

**MARINHA DO BRASIL**  
**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA**  
**ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE**

**JEAN CASEMIRO FERREIRA SILVA FILHO**

**ESTEIRA E VIBRAÇÃO: efeitos na navegação**

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**JEAN CASEMIRO FERREIRA SILVA FILHO**

**ESTEIRA E VIBRAÇÃO: efeitos na navegação**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Nautica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador (a): Mestre Hermann Regazzi Gerk

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**JEAN CASEMIRO FERREIRA SILVA FILHO**

**ESTEIRA E VIBRAÇÃO: efeitos na navegação**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Orientador: Mestre Hermann Regazzi Gerck

---

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: \_\_\_\_\_

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho ao meu professor e orientador Mestre Hermann Regazzi Gerk que foi indispensável no fornecimento de material e na ajuda na confecção do trabalho. Dedico também a Deus que sabe de todas as coisas e foi meu guia e minha luz para a realização e entendimento do conteúdo apresentado. Não posso me esquecer de dedicar a todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte ou me ajudaram mesmo que seja no apoio psicológico e apoio nas pesquisas e formatação do trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, a Deus pela oportunidade de realizar meu sonho que é ser formado na Efomm. Agradeço aos meus amados pais, Jean Casemiro e Ana Cristina, pelo apoio, incentivo e pela total dedicação a mim e aos meus estudos. A minha madrinha, pelo constante apoio. Ao meu irmão Yan Casemiro pela admiração e companheirismo. A minha irmã Juliana Casemiro pelos momentos de amizade e alegria. Aos meus avós paternos Cátia Ferreira e Casemiro Silva pelo incentivo aos meus estudos e suporte nos momentos de dificuldade. Aos meus avós maternos José Paulo e Elisabeth Rosa pelo carinho. A todos pela presença nos momentos de comemoração como formaturas. A toda a minha família pelas orações e amor, agradeço as pessoas que, de alguma forma, me ajudaram a chegar até aqui. Aos meus amigos, pelos bons momentos, obrigado a todos pelos três anos que passamos juntos.

## EPÍGRAFE

Devia ter amado mais  
Ter chorado mais  
Ter visto o sol nascer  
Devia ter arriscado mais e até errado mais  
Ter feito o que eu queria fazer  
Queria ter aceitado as pessoas como elas são  
Cada um sabe a alegria e a dor que traz no  
coração

O acaso vai me proteger  
Enquanto eu andar distraído  
O acaso vai me proteger  
Enquanto eu andar...

Devia ter complicado menos, trabalhado menos  
Ter visto o sol se pôr  
Devia ter me importado menos com problemas  
pequenos  
Ter morrido de amor  
Queria ter aceitado a vida como ela é  
A cada um cabe alegrias e a tristeza que vier

O acaso vai me proteger  
Enquanto eu andar distraído  
O acaso vai me proteger  
Enquanto eu andar

## RESUMO

Esse trabalho teve por finalidade estudar, explicar e aprofundar assuntos como o fenômeno da esteira, vibração e cavitação, revelando as causas e os principais efeitos na navegação mostrando também as particularidades dos problemas que esses fenômenos acarretam, além disso, foram mostrados dispositivos localizados pré-hélice (Duto Schneekluth, Popa Assimétrica, Aletas Grothues, Duto Parcial de Popa, Estatores, Duto Becker's Mewis e Duto Mitsui), pós-hélice (Aleta de Impulso no Cadaste, Boss Cap, Bulbo Costa, Leme Assimétrico) e no hélice (Propulsor kappel e End Plates) que fornecem auxílios para a minimização dos efeitos desses fenômenos e incrementam a eficiência energética, a potência efetiva aplicada no navio e o rendimento relacionando ao trabalho desempenhado, favorecendo a uma maior vida útil do maquinário.

Mostrarei também, de forma mais específica os tipos de cavitação mostrando quais são as mais prejudiciais com relação a corrosão do hélice. Além disso, será explicado o fenômeno da ressonância que é decorrente da vibração das estruturas do navio, será abordada também a interação casco-propulsor e o escoamento turbulento para explicar a formação da camada limite.

## ABSTRACT

This work was to study, explain and deepen subjects as the phenomenon of treadmill, vibration and cavitation, revealing the causes and their effects on navigation also showing the peculiarities of the problems that cause these phenomena, in addition, pre-located devices were shown helix (Duct Schneekluth, Asymmetric bow, Fins Grothues, Partial Bow, Stators, Duct Becker's Mewis and Mitsui Duct), Post-helix (fin Thrust in Cadaste, Boss Cap Bulb Costa Helm Asymmetric) and Propeller diviceses (thruster kappel and End Plates) that provide aid to minimize the effects of these phenomena and increase energy efficiency, the effective power applied on the ship and the rendering relating to the work performed, favoring a longer service life of machinery.

Also show, more specifically the types of cavitation showing which are the most harmful with respect to corrosion of the propeller. In addition, we will explain the phenomenon of resonance that is descorrente vibration of structures of the ship, will also be addressed to the hull-propeller interaction and turbulent flow to explain the formation of the boundary layer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Tipos de cavitação                                      | 15 |
| Figura 2 – Hélice que sofreu com os efeitos da cavitação           | 16 |
| Figura 3 – Navio equipado com duto Schneekluth                     | 19 |
| Figura 4 – Desenho do formato da popa assimétrica do navio         | 20 |
| Figura 5 – Navio equipado com Aletas Grothues                      | 20 |
| Figura 6 – Navio equipado com duto parcial de popa (ilustração)    | 21 |
| Figura 7 – Navio equipado com estator na popa                      | 22 |
| Figura 8 – Navio equipado com Duto Becker's Mewis                  | 22 |
| Figura 9 – Navio equipado com Duto Mitsui                          | 23 |
| Figura 10 – Navio equipado com Aleta de Impulso no Cadaste         | 24 |
| Figura 11 – Desenho ilustrativo de propulsor equipado com Boss Cap | 24 |
| Figura 12 – Navio equipado com Bulbo Costa                         | 25 |
| Figura 13 – Navio equipado com leme assimétrico                    | 26 |
| Figura 14 – Propulsor Kappel                                       | 26 |
| Figura 15 – Propulsor equipado com end plates                      | 27 |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>                            | <b>10</b> |
| <b>1.1</b>   | <b>PARTICULARIDADES DO PROBLEMA</b>          | <b>11</b> |
| <b>1.2</b>   | <b>OBJETIVO E ESCOPO DO TRABALHO</b>         | <b>12</b> |
| <br>         |  |           |
| <b>2</b>     | <b>INTERAÇÃO CASCO-PROPULSOR E A ÁGUA</b>    | <b>13</b> |
| <b>2.1</b>   | <b>EFEITO DA ESTEIRA</b>                     | <b>13</b> |
| <b>2.2</b>   | <b>CAVITAÇÃO</b>                             | <b>14</b> |
| <b>2.3</b>   | <b>FÍSICA DO FENÔMENO</b>                    | <b>14</b> |
| <b>2.4</b>   | <b>TIPOS DE CAVITAÇÃO</b>                    | <b>15</b> |
| <b>2.5</b>   | <b>EFEITOS DA CAVITAÇÃO NA NAVEGAÇÃO</b>     | <b>16</b> |
| <br>         |  |           |
| <b>3</b>     | <b>VIBRAÇÃO</b>                              | <b>17</b> |
| <b>3.1</b>   | <b>RESSONÂNCIA CAUSADA PELA VIBRAÇÃO</b>     | <b>17</b> |
| <b>3.2</b>   | <b>PROBLEMAS RESULTANTES DA VIBRAÇÃO</b>     |           |
| <br>         |  |           |
| <b>4</b>     | <b>DISPOSITIVOS EQUALIZADORES DE ESTEIRA</b> | <b>19</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>DISPOSITIVOS PRÉ-HÉLICE</b>               | <b>19</b> |
| <b>4.1.1</b> | <b>Duto Schneekluth</b>                      | <b>19</b> |
| <b>4.1.2</b> | <b>Popa Assimétrica</b>                      | <b>20</b> |
| <b>4.1.3</b> | <b>Aletas Grothues</b>                       | <b>20</b> |
| <b>4.1.4</b> | <b>Duto Parcial de Popa</b>                  | <b>21</b> |
| <b>4.1.5</b> | <b>Estatores</b>                             | <b>22</b> |
| <b>4.1.6</b> | <b>Duto Becker's Mewis</b>                   | <b>22</b> |
| <b>4.1.7</b> | <b>Duto Mitsui</b>                           | <b>23</b> |
| <br>         |  |           |
| <b>4.2</b>   | <b>DISPOSITIVOS PÓS-HÉLICE</b>               | <b>23</b> |
| <b>4.2.1</b> | <b>Aleta de Impulso no Cadaste</b>           | <b>23</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Boss Cap</b>                              | <b>24</b> |
| <b>4.2.3</b> | <b>Bulbo Costa</b>                           | <b>25</b> |
| <b>4.2.4</b> | <b>Leme assimétrico</b>                      | <b>26</b> |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>4.3</b>   | <b>DISPOSITIVOS LOCALIZADOS NO HÉLICE</b> | <b>26</b> |
| <b>4.3.1</b> | <b>Propulsor Kappel</b>                   | <b>26</b> |
| <b>4.3.2</b> | <b>Propulsor End-Plates</b>               | <b>27</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÕES</b>                         | <b>28</b> |
| <b>6</b>     | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>         | <b>29</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O transporte pelo mar é de suma importância no comércio exterior, visto que, no Brasil 90% em valor das mercadorias é exportado ou importado pelo mar. E como no sistema capitalista o lucro é sempre o alvo das relações comerciais, existe a exigência que o transporte marítimo seja um modal cada vez mais rentável, econômico, rápido e durável podendo assim ser utilizado em inúmeras viagens maximizando os lucros. Alguns efeitos existentes como a ressonância oriunda das vibrações no casco ou mesmo no motor de combustão principal podem afetar a vida útil do navio causando prejuízo para o armador.

Segundo Mewis Khung (2004) a capacidade dos contêineiros cresce a uma razão anual de 170 TEU/ano e a previsão é que antes de 2015 já haverá embarcações para 12000 TEU (Twenty Feet Equivalent Unit). Atualmente, o maior modelo de navio contêineiro pertence a empresa Maersk que surpreendentemente já possui a capacidade de 18340 TEU ultrapassando a previsão do livro. Esses dados evidenciam a grandiosidade e o crescimento da marinha mercante mundial e a necessidade de se investir em pesquisas que amenizem os efeitos da cavitação, da esteira e da vibração.

A Hidrodinâmica busca soluções científicas para esses problemas, por exemplo, os efeitos da esteira do navio sobre o desempenho no propulsor, esses efeitos são bem conhecidos qualitativamente mas há grande dificuldade em estima-los, apelando-se normalmente para ensaios experimentais, ou seja, a performance de um casco é feita de modo empírico, por tanto, buscam-se cascos consagrados por sua boa performance. Esses dados são necessários para lidar com a influência da esteira pois esse fenômeno não pode ser extinto, visto que é resultante do deslocamento de um corpo pela massa líquida. Entretanto pode ser diminuído como veremos no decorrer do trabalho.

A cavitação é um problema que tem recebido certa atenção pois é um dos principais responsáveis por gerar vibração. Esse fenômeno tem seu estudo particularmente difícil de ser conduzido pois mesmo usando relações de escala entre o modelo e o protótipo, as condições de rugosidade superficial sobre as pás, a concentração de agentes nucleares, turbulência do escoamento livre e efeito da esteira (como desprendimento de vórtices) não são similares.

Com relação a vibração nos navios, as frequências naturais do casco podem ser calculadas com precisão razoável através de programas de computador, que têm sido desenvolvidos para se obter uma análise compreensível das respostas e das forças e tensões associadas. As vibrações podem ser relacionadas com o fenômeno da cavitação e pode gerar ressonância que afeta tanto a vida da tripulação com noites mal dormidas como a vida útil do navio propriamente dito.

## 1.1 PARTICULARIDADES DO PROBLEMA

A vibração no navio é um fenômeno que existe desde quando esse meio de transporte sai do estaleiro e vai se agravando conforme vão ocorrendo outros fenômenos como a cavitação ou mesmo um choque físico do propulsor em algum objeto rígido. É uma matéria de grande importância para o navegante ter conhecimento pois a sua presença pode gerar desconforto principalmente se for associada com a ressonância, esse fenômeno dinâmico, também gera fadiga nos materiais que compõe a estrutura da embarcação ou mesmo o colapso estrutural (especialmente nos casos de ressonância) e deste modo afetar significativamente a sua operacionalidade.

Uma embarcação é um produto muito especial, geralmente de alto custo de construção e altos custos operacionais, que será utilizado por um longo período de tempo 25 anos ou mais, dependendo do tipo de embarcação. A tendência atual é que haja uma pressão cada vez forte, vinda sociedade e da comunidade internacional para que as embarcações, já existentes ou novas, tenham uma maior eficiência operacional, com redução de consumo de combustíveis e, conseqüentemente, com redução de emissão de gases poluentes. O aumento da eficiência de um navio pode ser obtido pela melhoria do projeto do casco com a equalização da esteira e conseqüente diminuição do arrasto causado. por melhorias nos sistemas de propulsão e pela melhoria no processo de manutenção. Assim, a eficiência operacional será maximizada pela minimização dos custos diretos e indiretos, o que implica em reduzir o consumo de combustível, em diminuir a poluição ambiental, mas sempre mantendo a confiabilidade alta dos sistemas (custos reduzidos de manutenção). Portanto, devem ser sempre procurados os projetos mais adequados (otimizados) de cascos e de propulsores de embarcações.

A falta de conhecimento técnico das vantagens e desvantagens das diferentes opções de formas de cascos ou das diversas opções de sistemas propulsores. Pode fazer com que as melhorias hidrodinâmicas atuais não sejam aplicadas pelos armadores. Projetar, construir e operar embarcações com esta visão de conservadorismo técnico pode significar conviver com ineficiências por toda a longa vida da embarcação. Se uma embarcação pode ser mais eficiente 5% a 10% do que seria se não fosse otimizada, em 25 anos ocorreriam ganhos operacionais significativos, tanto financeiros como ambientais.

Uma das conseqüências da cavitação pode ser observada nos hélices dos navios: quando estes estão submetidas à cavitação constante pode ocorrer aumento da vibração ocasionada no eixo do motor de combustão principal e falha mecânica devido ao desgaste por erosão das superfícies sólidas, ou seja, há perda considerável de massa da superfície que afeta o desempenho podendo levar o equipamento à falha mecânica. Esta degradação mecânica das superfícies metálicas provocada pela cavitação é chamada de erosão por cavitação (Koivula, 2000).

## 1.2 OBJETIVO E ESCOPO DO TRABALHO

Esse trabalho tem por objetivo explicar os fenômenos da cavitação, vibração, ressonância bem como mostrar os problemas da esteira assimétrica na navegação. Mostrar também dispositivos que amenizem os efeitos desses fenômenos.

No capítulo 2 será abordado com maiores detalhes o fenômeno da cavitação, explicando o fenômeno propriamente dito, os efeitos erosivos que podem ocorrer no interior de máquinas e outros dispositivos como disco rotativos e o que pode ser feito para minimizar esses efeitos. Também será abordado os efeitos da esteira na navegação e a interação casco-propulsor.

No capítulo 3 será abordado com maiores detalhes o fenômeno da vibração e o fenômeno da ressonância, além disso, serão mostrado também os efeitos que a vibração e a ressonância causam na navegação.

No capítulo 4 buscarei mostrar os dispositivos hidrodinâmicos que buscam minimizar os prejuízos causados por esses efeitos. É recomendado lembrar que esses efeitos não podem ser extintos, porém, a busca pela eficiência das embarcações é enorme fazendo com que sejam criado cada vez mais mecanismos que priorizem a eficiência energética. E no capítulo 5 será feita um breve conclusão.

## 2 INTERAÇÃO CASCO-PROPULSOR E A ÁGUA

A interação casco propulsor e a água é exercida pela camada limite. Em mecânica dos fluidos, a camada limite é a camada de fluido nas imediações de uma superfície delimitadora, fazendo-se sentir os efeitos difusivos e a dissipação da energia mecânica. O conceito foi introduzido no início do século XX, por Ludwig Prandtl para descrever a região de contacto entre um fluido incompressível em movimento relativamente a um sólido, ou seja casco-propulsor.

Quando um objeto move-se através de um fluido, ou um fluido move-se em redor de um objeto, o movimento das moléculas do líquido perto do objeto é perturbado, e estas moléculas movem-se em redor do objecto, gerando forças aerodinâmicas. A magnitude dessas forças depende da forma e velocidade do objeto, assim como da massa, viscosidade e compressibilidade do fluido. Para modelizar correctamente os efeitos, recorre-se a parâmetros adimensionais que relacionam as diferentes componentes envolvidas, como o coeficiente de Reynolds.

### 2.1 FORMAÇÃO DA ESTEIRA

O fluido é desacelerado devido aos efeitos viscosos. Se o gradiente de pressão é nulo,  $\frac{\partial p}{\partial x}=0$ , não há influência no escoamento. Na região em que o gradiente é favorável  $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$ , este ajuda o escoamento. Porém se o gradiente de pressão é adverso  $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$ , este atua contra o escoamento. Neste caso, a tensão na parede pode ser reduzida até atingir o valor zero. Este ponto é chamado de ponto de separação, a partir deste ponto, a teoria da camada limite não pode mais ser utilizada. Ocorre a formação da esteira e aparecem vórtices.

Em projetos de alto desempenho, muita atenção é dada para controlar-se o comportamento da camada limite para minimizar o arrasto. Dois efeitos têm de ser considerados. Em primeiro lugar, a camada limite aumenta a espessura efetiva do corpo, através da espessura de deslocamento, aumentando assim a pressão de arrasto. Em segundo lugar, as forças de cisalhamento na superfície da asa criam arrasto de fricção na superfície. Com o aumento do arrasto cresce o consumo de combustível de maneira proporcional, por isso existem estudos para diminuir a espessura de deslocamento.

## 2.2 CAVITAÇÃO

Uma outra fonte de perda de eficiência da propulsão é devido, em parte à forma da esteira, é a cavitação, que pode ocorrer sobre as pás, ou sobre partes do casco (especialmente no leme e propulsor).

Um líquido a uma temperatura constante, pode ser submetido a uma redução de pressão, por exemplo, a passagem das pás cortando a água até um ponto em que ela se torna menor que a pressão de vapor saturado. Quando isso ocorre, uma parte do líquido muda de fase, passando ao estado gasoso. Ao processo de vaporizar um líquido a uma temperatura constante, pelo decréscimo de pressão, chama-se cavitação.

A cavitação pode ocorrer, sobre perfis ou corpos rombudos, quando há um fluido escoando sobre eles. Ao longo do corpo, ocorre uma redução da pressão local devido à velocidade local do escoamento. Se em uma dessas regiões, a pressão se reduzir a um valor inferior a de vapor saturado, parte do fluido se vaporiza.

Esse fenômeno é muito comum e prejudicial aos sistemas de propulsão, e por isso merece ser abordado em um pouco mais de detalhes. Existe a dificuldade de se prever o fenômeno de modo analítico, portanto ocorre o estudo de modos experimentais, buscando a minimização desses efeitos a níveis não prejudiciais.

## 2.3 FÍSICA DO FENÔMENO

A cavitação pode ser explicada por alguns aspectos teóricos como, por exemplo, os efeitos termodinâmicos, efeitos da viscosidade, efeitos da forma não esférica, do tamanho inicial do nucleante, implosão, interação com a camada limite entre outros aspectos.

Partindo do caso de nucleação homogênea, as bolhas se originam a partir de pequenas cavidades imersas no fluido e crescem, quando a pressão do líquido é reduzida a um valor menor que um valor crítico. Esta pressão crítica pode ser obtida levando-se em conta a tensão superficial do líquido.

No caso dos propulsores, normalmente, ocorre nucleação heterogênea, pois há uma superfície sólida, energia cinética que varia ao longo da superfície e mudanças localizadas de pressão. O fenômeno da cavitação foi estudado primeiramente por Reynolds observando o comportamento de propulsores operando em alta rotação.

Suas causas são irregularidades na aresta ou bordo de ataque, porosidade na superfície da pá, *cup* em excesso (*cup* é a concavidade que se vê no bordo de fuga da pá de um

propulsor, evitando assim que o fluxo de água passe da área de maior pressão para a de menos pressão), pá mal projetada, hélice parcialmente submerso causando irregularidades na rotação do MCP, Mau tempo , ventilação do hélice.

Com o crescimento da densidade de bolha ocorre uma mudança do ao redor do corpo, com relação ao escoamento que varia de acordo com a forma da cavitação existem 3 formas: de vórtice, de nuvem e de folha.

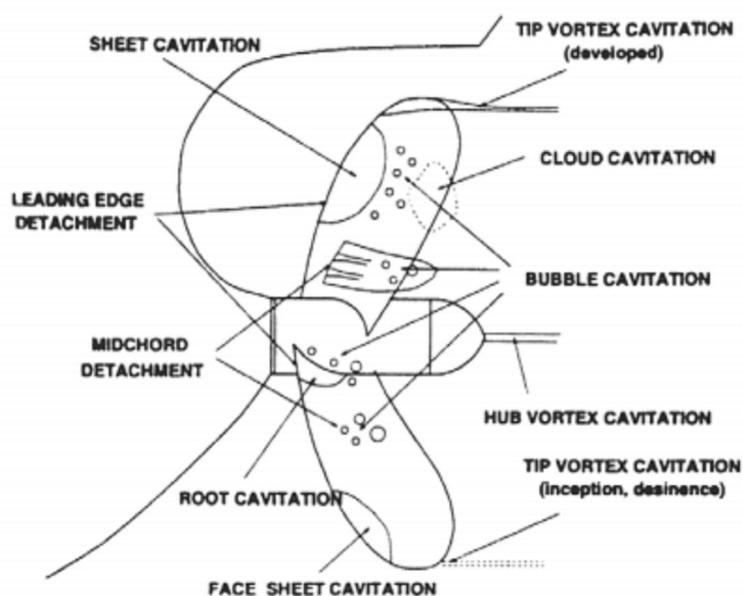
## 2.4 TIPOS CAVITAÇÃO

A de vórtice, é muito comum nas pontas das pás de propulsores navais. Nessas regiões, o escoamento tem grande vorticidade e o núcleo tem uma pressão reduzida. Se essa redução for suficiente o núcleo inteiro do vórtice pode ser preenchido por vapor. Forma-se uma estrutura muito estável que se prolonga a jusante do ponto de formação.

A de nuvem ocorre quando há formamação e colapso de um agrupamento grande de bolhas com aspecto de nuvem, acredita-se que essa cavitação seja a mais erosiva.

Outro tipo conhecido, é a cavitação totalmente preenchida por vapor, na região da esteira ou na separação do fluxo do líquido. Esse tipo do cavitação pode se estender por uma região mesmo a jusante do bordo de fuga como será observado na figura a seguir.

Figura 1: Tipos de cavitação



## 2.5 EFEITOS DA CAVITAÇÃO NA NAVEGAÇÃO.

Observa-se na figura 2, os efeitos em um hélice causado, principalmente, pela cavitação de bolhas, na qual as bolhas energéticas se expandem na região de baixa pressão e depois colapsam quando a pressão aumenta na próximo do bordo de fuga. A cavitação por bolhas é muito barulhenta que pode causar desconforto para a tripulação além de ocasionar, devido a erosão, uma diferença em questão de massa entre as pás podendo gerar vibração no eixo do motor de combustão principal, fenômeno o qual será estudado com detalhes mais adiante.

**Figura 2:** Hélice que sofreu com os efeitos da cavitação



### **3 VIBRAÇÃO**

Os fenômenos de vibração ocorrem sempre que existem forças dinâmicas, forças que variam ao longo do tempo a atuarem no casco e respectivos apêndices ou em determinados elementos estruturais do navio. Para a superestrutura a atenção é dirigida no sentido da redução da vibração face à susceptibilidade humana ao fenómeno. Os dois requisitos básicos para as vibrações nos compartimentos habitacionais são assegurar que as forças de excitação provenientes dos motores propulsores e geradores são reduzidas melhorando assim a habitabilidade do ambiente.

No que diz respeito à tolerância humana à vibração, as frequências mais baixas possuem maior amplitudes e trepidações menores e por isso são menos incomodativas. As frequências mais altas são particularmente indesejáveis, mesmo quando têm amplitudes baixas, por causa dos níveis de ruído que lhes estão associadas e pelo efeito desastrosos que têm nos instrumentos de navegação. Em ambos os casos, as vibrações horizontais são piores que as vibrações verticais de igual amplitude, pelo fato de interferirem mais com as atividades humanas a bordo do navio.

#### **3.1 RESSONÂNCIA CAUSADA PELA VIBRAÇÃO**

Primeiramente, explicarei o fenómeno da ressonância, mostrando como ele pode ser prejudicial para qualquer estrutura de engenharia. Ressonância é o fenómeno que acontece quando um sistema físico recebe energia por meio de excitações de frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração. Assim, o sistema físico passa a vibrar com amplitudes cada vez maiores. Cada sistema físico capaz de vibrar possui uma ou mais frequências naturais, isto é, que são características do sistema. Como por exemplo, um pêndulo ao ser afastado do ponto de equilíbrio, cordas de um violão ou uma ponte para a passagem de pedestres sobre uma rodovia movimentada. Todos estes sistemas possuem sua frequência natural, que lhes é característica.

Quando ocorrem excitações periódicas sobre o sistema, como quando o vento sopra com frequência constante sobre uma ponte durante uma tempestade, acontece um fenómeno de superposição de ondas que alteram a energia do sistema, modificando sua amplitude.

Os navios podem entrar em ressonância com as ondas do mar. Fato que deve ser observado pelos comandantes desses navios, sempre que as oscilações naturais do jogo do navio (balanço) entram em ressonância com os ondas do mar, as amplitudes das oscilações crescem de tal maneira que é colocada em risco a estabilidade transversal da embarcação. Os comandantes sempre ordenam uma alteração do rumo do navio ou de sua velocidade para alterar a frequência do impacto das ondas de modo a evitar a ressonância.

Os navios também podem sofrer influência do fenômeno da ressonância com a vibração de sua máquina de propulsão. Caso o motor de combustão principal sofra paralisação de alguns de seus cilindros ou se o eixo propulsor estiver empenado pode acarretar a vibração de toda a estrutura.

A estrutura do navio pode entrar em ressonância com as vibrações do motor causando aumentos perigosos na amplitude das vibrações, que poderiam causar ruptura de parte de sua estrutura. Para evitar o acidente é necessário que haja a alteração da velocidade de rotação da máquina e conseqüentemente alterar a frequência de vibração do MCP ou, no caso do eixo empenado realizar o reparo, fazendo cessar a ressonância.

## 4 DISPOSITIVOS EQUALIZADORES DE ESTEIRA

Nesse capítulo, será mostrado, com ilustrações, dispositivos pré-hélice e pós-hélice que auxiliam na prevenção da cavitação, nos efeitos da vibração e/ ou auxiliam na equalização das esteiras dos navios bem como trazem ganho de potência ou eficiência energética. Como consequência os navios tem sua vida útil aumentada, e uma diminuição nos custos da gestão comercial dos mesmo maximizando os lucros sobre esses navios.

### 4.1 DISPOSITIVOS PRÉ-HÉLICE

Dispositivos localizados adiante do hélice no sentido proa popa. Esses dispositivos têm efeitos positivos no navio que serão relacionados adiante.

#### 4.1.1 Duto Schneekluth

O duto Schneekluth é uma estrutura hidrofólica em forma de duto localizado na parte pré-hélice que fornece ao navio ganhos como aumento na velocidade, aumento de potência do motor, e com isso, economia de combustível, redução do nível de vibração no passadiço. Estudos comprovam que o ganho de velocidade pode ser maior que 0.3 nós isso representaria um ganho de 950 kw ou um aumento de 5% na eficiência do motor. Para alcançar esse aumento de velocidade é necessária a adição de 4 toneladas de combustível por dia, fato que aumentaria muito o custo operacional do navio.

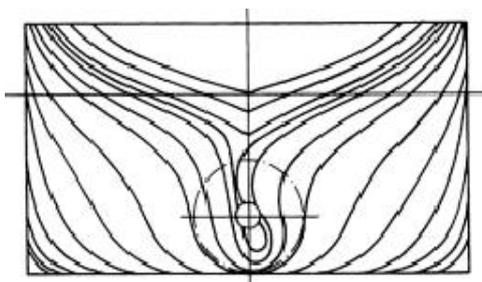
**Figura 3:** Navio equipado com duto Schneekluth



### 4.1.2 Popa Assimétrica

A função da popa assimétrica é fornecer energia para camada limite, regularizando a esteira fazendo com que o navio seja mais eficiente nas suas viagens. A popa assimétrica também favorece o escoamento turbulento fazendo com que a camada limite seja mais estável diminuindo a influência da esteira.

**Figura 4:** Desenho do formato da popa assimétrica do navio



### 4.1.3 Aletas Grothues

É uma sequência de hidrofólios, projetados para baixo e para fora nas laterais da carena, e posicionados pré-hélice no sentido proa-popa. Criam um fluxo axial mais uniforme no disco do propulsor, ou seja equalizam a esteira, acelerando o fluxo lento e aumentando a velocidade do navio somente com recursos hidrodinâmicos. Esse ganho de potência e velocidade gera eficiência para o navio e redução dos efeitos de arrasto causado pela esteira.

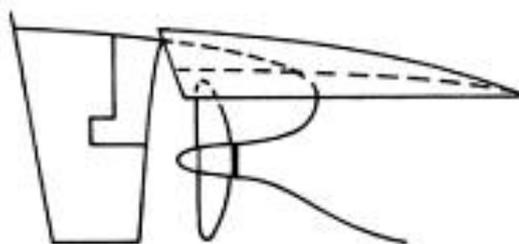
**Figura 5:** Navio equipado com Aletas Grothues



#### 4.1.4 Duto Parcial de Popa

Esse dispositivo busca equalizar a esteira direcionando, para o hélice, o fluxo de água lento, isso fará que o navio ganhe um acréscimo de velocidade e aumente sua eficiência energética.

**Figura 6:** Navio equipado com duto parcial de popa (ilustração)



#### 4.1.5 Estatores

Esse dispositivo consiste de pás ao redor de um eixo de forma radial. A finalidade é quebrar a resistência da água facilitando a passagem do hélice e diminuindo o trabalho para pá cortar a água. Tem como consequência acréscimo de potência levando a economia de combustível.

**Figura 7:** Navio equipado com estator na popa



#### 4.1.6 Duto Becker's Mewis

Consiste de um tubulão que direciona o fluxo de água para o hélice em conjunto com um estator que se localiza dentro do tubulão. Esse dispositivo é muito utilizado em navios que possuem grande coeficiente de bloco como graneleiros navios tanque e porta-containers em que seus propulsores operam em campos de esteiras desfavoráveis.

**Figura 8:** Navio equipado com Duto Becker's Mewis



#### 4.1.7 Duto Mitsui

Esse dispositivo é considerado estrutural porque faz parte da estrutura do navio. Consiste de um duto circular posicionado pré-hélice no sentido proa popa, sendo ao mesmo tempo assimétrico para capturar a aceleração dos fluidos nas áreas do disco do propulsor próximo ao casco.

**Figura 9:** Navio equipado com Duto Mitsui



## 4.2 DISPOSITIVOS PÓS-HÉLICE

Dispositivos localizados a ré do hélice no sentido proa popa. Esses dispositivos têm efeitos positivos no navio que serão relacionados adiante.

### 4.2.1 Aleta de Impulso no Cadaste

Esse dispositivo hidrodinâmico aproveita a energia torcional do giro do hélice e transforma em energia axial ajudando a propulsão do navio. Esse ganho de energia auxilia no rendimento dos motores de combustão e na economia de combustível.

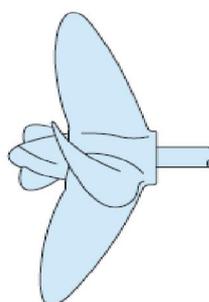
**Figura 10:** Navio equipado com Aleta de Impulso no Cadaste



#### 4.2.2 Boss Cap

Esse dispositivo nada mais é que um mini-hélice localizado na ponta do hélice do navio, que age como uma força motriz extra para impulsionar o navio. Aproveitando a energia torcional do hélice gerada pelo MPC.

**Figura 11:** Desenho ilustrativo de propulsor equipado com Boss Cap



### 4.2.3 Bulbo Costa

Esse dispositivo em forma de bulbo organiza o fluxo de água diminuindo a influência da resistência de apêndice causada pelo leme já que o líquido não percorre a região localizada entre o hélice e o leme.

**Figura 12:** Navio equipado com Bulbo Costa



### 4.2.4 Leme assimétrico

Esse leme tem o formato maior na parte superior e é mais fino na parte inferior, aproveitando que o efeito de interação entre o navio e o hélice faz com que o hélice impulse a água de maneira distinta nas regiões do leme.

**Figura 13:** Navio equipado com leme assimétrico



### 4.3 DISPOSITIVOS LOCALIZADOS NO HÉLICE

#### 4.3.1 Propulsor Kappel

Propulsor que evita os efeitos dos vórtices das pás, ou seja, evita a cavitação do tipo vórtece que acontece na ponta das pás como vimos anteriormente. Melhora a eficiência da propulsão, fornecendo potência extra e tornando a embarcação mais econômica.

**Figura 14:** Propulsor Kappel



### 4.3.2 Propulsor End-Plates

Propulsor que possui na sua ponta uma estrutura em forma de placa paralelas feita para evitar a cavitação de vórtece, esse propulsor também fornece ganho de potência com conseqüente aumento da eficiência energética.

**Figura 15:** Propulsor equipado com end plates



## 5. CONCLUSÃO

Os objetivos principais desse trabalho foram: estudar o fenômeno da esteira, vibração e cavitação, revelando as causas e os principais efeitos na navegação, além disso, foram mostrados dispositivos localizados pré-hélice (Duto Schneekluth, Popa Assimétrica, Aletas Grothues, Duto Parcial de Popa, Estatores, Duto Becker's Mewis e Duto Mitsui), pós-hélice (Aleta de Impulso no Cadaste, Boss Cap, Bulbo Costa, Leme Assimétrico) e no hélice (Propulsor kappel e End Plates) que fornecem auxílios para a minimização dos efeitos desses fenômenos e incrementam a eficiência energética, a potência efetiva aplicada no navio e o rendimento relacionando ao trabalho desempenhado, favorecendo a uma maior vida útil do maquinário.

Esse trabalho foi muito importante para o aprofundamento desse tema, uma vez que, permitiu conhecer melhor os fenômenos hidrodinâmicos que cercam o navio e influenciam diretamente na navegação, além de ter observado técnicas para se evitar a deterioração do navio em relações aos fenômenos (cavitação, vibração e esteira) estudados.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AURET, J. G., Damm, O. F. R. A., Wright, G. J., Robinson, F. P. A., Cavitation Erosion of Cooper and Aluminium in Water at Elevated Temperature. *Tribology International*, 1993, pp. 421-429.

BAZANNI, G., Bezerra, V.B., Silans, A.M.B.P.. The Influence of Physical Properties in Bubble Collapse and Pressure Field in Liquids. *Acta Scientiarum*, vol.21, No. 4: December, 1999, pp.773-778,.

BAZANINI, G., Bressan, J. D., Preliminary Experience with a New Compact Disk Apparatus for Cavitation Erosion Studies. *Wear*, V. 263, 2006, pp. 251-257.

BENNEKOM, A., Berndt, F., Rassool, M. N., Pump Impeller Failures – a Compendium of Case Studies. *Engineering Failure Analysis* 8, 2001, pp. 145-156.

BRENNEN, C. E., *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford University Press, 1995.

BRASIL R.S. – “Efeitos da Massa Adicional em Águas Rasas na Análise de Vibração de Embarcações”.

SALIBA, T.M. – “Leis Controversas Dificultam Caracterizar Vibração Insalubre” –