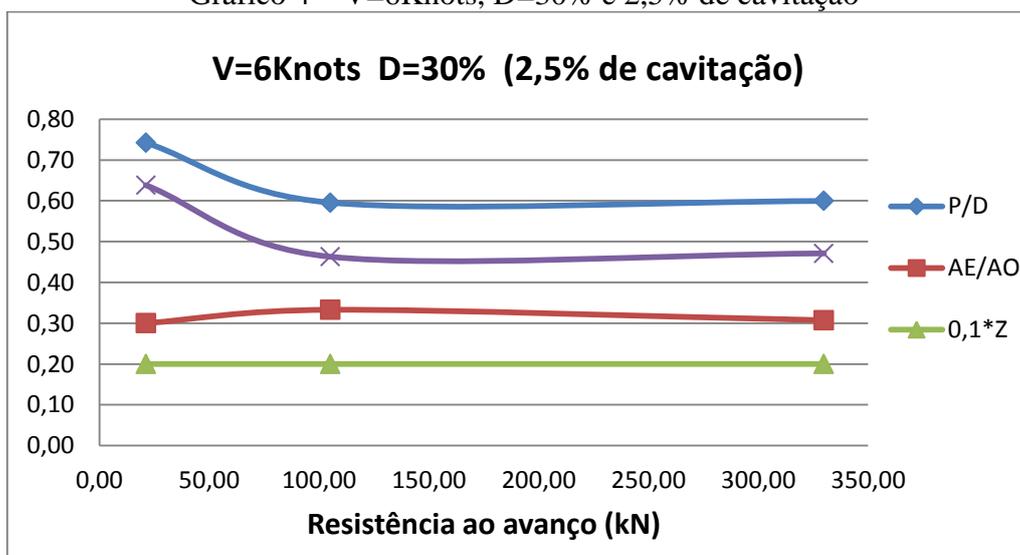
Fonte: Autor (2015).

4.3.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise será feita primeiramente para cada velocidade separadamente, em seguida será realizada uma análise geral dos resultados obtidos.

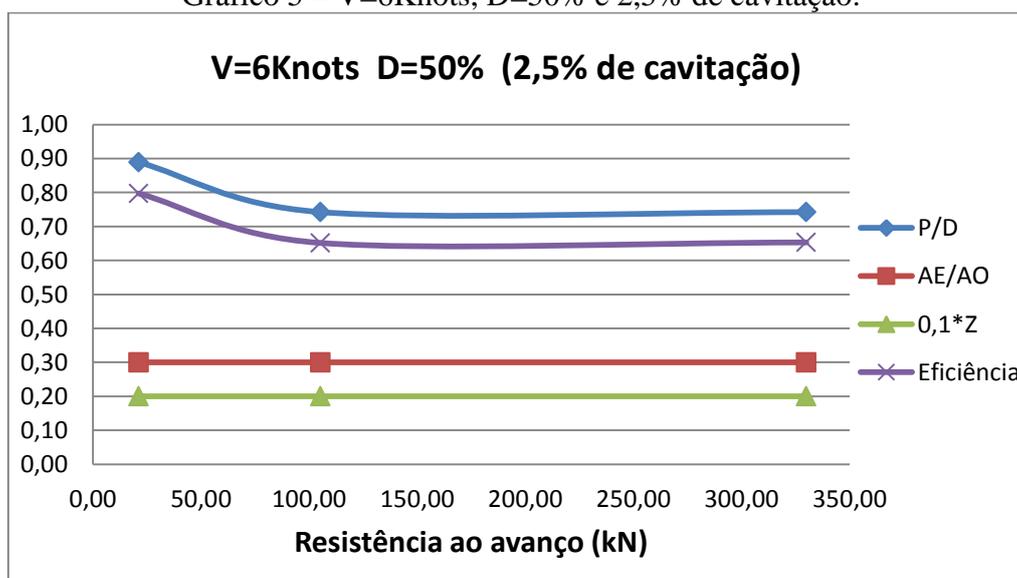
Para a menor velocidade ($V=6\text{knots}$), podemos perceber que o aumento do diâmetro do hélice influenciou no aumento da razão passo diâmetro, o passo aumentou em torno de 0,1 para cada 20% de aumento no diâmetro do hélice. Também houve um aumento da eficiência, o que era esperado, já que o aumento do diâmetro do hélice significa o aumento da área em contato com o fluido e por consequência o aumento do empuxo. A razão de área e o número de pás se mantiveram perto de 0,3 e 2 respectivamente. As observações relatadas podem ser notadas nos gráficos 4,5 e 6.

Gráfico 4 – $V=6\text{Knots}$, $D=30\%$ e 2,5% de cavitação



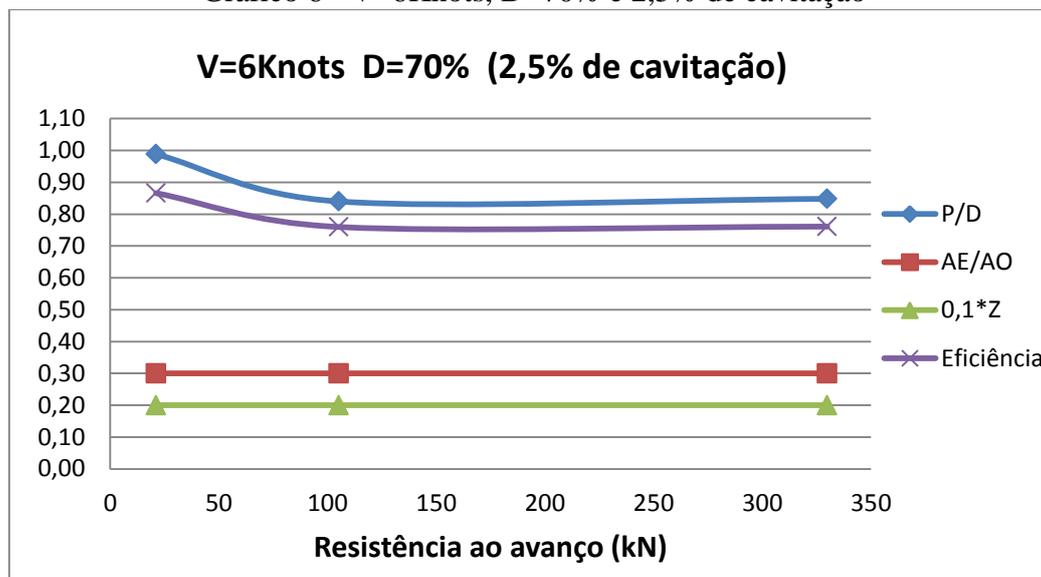
Fonte: Autor (2015).

Gráfico 5 – $V=6\text{Knots}$, $D=50\%$ e 2,5% de cavitação.



Fonte: Autor (2015).

Gráfico 6 - V=6Knots, D=70% e 2,5% de cavitação



Fonte: Autor (2015).

O critério de cavitação não teve forte influência nos parâmetros, mesmo não considerando a cavitação, o hélice ótimo, no pior dos cenários, apresentou apenas 2,5% de cavitação, a Tabela 14 apresenta a eficiência para cada valor de diâmetro e para cada porcentagem de cavitação e também mostra as porcentagens de cavitação para cada valor de diâmetro, obtidas pelo processo de otimização que não incluiu o critério de cavitação. Nesse caso, a eficiência teve um leve aumento apenas na mudança de 2,5% para 5% de cavitação.

Tabela 14 - Eficiência para porcentagem de cavitação e processo de otimização sem cavitação. (V=6Knots)

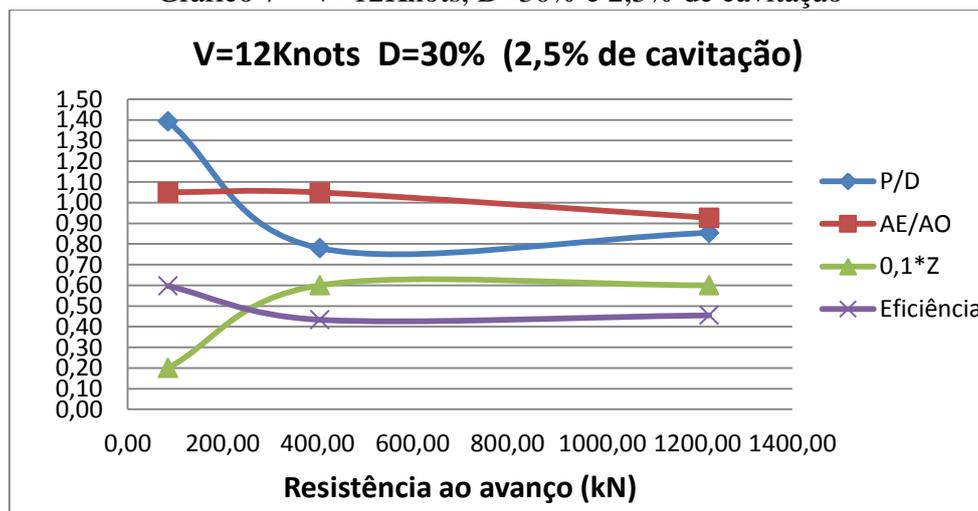
Eficiência de acordo com o limite de cavitação (V=6Knots)					Otimização sem cavitação	
V=6Knots	2,5% cav.	5% cav.	10% Cav.	20% Cav.	Sem cav.	Cavitação
30%calado	47,11%	47,56%	47,56%	47,56%	47,56%	Reprovado 2,5%
50%calado	65,31%	65,31%	65,31%	65,31%	65,31%	Aprovado em todos
70%calado	76,10%	76,10%	76,10%	76,10%	76,10%	Aprovado em todos

Fonte: Autor (2015).

Para a velocidade de 12Knots, assim como ocorreu com a menor velocidade, houve um aumento da eficiência em função do aumento do diâmetro do hélice. Para os diâmetros de 50% e 70% do calado, houve aumento da razão de passo e o número de

pás e de razão de área se mantiveram em 2 e 0,3 como também ocorreu para a velocidade de 6Knots. Para o diâmetro de 30% do calado, o número de pás aumentou com o aumento da resistência, apresentando uma tendência a se estabilizar em 6. A razão de área diminuiu a medida que a porcentagem de cavitação e resistência aumentaram. O comportamento comentado acima é apresentado pelos gráficos 7,8 e 9.

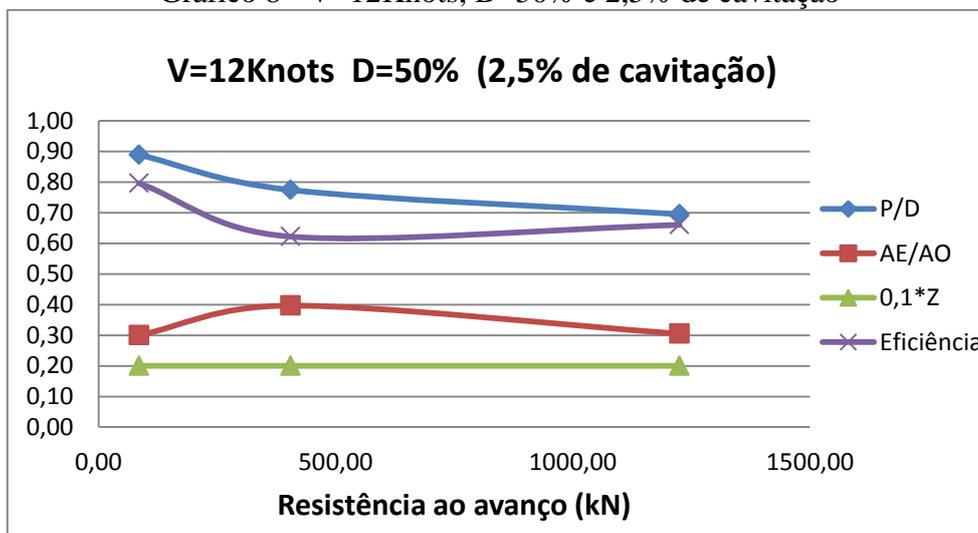
Gráfico 7 – V=12Knots, D=30% e 2,5% de cavitação



Fonte: Autor (2015).

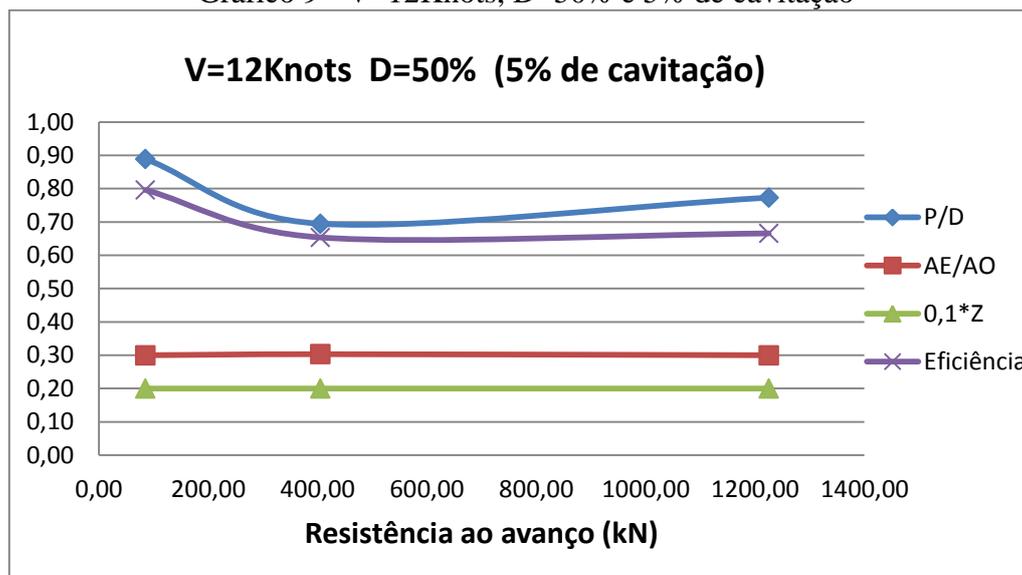
É importante ressaltar que para a menor resistência (gráfico 7), foi encontrado um hélice com 2 pás e razão de área de 1,05, o que na realidade, é impraticável. Portanto a interpretação dos resultados pelo projetista é de grande importância.

Gráfico 8 - V=12Knots, D=50% e 2,5% de cavitação



Fonte: Autor (2015).

Gráfico 9 - V=12Knots, D=50% e 5% de cavitação



Fonte: Autor (2015).

Quanto menor o diâmetro do hélice, mais o critério de cavitação foi influente na eficiência. A otimização sem o critério de cavitação apresentou eficiências maiores, porém o hélice com diâmetro correspondente a 30% do calado reprovou em todos os critérios de cavitação, isto significa que ele apresenta mais de 20% de cavitação em suas pás e o hélice com diâmetro correspondente a 50% do calado, apresenta mais de 2,5% de cavitação. Tais observações estão representadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Eficiência para porcentagem de cavitação e processo de otimização sem cavitação.(V=12Knots)

Eficiência de acordo com o limite de cavitação (V=12Knots)					Otimização sem cavitação	
V=12Knots	2,5% cav.	5% cav.	10% Cav.	20% Cav.	Sem cav.	Cavitação
30%calado	45,48%	46,24%	46,55%	46,56%	48,81%	Reprovado em todos
50%calado	66,01%	66,57%	66,57%	66,57%	66,57%	Reprovado 2,5%
70%calado	77,17%	77,17%	77,17%	77,17%	77,17%	Aprovado em todos

Fonte: Autor (2015).

Para a velocidade de 12knots, o critério de cavitação teve muita influência. Quanto maior a velocidade e menor o diâmetro, torna-se mais difícil de encontrar um hélice que atenda ao critério de cavitação. Esta influência pode ser percebida pelos dados da Tabela 16.

Tabela 16 - Eficiência para porcentagem de cavitação e processo de otimização sem cavitação.(V=18Knots)

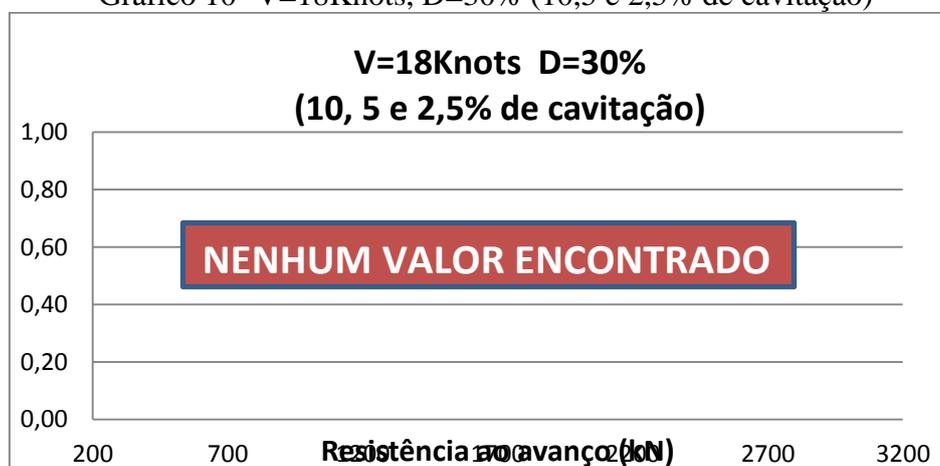
Eficiência de acordo com o limite de cavitação (V=18Knots)					Otimização sem cavitação	
V=18Knots	2,5% cav.	5% cav.	10% Cav.	20% Cav.	Sem cav.	Cavitação
30% calado	ñ encontrou	ñ encontrou	ñ encontrou	43,78%	47,41%	Reprovado em todos
50% calado	61,39%	61,39%	61,39%	65,16%	65,17%	Reprovado 10%
70% calado	75,37%	75,98%	75,98%	75,98%	75,98%	Reprovado 2,5%

Fonte: Autor (2015).

Para o diâmetro correspondente a 30% do calado não foram encontrados hélices com menos de 20% de cavitação e ainda assim, para a embarcação com comprimento médio (embarcação Chance), não foi possível encontrar um hélice que possuísse menos de 20% de cavitação.

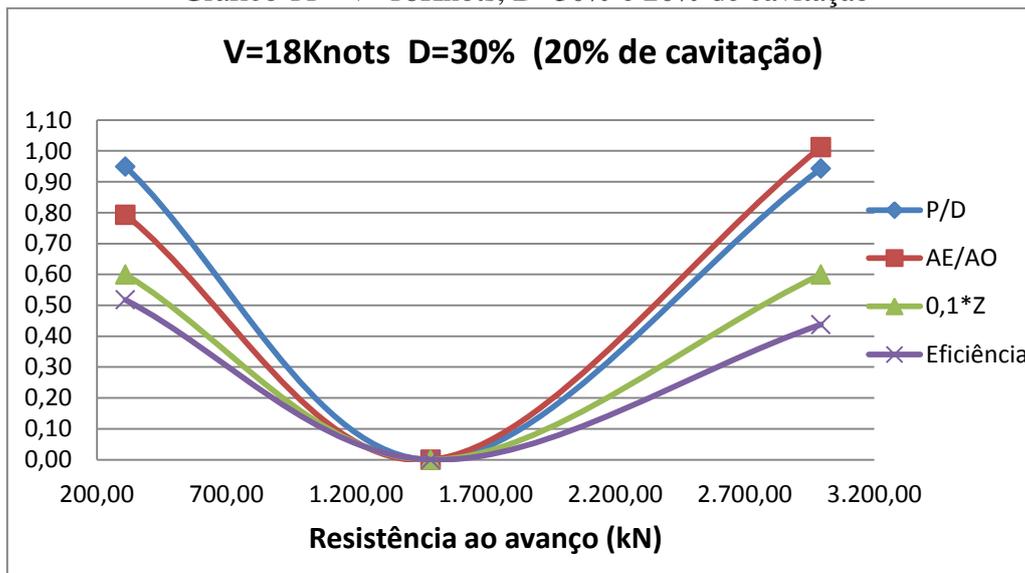
Isso ocorreu devido à relação comprimento/calado de cada embarcação. A embarcação menor (Combi Freighter) tem 89,77 metros de comprimento e 9,1 metros de calado, a embarcação de porte médio (Chance) possui 172 metros e apenas 4 metros de calado a mais que a embarcação menor, já a embarcação maior (Energy R), apesar de possuir o dobro do comprimento da embarcação de porte médio, o seu calado é 10 metros a mais que a embarcação de porte médio. Isto significa que para a velocidade de 18 knots, a embarcação média apresenta uma resistência ao avanço 4 vezes maior que a resistência da embarcação menor porém um diâmetro de 30% calado apenas 1 metro a mais. Por esta razão, não foi possível encontrar um hélice com 20% de cavitação para a embarcação de porte médio. Esse cenário é representado nos gráficos 10 e 11.

Gráfico 10- V=18Knots, D=30% (10,5 e 2,5% de cavitação)



Fonte: Autor (2015).

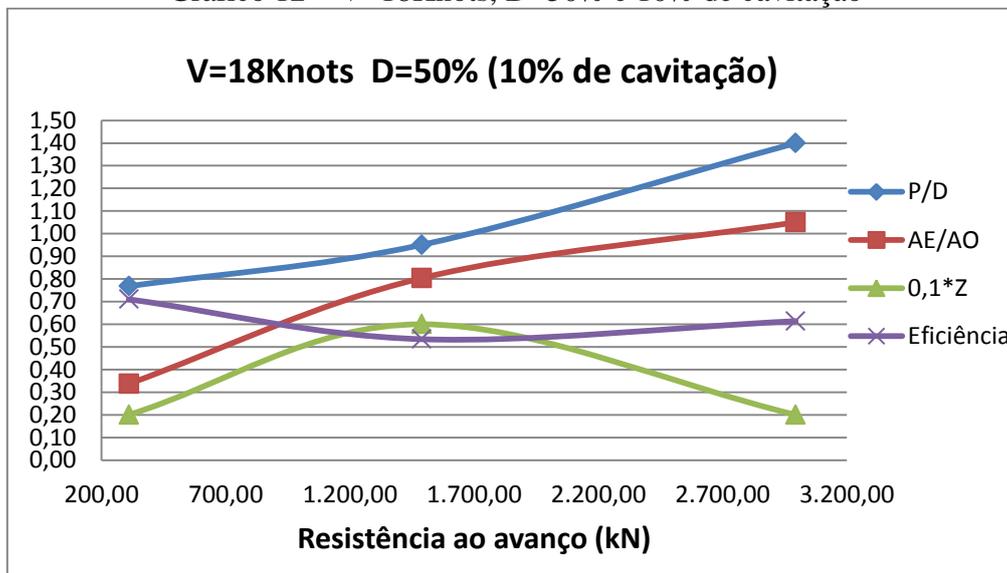
Gráfico 11 - V=18Knots, D=30% e 20% de cavitação



Fonte: Autor (2015).

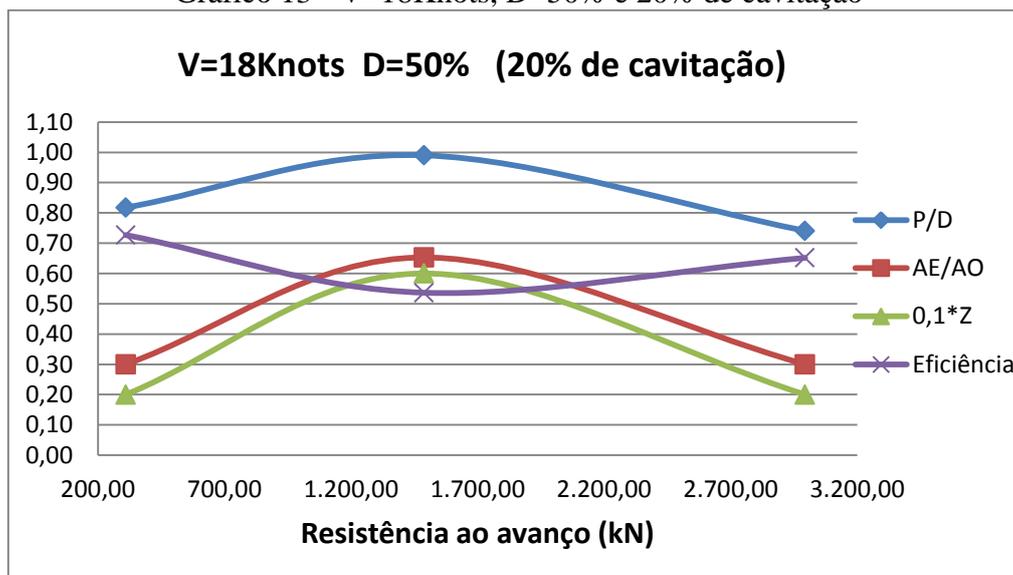
Com o aumento do diâmetro e da porcentagem de cavitação a razão de área e o número de pás seguem a tendência encontrada nas outras velocidades de convergirem para 0,3 e 2 respectivamente. A razão passo diâmetro diminuiu com o aumento do diâmetro. Esse comportamento é notado pelos gráficos 12, 13 e 14.

Gráfico 12 – V=18Knots, D=50% e 10% de cavitação



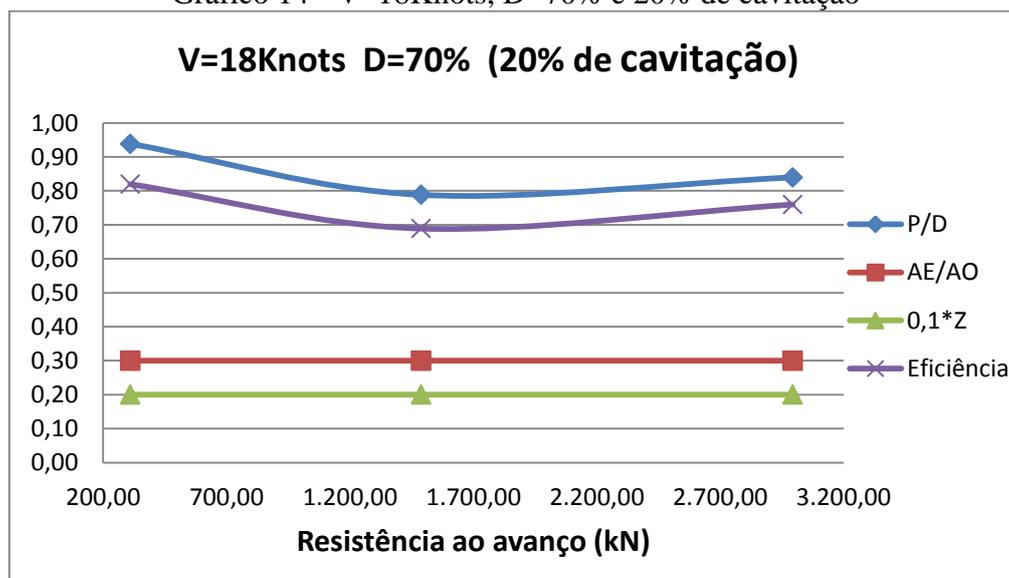
Fonte: Autor (2015).

Gráfico 13 - V=18Knots, D=50% e 20% de cavitação



Fonte: Autor (2015).

Gráfico 14 - V=18Knots, D=70% e 20% de cavitação



Fonte: Autor (2015).

Analisando de forma geral os resultados encontrados, percebe-se que o hélice que apresenta maior eficiência tem uma grande tendência a possuir 2 pás e razão de área de 0,3, porém isso pode ser devido a matriz de variação do parâmetros geométricos da Série B apresentados na Figura 7, onde para um hélice de 2 pás, foi utilizado apenas a razão de área de 0,3.

CONCLUSÕES

O correto dimensionamento do hélice é de extrema importância para o projeto de embarcações, por sua influência direta no custo operacional e no desempenho da embarcação. Os métodos tradicionais de processo de seleção de hélices apresentam uma série de etapas que requerem bastante precisão e conhecimento do projetista, que geralmente é adquirido por experiência. Além disso, ao adicionar o critério de cavitação no projeto, o processo de seleção do propulsor pode ser cansativo, pois a seleção terá que feita de maneira iterativa até que o hélice apresente porcentagens de cavitação aceitáveis.

A ferramenta construída e apresentada neste trabalho surge como uma opção de método para seleção do hélice que possui uma probabilidade maior de selecionar um hélice com maior eficiência que o encontrado pelo método tradicional, pois faz o uso de algoritmos de otimização que “testam” várias combinações de parâmetros de projeto e seleciona aquela que maximiza a eficiência. Além desse processo, essa ferramenta inclui o critério de cavitação e ainda possui a opção de calcular a resistência ao avanço pelo método de Holtrop, auxiliando ainda mais no projeto da embarcação, caso ela seja uma embarcação deslocante.

Através dessa ferramenta de projeto, foi possível realizar várias simulações de seleção de hélices e observar a influência da resistência da embarcação e diâmetro nos parâmetros de projeto do hélice, na sua eficiência e na porcentagem de cavitação encontrada.

Dessa forma, o projeto de propulsor pode ser realizado de forma mais simples, rápida e com maior precisão.

A ferramenta desenvolvida pode ser aprimorada de inúmeras formas. Outros métodos de cálculos para resistência ao avanço da embarcação poderão ser implementados de forma que a planilha possa calcular essa resistência não só para embarcações deslocantes, mas para outros tipos de embarcações.

Além disso, com a finalidade de reduzir os dados de entrada, também poderão ser implementados métodos empíricos para os cálculos dos coeficientes de forma da embarcação e também para os coeficientes de esteira e da redução da força propulsora.

Ainda como sugestão de trabalhos futuros, pode-se incrementar a ferramenta incluindo os cálculos das potências requeridas, para facilitar a escolha do motor,

obtendo dessa forma uma ferramenta completa de projeto do sistema propulsivo de uma embarcação.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTO, O. *Processo de busca não linear para o projeto da estrutura do navio*. 32 f. 1996. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1996.
- BRINATI, Hernani L. PNV 2324 *Instalações De Máquinas Marítimas*. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.
- HOLTROP, J; MENNEN, G.G.J. A statistical power prediction method, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 25. Outubro 1978.
- LEWIS, E.V. *Principles of Naval Architecture: Resistance, Propulsion and Vibration*, Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME). Jersey City, NJ (USA): The Society of Naval.1988. Vol. II.
- MOLLAND, A.; TURNOCK, S.; HUDSON, D. *Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power*. USA: Cambridge University Press, 2011.
- MONTEIRO, G.; DANTAS, J. Investigação de metodologia para o dimensionamento e validação de hélices. 25º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. *Anais...* Rio de Janeiro. 2014. 9 p.
- NASSEH, J. *Hélices: Os conceitos básicos (Parte I)*. *Revista Náutica*. n. 61. p. 98-100. São Paulo: Regina Hatakeyama. 1999.
- PADOVEZI, C. Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais. 87 f. 1997. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1997.
- PINHEIRO, T. *Obtenção de torque e empuxo de propulsores através do uso de sistema de medição de eixo por telemetria*. 2014. Monografia (Graduação). Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2014.
- Rules and regulations for the classification of naval ships*. Design Principles and Constructional Arrangements. Volume 1. Part 3. 2015.
- SAMPAIO, H. *Blog Fl 145: aviação e informação*. 2011. Disponível em: <<https://fl145.wordpress.com/>>. Acessado em 28 de maio de 2015.
- TANCREDI, T. *Otimização multidisciplinar distribuída aplicada a projetos de engenharia*. 190 f. 2008. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.

TONACIO, V. *Avaliação de propulsores navais em relação à eficiência e excitação de vibração*. 109 f. 2014. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

TRINDADE, J. *Hidrodinâmica e Propulsão: engenharia de máquinas marítimas*. [S. l.]: ENIDH, 2012.

YOSSEF, T. *Otimização Multiobjetivo De uma Embarcação De Apoio à Plataforma*. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013.

1 ANEXO

Anexo 1 - Coeficientes dos polinômios da série de Wageningen

Wageningen propeller series polynomial coefficients											
Thrust K_T					Torque K_Q						
n	C_x	s	t	u	v	n	C_x	s	t	u	v
1	0.00880496	0	0	0	0	1	0.00379368	0	0	0	0
2	-0.20455400	1	0	0	0	2	0.00886523	2	0	0	0
3	0.16635100	0	1	0	0	3	-0.032241	1	1	0	0
4	0.15811400	0	2	0	0	4	0.00344778	0	2	0	0
5	-0.14758100	2	0	1	0	5	-0.0408811	0	1	1	0
6	-0.48149700	1	1	1	0	6	-0.108009	1	1	1	0
7	0.41543700	0	2	1	0	7	-0.0885381	2	1	1	0
8	0.01440430	0	0	0	1	8	0.188561	0	2	1	0
9	-0.05300540	2	0	0	1	9	-0.00370871	1	0	0	1
10	0.01434810	0	1	0	1	10	0.00513696	0	1	0	1
11	0.06068260	1	1	0	1	11	0.0209449	1	1	0	1
12	-0.01258940	0	0	1	1	12	0.00474319	2	1	0	1
13	0.01096890	1	0	1	1	13	-0.00723408	2	0	1	1
14	-0.13369800	0	3	0	0	14	0.00438388	1	1	1	1
15	0.00638407	0	6	0	0	15	-0.0269403	0	2	1	1
16	-0.00132718	2	6	0	0	16	0.0558082	3	0	1	0
17	0.16849600	3	0	1	0	17	0.0161886	0	3	1	0
18	-0.05072140	0	0	2	0	18	0.00318086	1	3	1	0
19	0.08545590	2	0	2	0	19	0.015896	0	0	2	0
20	-0.05044750	3	0	2	0	20	0.0471729	1	0	2	0
21	0.01046500	1	6	2	0	21	0.0196283	3	0	2	0
22	-0.00648272	2	6	2	0	22	-0.0502782	0	1	2	0
23	-0.00841728	0	3	0	1	23	-0.030055	3	1	2	0
24	0.01684240	1	3	0	1	24	0.0417122	2	2	2	0
25	-0.00102296	3	3	0	1	25	-0.0397722	0	3	2	0
26	-0.03177910	0	3	1	1	26	-0.00350024	0	6	2	0
27	0.01860400	1	0	2	1	27	-0.0106854	3	0	0	1
28	-0.00410798	0	2	2	1	28	0.00110903	3	3	0	1
29	-0.000606848	0	0	0	2	29	-0.000313912	0	6	0	1
30	-0.004981900	1	0	0	2	30	0.0035985	3	0	1	1
31	0.002598300	2	0	0	2	31	-0.00142121	0	6	1	1
32	-0.000560528	3	0	0	2	32	-0.00383637	1	0	2	1
33	-0.001636520	1	2	0	2	33	0.0126803	0	2	2	1
34	-0.000328787	1	6	0	2	34	-0.00318278	2	3	2	1
35	0.000116502	2	6	0	2	35	0.00334268	0	6	2	1
36	0.000690904	0	0	1	2	36	-0.00183491	1	1	0	2
37	0.004217490	0	3	1	2	37	0.000112451	3	2	0	2
38	0.0000565229	3	6	1	2	38	-0.0000297228	3	6	0	2
39	-0.001465640	0	3	2	2	39	0.000269551	1	0	1	2
						40	0.00083265	2	0	1	2
						41	0.00155334	0	2	1	2
						42	0.000302683	0	6	1	2
						43	-0.0001843	0	0	2	2
						44	-0.000425399	0	3	2	2
						45	0.0000869243	3	3	2	2
						46	-0.0004659	0	6	2	2
						47	0.0000554194	1	6	2	2

Fonte: Molland; Turnock; Hudson (2011)

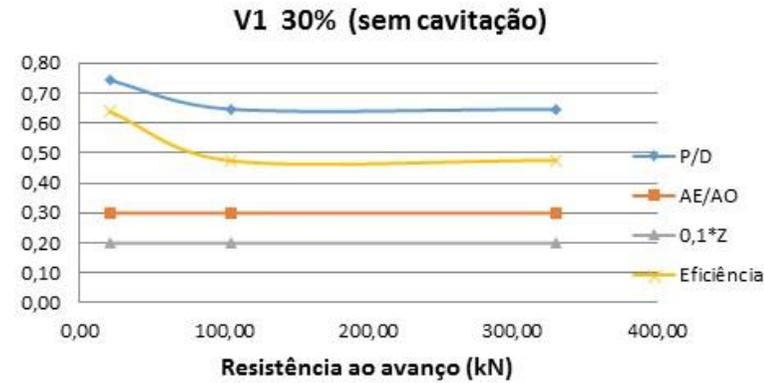
2 APÊNDICE

Apêndice A - Pontos retirados do diagrama de Burril

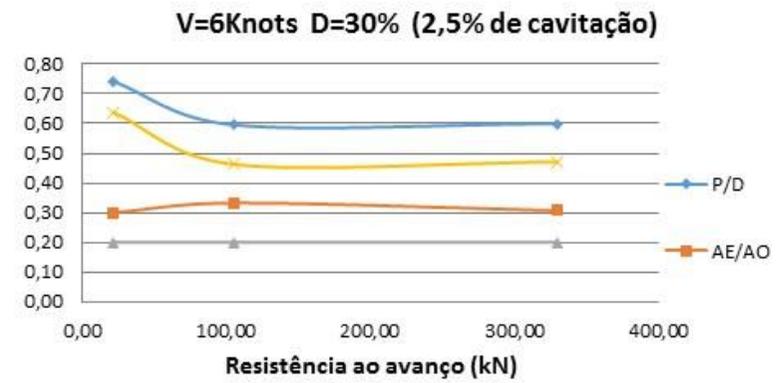
20%		10%		5%		2,5%	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0,115	0,08	0,14	0,076	0,16	0,074	0,189	0,0739
0,12	0,086	0,145	0,08	0,17	0,079	0,199	0,0779
0,125	0,092	0,149	0,084	0,18	0,0858	0,21	0,0819
0,13	0,096	0,16	0,092	0,19	0,089	0,22	0,086
0,14	0,107	0,165	0,096	0,204	0,098	0,24	0,0937
0,151	0,12	0,17	0,1	0,219	0,105	0,25	0,0964
0,172	0,13	0,183	0,11	0,239	0,114	0,27	0,104
0,18	0,14	0,198	0,12	0,26	0,122	0,29	0,111
0,19	0,156	0,209	0,127	0,289	0,132	0,32	0,12
0,199	0,165	0,229	0,14	0,31	0,14	0,35	0,13
0,22	0,18	0,24	0,146	0,339	0,15	0,39	0,14
0,23	0,189	0,26	0,157	0,379	0,161	0,43	0,149
0,245	0,198	0,284	0,17	0,41	0,17	0,46	0,155
0,259	0,21	0,298	0,176	0,449	0,18	0,498	0,163
0,279	0,224	0,329	0,19	0,49	0,19	0,56	0,175
0,289	0,229	0,379	0,21	0,539	0,201	0,6	0,181
0,299	0,235	0,419	0,224	0,58	0,209	0,64	0,188
0,31	0,24	0,47	0,24	0,66	0,222	0,7	0,197
0,34	0,26	0,539	0,26	0,72	0,235	0,78	0,208
0,359	0,27	0,58	0,27	0,79	0,249	0,82	0,214
0,379	0,28	0,66	0,289	0,839	0,253	0,898	0,224
0,41	0,29	0,74	0,303	0,94	0,27	0,998	0,235
0,45	0,31	0,798	0,318	0,98	0,278	1,1	0,249
0,48	0,32	0,86	0,33	1,09	0,29	1,2	0,258
0,5	0,33	0,919	0,34	1,16	0,3	1,29	0,269
0,56	0,35	0,979	0,35	1,29	0,312	1,39	0,279
0,62	0,37	1,09	0,37	1,34	0,32	1,49	0,286
0,68	0,39	1,18	0,382	1,43	0,33	1,51	0,293

Fonte: Autor (2015)

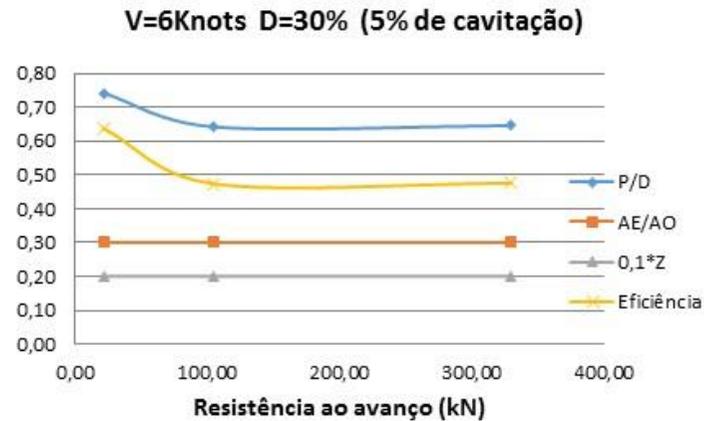
Apêndice B – V1 30% (sem cavitação)



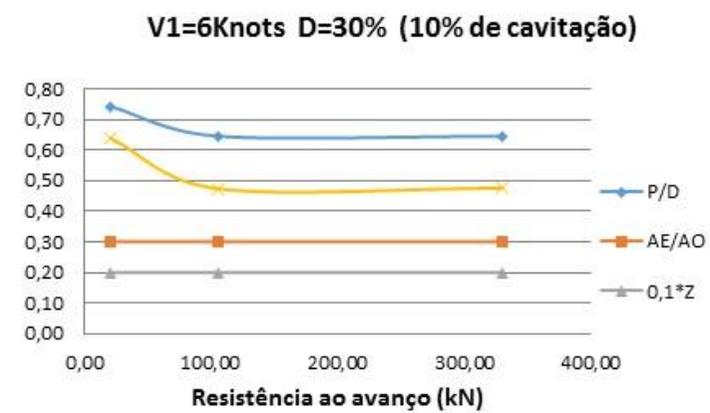
Apêndice C – V=6Knots D=30% (2,5% de cavitação)



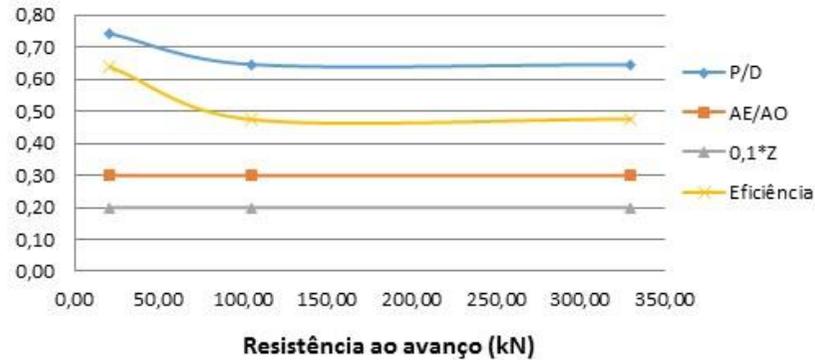
Apêndice D – V=6Knots D=30% (5% de cavitação)



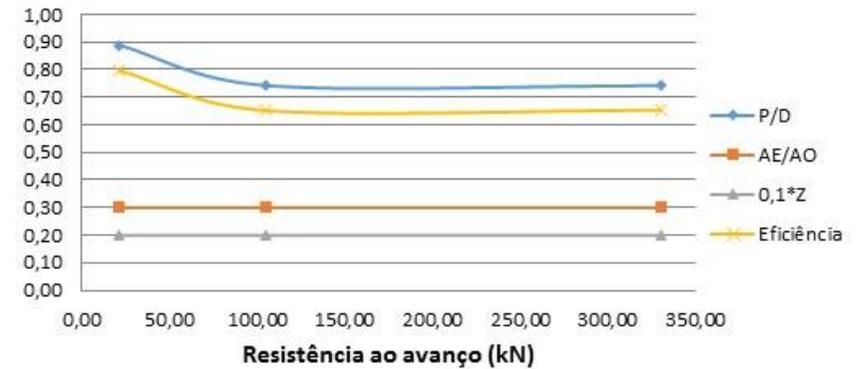
Apêndice E – V=6Knots D=30% (10% de cavitação)



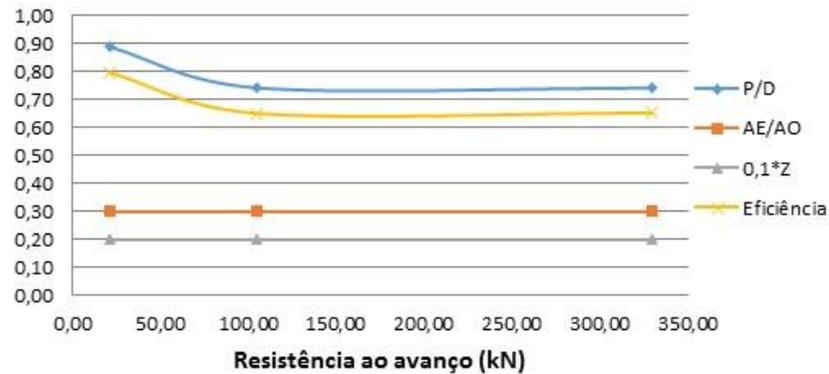
Apêndice F – V=6Knots D=30% (20% de cavitação)

V=6Knots D=30% (20% de cavitação)

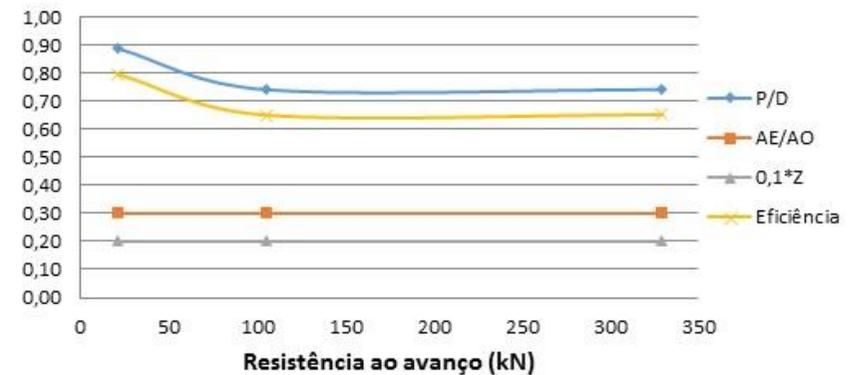
Apêndice G – V=6Knots D=50% (sem cavitação)

V=6Knots D=50% (sem cavitação)

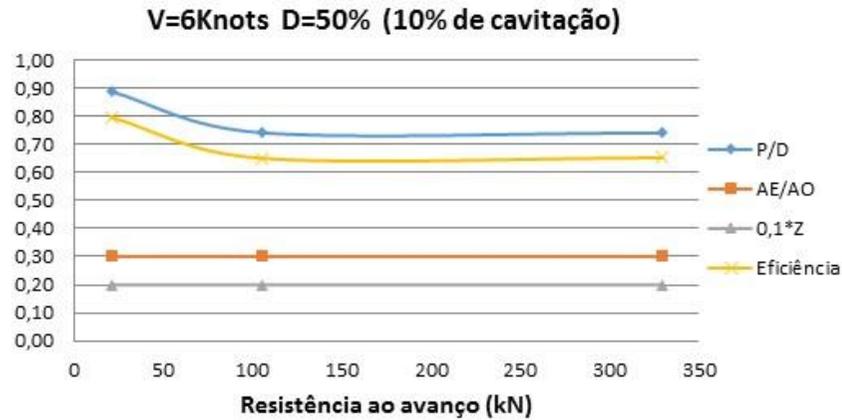
Apêndice H – V=6Knots D=50% (2,5% de cavitação)

V=6Knots D=50% (2,5% de cavitação)

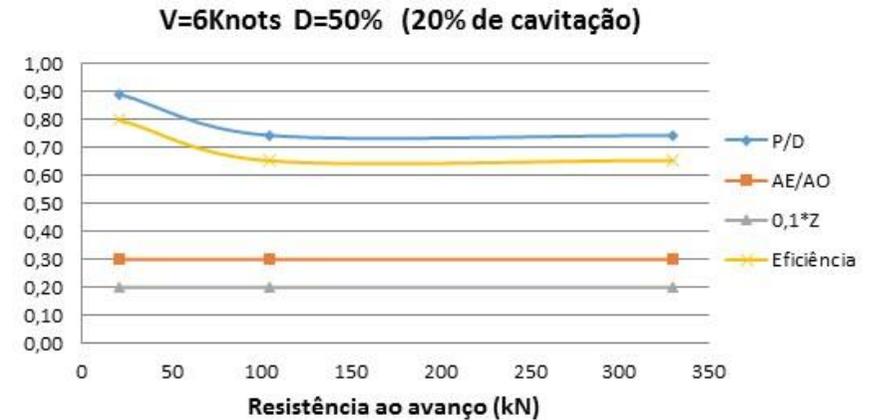
Apêndice I – V=6Knots D=50% (5% de cavitação)

V=6Knots D=50% (5% de cavitação)

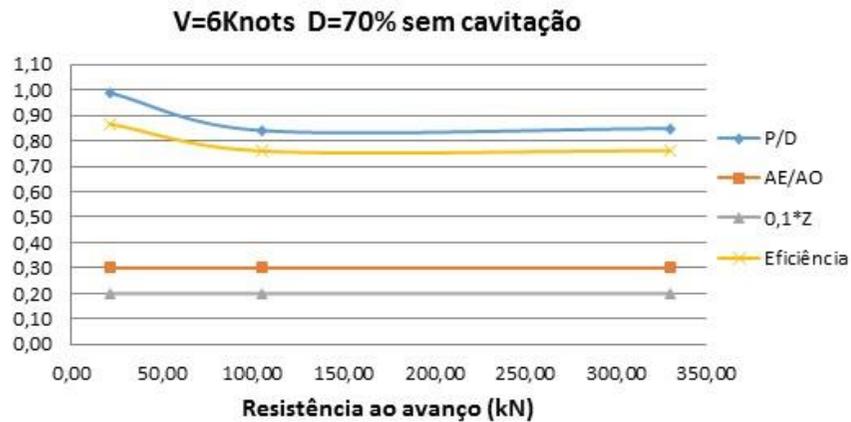
Apêndice J – V=6Knots D=50% (10% cavitação)



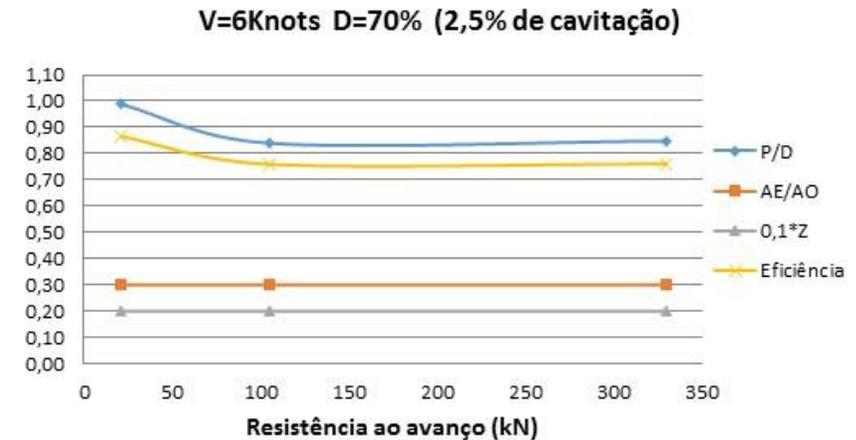
Apêndice L – V=6Knots D=50% (20% cavitação)



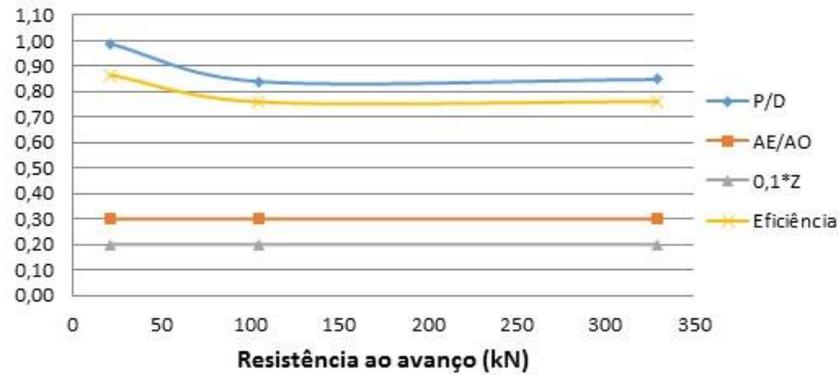
Apêndice M – V=6Knots D=70% sem cavitação



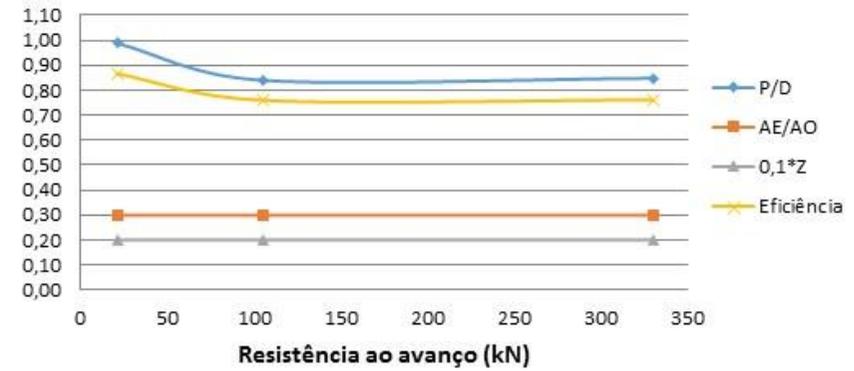
Apêndice N – V=6Knots D=70% (2,5% de cavitação)



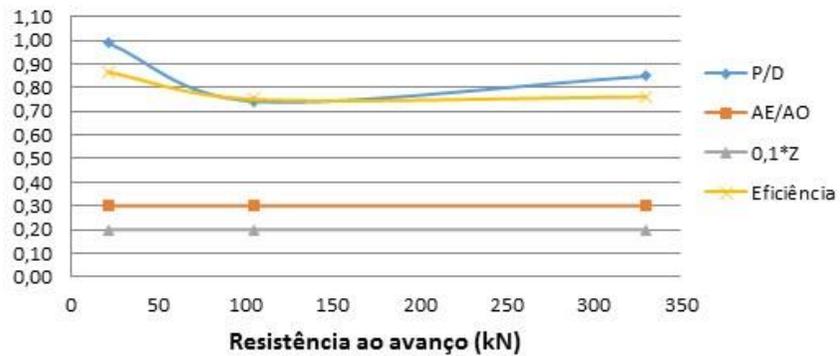
Apêndice O – V=6Knots D=70% (5% de cavitação)

V=6Knots D=70% (5% de cavitação)

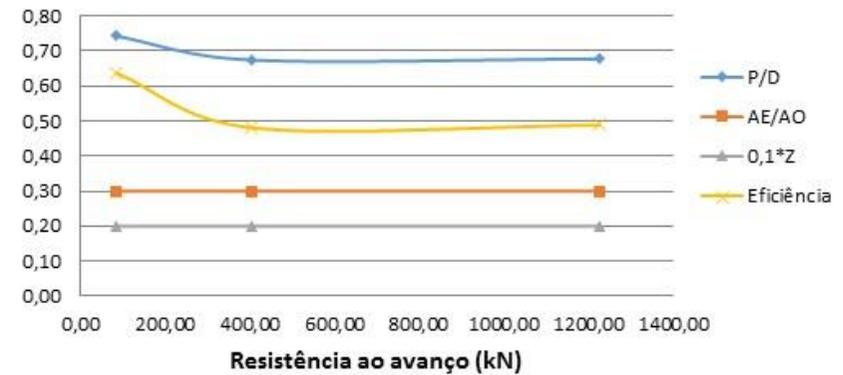
Apêndice P – V=6Knots D=70% (10% de cavitação)

V=6Knots D=70% (10% de cavitação)

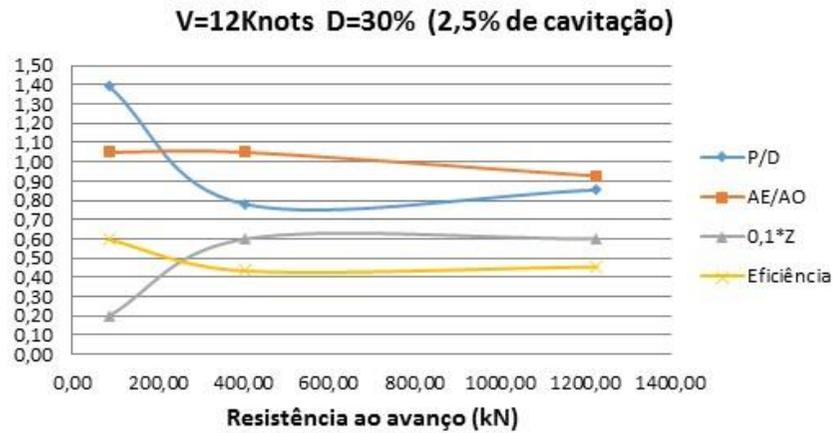
Apêndice Q – V=6Knots D=70% (20% de cavitação)

V=6Knots D=70% (20% de cavitação)

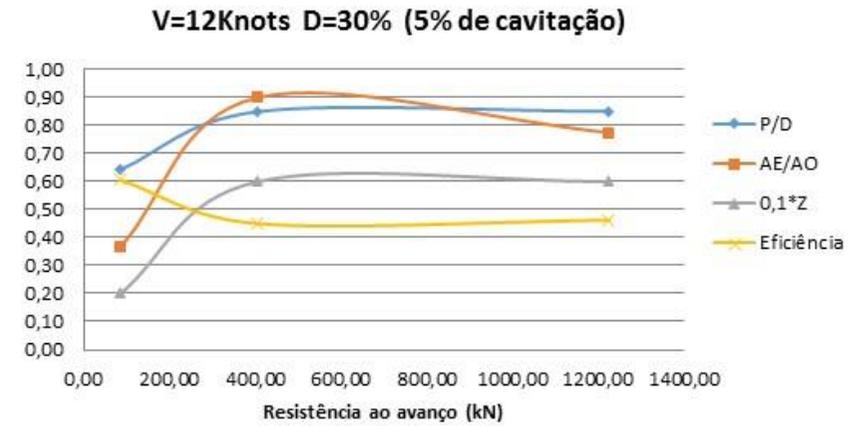
Apêndice R – V=6Knots D=30% (sem cavitação)

V=12Knots D=30% (sem cavitação)

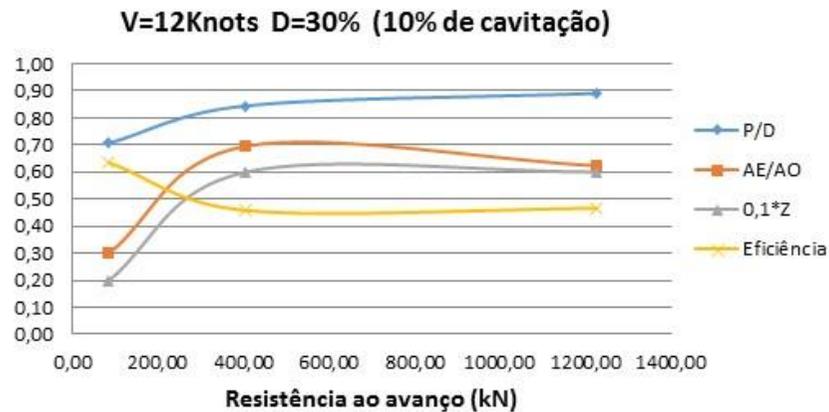
Apêndice S – V=12Knots D=30% (2,5% de cavitação)



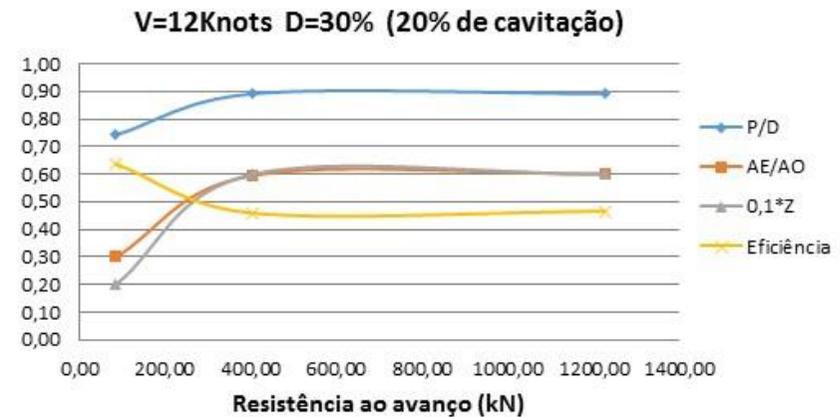
Apêndice T – V=12Knots D=30% (2,5% de cavitação)



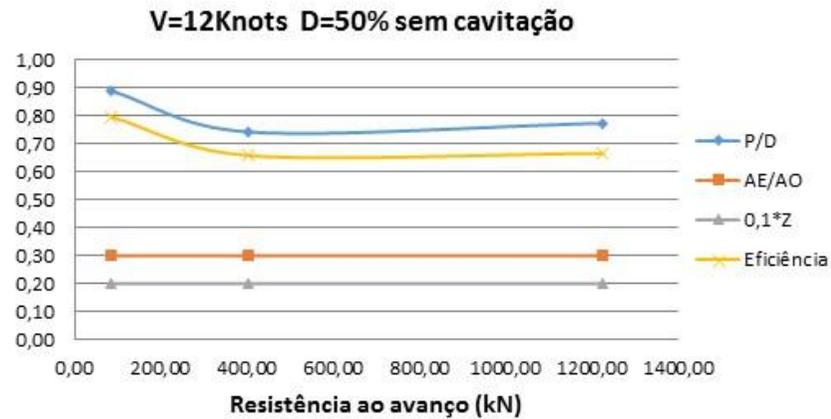
Apêndice U – V=12Knots D=30% (10% de cavitação)



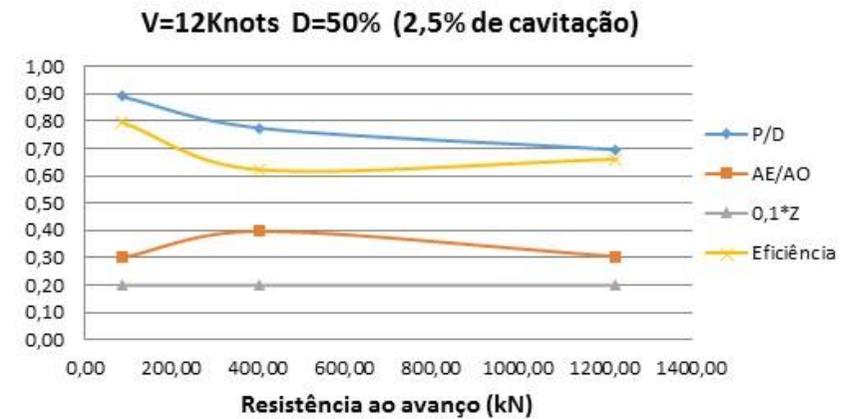
Apêndice V – V=12Knots D=30% (20% de cavitação)



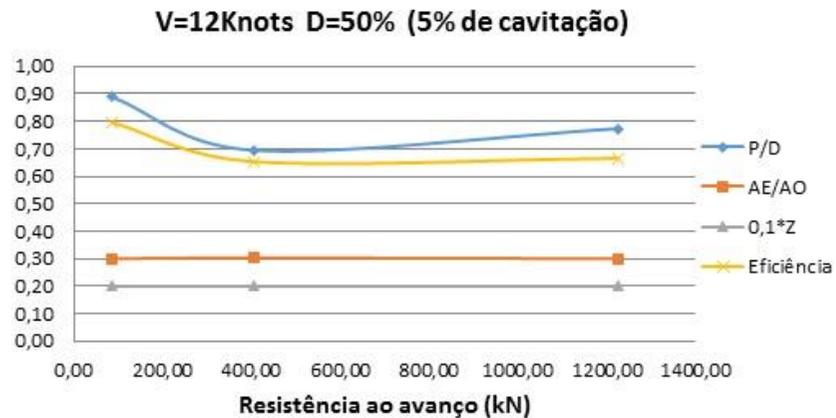
Apêndice X – V=12Knots D=50% (sem cavitação)



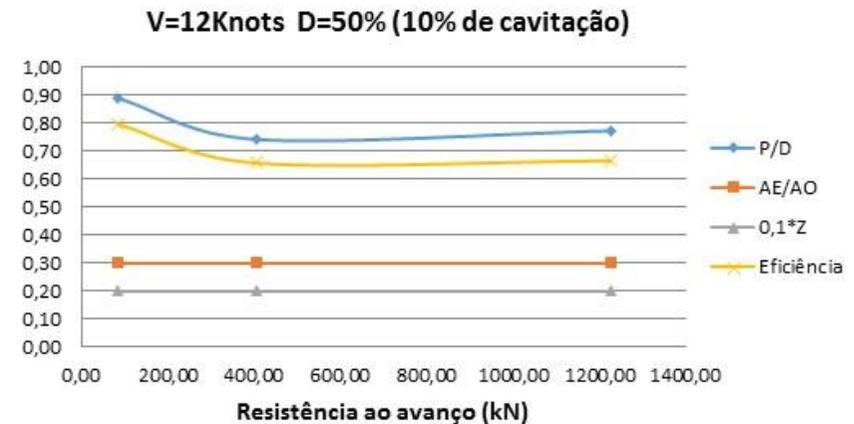
Apêndice W – V=12Knots D=50% (sem cavitação)



Apêndice Y – V=12Knots D=50% (5% cavitação)

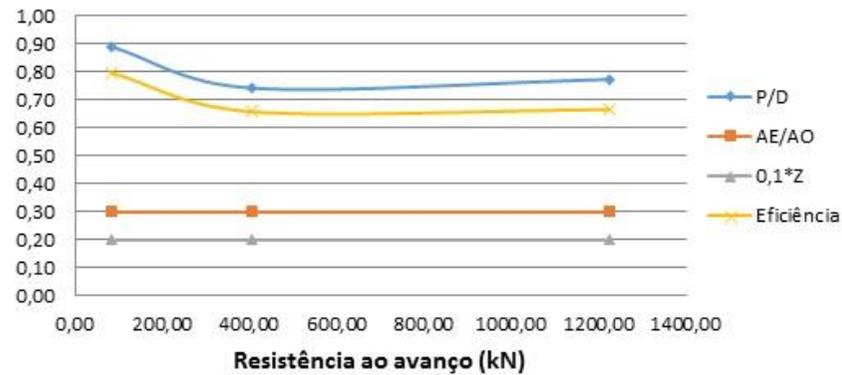


Apêndice Z – V=12Knots D=50% (10% cavitação)



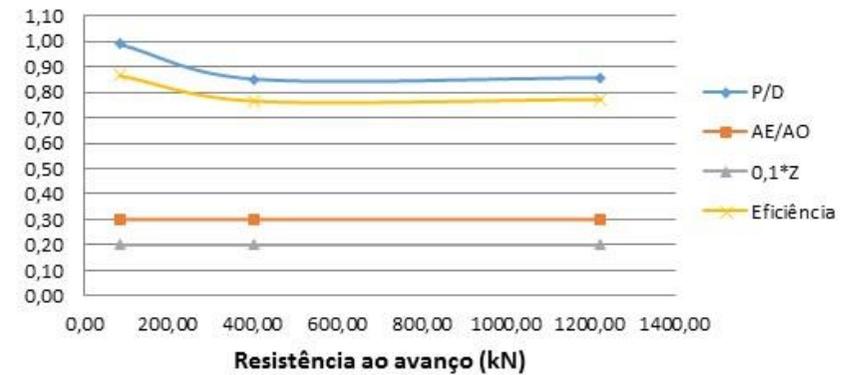
Apêndice AA – V=12Knots D=50% (20% cavitação)

V=12Knots D=50% (20% de cavitação)



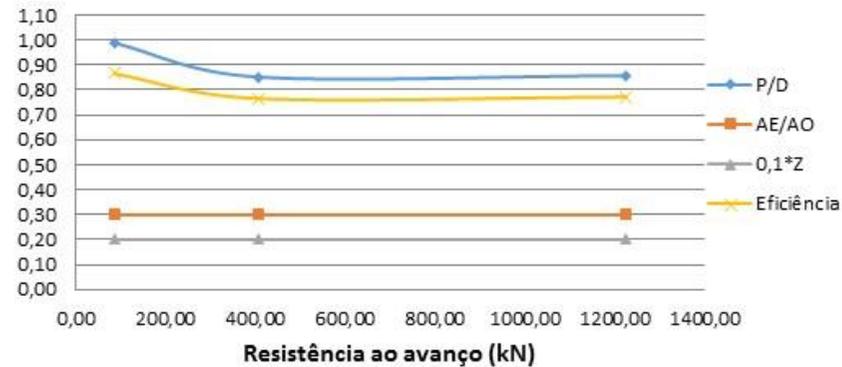
Apêndice AB – V=12Knots D=70% (sem cavitação)

V=12Knots D=70% sem cavitação



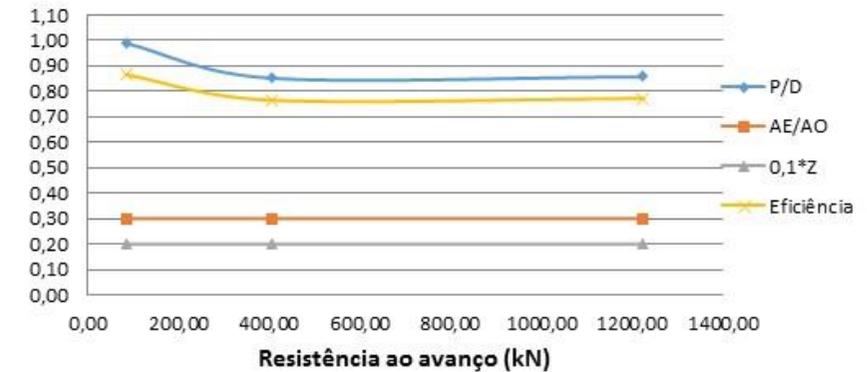
Apêndice AC – V=12Knots D=70% (2,5% cavitação)

V=12Knots D=70% (2,5% de cavitação)



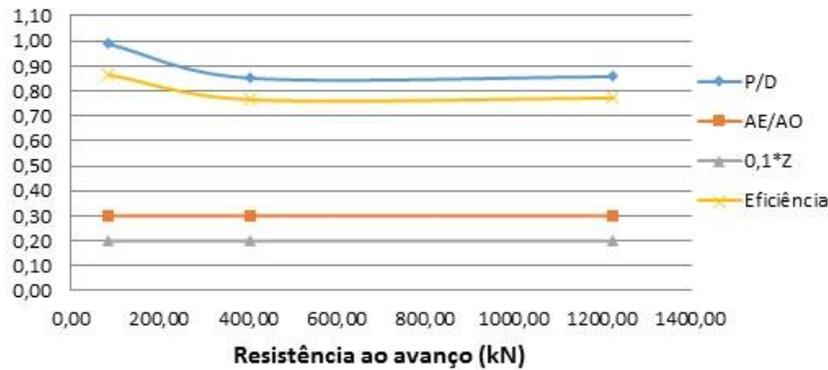
Apêndice AD – V=12Knots D=70% (5% cavitação)

V=12Knots D=70% (5% de cavitação)



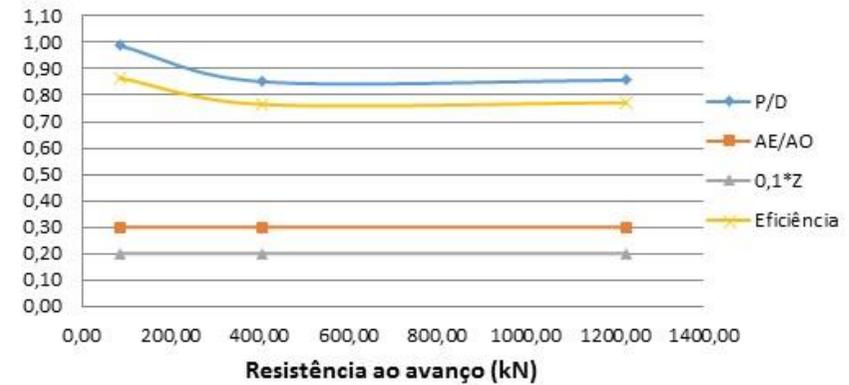
Apêndice AE – V=12Knots D=70% (10% cavitação)

V=12Knots D=70% (10% de cavitação)



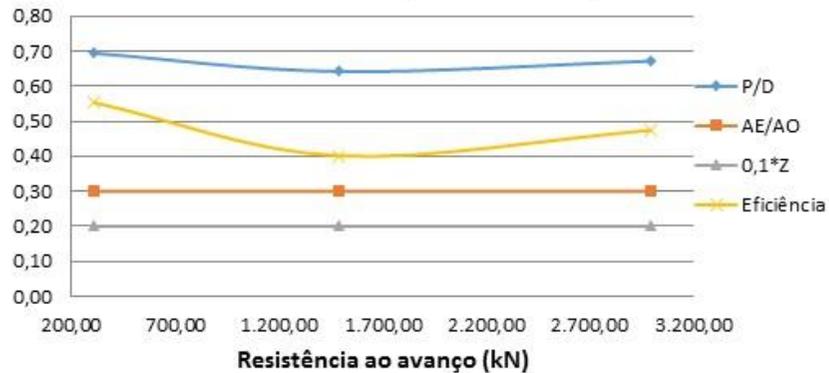
Apêndice AF – V=12Knots D=70% (20% cavitação)

V=12Knots D=70% (20% de cavitação)



Apêndice AG – V=18Knots D=30% (sem cavitação)

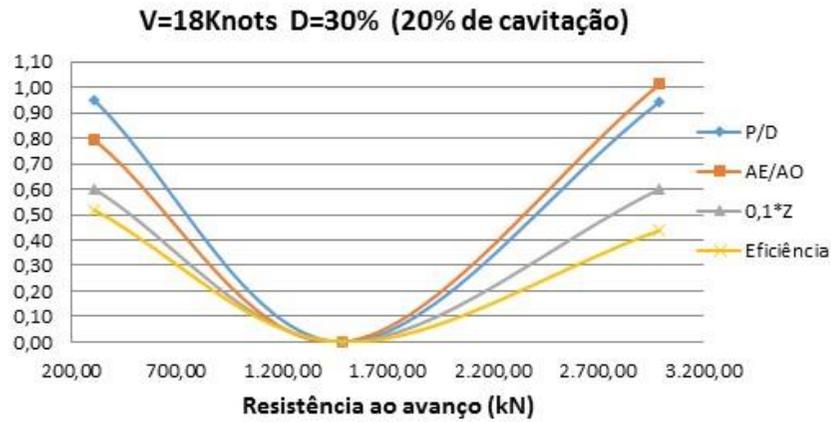
V=18Knots D=30% (sem cavitação)



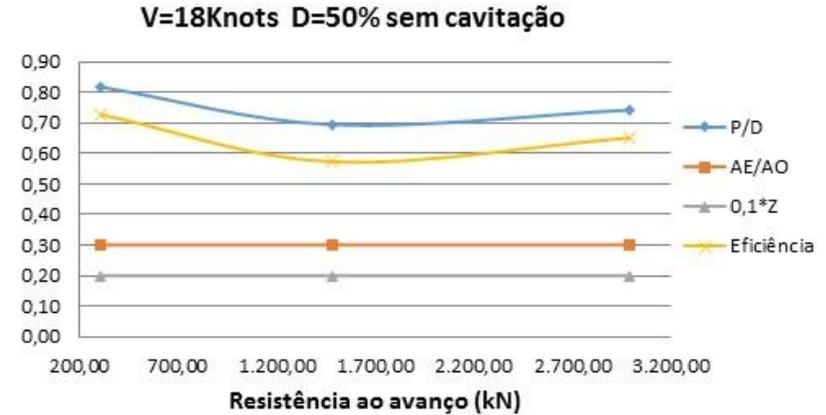
Apêndice AH – V=18Knots D=30% (10,5% E 2,5 % de cavitação)

V=18Knots D=30%
(10,5 e 2,5% de cavitação)

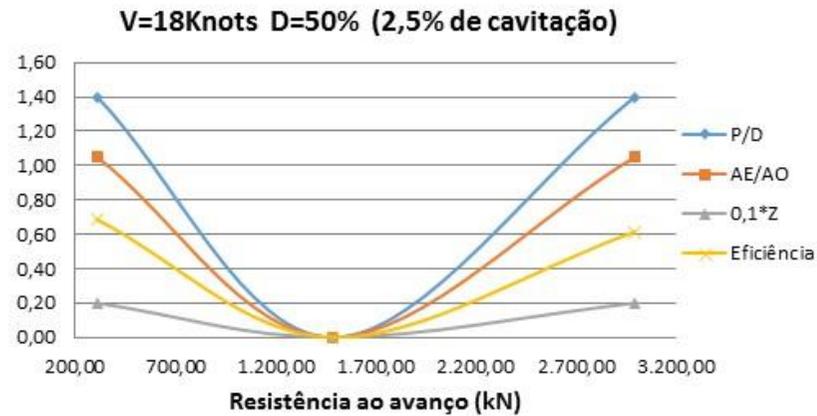
Apêndice AI – V=18Knots D=30% (20% de cavitação)



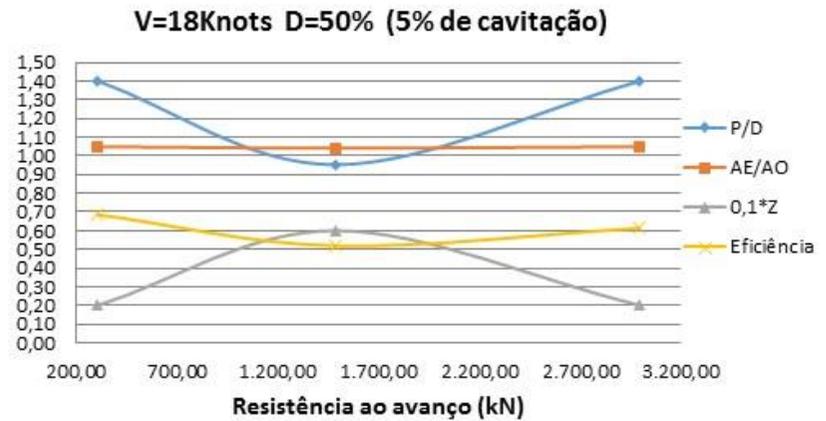
Apêndice AJ – V=18Knots D=50% (sem cavitação)



Apêndice AJ – V=18Knots D=50% (2,5% cavitação)

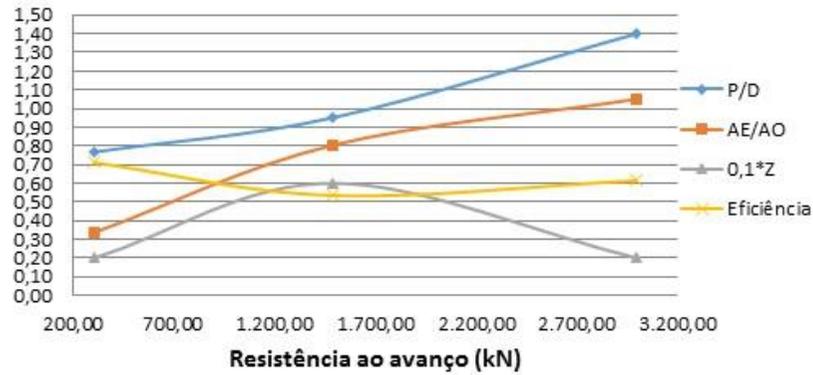


Apêndice AK – V=18Knots D=50% (5% cavitação)



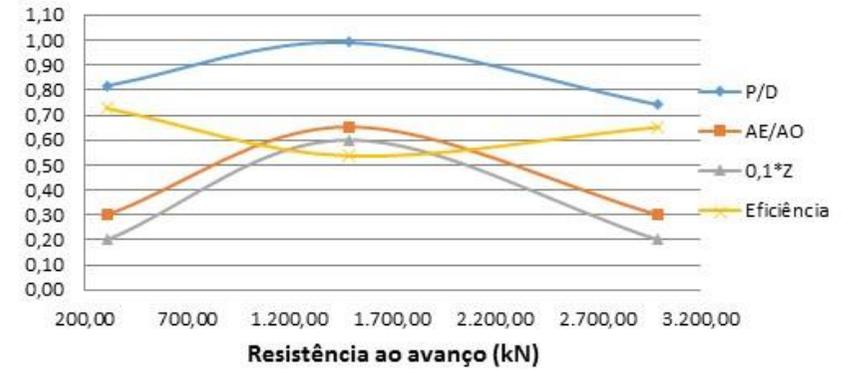
Apêndice AL – V=18Knots D=50% (10% cavitação)

V=18Knots D=50% (10% de cavitação)



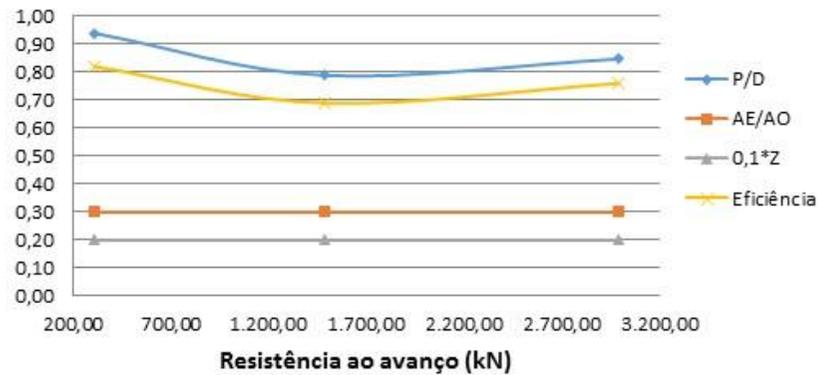
Apêndice AM – V=18Knots D=50% (20% cavitação)

V=18Knots D=50% (20% de cavitação)



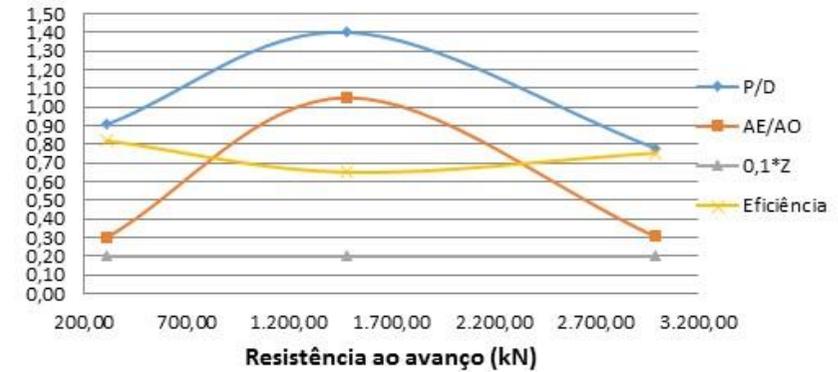
Apêndice AN – V=18Knots D=70% (sem cavitação)

V=18Knots D=70% sem cavitação



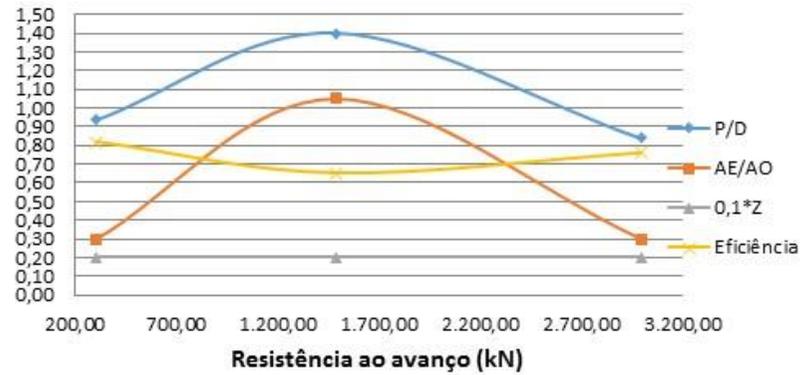
Apêndice AO – V=18Knots D=70% (2,5% de cavitação)

V=18Knots D=70% (2,5% de cavitação)



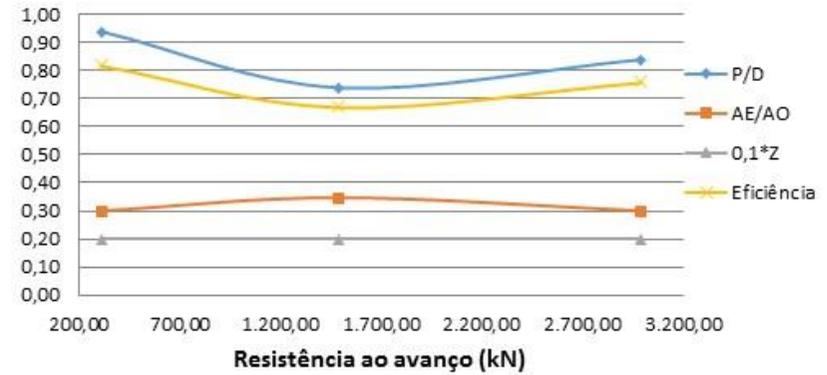
Apêndice AP- V=18Knots D=70% (5% de cavitação)

V=18Knots D=70% (5% de cavitação)



Apêndice AQ- V=18Knots D=70% (10% de cavitação)

V=18Knots D=70% (10% de cavitação)



Apêndice AR- V=18Knots D=70% (20% de cavitação)

V=18Knots D=70% (20% de cavitação)

