



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Automotiva**

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE  
EROSIVO – ABRASIVO DE AÇOS INOXIDÁVEIS E  
AÇOS CARBONO (I)**

**Autor: João Antonio Bastos Ferreira  
Orientador: Edison Gustavo Cueva**

**Brasília, DF  
2015**



**JOÃO ANTONIO BASTOS FERREIRA**

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE EROSIVO – ABRASIVO DE  
AÇOS INOXIDÁVEIS E AÇOS CARBONO (I)**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: D. Sc. Edison Gustavo Cueva Galárraga

**Brasília, DF  
2015**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Ferreira, João Antonio.

Estudo Comparativo do Desgaste Erosivo – Abrasivo de Aços Inoxidáveis e Aços Carbono (I) / João Antonio Bastos Ferreira. Brasília: UnB, 2015.

Monografia (Bacharel em Engenharia Automotiva) –  
Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2015. Orientação: Edison  
Gustavo Cueva Galárraga.

1. Desgaste erosivo-abrasivo. 2. Aço inoxidável.  
3. Resistência à erosão-abrasão I. Cueva Galárraga, Edison  
Gustavo.

CDU Classificação



**ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE EROSIVO – ABRASIVO DE  
AÇOS INOXIDÁVEIS E AÇOS CARBONO (I)**

**João Antonio Bastos Ferreira**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 02/11/2015 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. D. Sc. Edison Gustavo Cueva Galárraga, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. D. Emmanuel Pacheco Rocha Lima, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Arthur Ribeiro de Oliveira**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2015

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo geral, fazer um estudo comparativo da resistência ao desgaste erosivo-abrasivo de amostras de aço carbono e de aço inoxidável utilizadas na fabricação de componentes náuticos (hélice de rotores). Nesta etapa inicial do trabalho (TCC I) foram realizadas adaptações numa bancada de ensaios de desgaste construída na Faculdade do Gama da Universidade de Brasília, e depois verificada seu correto funcionamento por meio de ensaios de desgaste em amostras de aço carbono 1020. Amostras foram ensaiadas numa solução aquosa contendo areia grossa como abrasivo. As amostras foram fixadas a um porta-amostras de tal forma que as partículas impactem nas amostras com ângulos predeterminados de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°. O tempo total de ensaio foi de 2h, para cada ângulo examinado. A cada 30 min os ensaios foram interrompidos para quantificar a perda de massa sofrida. Os resultados mostraram que as amostras ensaiadas com ângulo de 90° foram as que mais se desgastaram, seguidas das amostras ensaiadas a 45°, 30°, 60° e 0°. Estes resultados, em geral, corroboram outros apresentados na literatura científica, a exceção dos valores medidos a 90° cujo comportamento pode ser explicado em função do arranjo experimental utilizado. A dinâmica de movimentação da solução erosiva faz com que parte das partículas erosivas impactem as amostras com ângulos diferentes aos previstos nos ensaios. Na sequência (TTC2), serão complementados os ensaios com aços carbono 1020 e depois, ensaios semelhantes serão realizados com amostras de aço inoxidável, cujos resultados permitirão fazer finalmente as comparações pretendidas.

**Palavras-chave:** Desgaste erosivo-abrasivo. Aço carbono. Aço inoxidável. Resistência à erosão-abrasão.

## ABSTRACT

The main objective of this work is to make a comparative study of resistance to erosive-abrasive wear of carbon steel samples and stainless steel used in the manufacture of water components (propeller rotors). At this early stage of the work (TCC I), adjustments were made in a wear testing machine built at the University of Brasilia, and then verify its correct operation through wear tests in carbon steel SAE 1020 samples. Samples were tested in a solution water containing coarse sand as an abrasive. Samples were fixed to a sample holder such that the particles impacting the samples with predetermined angles  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ . The total test time was 2h, for each angle considered. Every 30 minutes the tests were stopped to measure the weight loss suffered. The results showed that the tested samples  $90^\circ$  undergone the greatest wear, followed by the samples tested at  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $0^\circ$ . These results are in agreement with others presented in the scientific literature, with the exception of the values measured at  $90^\circ$  whose behavior can be explained by the experimental arrangement used. The dynamics of erosive solution causes of the erosive particles impacting the samples with different angles to those of tests. Following (TTC2) testing with carbon steel in 1020 will be completed and then, similar tests will be carried out with stainless steel samples; whose results will finally make the required comparisons.

**Keywords:** Erosive-abrasive wear. Stainless steel. Carbon Steel. Erosion-abrasion resistance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Tipos de embarcações (Fujarra, 2006).....  | 13 |
| Figura 2 - Exemplo de sistema de propulsão direta (Baptista, 2013) .....  | 14 |
| Figura 3 - Exemplo de sistema de propulsão indireta (Baptista, 2013).....   | 15 |
| Figura 4 - Diversas geometrias de hélices (MacKenzie, et al., 2008) .....   | 16 |
| Figura 5 - Partes de um hélice (Geer, 1989).....  | 17 |
| Figura 6 - Hélices feitos de compósito (Searle, 1998).....  | 20 |
| Figura 7 - Consequências da cavitação (Baptista, 2013) .....  | 21 |
| Figura 8 - a) contato entre as asperezas, b) formação de ilhas de óxido, c) crescimento das ilhas de óxido, d) quebra das pontas oxidadas, formação de novas áreas oxidadas e aglomeração de partículas (Zum Gahr, 1987). ..... | 23 |
| Figura 9 - Geometria de diferentes pites (ASTM – G 48) .....  | 24 |
| Figura 10 - Pites na superfície de aço AISI 304 (Ochoa, 2007).....  | 24 |
| Figura 11 - Fadiga sub-superficial propagando-se paralela à superfície (Gahr., 1987).....   | 25 |
| Figura 12 - Mecanismos do desgaste abrasivo (Gahr, 1987) .....  | 26 |
| Figura 13 - Relação entre ângulo de ataque nos mecanismos de corte e sulcamento com a taxa de desgaste (Gahr, 1987).....  | 27 |
| Figura 14 - Rotor de uma bomba submetido à erosão e corrosão (Ochoa, 2007) .....  | 27 |
| Figura 15 - Influencia do tamanho da partícula (Tabakoff, et al., 1983) .....   | 28 |
| Figura 16 - Efeito do tamanho da partícula no desgaste erosivo do aço inox a 650°C (J.Zhou, et al., 1989).....  | 29 |
| Figura 17 - Influencia do ângulo de impacto na taxa de erosão (Finnie, 1995) .....  | 30 |
| Figura 18 - Taxa de erosão em função da velocidade de impacto (Hutchings 1992).....   | 31 |
| Figura 19 - Influência da velocidade e do ângulo nos mecanismos de desgaste (Ochoa, 2007) .....   | 31 |
| Figura 20 - Efeito da velocidade e ângulo de impacto na taxa de erosão de um aço inoxidável martensítico e um austenítico em um meio aquoso, respectivamente (Ochoa, 2007) .....  | 32 |
| Figura 21 - Velocidade de desgaste em função da dureza dos elementos (partícula abrasiva e superfície desgastada) (Wainer, et al., 1992) .....  | 33 |
| Figura 22 - Esquemático do equipamento utilizado pela norma ASTM G 65-91 (ASTM, 1991) .....   | 34 |
| Figura 23 - Equipamento de ensaio de desgaste por impacto e abrasão (Kennedy, et al., 1996) .....   | 35 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 24 - Máquina de desgaste construída por Oliveira (2015) .....              | 36 |
| Figura 25 – Estrutura inicial e estrutura com modificações, respectivamente ..... | 37 |
| Figura 26 – Disco porta-amostras.....   | 38 |
| Figura 27 - Amostras posicionadas em um ângulo 60 graus.....                      | 38 |
| Figura 28 – Sistema no qual as amostras são inseridas.....                        | 39 |
| Figura 29 - Amostras de aço 1020.....   | 39 |
| Figura 30 - Peneira industrial Bertel.....  | 40 |
| Figura 31 - Balança Semi-Analítica OHAUS .....                                    | 40 |
| Figura 32 - Taxa de desgaste média para as três amostras.....                     | 42 |
| Figura 33 - Esquemático de desgaste em diferentes ângulos .....                   | 42 |
| Figura 34 - Suporte com amostras dentro do galão .....                            | 43 |
| Figura 35 - Partícula abrasiva impactando amostra a 0°.....                       | 44 |
| Figura 36 - Partícula impactando amostra a 30°.....                               | 44 |
| Figura 37 - Partícula abrasiva impactando amostra a 45°.....                      | 45 |
| Figura 38 - Partícula impactando a amostra a 60°.....                             | 45 |
| Figura 39 - Partícula abrasiva impactando amostra a 90°.....                      | 46 |



## **LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Componentes do sistema de propulsão e suas funções ..... | 15 |
| Tabela 2 - Esquemático do ensaio de desgaste abrasivo-erosivo ..... | 41 |
| Tabela 3 - Esquemático de proposta de rotina de testes .....        | 48 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>13</b> |
| 2.1. VEÍCULOS NÁUTICOS DE ESPORTE E LAZER.....                                     | 13        |
| 2.1.1. Sistemas de propulsão de veículos náuticos.....                             | 14        |
| 2.1.2. Propulsor náutico (hélice) .....  | 16        |
| 2.1.3. Materiais utilizados em hélices de veículos náuticos .....                  | 18        |
| 2.1.3.1. Aços inoxidáveis e aços carbono .....                                     | 18        |
| 2.1.4. Materiais alternativos.....   | 19        |
| 2.1.5. Falhas por desgaste em hélices de veículos náuticos.....                    | 20        |
| 2.2. MECANISMO DE DESGASTE DE MATERIAIS .....                                      | 21        |
| 2.2.1. Desgaste oxidativo.....   | 22        |
| 2.2.2. Desgaste por fadiga superficial .....                                       | 24        |
| 2.2.3. Desgaste abrasivo .....   | 25        |
| 2.2.4. Desgaste erosivo .....  | 27        |
| 2.2.4.1. Influência do tamanho da partícula abrasiva.....                          | 28        |
| 2.2.4.2. Influência do ângulo de impacto da partícula abrasiva .....               | 29        |
| 2.2.4.3. Influência da velocidade de impacto da partícula abrasiva .....           | 30        |
| 2.2.4.4. Influência da dureza da partícula abrasiva e do material desgastado ..... | 32        |
| 2.2.5. Recobrimentos resistentes ao desgaste abrasivo-erosivo.....                 | 33        |
| 2.3. ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO – ABRASIVO.....                                   | 34        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>   | <b>37</b> |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>  | <b>42</b> |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>   | <b>47</b> |
| <b>6. TRABALHOS FUTUROS .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>49</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Fajarra (2006), setenta por cento da superfície da Terra é coberta por água. O homem desde sua existência aproveita-se deste recurso natural para praticar diversas atividades: captura de alimentos, produção de energia, exploração de recursos minerais, transporte de cargas e passageiros, prática de esportes, atividades recreativas e diversas outras atividades.

Com a exploração deste recurso natural abundante existente na Terra, surgiu a necessidade do homem em estudar meios para a melhor utilização destas oportunidades. Um tema que vem sendo estudado desde que o homem começou a utilizar a navegação como meio de transporte é a arquitetura de embarcações náuticas.

As embarcações náuticas, como qualquer outro meio de transporte, estarão sujeitas as problemáticas do ambiente no qual ela está inserida. Em navegações oceânicas o projeto mecânico de certos componentes das embarcações deve levar em conta diversos fatores críticos do local, um fator preponderante é a presença de sal na água que intensifica diversos tipos de desgastes: oxidativo, erosivo, abrasivo, combinações destes e outros mais.

O desgaste erosivo é um fator preocupante para a indústria náutica, segundo Ochoa (2007) a indústria náutica gasta milhões com a reposição e reconstrução de componentes do sistema de transporte náutico devido a falhas causadas por este desgaste. Dada esta situação, o desenvolvimento de componentes que possuam resistência à erosão é fundamental para otimização dos projetos náuticos e para a criação de conhecimento nesta área.

O presente trabalho tem como objetivo geral fazer um estudo comparativo da resistência ao desgaste erosivo-abrasivo de amostras de aço carbono e de aço inoxidável utilizadas na fabricação de componentes náuticos (hélice de rotores).

Inicialmente (TCC I), serão realizadas adaptações à bancada de ensaios de desgaste erosivo –abrasivo construída por Cueva (2015), e depois verificar seu funcionamento por meio de ensaios preliminares em amostras de aço carbono 1020.

Na sequência (TTC2), serão complementados os ensaios com aços carbono 1020 e a seguir, ensaios semelhantes serão realizados com amostras de aço inoxidável; para finalmente realizar as comparações pretendidas.

O trabalho encontra-se dividido em sete capítulos, o capítulo um é destinado a inserir o leitor no conteúdo abordado. O capítulo dois é destinado a inserir o conteúdo teórico necessário para o entendimento e realização deste trabalho, no capítulo três é descrito os materiais e métodos utilizados no ensaio. No capítulo quatro é abordado os resultados adquiridos após o ensaio, bem como uma discussão a respeito, já no capítulo cinco é apresentado uma conclusão sobre o trabalho, logo em seguida no capítulo seis é apresentado algumas propostas de trabalhos futuros. Por fim, no capítulo sete são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para criação deste trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. VEÍCULOS NÁUTICOS DE ESPORTE E LAZER

A Normam (Normas de Autoridade Marítima) 28 de 2011 define embarcação como sendo qualquer construção, inclusive as plataformas móveis e fixas, sujeitas à inscrição na Autoridade Marítima e suscetível de se locomover na água, por meios próprios ou não, transportando pessoas ou cargas.

Segundo Fajarra (2006) as embarcações podem ser classificadas em três tipos no que se refere ao tipo de sustentação em relação à água, exemplos dos três tipos podem ser vistos na Fig. (1), são elas: aerostática, hidrodinâmica e hidrostática.

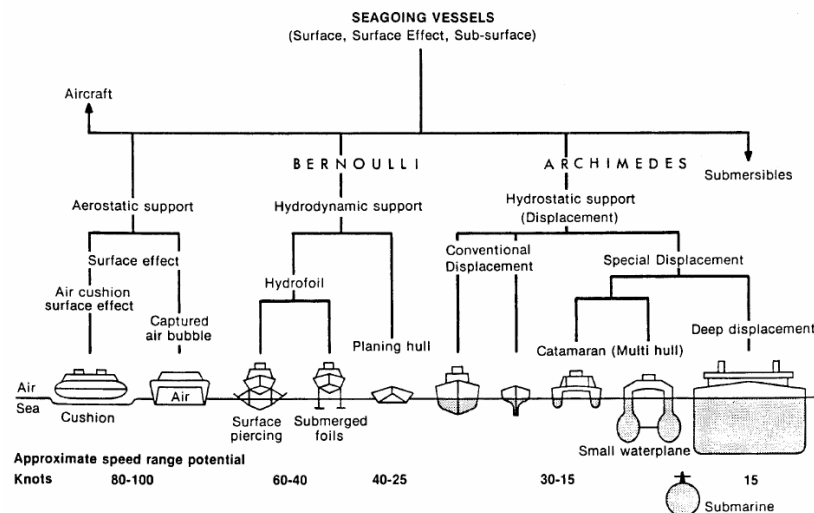


Figura 1 - Tipos de embarcações (Fajarra, 2006)

Na Figura (1) é possível notar que as embarcações aerostáticas são sustentadas sobre a superfície da água através de colchões de ar e caracterizam-se por ser as mais velozes. Os hidrodinâmicos utilizam de efeitos hidrodinâmicos em fólios (asas) ou da geometria do fundo do casco para a sua sustentação, a principal embarcação deste tipo são as lanchas.

O último grupo composto pelos navios que utilizam do efeito hidrostático para sua sustentação sobre a água, este grupo apresenta as menores velocidades comparados aos dois primeiros, no entanto, possuem a característica de permitir maiores capacidades de carga.

As embarcações de esporte e lazer são embarcações com fins não comerciais e segundo a Normam 28 são classificadas em três tipos: grande porte, médio porte e miúdas. As

embarcações de grande porte possuem comprimento maior ou igual a 24 metros ou, quando menores, AB (arqueação bruta) – valor adimensional relacionado com o volume interno total de uma embarcação - maior que 100. Médio porte possuem comprimento menor que 24 metros e maior que 5 metros.

Embarcações miúdas possuem comprimento menor ou igual a 5 metros ou com comprimento superior a cinco metros que apresentem as características: convés aberto, convés fechado mas sem cabine habitável e sem propulsão mecânica fixa e que, caso utilizem motor de popa, este não exceda 30hp (Brasil, 2011).

### 2.1.1. Sistemas de propulsão de veículos náuticos

O homem utiliza embarcações náuticas para diversas atividades, no entanto, para que seu uso se tornasse mais eficiente foi necessário o desenvolvimento de diversas tecnologias, entre os sistemas que mais se desenvolveram está o sistema de propulsão, responsável por retirar a embarcação da inércia.

Inicialmente as embarcações eram propulsionadas através do vento, o que restringia o deslocamento da embarcação para somente quando o vento estivesse favorável. Atualmente existem vários métodos de propulsão que utilizam as mais diversas tecnologias.

Para Baptista (2013) o sistema de propulsão de embarcações tem como função principal efetuar a propulsão, movimento criado a partir de uma força impulsiva, da embarcação. Para este mesmo autor, existem dois tipos de sistema de propulsão de embarcações:

- Direta – motor de combustão principal (MCP) aciona diretamente o propulsor através da linha de veios, um exemplo deste tipo é visto na Fig. (2).

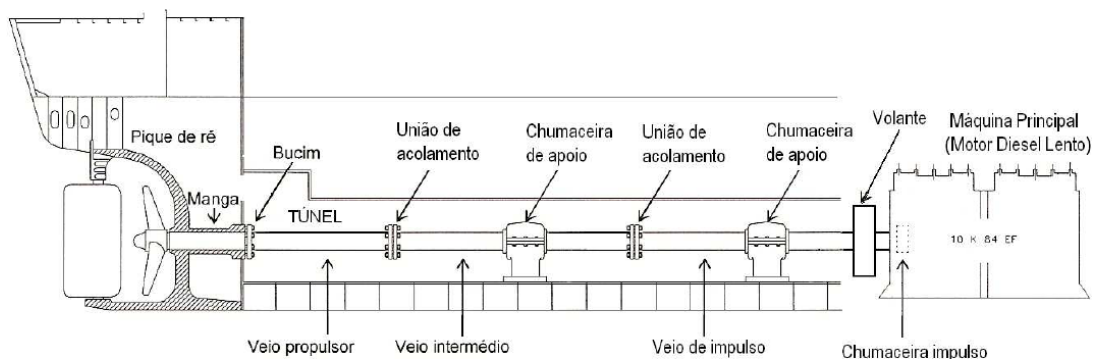


Figura 2 - Exemplo de sistema de propulsão direta (Baptista, 2013)

- Indireta - MCP aciona a linha de veios através de uma caixa de engrenagens para assim acionar o propulsor, um exemplo deste tipo é visto na Fig. (3).

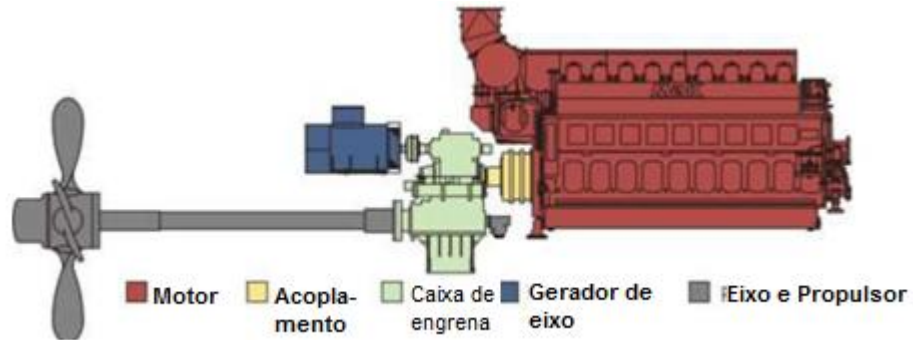


Figura 3 - Exemplo de sistema de propulsão indireta (Baptista, 2013)

Nas Figuras (2) e (3) é visto diversos componentes mecânicos que constituem os sistemas de propulsão, eles são descritos na Tab. (1).

Tabela 1 - Componentes do sistema de propulsão e suas funções

| Linha de veios                |   |
|-------------------------------|---|
| Componentes                   | Função  |
| Caixa de engrenagens redutora | Conjunto de engrenagens redutoras de velocidade cuja função é reduzir a rotação do motor para que seja transmitida para o hélice, fazendo com que o rendimento seja otimizado |
| Veio de impulso               | Estabelece a ligação entre o MCP e o veio intermediário   |
| Veios intermediários          | Estabelecem a ligação entre o veio de impulso e o veio propulsor  |
| Veio propulsor                | Estabelece a ligação entre o veio intermediário e o propulsor (hélice)  |
| Chumaceiras de impulso        | Suportar e transmitir o impulso do hélice à embarcação  |
| Chumaceira de apoio           | Suportar ao veio de impulso e aos veios intermediários  |
| Manga                         | Tubo no qual o veio propulsor passa por dentro  |
| Bucim de vedação              | Evitar que a água entre para dentro do navio  |
| Hélice                        | Propulsionar a embarcação   |

### 2.1.2. Propulsor náutico (hélice)

Na língua portuguesa utilizada no Brasil, a palavra hélice existe tanto no gênero masculino quanto no gênero feminino. Hélice no feminino refere-se a geometria em espiral, como por exemplo de uma mola, já hélice no masculino refere-se ao componente mecânico utilizado em aviões e embarcações náuticas (Global, 2009).

Segundo Fajarra (2006) o hélice é uma máquina de propulsão, seu funcionamento consiste em rotacionar superfícies dispostas radialmente sobre um eixo, o qual é alinhado com o sentido do movimento. Para Geer (1989) um hélice deve preencher dois requisitos básicos: corresponder à potência do motor e a velocidade do eixo de rotação, no entanto, estes dois parâmetros estão relacionados a diversos outros: tamanho e velocidade da embarcação, tipo de casco, velocidade do motor.

A função do hélice é deslocar a embarcação movida à propulsão mecânica através da transferência de potência do motor para a água. A escolha do hélice é uma decisão que influencia no desempenho e no consumo de combustível da embarcação, com o hélice, motor e casco adequados o desempenho da máquina será otimizado (Nasseh, 1999). Na Figura (4) são expostos vários tipos de hélices.



Figura 4 - Diversas geometrias de hélices (MacKenzie, et al., 2008)

Na Figura (4) é possível ver diversos tipos de hélices, variando desde a geometria, quantidade de pás, posicionamento e material no qual são fabricados. O hélice é composto por diversos componentes mecânicos, vistos na Fig. (5).



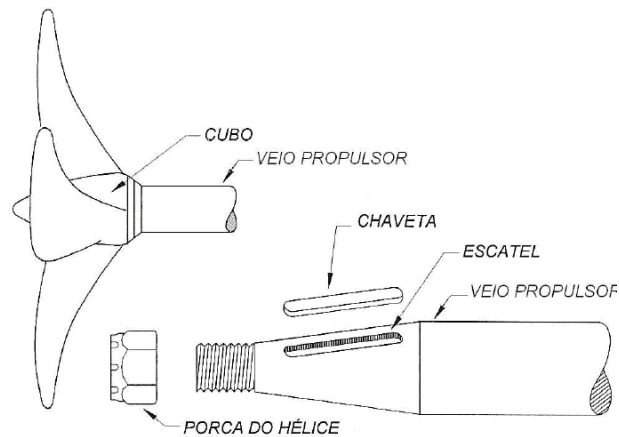


Figura 5 - Partes de um hélice (Geer, 1989)

Geer (1989) e Gomes (1981) descrevem os componentes da Fig. (5) como: cubo – disco central rígido e vazado para o encaixe do eixo de rotação, utilizado como base das pás; chaveta – prisma retangular disposto ao longo do eixo de propulsão que se encaixa à fenda ou abertura no hélice; pás – barbatanas ou chapas torcidas projetadas do cubo que proporcionam a locomoção da embarcação; porca – elemento mecânico responsável pela fixação do cubo ao eixo de rotação.

Baptista (2013) explica os dois principais tipos de hélice: de passo fixo (FPP), constituído por 3 ou mais pás fixadas ao cubo, neste sistema a velocidade da embarcação é controlada através da variação da velocidade de rotação do hélice, para inverter a marcha da embarcação é necessário a parada do MCP; de passo variável (CPP), neste caso as pás são acionadas por um sistema hidráulico que faz variar o passo, para inverter a marcha da embarcação não é necessário que o MCP pare, estes hélices são mais utilizados em rebocadores, navios de cruzeiro e outras embarcações de grande porte.

O passo do hélice é entendido de forma didática como a distância percorrida pela embarcação a cada rotação completa do propulsor, isto seria verdade se a água fosse um meio rígido. Para hélices FPP, mais utilizadas em embarcações comerciais, a velocidade do navio adotando que a água seja um meio rígido poderia ser expressa por:

$$V = p \times n \quad (1)$$

Onde  $V$  é a velocidade do navio,  $p$  o passo do hélice e  $n$  o número de rotações por unidade de tempo, normalmente mensurada em função dos minutos (RPM), no entanto, como a água é um elemento deformável ocorre que o avanço da embarcação não seja igual ao passo fixo. Para cálculo da velocidade real da embarcação é necessário o cálculo do recuo do hélice:

$$\text{coef}_{\text{recuo}} = \frac{v - v'}{v} \quad (2)$$

Onde  $\text{coef}_{\text{recuo}}$  é uma porcentagem que varia entre 5 e 10% para embarcações de um só hélice e de 10 a 20% para embarcações com dois ou mais hélices, e  $v'$  é a velocidade real da embarcação (Baptista, 2013).

O hélice devido seu movimento de rotação e ao meio no qual está inserido estará sujeita a diversos esforços, fenômenos físicos, químicos e diversas outras ocorrências, para que sua estrutura se mantenha segura e funcional é necessário que seu projeto leve em consideração estes e outros parâmetros, uma das mais importantes variáveis do projeto do hélice é o material no qual ele será fabricado.

### 2.1.3. Materiais utilizados em hélices de veículos náuticos

A escolha dos materiais a serem utilizados para a fabricação de embarcações trata-se de uma tarefa complexa que envolve diversos fatores, entre eles Fajarra (2006) cita: preferência e experiência do projetista em trabalhar com determinado material, tipo de projeto naval, custo do material, disponibilidade e escala de produção, local e condições nas quais será realizada a construção e outras mais.

A indústria náutica inicialmente utilizava ferro fundido para a fabricação de hélices, posteriormente houve uma migração para o uso de metais resistentes à corrosão. Níquel-Alumínio-Bronze (NAB) e Manganês-Alumínio-Bronze (MAB) são os mais utilizados na fabricação de hélices (Young, 2008).

A utilização de metais para a fabricação de hélices possui vantagens e desvantagens. Entre as vantagens está a facilidade no cálculo de pressões hidrodinâmicas e de resposta estrutural à esforços, entre as desvantagens estão: custo de fabricação elevado devido à geometria complexa de algumas hélices, corrosão, cavitação, fadiga e rachaduras (Motley, et al., 2009). Uma liga metálica bastante utilizada pela indústria náutica em componentes submersos na água é o aço inoxidável, devido sua principal característica: resistência à corrosão.

#### 2.1.3.1. Aços inoxidáveis e aços carbono

Segundo Ochoa (2007) os aços inoxidáveis surgiram no mercado na década de 1910 como uma alternativa aos materiais resistentes a corrosão, inicialmente estes aços foram empregados na indústria alimentícia e médica. Com a realização de novos estudos voltados a melhoria das propriedades desse aço e com a diminuição do preço, atualmente é utilizado em diversas aplicações, principalmente pela indústria náutica.

Para Ningshen (2007) os aços inoxidáveis são ligas compostas de ferro e cromo, com teor mínimo de 10,5% de cromo para que haja imunidade aos ambientes hostis. A resistência a corrosão deve-se a uma camada de óxido (camada passiva) sobre a superfície do material. As principais características desta camada são: rica em cromo, espessura na ordem de nanômetros, altamente aderente, contínua e compacta.

Dependendo da aplicação do aço, outros elementos de liga podem ser adicionados para a melhora de algumas características, segundo Talbot (1998) o níquel e o molibdênio são alternativas para a melhora das características da camada passiva, no entanto, com o custo elevado do níquel, o nitrogênio tornou-se uma alternativa a ele.

O aço inoxidável austenítico seguindo Ochoa (2007) é resultado da estabilização da austenita à temperatura ambiente, para a realização deste processo são adicionados níquel e ferro à liga. As principais características são: estrutura cúbica de face centrada (fcc), não pode ser endurecida por tratamento térmico, boa ductilidade, conformabilidade e tenacidade.

Esta liga é bastante utilizada em ambientes agressivos, tais como: corrosivos e submetidos à elevadas temperaturas. Suas aplicações estão principalmente na indústria alimentícia, farmacêutica e química.

Estes aços são basicamente compostos por cromo (entre 18 e 25%), níquel (entre 8 e 20%), baixos teores de carbono e outros elementos, no entanto, a composição dos aços comerciais é projetada a fim de se obter o menor custo, ou seja, a indústria diminui a porcentagem do elemento mais caro (níquel) (Ochoa, 2007). A composição de um aço inoxidável austenítico com o mínimo de níquel é 18% de cromo, 9% de níquel e 0,06% de carbono, segundo Talbot (1998) o níquel é responsável por 60% do custo do aço inoxidável austenítico.

Hélices feitas em aço carbono eram largamente utilizadas na indústria náutica por embarcações, no entanto, com o desenvolvimento de novas pesquisas a respeito do tema desgaste dos componentes náuticos, o uso de materiais alternativos como o aço inoxidável e de polímeros tornou-se mais comum no mercado náutico (Searle, 1998).

#### **2.1.4. Materiais alternativos**

Atualmente nota-se no mercado marítimo uma tendência no uso de materiais compósitos em substituição aos metais na utilização como insumo de fabricação de estruturas náuticas. Propriedades mecânicas, anisotropia e o custo do ciclo de vida de estruturas feitas em material compósito tornam a utilização deste material como uma alternativa dos materiais

mais utilizados na indústria náutica (Fontoura, 2009). Exemplos de hélices fabricados em materiais compósitos são vistos na Fig. (6).



Figura 6 - Hélices feitos de compósito (Searle, 1998)

Searle (1998) projetou hélices de três pás com material compósito que são vistas na Fig. (6), elas foram produzidas através do processo de fabricação conhecido como RTM (Moldagem por Transferência de Resina) e foi introduzido no projeto um eixo metálico para melhorar as propriedades finais do hélice. Segundo Fontoura (2009) ensaios foram realizados para comparação do desempenho deste hélice com hélices feitos de metal e os resultados mostraram que não houve diferenças significativas.

Segundo Lin (2005) materiais compósitos também são utilizados para a fabricação somente das pás que constituem o hélice, no entanto, hélices feitos todo de material compósito alcançam maiores rotações por minuto do que com os materiais tradicionalmente utilizados no mercado (Marsh, 2004).

Como dito anteriormente, devido ao movimento feito pelas pás do hélice elas estão sujeitas a específicos esforços, um benefício relevante na utilização de material compósito é a facilidade da mudança de direção das fibras durante o processo de fabricação para assim minimizar a deformação do hélice (Mouritz, et al., 2001).

#### **2.1.5. Falhas por desgaste em hélices de veículos náuticos**

Os hélices de veículos náuticos por estarem sujeitos a diversos esforços e a condições adversas devido ao ambiente no qual estão inseridos, constantemente falham. Estas falhas podem ser interpretadas como mal funcionamento ou até mesmo a total ineficiência da mesma, um fenômeno que ocorre em torno do hélice e contribui para o seu desgaste é a cavitação.

Baptista (2013) diz que devido a aceleração do fluido pelo movimento da pá do hélice, a pressão pode diminuir até o ponto de ser menor que a pressão mínima na qual ocorre a

vaporização do fluido, isto gerará uma vaporização local do fluido dando origem a bolhas de vapor. Estas bolhas de vapor podem se deslocar para regiões onde a pressão cresça novamente a um valor superior ao da pressão mínima, causando assim a implosão das bolhas.

Eventos sucessivos de implosões perto das pás do hélice podem gerar danos ao componente devido à formação de microtrincas que com o tempo crescem e provocam deslocamento de material da superfície (Baptista, 2003), um exemplo de hélice que sofreu este fenômeno pode ser visto na Fig. (7).

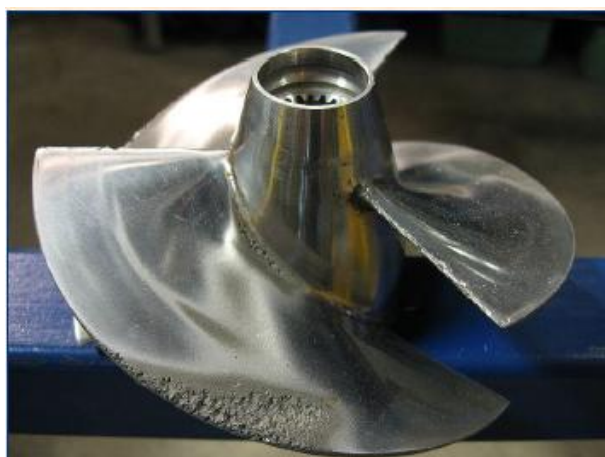


Figura 7 - Consequências da cavitação (Baptista, 2013)

Na Figura (7) é possível analisar o desgaste provocado pela cavitação, as regiões mais afetadas deste hélice foram as extremidades, devido as implosões de bolhas causadas pela diferença de pressão.

A cavitação associada a outros fenômenos físicos e químicos, como por exemplo a abrasão e a corrosão, pode ocasionar a total ineficiência do hélice, gerando assim prejuízos para a indústria náutica.

## 2.2. MECANISMO DE DESGASTE DE MATERIAIS

Segundo a norma DIN 50320, existem quatro mecanismos de desgaste que podem ocorrer separadamente ou em conjunto, os mecanismos são: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica. Ochoa (2007) diz que para quantificar quanto um material é resistente ao desgaste, normalmente é utilizado o método do estudo da taxa de desgaste através da análise de perda de material. Esta análise pode ser feita através da perda de massa, volume ou da redução da espessura, por unidade de área da amostra e por unidade de tempo ou massa de partículas.

Para Cueva (2002) na adesão ocorre a formação e o rompimento subsequente de ligações adesivas interfaciais, isto ocorre em juntas e soldas a frio. Uma característica deste tipo de desgaste é o cisalhamento superficial ou o destacamento de material em função do movimento relativo entre duas superfícies que se desgastam pela ação de partículas soltas.

A abrasão segundo Ramalho (1997) é um fenômeno que ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície metálica em relação à qual estão em movimento. Na abrasão pode ocorrer afastamento de material por sulcamento ou usinagem de material por corte, fadiga e trincamento (Cueva, 2002).

No mecanismo de desgaste superficial ocorre fadiga mecânica (processo de criação e propagação de trincas) devido a existência de tensões cíclicas, resultando em fraturas frágeis rompendo o material.

O último mecanismo é o mecanismo de desgaste por reação triboquímica, que segundo Ribeiro (2004) consiste na usinagem de material ou degradação de propriedades mecânicas devido a ação química ou eletroquímica de meios agressivos, ou devido à usinagem de material por meios mecânicos facilitada pela reação química.

Cueva (2002) afirma que quando duas superfícies deslizam uma sobre a outra, o atrito entre elas provoca temperaturas elevadas em certos pontos da superfície e a velocidade relativa das superfícies influencia diretamente nessas temperaturas. Em velocidades relativas moderadas no deslizamento, alguns metais formam essas regiões de elevadas temperaturas, formando ilhas ou platôs de óxido que podem formar uma camada entre as superfícies que deslizam entre si, reduzindo assim o contato (Hutchings, 1992).

### **2.2.1. Desgaste oxidativo**

Segundo Cueva (2002) a área de contato real entre as superfícies é pequena (asperezas), o que ocasiona elevadas pressões que podem provocar o surgimento de trincas nessas ilhas de óxido gerando partículas não metálicas (debris) devido ao desgaste, se o sistema estiver inserido em um ambiente contendo oxigênio, estas partículas serão constituídas de variados óxidos que variam conforme a temperatura do sistema. Em temperaturas baixas só ocorrerá oxidação nas regiões de contato real, no entanto, em elevadas temperaturas a oxidação pode acontecer em toda superfície.

O mecanismo pelo qual as partículas de óxido se tornam partículas de desgaste pode ser explicado por uma teoria: as regiões de contato real entre as superfícies são as asperezas das superfícies, no contato algumas pontas das asperezas contem óxidos e são quebradas, a nova região será oxidada devido a temperatura e novamente irá se quebrar em um posterior

contato, esse processo é conhecido como oxidação-raspagem-reoxidação. As partículas quebradas se concentram podendo gerar partículas grandes que podem provocar abrasão das superfícies antes de serem removidas. O mecanismo de desgaste oxidativo pode ser observado esquematicamente na Fig. (8).

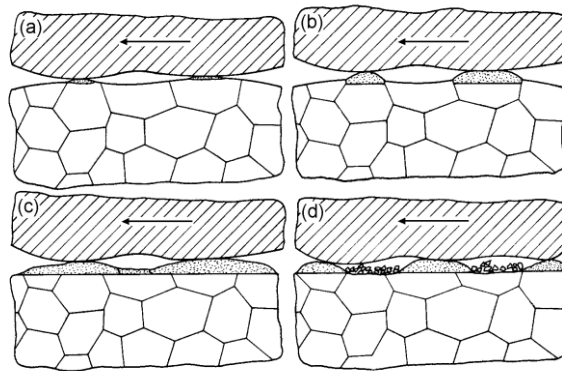


Figura 8 - a) contato entre as asperezas, b) formação de ilhas de óxido, c) crescimento das ilhas de óxido, d) quebra das pontas oxidadas, formação de novas áreas oxidadas e aglomeração de partículas (Zum Gahr, 1987).

Segundo Ochoa (2007) os aços inoxidáveis, principal material utilizado na indústria náutica, apresentam baixas taxas de oxidação quando comparadas nas mesmas condições a outros materiais, isto deve-se graças a camada passiva.

A proteção contra o desgaste oxidativo do aço inoxidável diminui quando este aço é submetido a certas condições termodinâmicas e cinéticas desfavoráveis a camada passiva, causando sua instabilidade e modificando parâmetros fundamentais como a espessura, composição química, estrutura cristalina, propriedades mecânicas e elétricas.

A instabilidade da camada pode ser causada por diversos fatores, os principais são devido a defeitos na camada protetora de óxido. Segundo Lula (1986) há quatro formas fundamentais de oxidação em metais: corrosão intergranular, corrosão por pite, em fresta e a corrosão sob tensão.

Para Ochoa (2007) os pites são pequenos furos com diâmetro normalmente igual a sua profundidade, eles são geralmente encontrados isoladamente em metais que possuem uma camada passiva, exemplos de pites são vistos na Fig. (9) e (10).

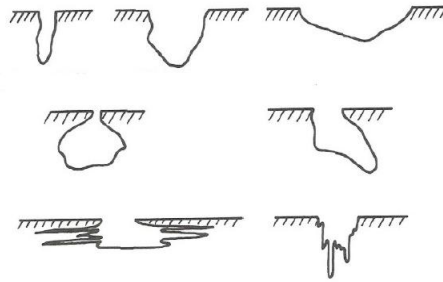


Figura 9 - Geometria de diferentes pites (ASTM – G 48)

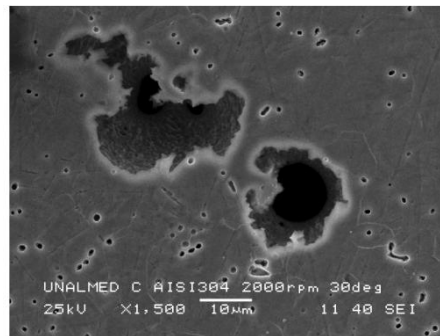


Figura 10 - Pites na superfície de aço AISI 304 (Ochoa, 2007)

O ambiente aquoso no qual há presença de íons cloreto, íons hipoclorito ou íons brometo é ideal para o surgimento do desgaste por pite em aços. Outros fatores preponderantes para o surgimento destes furos é a temperatura e velocidade do meio.

### 2.2.2. Desgaste por fadiga superficial

Em superfícies sólidas que estão sujeitas a carregamentos cíclicos ocorre o fenômeno conhecido como fadiga superficial que ocasiona um desgaste, a falha do componente ocorrerá graças a propagação de trincas que diminuirá a área sujeita ao carregamento, aumentando assim as tensões, até o ponto onde o material irá falhar por fratura frágil.

Segundo Cueva (2002) em superfícies em contato que possuem um movimento relativo entre si (rolamento ou deslizamento) ou que estão sujeitas a impactos de partículas sólidas ou líquidas, podem surgir tensões dinâmicas superficiais que ocasionam o fenômeno conhecido como fadiga superficial. No deslizamento as superfícies estão sujeitas a carregamentos dinâmicos que podem gerar trincas na superfície e/ou abaixo dela, que se propagam ao longo do tempo provocando o destacamento de partículas de material quando a trinca alcança a superfície, o esquemático do mecanismo é visto na Fig. (11).



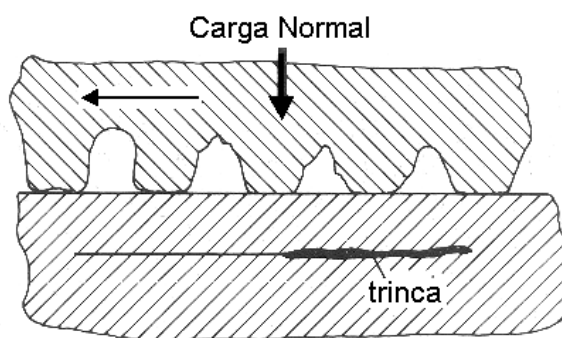


Figura 11 - Fadiga sub-superficial propagando-se paralela à superfície (Gahr., 1987)

Em superfícies em contato a força normal será a responsável por desempenhar o papel do carregamento dinâmico juntamente com a força de atrito (Fig, 11) - que tem uma componente adesiva (Cueva, 2002) - na área de contato das superfícies.

Em superfícies que possuem um movimento relativo entre si do tipo deslizamento, segundo Cueva (2002) nas superfícies de contato real (asperezas) ocorre a formação de forças atrativas que podem ser de caráter covalente, iônico, metálico ou de Van der Waals. Pelo fato das asperezas serem pequenas, altas pressões de contato são formadas provocando deformação plástica, adesão e criação de junções localizadas, que são rompidas durante o deslizamento provocando transferência de material de uma para outra ou criando partículas de desgastes.

### 2.2.3. Desgaste abrasivo

No desgaste abrasivo segundo Cueva (2002) o desgaste propriamente dito pode ocorrer de dois modos: pelo movimento de partículas duras (abrasivas) entre as superfícies que estão em contato ou por uma das superfícies conter essas partículas que em contato com a outra superfície provoca o desgaste.

Os motivos pelos quais podem existir partículas abrasivas entre as superfícies de contato podem ser vários, pode ocorrer que um dos componentes tenha em sua superfície resquícios de materiais utilizados no seu processo de fabricação, outra possibilidade é que partículas advindas do desgaste encruem em uma das superfícies.

Em situações nas quais duas superfícies em contato possuam diferenças de dureza, pode ocorrer desgaste abrasivo, ou seja, um processo de usinagem é um processo de desgaste abrasivo, no entanto, nem todo desgaste abrasivo é uma usinagem. Os mecanismos deste tipo de desgaste são: sulcamento, corte, fadiga e trincamento. Os mecanismos são vistos na Fig. (12).

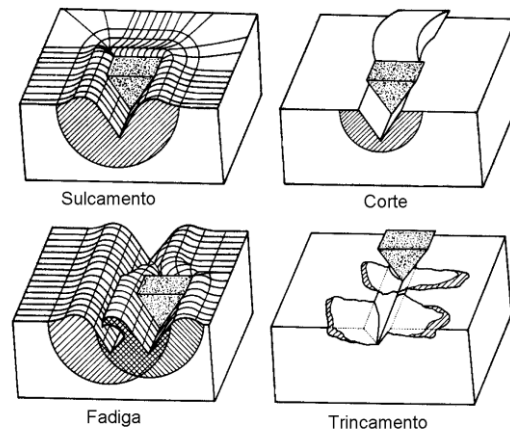


Figura 12 - Mecanismos do desgaste abrasivo (Gahr, 1987)

No mecanismo de sulcamento visto na Fig. (12), Cueva (2002) diz que se for considerada a passagem de apenas uma partícula abrasiva contra a superfície, esta não provocará a usinagem de material, no entanto, formará um sulco, pois o material será deslocado para os lados. Se mais de uma partícula abrasiva for atritada repetidamente contra a superfície ocorrerá o destacamento de uma lasca, em um processo conhecido como fadiga de baixo ciclo.

No mecanismo de corte ocorre usinagem de material, provocado pelo atrito da partícula abrasiva. O material usinado será diretamente proporcional ao sulco formado, tanto o mecanismo de corte quanto o de sulcamento são os mais típicos em materiais dúcteis e a quantidade de material usinado ou deslocado dependerá do ângulo de ataque da partícula dura, quanto maior for o ângulo de ataque maior será o desgaste (Cueva, 2002), esta relação pode ser vista na Fig. (13).

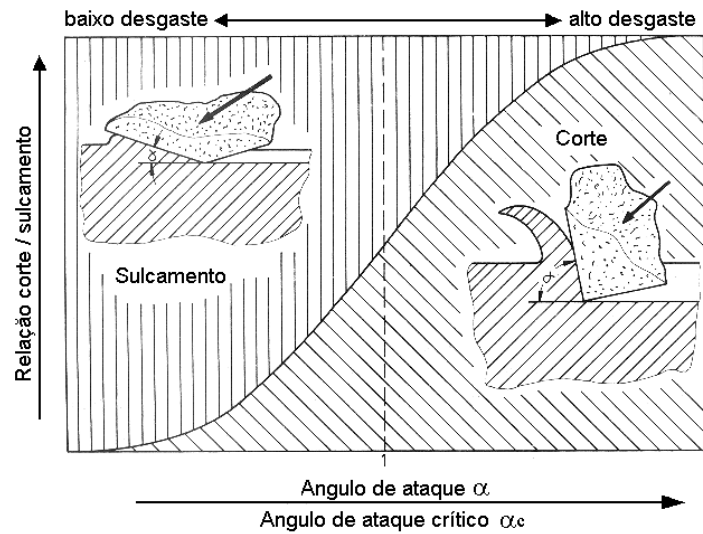


Figura 13 - Relação entre ângulo de ataque nos mecanismos de corte e sulcamento com a taxa de desgaste (Gahr, 1987)

#### 2.2.4. Desgaste erosivo

O impacto de partículas sólidas ou de um fluido multicomponente sobre uma superfície ocasionando dano é caracterizado como desgaste erosivo pela norma ASTM G76. Tanto o desgaste abrasivo quanto o erosivo são bastante prejudiciais aos materiais que possuem uma camada protetora contra a oxidação, caso dos aços inoxidáveis. A presença destes dois tipos de desgastes no mesmo meio gera o aumento da taxa de desgaste do material atacado devido o somatório dos danos de cada desgaste, um exemplo de material submetido a combinações de desgastes pode ser visto na Fig. (14).



Figura 14 - Rotor de uma bomba submetido à erosão e corrosão (Ochoa, 2007)

O estudo do desgaste erosivo é bastante complexo devido a diversos fatores, o principal está em relação ao tempo de interação entre a partícula e a superfície desgastada, por tratar-se de um tempo curto o fenômeno é caracterizado como de natureza dinâmica.

Atualmente os modelos utilizados para estudo deste fenômeno não são totalmente fiéis aos resultados encontrados experimentalmente, os principais modelos utilizam propriedades estáticas por serem mais fáceis de trabalhar e pelos resultados aproximarem-se dos que utilizam propriedades dinâmicas. Segundo Ochoa (2007) a principal desvantagem dos modelos existentes está no fato de não interpretarem a erosão como uma sequência de múltiplos eventos e sim como um único evento que se repete constantemente.

Por tratar-se de um evento complexo é necessário a utilização de múltiplas variáveis para a construção de um modelo para estudo, entre as mais utilizadas pelos diversos modelos existentes estão o ângulo de impacto das partículas erosivas, velocidade de impacto, dureza da partícula e outras mais.

#### 2.2.4.1. Influência do tamanho da partícula abrasiva

Ensaio de erosão foram feitos por Tabakoff (1983) em liga Inconel 600 utilizando como partícula abrasiva o quartzo com tamanho variando entre 70 e 800  $\mu\text{m}$ , os resultados obtidos indicaram que a taxa de desgaste aumenta conforme o tamanho da partícula abrasiva aumenta, estes resultados são vistos na Fig. (15).

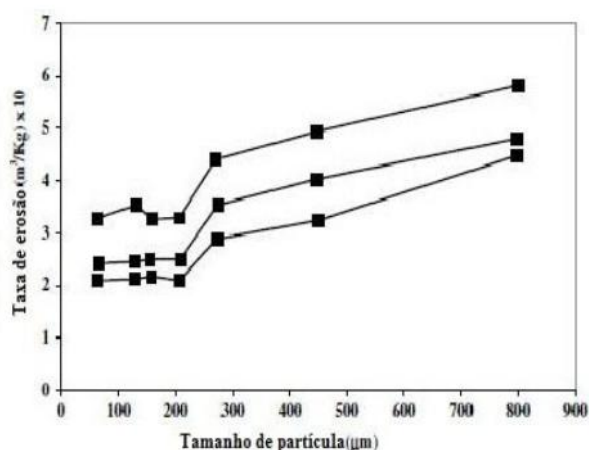


Figura 15 - Influencia do tamanho da partícula (Tabakoff, et al., 1983)

Zhou (1989) investigou a taxa de desgaste do aço inox 304 submetido a desgaste erosivo-corrosivo com partícula abrasiva de SiC, a temperatura de trabalho do teste foi de  $650^\circ\text{C}$ , ângulo de impacto de  $30^\circ$  e velocidade da partícula abrasiva de 65 m/s, os resultados são mostrados na Fig. (16).

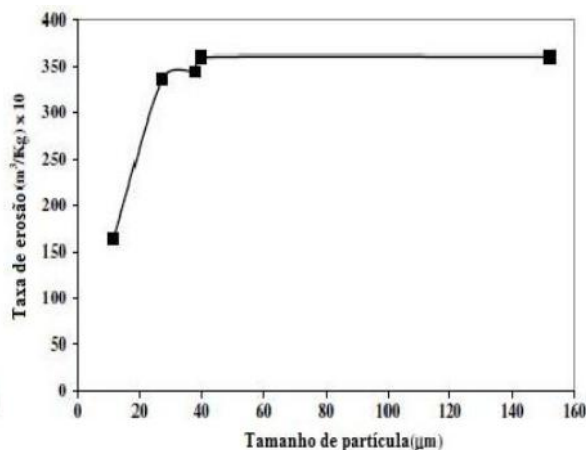


Figura 16 - Efeito do tamanho da partícula no desgaste erosivo do aço inox a 650°C (J.Zhou, et al., 1989)

Pelo gráfico é possível notar que há praticamente um aumento constante da taxa de desgaste até o tamanho 40µm, logo em seguida a taxa torna-se constante independentemente do tamanho da partícula abrasiva.

Os resultados mostram que a taxa de desgaste aumentou conforme a partícula abrasiva aumentava, no entanto, esta análise só é válida para estes ensaios, ou seja, para cada situação diferente - outro tipo de partícula abrasiva, outro material a ser desgastado ou qualquer outro parâmetro diferente - uma nova análise deve ser feita.

#### 2.2.4.2. Influência do ângulo de impacto da partícula abrasiva

O ângulo de impacto da partícula abrasiva é um importante variável para o estudo do desgaste erosivo, Finnie (1995) apresentou resultados experimentais mostrados na Fig. (17).

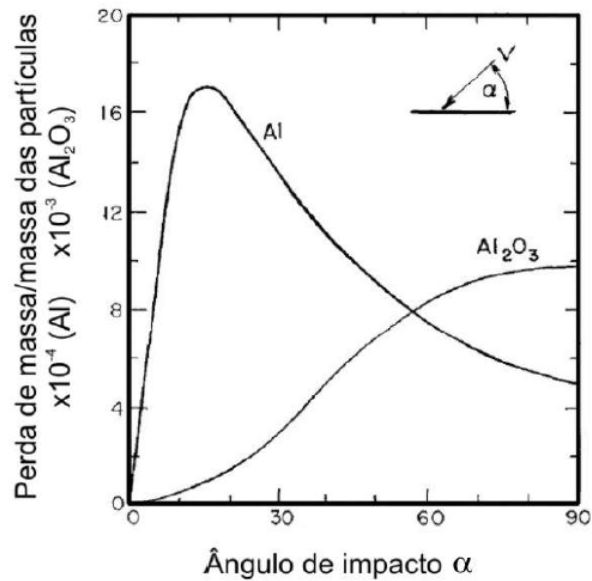


Figura 17 - Influencia do ângulo de impacto na taxa de erosão (Finnie, 1995)

O comportamento de amostras de alumínio e de alumina submetidas a desgaste erosivo utilizando partículas de SiC a  $152 \text{ ms}^{-1}$  são vistas na Fig. (17), a liga de alumínio (material dúctil) apresentou uma crescente taxa de desgaste até atingir seu máximo em aproximadamente  $20^\circ$  e posteriormente houve um decaimento. O comportamento da alumina, material mais frágil, apresentou desgaste máximo em  $90^\circ$ , ou seja, quando o impacto com as partículas era normal a superfície da amostra.

#### 2.2.4.3. Influência da velocidade de impacto da partícula abrasiva

A velocidade é outra variável fundamental utilizada nos modelos existentes, segundo Hutchings (1992) ela se relaciona com a taxa de desgaste no desgaste erosivo. Na Figura (18) é possível notar o comportamento de uma amostra de cobre submetida a impactos de partículas de SiC.

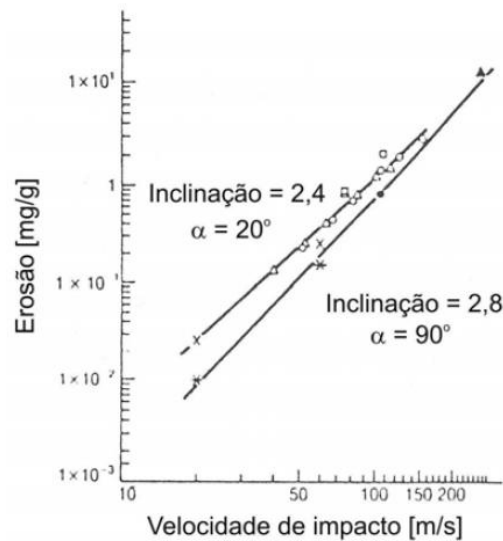


Figura 18 - Taxa de erosão em função da velocidade de impacto (Hutchings 1992)

No gráfico da Fig. (18) é possível perceber que a taxa de desgaste cresce conforme é aumentada a velocidade de impacto das partículas para ambas as amostras em diferentes ângulos, no entanto, para um ângulo reto o segmento de reta possui maior inclinação mostrando que a para este caso a combinação entre ângulo reto e aumento da velocidade causará mais danos as amostras.

Para velocidades muito altas a tendência é que ocorra aquecimento do material e fusões localizadas aconteçam, como pode ser visto esquematicamente na Fig. (19).

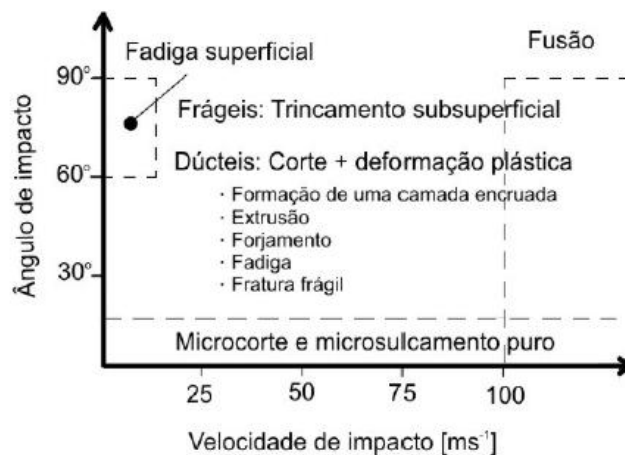


Figura 19 - Influência da velocidade e do ângulo nos mecanismos de desgaste (Ochoa, 2007)

No entanto, em situações onde há presença de fluido líquido misturado as partículas abrasivas, a elevação da temperatura do material desgastado será contida, Levy e Yau observaram que a taxa de erosão se alterará como é visto na Fig. (20).

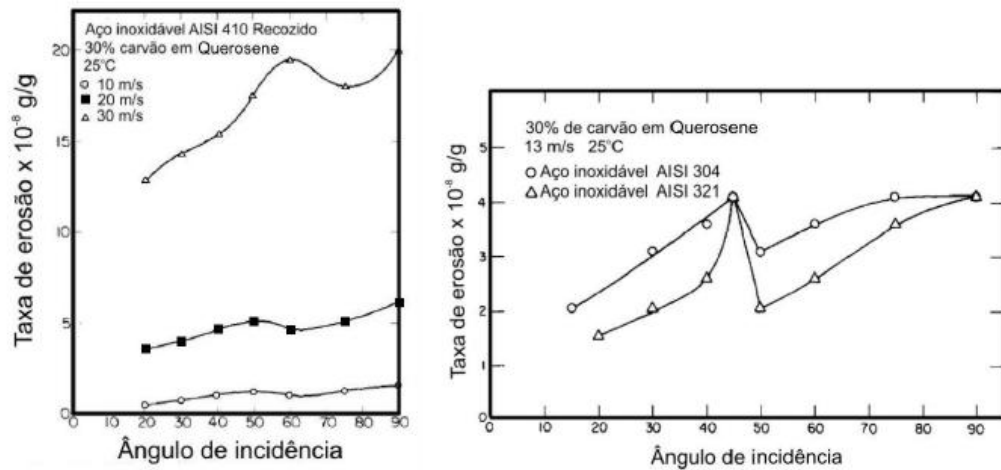


Figura 20 - Efeito da velocidade e ângulo de impacto na taxa de erosão de um aço inoxidável martensítico e um austenítico em um meio aquoso, respectivamente (Ochoa, 2007)

Em um material dúctil o pico máximo da taxa de erosão ocorrerá principalmente em ângulos retos, no entanto há ainda incidências de picos em ângulos intermediários, esta diferença está relacionada com o efeito da viscosidade e da camada limite do líquido na superfície do corpo de prova (Levy, et al., 1984).

#### 2.2.4.4. Influência da dureza da partícula abrasiva e do material desgastado

Segundo Ribeiro (2004) um fator que influencia a taxa de desgaste é o coeficiente de dureza, razão entre a dureza da partícula abrasiva ( $H_a$ ) e a dureza da superfície desgastada ( $H_m$ ). Na Figura (21) é possível perceber a influência das durezas na taxa de desgaste.



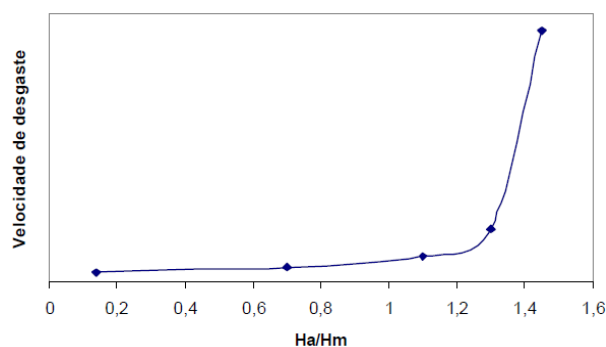


Figura 21 - Velocidade de desgaste em função da dureza dos elementos (partícula abrasiva e superfície desgastada) (Wainer, et al., 1992)

No gráfico percebe-se que o coeficiente de dureza influenciou significativamente na taxa de desgaste, entre o intervalo de 0,2 e 1,2 a velocidade de desgaste não se altera muito devido a dureza da superfície desgastada ser maior. A partir de 1,2 a taxa de desgaste aumenta consideravelmente, pois a dureza da partícula abrasiva é maior.

### 2.2.5. Recobrimentos resistentes ao desgaste abrasivo-erosivo

Ribeiro (2004) em sua dissertação de mestrado diz que as ligas Fe-C-Cr são utilizadas como recobrimentos para resistir ao desgaste abrasivo, estes revestimentos são feitos através do processo de soldagem por eletrodo revestido. Estas ligas de revestimento normalmente possuem na sua composição química carbono e cromo, com teores de 1,2 a 4% de carbono e de 6 a 40% de cromo.

Fatores como dureza relativa entre as fases, tamanho, forma, estabilidade, distribuição das partículas são fatores que segundo Ribeiro (2004) podem influenciar no comportamento ao desgaste abrasivo de uma liga. Os carbonetos  $M_7C_3$  possuem alto nível de dureza e contribuem para a resistência ao desgaste, no entanto, o fato deles serem frágeis e o modo pelo qual estão presos a matriz podem contribuir na ocorrência ou não de trincas durante a abrasão.

Ribeiro (2004) cita que ensaios nos quais amostras de ligas de ferro fundido de alto cromo, contendo entre 10 e 40% em fração volumétrica de carbonetos de cromo tipo  $M_7C_3$  foram submetidas a ensaios de desgaste abrasivo em roda de borracha, com dois tipos de partícula abrasiva, areia semi arredondada e alumina. A taxa de desgaste com o abrasivo tipo areia diminuiu consideravelmente para frações volumétricas intermediárias, correspondentes à liga de composição eutética.

A resistência ao desgaste para os dois abrasivos também aumentou consideravelmente com fração volumétrica de carbonetos nas ligas hipoeutéticas, já em composições hipereutética a resistência ao desgaste diminuiu em situações na qual se utilizava areia como abrasivo, Ribeiro diz que isso ocorreu devido o trincamento dos carbonetos.

Ribeiro conclui que com o aumento das frações volumétricas de carbonetos  $M_7C_3$  em ligas hipoeutéticas devido a adição de Cr e C aumenta-se a resistência ao desgaste abrasivo.

### 2.3. ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO – ABRASIVO

Como dito anteriormente o estudo dos tipos de desgastes é um tema bastante complexo que envolve diversos parâmetros, esta complexidade aliado aos diversos métodos de ensaio existentes dificulta a comparação de resultados obtidos experimentalmente.

Segundo Ribeiro (2004) estima-se que 50% dos problemas ocorridos na indústria e que estão relacionados ao desgaste são decorrentes do desgaste por abrasão. Com o intuito de estudar este tipo de desgaste e diminuir os prejuízos causados na indústria, vários métodos de ensaio foram desenvolvidos para estudo da abrasão a três corpos (corpo de prova, roda giratória e partícula abrasiva), a maioria deles tem como base as normas: ASTM – norma G 65 (ensaio de abrasão por roda de borracha e areia seca), norma G 105 (ensaio de abrasão por roda de borracha e areia molhada) e a norma B 611 (ensaio de abrasão por roda de aço e areia molhada, especificamente para carbonetos cementados). A máquina utilizada para realização do teste é vista na Fig. (22).

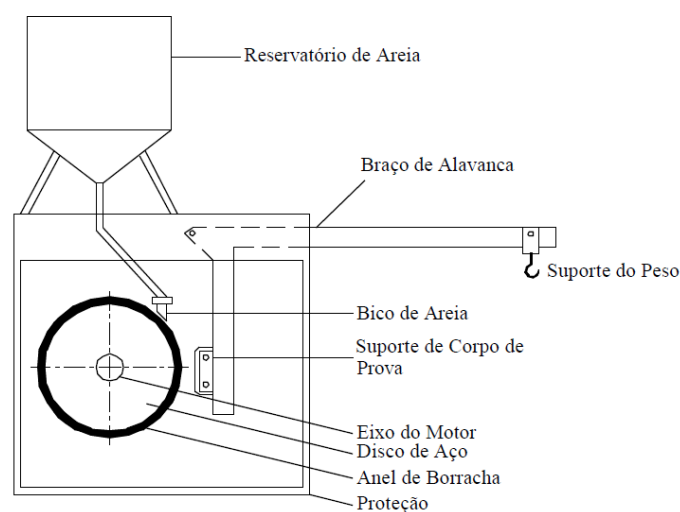


Figura 22 - Esquemático do equipamento utilizado pela norma ASTM G 65-91 (ASTM, 1991)

O procedimento consiste em pesar o corpo de prova antes do ensaio e colocá-lo no suporte, o abrasivo (areia) com tamanho e composição controlados é introduzido entre o corpo de prova e o anel de borracha na máquina com uma vazão de 300 a 400 g/min. O objetivo do teste é esmerilhar o corpo de prova através do pressionamento dele contra a roda de borracha que está girando. Para um estudo comparativo de diversos metais submetidos a este ensaio é necessário a conversão da perda de massa para perda de volume em milímetros cúbicos, devido as possíveis diferenças dos materiais (Ribeiro, 2004).

Para o estudo do desgaste de abrasão e impacto (erosivo) Kennedy, et al.. (1996) apresentaram um equipamento para criação de uma rotina experimental. Um corpo de prova é fixado junto a uma mesa posicionada sobre uma base presa a quatro pilares através de guias deslizantes.

Para a simulação de ensaios de impacto a mesa deve mover-se verticalmente forçando o corpo de prova contra o dispositivo abrasivo, preso logo acima. Em ensaios de abrasão o dispositivo abrasivo é movimentado horizontalmente sobre a amostra por meio de um ajustador excêntrico.

Kennedy (1996) utilizaram o equipamento da Fig. (23) para ensaio de amostras de alumínio e aço moderado em situações nas quais os dois desgastes (abrasivo e erosivo) ocorrem. No ensaio foi utilizado carboneto de tungstênio com raio de 2mm como dispositivo abrasivo e os resultados mostraram os efeitos do desgaste abrasivo-erosivo em diferentes velocidades.

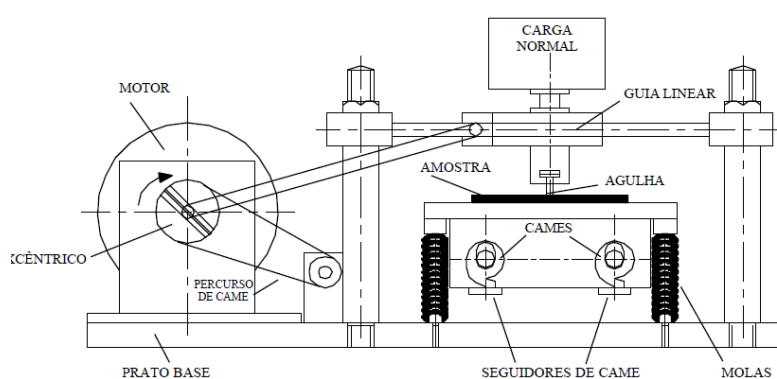


Figura 23 - Equipamento de ensaio de desgaste por impacto e abrasão (Kennedy, et al., 1996)

Oliveira (2015) estudou o desgaste erosivo sofrido por um aço inoxidável de um hélice de moto aquática, tipo Jet Ski, para tanto construiu um equipamento para realização do seu

estudo. O equipamento é constituído por um motor de 3440 RPM e um suporte no qual as amostras de hélices eram fixadas, como é mostrado na Fig. (24).



Figura 24 - Máquina de desgaste construída por Oliveira (2015)

Nos ensaios, amostras do material da hélice (aço inoxidável) se movimentavam dentro de um recipiente contendo uma solução aquosa com abrasivos. No estudo foi avaliada a influência do tratamento superficial no desgaste erosivo; para isto, amostras com suas superfícies polidas e outras jateadas foram examinadas.

## **OBJETIVOS**

O objetivo geral do presente trabalho é fazer um estudo comparativo do desgaste erosivo – abrasivo de aços inoxidáveis e de aços de baixo carbono utilizadas na fabricação de componentes náuticos (hélice de rotores).

### **Objetivos específicos:**

- Adaptar uma bancada de ensaios de desgaste erosivo-abrasivo construída por Cueva (2015), na Universidade de Brasília, para realizar ensaios de desgaste, em condições diferentes as utilizadas pelo pesquisador.
- Verificar o correto funcionamento da máquina por meio de ensaios preliminares de desgaste realizados em amostras de aço carbono, SAE 1020.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de amostras de aço carbono submetidas ao desgaste erosivo-abrasivo, para realização deste estudo foi realizado um experimento inspirado no trabalho de Cueva et. al. (2015), os seguintes equipamentos foram utilizados:

- Máquina de desgaste erosivo-abrasivo

O equipamento foi desenvolvido por Cueva et. al. (2015), o intuito da máquina é estudar o comportamento de materiais utilizados na fabricação de hélices de embarcações náuticas quando submetidas ao desgaste erosivo-abrasivo. A máquina pode ser vista na Fig. (25).



Figura 25 – Estrutura inicial e estrutura com modificações, respectivamente

A máquina é constituída por um motor trifásico de 1710 RPM, no qual em seu eixo de saída é acoplado uma polia de 210mm de diâmetro para transmissão de movimento através de uma correia para outra polia de 150mm diâmetro. Através das relações envolvendo diâmetro das polias e velocidade angular das mesmas foi possível alcançar uma velocidade tangencial nas amostras de 15,3m/s que está dentro do intervalo de 15 a 45m/s, que segundo Cueva (2015) são as velocidades em condições de uso recreativo de uma moto náutica (Jet Ski).

Na polia de menor diâmetro é acoplado um eixo, no qual foi fixado um disco porta-amostras, como pode ser visto na Fig. (26).

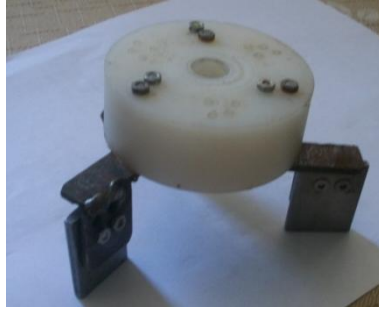


Figura 26 – Disco porta-amstras

O porta-amstras possui um diâmetro externo de 120mm, e diversos furos que permitem a fixação das amostras com ângulos de:  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ . Em cada ensaio, três amostras foram fixadas ao suporte em um ângulo determinado. Um exemplo de posicionamento das amostras é mostrado na Fig. (27).

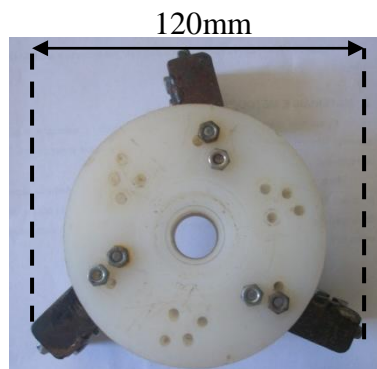


Figura 27 - Amostras posicionadas em um ângulo 60 graus

As amostras fixadas ao suporte foram ensaiadas dentro de uma solução aquosa de quinze litros de água com duzentos gramas de areia. A concentração de 13,3g de areia para cada litro de água foi escolhida por tratar-se de uma concentração rica em abrasivo, o que permitiu uma taxa de desgaste acelerada durante o experimento.

O galão de água no qual a solução aquosa de areia e água foi mantida pode ser vista na Fig. (28). O galão possui diâmetro interno de 267mm e encontra-se concêntrico ao eixo no qual o suporte com as amostras está fixado.

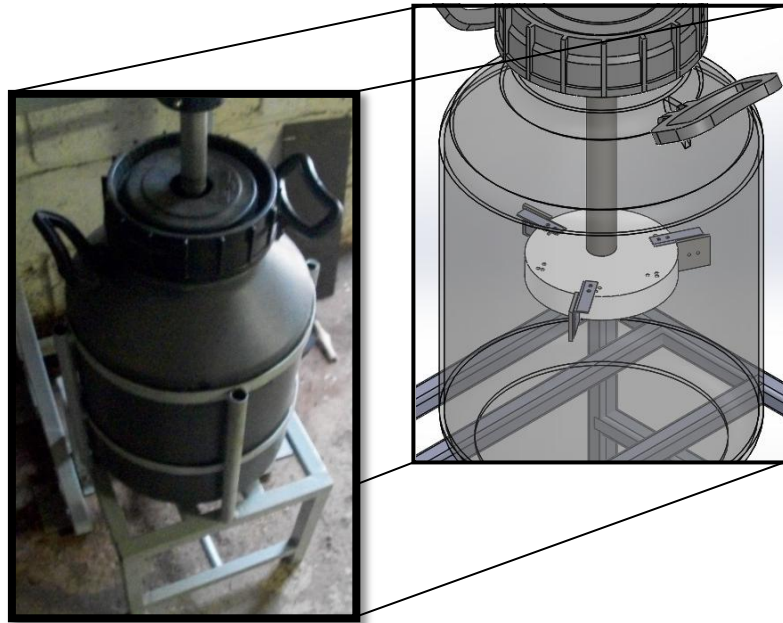


Figura 28 – Sistema no qual as amostras são inseridas

- Amostras de aço 1020

As amostras utilizadas no ensaio foram de aço 1020, com dimensões de trinta e cinco milímetros de comprimento por vinte e cinco milímetros de largura e quatro milímetros de espessura.

As amostras possuem estas dimensões, pois são próximas das utilizadas por Oliveira (2015) e Cueva (2015) em seus trabalhos com aço inoxidável extraídas de um hélice de Jet ski. As amostras são vistas na Fig. (29).



Figura 29 - Amostras de aço 1020

Para a realização dos ensaios as superfícies das amostras passaram por lixamento com lixas d'água até lixa 1200. Este processo foi realizado entre um experimento e outro para que a superfície não influenciasse no próximo experimento.

- Areia com granulometria entre 710 $\mu$ m e 1mm

Duas peneiras industriais foram utilizadas para atingir a granulação entre 710 $\mu$ m e 1 mm nas partículas de areia. Na Fig. (30) é visto a peneira de 710 $\mu$ m.



Figura 30 - Peneira industrial Bertel

Este intervalo de granulação foi escolhido por tratar-se de um tamanho de partícula razoavelmente grande, o que implicaria em um desgaste maior e mais acelerado das amostras, tornando o ensaio mais curto em relação ao tempo.

- Balança de precisão

Para medição das massas das amostras e da areia utilizadas no ensaio foi utilizada a balança semi-analítica OHAUS, que possui precisão de quatro casas decimais. A balança é vista na Fig. (31).



Figura 31 - Balança Semi-Analítica OHAUS

A metodologia do experimento divide-se nas seguintes etapas:

Etapa 1: Lixar as amostras com lixa até 1200.

Etapa 2: Limpar as amostras com água e secá-las.



Etapa 3: Pesar e anotar o valor da massa das amostras.

Etapa 4: Fixar as amostras ao suporte em um determinado ângulo, inseri-las dentro do galão com solução de água e areia, e ligar a máquina.

Etapa 5: Após 30 minutos, retirar as amostras, limpá-las com água, secar para pesá-las e anotar o valor da massa da amostra. Esta etapa é repetida quatro vezes, totalizando duas horas de teste para cada ângulo.

Etapa 6: Repetir todas as etapas anteriores para outro ângulo de impacto e nova solução aquosa de água e areia nas mesmas proporções.

Para cada ângulo será coletado os dados (massas das amostras), para assim ser feito o cálculo da taxa de desgaste, perda de massa da amostra por área desgastada para cada amostra.

Na Tabela (2) é possível ver resumidamente o esquemático dos ensaios realizados.

Tabela 2 - Esquemático do ensaio de desgaste abrasivo-erosivo

| Ensaio | Amostras | Partícula abrasiva | Ângulo de impacto |     |     |     |     |
|--------|----------|--------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|
|        |          |                    | 0°                | 30° | 45° | 60° | 90° |
| 1      | X        | x                  | x                 |     |     |     |     |
| 2      | X        | x                  |                   | x   |     |     |     |
| 3      | X        | x                  |                   |     | x   |     |     |
| 4      | X        | x                  |                   |     |     | x   |     |
| 5      | X        | x                  |                   |     |     |     | x   |

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A taxa de desgaste média do experimento é vista na Fig. (32). No gráfico nota-se a maior taxa de desgaste ocorreu com as amostras ensaiadas com ângulo de 90° seguido dos ângulos de 30° e 45°. Verifica-se também, que os desgastes das amostras ensaiadas a 0 e 60° são praticamente iguais entre si.

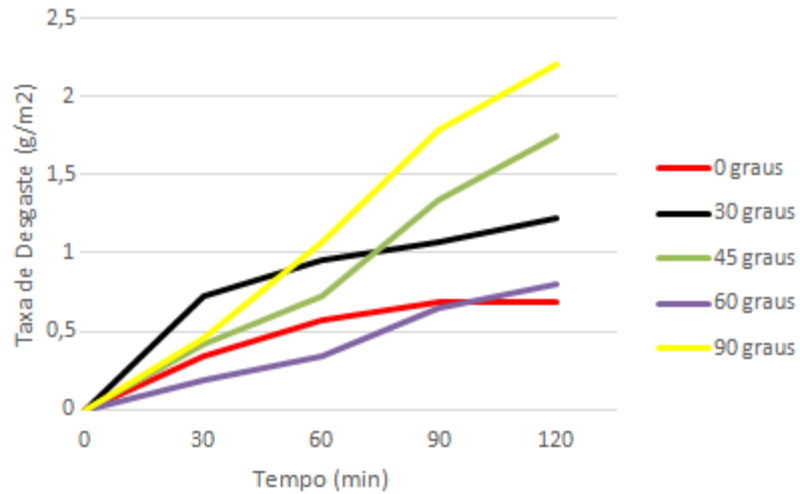


Figura 32 - Taxa de desgaste média para as três amostras

A posição das curvas contraria outros resultados encontrados na literatura científica (Finnie, 1995), onde a taxa de desgaste em materiais dúcteis é maior para ângulos mais agudos, pois o mecanismo de corte é mais atuante do que a deformação plástica que ocasionará perda de material por fadiga superficial, como mostrado esquematicamente na Fig. (33).

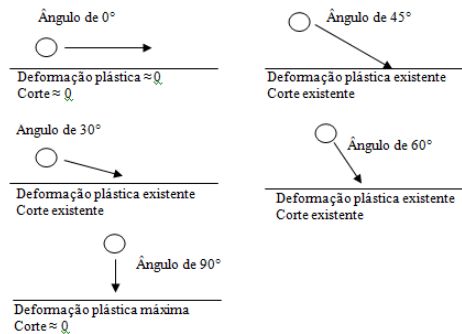


Figura 33 - Esquemático de desgaste em diferentes ângulos

Neste trabalho, a tendência da taxa de desgaste esperada para o ângulo de  $0^\circ$  foi atingida (ser a menor), assim como a tendência da taxa de desgaste do ângulo de  $60^\circ$  ser menor que a de  $30^\circ$  e  $45^\circ$ .

Uma das causas que explicaria a posição das curvas obtidas estaria relacionada com o sistema no qual o ensaio foi realizado: a parede interna do galão fica muito próxima das amostras, como é visto na Fig. (34). E durante a movimentação da solução aquosa, a turbulência gerada promoveria também, a incidência de partículas abrasivas em ângulos diferentes aos selecionados inicialmente.

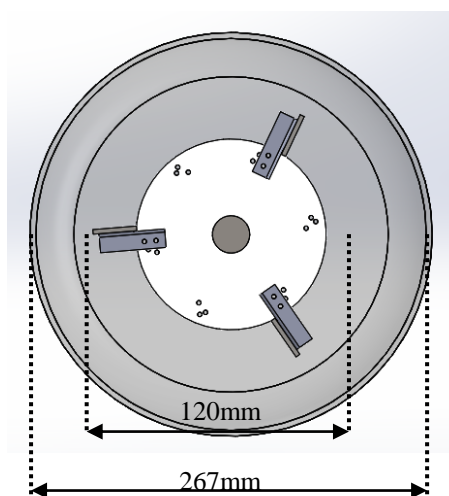


Figura 34 - Suporte com amostras dentro do galão

A dinâmica do sistema causa movimentos repetitivos das partículas abrasivas, ou seja, a partícula ao se chocar com a amostra é repelida na direção da parede interna do galão causando novamente uma repulsão. As situações demonstradas nas Fig. (35), Fig. (36), Fig. (37), Fig. (38) e Fig. (39) nas quais a amostra é fixada em ângulos de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$  respectivamente, serão analisadas antes e depois do impacto.

A partícula abrasiva será entendida como um corpo esférico perfeito, a superfície impactada da amostra como sendo perfeitamente polida e a velocidade da partícula após a colisão com a amostra como sendo de 15,3m/s (velocidade tangencial da amostra). A distância entre as amostras e a parede interna do galão é de 73,5mm, portanto após atingir a amostra a partícula demorará 0,0048 segundos para alcançar a parede do galão.

Levando em consideração o tempo descrito anteriormente, as rotações por minuto das amostras (1221RPM) e os ângulos de impacto da partícula, cada suporte contendo as amostras estará aproximadamente na posição indicada nas figuras a seguir.

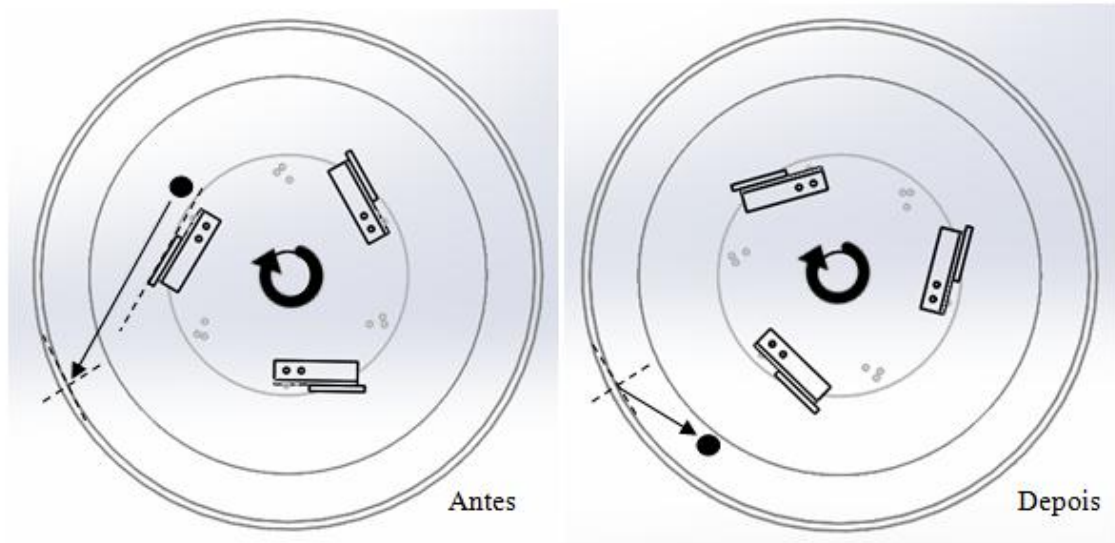


Figura 35 - Partícula abrasiva impactando amostra a  $0^\circ$

Na Fig. (35) é possível perceber, que a teoricamente a partícula não atingiria a amostra, no entanto, a dinâmica do sistema (turbulência da solução, partícula ricocheteada) causa o impacto da amostra com a partícula abrasiva em algum momento, ocasionando desgaste. Mesmo com estes desgastes o ângulo de  $0^\circ$  continua sendo o de menor taxa de desgaste.

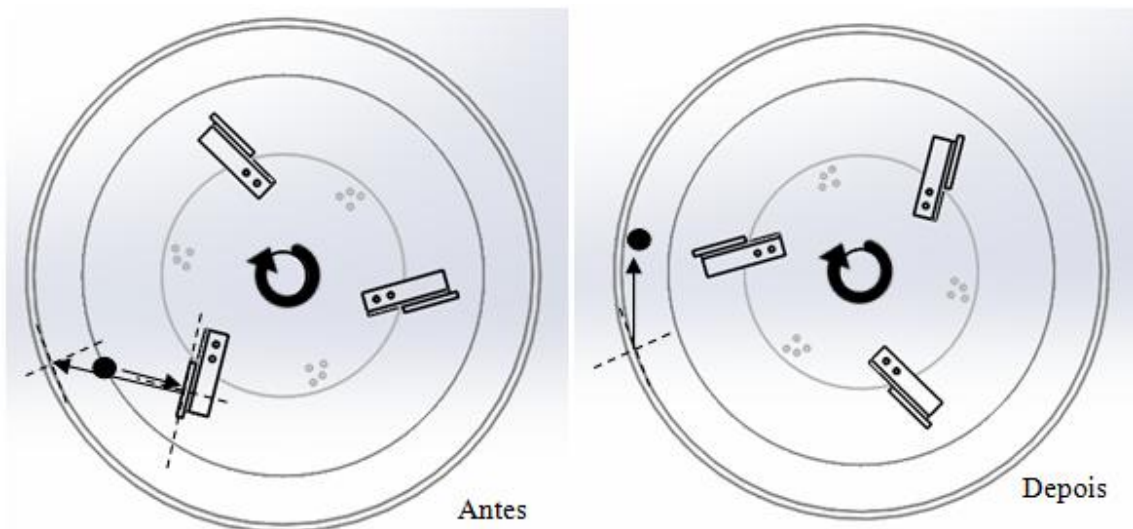


Figura 36 - Partícula impactando amostra a  $30^\circ$

Na Fig. (36) é possível perceber, que após a partícula atingir a amostra ela é repelida contra a parede interna do galão atingindo-a e sendo novamente repelida. Após esta repulsão a partícula poderá ser repelida de forma a impactar a próxima na amostra.

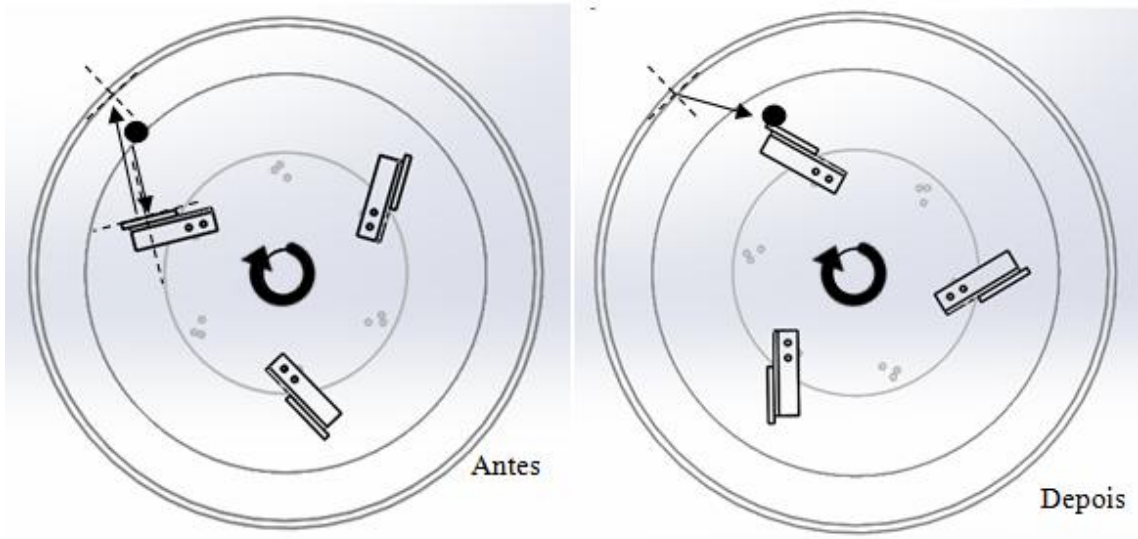


Figura 37 - Partícula abrasiva impactando amostra a  $45^\circ$

Na Fig. (37) é possível perceber, que a partícula ao atingir a amostra posicionada em um ângulo de  $45^\circ$  é repelida para a parede interna do galão, sendo novamente repelida ao impactar a parede, o que pode ocasionar que ela impacte a próxima amostra.

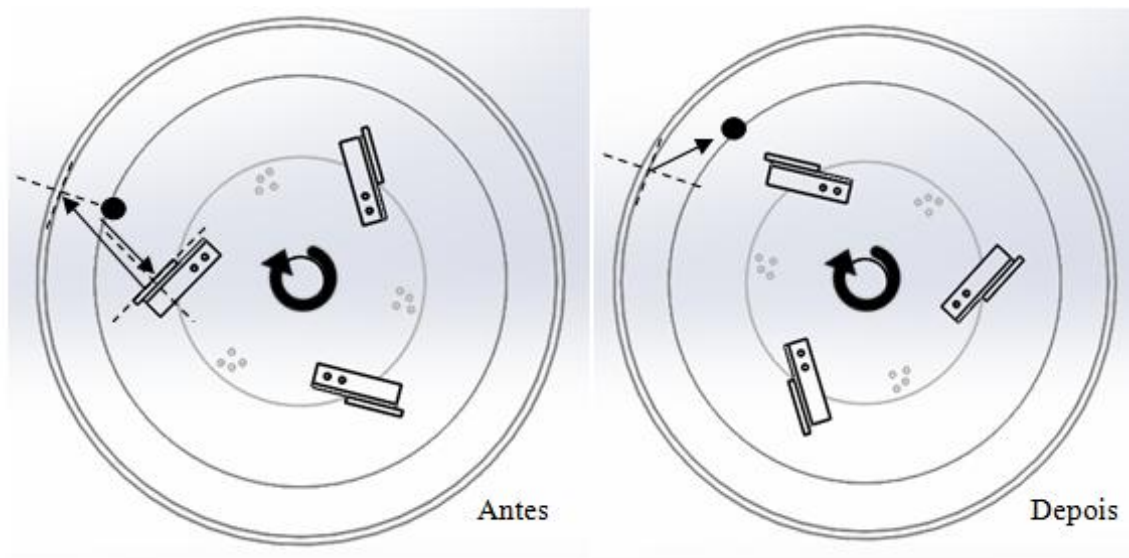


Figura 38 - Partícula impactando a amostra a  $60^\circ$

Na Fig. (38) é possível perceber, que a partícula ao atingir a amostra em um ângulo de  $60^\circ$  é repelida para a parede interna do galão em um ângulo de  $30^\circ$ , sendo novamente repelida ao impactar a parede, podendo não impactar a próxima amostra.

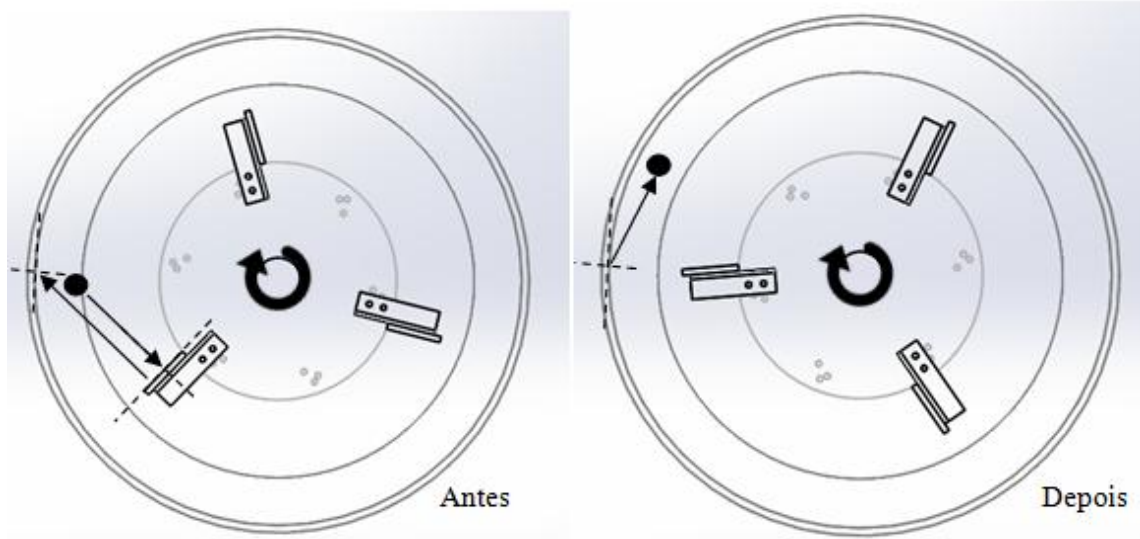


Figura 39 - Partícula abrasiva impactando amostra a  $90^\circ$

Na situação vista na Fig. (39), a partícula atinge a amostra em um ângulo de  $90^\circ$ , sendo impulsionada contra a parede do galão em um ângulo reto, o que ocasionará outra repulsão, só que desta vez possivelmente na direção contrária a da próxima amostra.

As situações descritas nas figuras anteriores podem influenciar nos resultados, pois as partículas são repelidas podendo atingir ou não a próxima amostra, no entanto, os resultados seguem a algumas tendências vistas na literatura à respeito do tema.

## 5. CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho que estudou o comportamento de amostras de aço carbono 1020 submetidas ao desgaste erosivo-abrasivo e após análise dos resultados pode-se concluir que:

- A máquina construída com o intuito de estudar o desgaste abordado neste trabalho atendeu aos requisitos do trabalho, pois alcançou uma tendência parecida nos resultados quando comparados com a literatura já existente.
- A taxa de desgaste seguiu a tendência de ser a menor para o ângulo de  $0^\circ$ , pois nesta situação teoricamente não ocorre mecanismo de retirada de material por corte nem por fadiga superficial, apenas por sulcamento.
- Ângulos agudos como  $30^\circ$  e  $45^\circ$  foram os que mais retiraram material das amostras durante os experimentos, a retirada de material deu-se pelos mecanismos de corte e sulcamento.
- A taxa de desgaste das amostras dúcteis para o ângulo de  $90^\circ$  segundo a literatura deveria ser menor quando comparada a ângulos de  $30^\circ$  e  $45^\circ$  e maior quando comparada ao ângulo de  $0^\circ$ , no entanto, a influência da dinâmica do sistema no qual o experimento é realizado não confirmaram esta afirmação.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Para a conclusão do trabalho (TCC 2), a realização de uma nova sequência de ensaios será necessário, considerando as limitações e potencialidades do arranjo experimental proposto inicialmente. A seguir são descritas algumas das atividades a serem realizadas no TTC2.

- Novas amostras

Amostras de aço inoxidável devem ser ensaiadas e seu comportamento deverá ser comparado com os resultados obtidos com o aço carbono.

- Solução aquosa

A solução deverá ser misturada com sal, de modo a simular as condições de operação de veículos náuticos em ambientes oceânicos.

- Velocidade de impacto das partículas

Tendo em vista que o intervalo de velocidade no qual as embarcações náuticas são utilizadas é bastante amplo, há a necessidade de variar a velocidade de impacto das amostras para coleta dos dados, portanto novas polias devem ser implementadas no equipamento de desgaste.

- Tempo de ensaio

O tempo de ensaio deve tornar-se maior para um estudo mais completo do comportamento das amostras. Baseado no trabalho de Cueva (2015) um tempo total de cinco horas com intervalos de coleta de dados de uma hora será realizado. Assim, as amostras de aço carbono serão outra vez ensaiadas até alcançar o tempo total de ensaio.

Um esquemático destas propostas é visto na Tab. (3).

Tabela 3 - Esquemático de proposta de rotina de testes

| Número do Ensaio | Amostra | Partícula abrasiva |     | Ângulo de impacto |     |     |     |     | Velocidade de impacto (m/s) |                |                |
|------------------|---------|--------------------|-----|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----------------------------|----------------|----------------|
|                  |         | Areia              | Sal | 0°                | 30° | 45° | 60° | 90° | V <sub>1</sub>              | V <sub>2</sub> | V <sub>3</sub> |
| 1                | x       | x                  | x   | x                 |     |     |     |     | x                           | x              | x              |
| 2                | x       | x                  | x   |                   | x   |     |     |     | x                           | x              | x              |
| 3                | x       | x                  | x   |                   |     | x   |     |     | x                           | x              | x              |
| 4                | x       | x                  | x   |                   |     |     | x   |     | x                           | x              | x              |
| 5                | x       | x                  | x   |                   |     |     |     | x   | x                           | x              | x              |



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM. 1991.** *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/rubber Wheel Apparatus (ASTM G-65)*. 1991.
- Baptista, Luis Filipe. 2013.** *Sistemas de Propulsão e Governo. Tecnologia Marítima*. 2013.
- Brasil, Marinha do. 2011.** *Normas da autoridade marítima para navegação e cartas náuticas 28*. s.l. : Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2011.
- Cueva, Edison Gustavo. 2002.** *Estudo do Desgaste em Materiais Utilizados em Discos de Freio de Ferro Fundido com Grafita Lamelar e Vermicular*. São Paulo : s.n., 2002.
- Doctors, Corrosion.** Corrosion Doctors. *Corrosion Doctors*. [Online] [Citado em: 14 de Maio de 2015.] [www.corrosiondoctors.com](http://www.corrosiondoctors.com).
- Edison Gustavo Cueva Galárraga, Evelin da Rocha de Lima, Isabele da Silva Paiva, Lorena dos Santos de Jesus, Thais Luane Antunes de Araújo, Lorena Freitas Gobira, Carlos Abel Nuñez Lazo. 2015.** *Resistência ao Desgaste Erosivo de Aços Inoxidáveis*. 2015.
- Finnie, I. 1995.** *Some reflections on the past and future of erosion*. 1995.
- Fontoura, Cláudia Moreira da. 2009.** *Desenvolvimento de hélice de material compósito polimérico utilizando a moldagem por transferência de resina*. Porto Alegre : s.n., 2009.
- Fujarra, André Luis Condino. 2006.** *Arquitetura Naval. Especialização em Engenharia Naval*. São Paulo : Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, 2006.
- Gahr, K.H.Zum. 1987.** *Microstructure and wear of materials*. s.l. : Elsevier Science Publishers, 1987.
- Geer, D. 1989.** *Propeller Handbook: The Complete reference for Choosing, Installing and Understanding Boat Propellers*. New York : McGraw-Hill-International Marine, 1989.
- Gomes, C.R.C. 1981.** *Arquitetura Naval*. Rio de Janeiro : s.n., 1981.
- Hutchings, I.M. 1992.** *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. s.l. : Edward Arnold, 1992.
- J.P.Ramalho e L.Gimenez. 1997.** *Processo com eletrodo revestido*. 1997.
- J.Zhou e Bahadur, S. 1989.** *Corrosion and Particle Erosion at High Temperature*. s.l. : Srinivasan and K Vedula, 1989.
- . 1989. *Corrosion and Particle Erosion at High Temperature*. 1989.
- Kennedy, D.M. e Hashmi, M.S.J. 1996.** *Test rig design and experimental results of coated systems under impact abrasion conditions*. s.l. : Surface and Coatings Technology, 1996.
- Levy, A. e Yau, P. 1984.** *Erosion of steels in liquid slurries*. 1984.
- Lin, H.J., Lin, J.J. e T.J.Chuang. 2005.** *Strength Evaluation of a Composite Marine Propeller Blade*. 2005.

- Lula, R.A. 1986.** *Stainless steels*. s.l. : American Society for Metals, 1986.
- MacKenzie, P.M. and Forrester, M.A. 2008.** *Sailboat propeller drag*. s.l. : Ocean Engineering, 2008.
- Marsh, G. 2004.** *A new star for marine propellers* . 2004.
- Motley, M.R., Liu, Z. e Young, Y.L. 2009.** *Utilizing fluid-structure interactions to improve energy efficiency of composite marine propellers in spatially varying wake*. 2009.
- Mouritz, A.P., et al. 2001.** *Review of advanced composite structures for naval ships and submarines*. 2001.
- Nasseh, J. 1999.** *Hélice: Os conceitos básicos (parte 1)*. s.l. : Revista Náutica, 1999.
- Ningshen, S., et al. 2007.** *Semiconducting and passive film properties of nitrogen-containing type 316LN stainless steels* . 2007.
- Ochoa, Diana Maria López. 2007.** *Estudo do Desgaste Erosivo-Corrosivo de Aços Inoxidáveis de Alto Nitrogênio em Meio Lamacento*. São Paulo : s.n., 2007.
- Ribeiro, Rubens. 2004.** *Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria Sucroalcooleira*. Ilha Solteira : s.n., 2004.
- Roy, M. 2006.** *Elevated temperature erosive wear of metallic materials*. s.l. : Journal of Physics, 2006.
- Searle, T. 1998.** *Composites Final Frontier* . 1998.
- Sendriks, A. J. 1996.** *Corrosion of Stainless steels* . New York : Wiley Inter-science, 1996.
- Tabakoff, W. e Vittal, B.V.R. 1983.** *High Temperature Erosion Study of INCO 600 Metal*. 1983.
- Talbot, D. e Talbot, J. 1998.** *Corrosion Science and Technology*. 1998.
- Wainer, E., Brandi, D.S. e Homen, F.D. 1992.** *Soldagem Processos e Metalurgia*. São Paulo : Edgard Blucher, 1992.
- Young, Y.L. 2008.** *Fluid-structure interaction analysis of flexible composite marine propellers*. s.l. : Journal of Fluids and Structures, 2008. Vol. 24.