

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE  
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**COMPORTAMENTO AO DESGASTE EROSIVO DE UM AÇO INOXIDÁVEL  
UTILIZADO EM HÉLICE DE MOTO AQUÁTICA**

**ARTUR RIBEIRO DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR (A): Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA  
ENGENHARIA**

**PUBLICAÇÃO: FGA.DM – 024A/2015  
BRASÍLIA/DF: SETEMBRO/2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE  
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**ARTUR RIBEIRO DE OLIVEIRA**

**COMPORTAMENTO AO DESGASTE EROSIVO DE UM AÇO INOXIDÁVEL  
UTILIZADO EM HÉLICE DE MOTO AQUÁTICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.**

**ORIENTADOR: EDISON GUSTAVO CUEVA GALÁRRAGA**

**BRASÍLIA - DF  
2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE  
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**COMPORTAMENTO AO DESGASTE EROSIVO DE UM AÇO INOXIDÁVEL  
UTILIZADO EM HÉLICE DE MOTO AQUÁTICA**

**ARTUR RIBEIRO DE OLIVEIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga (UNB)  
(Orientador)**

---

**Prof. Dr. Emmanuel Pacheco Rocha Lima (UNB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Dr. Clodoaldo Valverde (UEG)  
(Examinador Externo)**

**Brasília, 23/09/2015**

## FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, ARTUR RIBEIRO

Comportamento ao Desgaste Erosivo de um Aço Inoxidável Utilizado em Hélice de Moto Aquática, [Distrito Federal] 2015.

Nº.103p. 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2015). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

1. Desgaste Erosivo

2. Motos Aquáticas

3. Hélices

4. Polimento e Jateamento

I. FGA/FT/UnB

II. Mestre

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, A. R. (2015). Comportamento ao Desgaste Erosivo de um Aço Inoxidável Utilizado em Hélice de Moto Aquática. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação 024A/2015, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, nº.103p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Artur Ribeiro de Oliveira.

TÍTULO: Comportamento ao Desgaste Erosivo de um Aço Inoxidável Utilizado em Hélice de Moto Aquática

GRAU: Mestre

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

NOME: Artur Ribeiro de Oliveira

ENDEREÇO: Rua 16 de Julho, Nº 1013, Qd. 07 Lt. 02, Setor Oeste

CEP: 75380-000 Trindade, GO – Brasil.

artur.ro@hotmail.com

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais  
Sérgio e Rosimeire, e minha adorada irmã  
Meiriany.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me protegido durante as viagens que realizei para a UNB, pela minha saúde, sabedoria, paciência, motivação e compreensão para realizar este trabalho.

Ao meu orientador Professor Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga pelo compartilhamento de saberes das disciplinas que ministrou é para a orientação deste trabalho.

Aos Professores do Programa de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, pela dedicação, trabalho e orientação nas disciplinas do programa.

A minha namorada Thaynara Clarinda, pelo incentivo, apoio e compreensão por estes dois anos árduos de estudo.

A Aerosolda Serviços de Solda LTDA, por financiar a aquisição de equipamentos de ensaio utilizado neste trabalho, e materiais utilizados para produzir a máquina de desgaste.

Aos Amigos Jeanisson Mariano e Weimar Castilho, pelo companheirismo, apoio com as disciplinas que juntos realizamos e para o desenvolvimento desta pesquisa.

A Dra. Tatiane coordenadora do laboratório de microscopia LabMic da Universidade Federal de Goiás – UFG pela realização das fotografias de MEV desta pesquisa.

Ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – Crti da Universidade Federal de Goiás – UFG pela realização das fotos de microscopia óptica desta pesquisa.

*“A Grandiosidade vem de pequenos  
começos”*

*(Sir Francis Drake)*

## RESUMO

Oliveira, Artur Ribeiro, *Comportamento ao Desgaste Erosivo de um Aço Inoxidável Utilizado em Hélice de Moto Aquática*. Brasília: Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasil, 2015. Dissertação de Mestrado.

Motos aquáticas, mais conhecidas como *Jet Skis*, proporcionam entretenimento e lazer em rios, lagos e/ou litorais. Entretanto, a concentração de partículas duras, em suspensão nas águas, provoca o desgaste prematuro do sistema de propulsão, principalmente das hélices. As pás das hélices costumam ser fabricadas com as superfícies polidas ou, com o intuito de melhorar sua resistência ao desgaste, jateadas. O presente trabalho teve como objetivo construir um equipamento que permitisse estudar o comportamento em desgaste erosivo de um aço inoxidável utilizado na fabricação de hélices de motos aquáticas; e verificar se o jateamento aumenta realmente a resistência ao desgaste destes elementos. Para isto, corpos de prova foram retirados diretamente de uma hélice de moto aquática e dois tipos de superfícies foram preparados: uma polida e outra jateada com areia. Amostras com cada tipo de condição superficial foram fixadas a um disco giratório porta-amostras e posicionadas de tal forma, que quando mergulhadas dentro de uma solução aquosa erosiva pudessem receber o impacto da mistura com ângulos de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ . O ensaio teve uma duração total de 25 h, no entanto, em determinados intervalos de tempo, o ensaio era interrompido para medir a perda de massa, a rugosidade superficial e, por meio de imagens via microscopia eletrônica, acompanhar o dano superficial ocorrido. Os resultados mostraram que, apesar do jateamento causar um aumento de dureza superficial, não foi detectado uma melhora na resistência ao desgaste das amostras jateadas comparado com as amostras polidas. Os maiores desgastes ocorreram quando o ângulo de incidência foi de  $45^\circ$ , independentemente do tipo de superfície; e o desgaste com ângulos incidência de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  foram idênticos entre si, independentemente também, do tipo de superfície. O trabalho mostrou ainda que, o equipamento construído simulou com precisão as condições de uso desses veículos náuticos e sua versatilidade servirá para o desenvolvimento de futuras pesquisas na Universidade de Brasília.

**Palavras-chave:** Desgaste Erosivo; Motos Aquáticas; Hélices; Polimento e Jateamento.

## ABSTRACT

Oliveira, Artur Ribeiro, *The Erosive Wear Behavior of Stainless Steel Used in Personal Watercraft Impeller*. Brasília: Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasil, 2015. Dissertação de Mestrado.

Jet skis provide entertainment and recreation in rivers, lakes and/or coastlines. However, the concentration of hard particles in suspension in the water causes premature wear of the propulsion system, especially the propellers. The propeller blades are usually made of polished surfaces or in order to improve their wear resistance, blasted. This study aimed to construct a device that allows to study the behavior in erosive wear a stainless steel used in the manufacture of jet skis propellers; and check whether the blasting actually increases the wear resistance of these elements. For this, samples were taken directly from a Jet Ski propeller and two types of surfaces were prepared: a polished and another sandblasted. Samples with each type of surface condition were fixed to a disc rotating sample holder and positioned such that, when dipped into an aqueous solution erosive could receive the impact of the mixture at angles of 0°, 45° and 90°. The test had a total duration of 25h, however, at certain intervals of time, the test was stopped to measure the weight loss, surface roughness, and by electron microscopy pictures, accompany the surface damage occurred. The results showed that although the sandblasted cause an increase of surface hardness, was not detected an improvement in wear resistance of the sandblasted samples as compared with the polished samples. The higher wear occurred when the incident angle was 45°, regardless of the type of surface; and wear with incidence angles of 0° and 90° were identical among them, irrespective also of the type of surface. The work also showed that the equipment built accurately simulated the conditions of use of these nautical vehicles and their versatility will serve for the development of future research at the University of Brasilia.

**Keyword:** Erosive Wear; Personal Watercraft; Impeller; Polishing and Blasting.

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 2.1</b> – Jet Fishing - Modelo de moto aquática utilizada para pescaria .....	<b>07</b>
<b>Figura 2.2</b> – Casco de um PWC em GRP quebrado .....	<b>08</b>
<b>Figura 2.3</b> – Mecanismo de propulsão de uma moto aquática .....	<b>09</b>
<b>Figura 2.4</b> – Motor de um PWC 4 tempos - produzido conforme determinações ambientais.....	<b>10</b>
<b>Figura 2.5</b> – Evolução dos Modelos de Exposição do Hélice – a esquerda sistema tradicional, a direita sistemas atuais .....	<b>11</b>
<b>Figura 2.6</b> – Definição do passo da hélice.....	<b>12</b>
<b>Figura 2.7</b> – Modelos e tipos de hélices de motos aquáticas .....	<b>13</b>
<b>Figura 2.8</b> – Tipos de Desgaste: (a) Abrasivo; (b) Adesivo; (c) Erosivo e (d) Cavitação .....	<b>15</b>
<b>Figura 2.9</b> – Mecanismo de Degaste por Cavitação: a) mecanismo do colapso de bolhas e b) evidência do dano superficial causado por cavitação em um material metálico (irídio).....	<b>16</b>
<b>Figura 2.10</b> – Classificação dos Modos de Desgaste Erosivo. A) Erosão através de partículas sólidas em meio gasoso; B) Erosão através de partículas sólidas em meio de líquidos C) Erosão causada pela ação de gotas de líquidos D) Cavitação-Erosão; E) Erosão-Corrosão; F) Erosão com processo Térmico.....	<b>17</b>
<b>Figura 2.11</b> – Resultados Experimentais para a Erosão de um Material Dúctil .....	<b>18</b>

- Figura 2.12** – Mecanismo de Desgaste. 1 – Fadiga de fase Intergranular; 2 – Microtrinca no Contorno de grão; 3 – Indução de Microtrincas no grão; 4 – Desprendimento do grão; 5 – Desprendimento de Fragmentos do Grão ..... **18**
- Figura 2.13** – Variação da taxa de erosão com o tamanho da partícula em um aço utilizando um ângulo normal de impacto com diferentes velocidades de ataque ..... **19**
- Figura 2.14** – Representação esquemática do efeito do ângulo de impacto sobre as taxas de desgaste de materiais dúctil e frágeis ..... **20**
- Figura 2.15** – Erosão por partícula sólida de um aço Inox 304 a uma velocidade de 70 m/s em função do ângulo para temperaturas de 24 e 500 C° ..... **21**
- Figura 2.16** – Mecanismo de Formação de Desgaste Oxidativo (a) Formação do Patamar de óxido; (b) Crescimento do Patamar; (c) Expansão dos Óxidos; (d) Quebra dos Óxidos Formação de Partículas ..... **23**
- Figura 2.17** – Fatores que afetam a vida em fadiga de um componente ..... **25**
- Figura 2.18** – Rasura mínima em que um dos modelos de moto aquática deve trafegar, A = 90 cm ..... **28**
- Figura 2.19** – Hélices desgastadas por erosão e corrosão ..... **28**
- Figura 2.20** – Variação da Perda de Peso com a Quantidade de Abrasivos aço SAE 1020, com abrasivos de carbeto de silício malha 60, e velocidade de 76 m/s ..... **29**
- Figura 2.21** – Hélice de uma moto aquática danificada por cavitação ..... **31**
- Figura 3.1** – Hélice de uma moto aquática marca Sea Doo, modelo GSX, ano 1997, a) polida e b) jateada ..... **33**
- Figura 3.2** – a) Durômetro e b) Micro-Durômetro ..... **34**

<b>Figura 3.3</b> – Microscópio Ótico Confocal Axio Imager Z2m (Zeiss) .....	<b>35</b>
<b>Figura 3.4</b> – Peneiras utilizadas na seleção dos abrasivos do ensaio de desgaste .	<b>35</b>
<b>Figura 3.5</b> – Representação esquemática dos equipamentos. a) Desenvolvido nesta pesquisa e b) Utilizado por Toro.....	<b>36</b>
<b>Figura 3.6</b> – Disco porta amostras.....	<b>37</b>
<b>Figura 3.7</b> – Recipiente responsável por comportar a água com abrasivos; e simulação do comportamento do fluido dentro dele .....	<b>38</b>
<b>Figura 3.8</b> – Máquina de desgaste construída.....	<b>38</b>
<b>Figura 3.9</b> – Amostras utilizadas nos ensaios de desgaste erosivo .....	<b>39</b>
<b>Figura 3.10</b> – Máquina utilizada para o jateamento de amostras .....	<b>39</b>
<b>Figura 3.11</b> – Balança analítica de precisão AG 200 GEHAKA.....	<b>42</b>
<b>Figura 4.1</b> – (A) Matriz com traços de ferrita delta no material da hélice. (B) Ferrita delta em aço 15-5PH.....	<b>46</b>
<b>Figura 4.2</b> – Matriz martensítica encontrada no aço da hélice 15-5 PH .....	<b>47</b>
<b>Figura 4.3</b> – Geometria das partículas abrasivas usadas nos ensaios de desgaste .....	<b>48</b>
<b>Figura 4.4</b> – Desgaste acumulado de amostras polidas ensaiadas com ângulos de impacto do abrasivo de 90°, 45° e 0° .....	<b>49</b>
<b>Figura 4.5</b> – Efeito do ângulo de incidência no dano superficial.....	<b>49</b>

<b>Figura 4.6</b> – Perda de massa de amostras polidas após 1 hora de ensaio de desgaste erosivo a 90°, 45° e 0° .....	<b>50</b>
<b>Figura 4.7</b> – Desgaste total das amostras polidas em função do ângulo de incidência das partículas abrasivas.....	<b>51</b>
<b>Figura 4.8</b> – Desgaste erosivo em materiais dúcteis em função do ângulo de ataque das partículas.....	<b>51</b>
<b>Figura 4.9</b> – Superfície de uma amostra polida antes de ser usada nos ensaios de desgaste.....	<b>52</b>
<b>Figura 4.10</b> – Superfícies de amostras polidas, que foram ensaiadas a 90°, após 5, 15 e 25 horas de ensaio de desgaste .....	<b>53</b>
<b>Figura 4.11</b> – Um dos possíveis mecanismos de desgaste erosivo provocado por deformação plástica. Alto ângulo de incidência de partículas erodentes .....	<b>54</b>
<b>Figura 4.12</b> – Superfícies de amostras polidas, que foram ensaiadas a 45°, após 5, 15 e 25 horas de ensaio de desgaste .....	<b>54</b>
<b>Figura 4.13</b> – Mecanismos de desgaste erosivo provocado pela abrasão de partículas erodentes sobre a superfície com baixo ângulo de incidência de partículas erodentes .....	<b>55</b>
<b>Figura 4.14</b> – Superfície de amostras polidas após 5, 15 e 25 horas de ensaio de desgaste a 0° .....	<b>56</b>
<b>Figura 4.15</b> – Parâmetros de Rugosidade Ra e Rz medidos durante os ensaios realizados com amostras polidas e ângulos de incidência de 90°, 45° e 0° .....	<b>56</b>
<b>Figura 4.16</b> – Geometria das partículas erodentes após 1 hora de ensaio de desgaste erosivo.....	<b>58</b>

<b>Figura 4.17</b> – Desgaste acumulado de amostras jateadas ensaiadas com ângulos de incidência do abrasivo de 90°, 45° e 0° .....	<b>59</b>
<b>Figura 4.18</b> – Perda de massa de amostras jateadas durante a primeira hora de ensaio, utilizando ângulos de incidência do abrasivo de 90°, 45° e 0° .....	<b>59</b>
<b>Figura 4.19</b> – Representação esquemática do processo de jateamento mostrando a geração tensões e de uma superfície formada por microcavidades. ....	<b>60</b>
<b>Figura 4.20</b> – Desgaste total das amostras jateadas em função do ângulo de incidência das partículas abrasivas .....	<b>61</b>
<b>Figura 4.21</b> – Superfície de amostras jateadas antes de se iniciar o ensaio de desgaste a 90° .....	<b>62</b>
<b>Figura 4.22</b> – Superfície de amostras jateadas após 5,15 e 25 horas de ensaio de desgaste a 90° .....	<b>62</b>
<b>Figura 4.23</b> – Superfície de amostras jateadas a após 5,15 e 25 horas de ensaio de desgaste a 45° .....	<b>63</b>
<b>Figura 4.24</b> – Superfície de amostras jateadas a após 5, 15 e 25 horas de ensaio de desgaste a 0° .....	<b>64</b>
<b>Figura 4.25</b> – Parâmetros de Rugosidade Ra e Rz medidos durante os ensaios realizados com amostras jateadas e ângulos de incidência de 90°, 45° e 0° .....	<b>65</b>
<b>Figura 5.1</b> – Perda de massa acumulada e globalizada em função do tipo de superfície, ângulo de incidência e tempo de ensaio de desgaste .....	<b>67</b>
<b>Figura 5.2</b> – Desgaste acumulado de amostras polidas e jateadas em função do ângulo de ataque das partículas .....	<b>68</b>

- Figura 5.3** – Perda de massa de amostras polidas e jateadas durante a primeira hora de ensaio, utilizando ângulos de incidência do abrasivo de 90°, 45° e 0° ..... **69**
- Figura 5.4** – Aspecto das superfícies antes e depois dos ensaios de desgaste..... **71**
- Figura 5.5** – Rugosidade Ra medida durante os ensaios realizados com amostras polidas e jateadas com ângulos de incidência de 90°, 45° e 0° ..... **72**

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 2.1</b> – Número de Eventos Náuticos no Brasil em 2005.....	<b>05</b>
<b>Tabela 3.1</b> – Condições dos Ensaios Realizados .....	<b>40</b>
<b>Tabela 3.2</b> – Esquema de Paradas para Cada Ensaio de Desgaste .....	<b>41</b>
<b>Tabela 4.1</b> – Composição química do material da hélice (% peso) .....	<b>44</b>
<b>Tabela 4.2</b> – Medidas de dureza e microdureza do material da hélice .....	<b>45</b>
<b>Tabela 4.3</b> – Medidas de dureza e microdureza do material da hélice após jateamento com areia.....	<b>45</b>
<b>Tabela 4.4</b> – Composição química da areia utilizada nos ensaios (% peso) .....	<b>47</b>

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<i>ACOBAR</i>	<i>Associação Brasileira dos Construtores de Barcos e seus Implementos</i>
<i>BRP</i>	<i>Bombardier Recreational Products INC.</i>
<i>CNC</i>	<i>Confederação Nacional do Comércio de Bens, Serviços e Turismo</i>
<i>EPA</i>	<i>Environmental Protection Agency</i>
<i>GRP</i>	<i>Glass Reinforced Plastic</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>HNSS</i>	<i>High Nitrogen Stainless Steels</i>
<i>NTSB</i>	<i>National Transportation Safety Board</i>
<i>PWC</i>	<i>Personal Watercraft</i>
<i>PWIA</i>	<i>Personal Watercraft Industry Association</i>
<i>SMC</i>	<i>Sheet Moulding Compound</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>cv</i>	Cavalo-Vapor
<i>g</i>	Gramas
<i>h</i>	Horas
<i>kgf</i>	Quilograma-Força
<i>km</i>	Quilômetros
<i>min</i>	Minutos
<i>m/s</i>	Metros por Segundo
$\mu m$	Micrometro
<i>rpm</i>	Rotações por Minuto
<i>V</i>	Volts

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS</b> .....	<b>xvi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>01</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>03</b>
2.1 VEÍCULOS NÁUTICOS DE ESPORTE E LASER .....	<b>03</b>
2.2 JET-SKI: HISTÓRIA, MODELOS, APLICAÇÕES E FUTURO .....	<b>06</b>
2.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE MOTOS AQUÁTICAS .....	<b>08</b>
2.4 SISTEMAS DE PROPULSÃO DE MOTOS AQUÁTICAS .....	<b>09</b>
2.4.1 Motores e Hélices .....	<b>09</b>
2.5 MECANISMOS DE DESGASTE EM SISTEMAS DE PROPULSÃO .....	<b>13</b>
2.5.1 Introdução ao Desgaste.....	<b>13</b>
2.5.2 Desgaste Erosivo.....	<b>17</b>
2.5.3 Desgaste Oxidativo.....	<b>22</b>
2.5.4 Desgaste por Fadiga Superficial.....	<b>24</b>
2.5.5 Recobrimentos Resistentes ao Desgaste Erosivo .....	<b>26</b>
2.5.6 Desgaste em Sistemas de Propulsão de Motos Aquáticas.....	<b>27</b>
2.6 OBJETIVOS .....	<b>31</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DA HÉLICE DE MOTO AQUÁTICA .....	<b>33</b>
3.1.1 Composição Química.....	<b>33</b>
3.1.2 Dureza .....	<b>33</b>
3.1.3 Análises Metalográficas.....	<b>34</b>
3.2 PARTÍCULAS ABRASIVAS .....	<b>35</b>
3.2.1 Composição Química.....	<b>36</b>
3.2.2 Análises Microscópicas.....	<b>36</b>
3.3 ENSAIO DE DESGASTE EROSIVO .....	<b>36</b>
3.3.1 Equipamento.....	<b>36</b>
3.3.2 Corpos de Prova.....	<b>38</b>

3.3.3 Condições de Ensaio.....	40
3.3.4 Tempo de Ensaio.....	40
3.3.5 Mistura Erosiva .....	41
3.3.6 Perda de Massa.....	42
3.3.7 Análise das Superfícies .....	42
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DA HÉLICE .....	44
4.1.1 Composição Química.....	44
4.1.2 Dureza .....	45
4.1.3 Análises Metalográficas.....	45
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ABRASIVOS.....	47
4.2.1 Composição Química.....	47
4.2.2 Análises Microscópicas.....	47
4.3 ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO.....	48
4.3.1 Ensaio 01 - Amostras com Superfícies Polidas .....	48
4.3.1.1 – Perda de Massa.....	48
4.3.1.2 – Análise das Superfícies .....	52
4.3.1.3 – Deterioração dos Abrasivos.....	57
4.3.2 Ensaio 02 - Amostras com Superfícies Jateadas .....	58
4.3.2.1 – Perda de Massa.....	58
4.3.2.2 – Análise das Superfícies .....	61
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>67</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>77</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil vem se tornando um país cobiçado para sediar atividade de turismo e esportes náuticos, principalmente, pelo tamanho da costa litorânea (8.500 km navegáveis), a enorme gama de rios, hidrovias, represas e lagos que somam mais de 9.260 km por todo país, e por sua beleza natural, onde paisagens deslumbrantes podem ser aproveitadas o ano inteiro devido as excepcionais condições de clima e temperatura. Estimasse que a frota brasileira de embarcações de esporte e lazer seja de aproximadamente 53.000 unidades; e dentre elas, as de aceitação são as motos aquáticas (MINISTÉRIO DO TURISMO, 2010)

As motos aquáticas, mais conhecidas como *Jet Skis*, surgiram nos anos 70 e se popularizaram rapidamente em vários países com o passar dos anos. O objetivo destas máquinas é proporcionar entretenimento e lazer em rios, lagos e/ou litorais; mas também são bastante utilizadas para o esporte ou até mesmo para o trabalho (NIXON, 2003 e PWIA, 2006).

Um dos problemas que mais afetam as motos aquáticas é o desgaste gerado no sistema de propulsão, que é o responsável pelo desempenho da máquina sobre a água. O desgaste dos propulsores pode ser alto devido principalmente à navegação em águas rasas e a falta de experiência dos pilotos em comandar as motos aquáticas (BRP, 2014).

O desgaste do sistema de propulsão, provocado pela ação erosiva - abrasiva de partículas duras presentes nas águas, pode levar os proprietários de motos aquáticas a realizar gastos onerosos em curtos intervalos de tempo, principalmente, quando é necessária a troca e/ou a recuperação da hélice e de outros componentes do sistema de propulsão.

Dependendo do fabricante e do modelo da moto aquática, as características das hélices podem variar significativamente em tamanho, geometria, acabamento superficial das pás e tipo de material utilizado. As superfícies das hélices são, normalmente, polidas ou jateadas, sendo que o jateamento é utilizado para promover um aumento da dureza superficial por deformação plástica (encruamento) e gerar tensões residuais de compressão na superfície, que promoveriam uma melhora na resistência ao desgaste.

O objetivo deste trabalho foi construir um equipamento que permitisse estudar o comportamento em desgaste erosivo de um material utilizado na fabricação de hélices de motos aquáticas. Corpos de prova foram preparados com superfícies, propositalmente, polidas e outras jateadas, com areia, para verificar a influência do tratamento superficial na resistência ao desgaste destes elementos.

A presente pesquisa está dividida em oito capítulos, sendo o primeiro capítulo responsável por mostrar uma breve introdução sobre o estudo proposto assim como sua motivação.

No capítulo dois é apresentada uma revisão da literatura que engloba assuntos como veículos náuticos, motos aquáticas, sistemas de propulsão de motos aquáticas, alguns tipos de desgaste que podem estar presentes em sistemas de propulsão e desgaste em propulsores de motos aquáticas.

O capítulo três apresenta os materiais e a metodologia que foram utilizados na pesquisa, a fabricação detalhada do equipamento de desgaste erosivo assim como os parâmetros de ensaio utilizados para realizar os testes.

No capítulo quatro são apresentados os resultados obtidos, e são discutidos cada detalhe encontrado, como a perda de massa e o dano superficial ocorrido no decorrer do tempo de ensaio.

No capítulo cinco são realizadas as considerações finais do trabalho, comparando globalmente todos os resultados obtidos.

No capítulo seis são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos, e no capítulo sete algumas propostas de trabalhos futuros. Por fim no capítulo oito são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 VEÍCULOS NÁUTICOS DE ESPORTE E LASER

A palavra náutica conforme afirma o Ministério do Turismo, é definida como toda a atividade que se desenvolve em embarcações que se locomovem sobre a água, sejam elas; fluviais; lacustres; paradas ou correntes; oceânicas ou marítimas. A navegação em conciliação com a prática turística, formam juntas o que se chama de Turismo Náutico. Nos últimos anos foi visto que o crescimento náutico em geral, foi de suma importância para avanço tecnológico da indústria nacional de navios e barcos (MINISTÉRIO DO TURISMO, 2010).

Estimasse que a frota brasileira de embarcações de esporte e lazer seja de aproximadamente 53.000 unidades, levando em consideração barcos acima de 14 pés, neste montante estão inclusos não somente embarcações que possuem motores, mas também velas e pequenos barcos de competição, além disso o mercado brasileiro ainda conta com:

- 151 Fabricantes de Embarcações;
- 039 Fabricantes de Botes;
- 257 Fabricantes de Acessórios Náuticos;
- 283 Fabricantes e Revendedores de Equipamentos de Pesca;
- 111 Fabricantes e Revendedores de Pranchas à Vela.

Assim é formado um grupo de empresas grandes e pequenas que estão espalhadas por todo o país, que sempre necessitam de profissionais em áreas como a mecânica, elétrica, artesanal, tapeçaria, hidráulica, pintura e etc. (ACOBAR, 2005).

Conforme diz Moura (2008), um dos maiores fornecedores de produtos náuticos do mundo são os Norte Americanos, estes são responsáveis por fornecer maior parte dos equipamentos de ponta que são necessários para indústria náutica de todo o mundo, além de serem também os maiores consumidores do mundo de alguns veículos náuticos como: *Jet Skis*, Velas, lanchas lates e outros.

Já os Britânicos e Franceses são vistos como os turistas náuticos que mais utilizam o mar em busca de aventura conforme relato feito pelo movimento aduaneiro

de Gibraltar, Bahamas e Trinidad entre 1999 e 2003 (MINISTÉRIO DO TURISMO, 2010).

O turismo náutico ainda é dividido em duas classes conforme diz o Ministério do Turismo (2010), sendo elas:

➤ Turismo Náutico de Cruzeiro

Oferecendo prestação de serviços como: hospedagem, transporte, visitas, entretenimento e serviços afins quando feito em embarcações de turismo.

➤ Turismo Náutico de Recreio e Esporte

Utilizado por embarcações pequenas e de médio porte sendo de propriedade particular ou não.

Atualmente o Brasil vem se tornando um país cobiçado para sediar esportes náuticos e dar alegria a aqueles que gostam de usufruir de seus veículos aquáticos em momentos de lazer, com lugares deslumbrantes, clima e temperatura apropriados, isto faz com que o Brasil seja um dos países mais requisitados do mundo para prática de tais atividades, sejam elas, com os mais variados tipos de veículos náuticos citados anteriormente. Hoje o Brasil dispõe de 8.500 km navegáveis de costa que se estendem por 17 estados, além de contar com uma enorme gama de rios, hidrovias, represas e lagos que somam 9.260 km por todo país (MINISTÉRIO DO TURISMO, 2010).

Para o exercício da atividade náutica no Brasil, determinadas leis devem ser seguidas por aqueles que trafegam pelas águas brasileiras, abaixo segue uma lista com as principais normas e suas respectivas áreas de atuação.

- Lei nº 5.869/73 - Código de Processo Civil;
- Decreto-Lei nº 5.452/43 - CLT;
- Lei nº 8.617/93 - Questões do Mar Territorial;
- Lei nº 9.432/97 - Política e Estratégia;
- Lei nº 9.537/97 - Segurança do Transporte Aquaviário;
- Decreto nº 2.596/98, Responsável por Regular a Lei nº 9.537/97
- Lei nº 9.966/2000 - Prevenção da Poluição.

Juntas estas leis regem uma legislação que englobam fatores como tratados, fiscalização de prestadoras de serviços turísticos, normas, acordos, regulamentação de serviços de transporte, eventos, operação e agenciamento turístico, tendo como foco manter a ordem do transporte marítimo brasileiro (CNC, 2011).

Em consequência disto, várias empresas do setor, sendo estas nacionais e internacionais, sediam eventos e investem pesado em acessórios e equipamentos, com foco na expansão do segmento no país; impulsionando assim cada vez mais adeptos para o ramo seja para o esporte ou o lazer, a tabela 2.1 mostra o número de eventos sediados somente no Brasil no ano de 2005 (ACOBAR, 2005).

**Tabela 2.1** – Número de Eventos Náuticos no Brasil em 2005 (ACOBAR,2005).

<b>Modalidade</b>	<b>Eventos Oficiais em 2005</b>
Salões Náuticos	2
Vela	143
Motonáutica	4
Jet Ski	19
Wakeboard	15
Remo	6
Ski Aquático	5
Total	194

Contudo, foi visto que o turismo náutico é um segmento que abrange todo o mundo atraindo milhares de adeptos, a taxa de empregabilidade é grande pois este necessita de profissionais em diversos setores gerando uma enorme gama de empregos e consequentemente movimentando a economia de cada país, o Brasil tem se tornado um grande atrativo para prática de tais atividades, sua estrutura hidrográfica atrai grandes fabricantes de veículos náuticos e acessórios, contudo, também é importante notar que com a expansão do setor, alguns problemas como por exemplo de emissão de poluentes se alastram, deste modo sempre será importante também investir em projetos sustentáveis que beneficiem tanto a população do turismo quando o meio ambiente.

## 2.2 JET-SKI: HISTÓRIA, MODELOS, APLICAÇÕES E FUTURO

Motos aquáticas são definidas como uma embarcação que utiliza um motor interno ligado a uma bomba a jato de água como fonte de energia primária, o equipamento é projetado para transportar de uma a três pessoas e para sua operação se faz necessário uma pessoa sentada, em pé ou de joelhos (JEFFERY e CAIACH, 1991).

O PWC (*Personal Watercraft*) ou *Jet Ski* como são mais conhecidos, é um tipo de barco de recreio que se tornou bastante popular nos anos 80 e 90, e sofre uma grande expansão com passar de cada ano, os fabricantes estimam que cerca de 200 mil PWC são vendidos a cada ano e que mais de um milhão estão em operação nos dias atuais, nos Estados Unidos em 1998 o PWC já representava mais de um terço das novas vendas de barcos de recreio (NTSB, 1998).

O termo Jet-Ski, trata-se de uma marca registrada da Kawasaki em meados de 1973, nesta ocasião a indústria Kawasaki Ski comprou a patente de *Clayton Jacobsen* // criador dos dois primeiros tipos de PWC, após a compra de patentes a Kawasaki fabricou os primeiros modelos de motos aquáticas vendidos com sucesso em grande escala levando consigo o termo Jet-Ski, que logo se popularizou mundialmente, fazendo com que as pessoas chamassem de Jet-Ski qualquer moto aquática criada por outras fabricantes (NIXON, 2003).

Fabricantes de PWC têm focado seus novos projetos ao passar dos anos em modelos de base familiar, deste modo continuam a aperfeiçoar e produzir mais modelos de três pessoas, entre 1991 e 1995 pesquisas realizadas pela PWIA (*Personal Watercraft Industry Association*) relatou que modelos com ocupação para 3 pessoas já representam mais de 75% do mercado de PWC, o comprador médio de um PWC possuía uma faixa etária de 41 anos, 85% dos condutores eram do sexo masculino e 71% eram casados, outros 69% possuíam outra embarcação como uma lancha antes de comprar um PWC e 66% eram estudantes ou concluíram um curso universitário, e apenas 42% dos usuários tinham acesso a uma casa frente a água; sendo esta sua ou de amigos e familiares (NTSB, 1998 e PWIA, 2006).

Por volta de 1998 empresas renomadas em outros segmentos também começaram a vender suas motos aquáticas em grande escala, sendo algumas delas: Yamaha e Honda, nos anos 2000 a Kawasaki mais uma vez revolucionou o mercado

com os seus novos modelos de motos aquáticas desta vez com motores modernos, reduzindo assim a emissão de poluentes e ruídos, além de aumentar a potência do motor consideravelmente, nesta década a perturbação causadas pelos PWC fizeram com que entidades governamentais criassem regras e leis para regulamentar e restringir o uso de motos aquáticas respondendo a queixas da sociedade, os gastos com o PWC para esporte neste período passaram de 300 milhões por ano compreendendo taxas de inscrições, compra do PWC, trailers, seguro, roupas, combustíveis, acessórios e despesas adicionais (NIXON, 2003).

Recentemente o PWC ganhou mais uma utilidade, o *Jet Fishing* em outras palavras o Jet Ski pescador, uma das fabricantes do segmento produziu um modelo específico para aqueles que são adeptos a pescaria, este possui sua estrutura externa adaptada para apetrechos de pesca além comportar 3 pessoas a bordo, como mostra a figura 2.1 abaixo (DOTTORI, 2010).



**Figura 2.1** – Jet Fishing - Modelo de Moto Aquática Utilizada para Pescaria (DOTTORI, 2010).

Hoje para indústrias que produzem um PWC uma série de regras devem ser seguidas criteriosamente por agências reguladoras de proteção do meio ambiente como a EPA (*Environmental Protection Agency*) criada em 1999, a mesma busca impor limitações ao uso do PWC, visando obter o controle principalmente de taxas de emissões e ruídos, como efeito, os índices de emissões a partir 1999 foram reduzidos em grande parte. Além disso, estudos são realizados constantemente para atender a

necessidade do mercado, com o avanço da tecnologia os novos PWC possuem melhorias tanto para beneficiar o piloto principalmente em relação a segurança, quanto em sofisticação de suas máquinas melhorando sua navegação, todas estas melhorias fizeram com que o número de acidentes com as motos aquáticas diminuísse drasticamente (PWIA, 2006).

### 2.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE MOTOS AQUÁTICAS

Hoje as Motos Aquáticas são máquinas super modernas conforme visto nos itens anteriores, mas esta evolução só tomou fortes proporções a partir de 25 anos após sua criação, com o avanço tecnológico foi possível criar os PWC com GRP (*Glass Reinforced Plastic*) um compósito reforçado com fibra de vidro, e o SMC (*Sheet Moulding Compound*) um processo que utiliza uma mistura de resinas e fibras como reforços; bastante utilizado em modelagem por compressão. Foi com uso destes materiais que surgiram projetos capazes melhorar com grande escala características como: eficiência hidrodinâmica, resistência estrutural, redução de peso e padrões estéticos que são empregados não apenas em PWC; mais em grande maioria de veículos náuticos, entretanto, o uso do GRP se tornou mais requisitado com o passar dos anos pois este possui boa flexibilidade facilitando assim alterações de design e reparos segundo a Bombardier uma das fabricantes, a figura 2.2 abaixo mostra um casco de um PWC quebrado que pode ser reparado devido ao material utilizado (GRP) em sua fabricação, evitando assim a troca de todo o casco (MARSH, 1997).

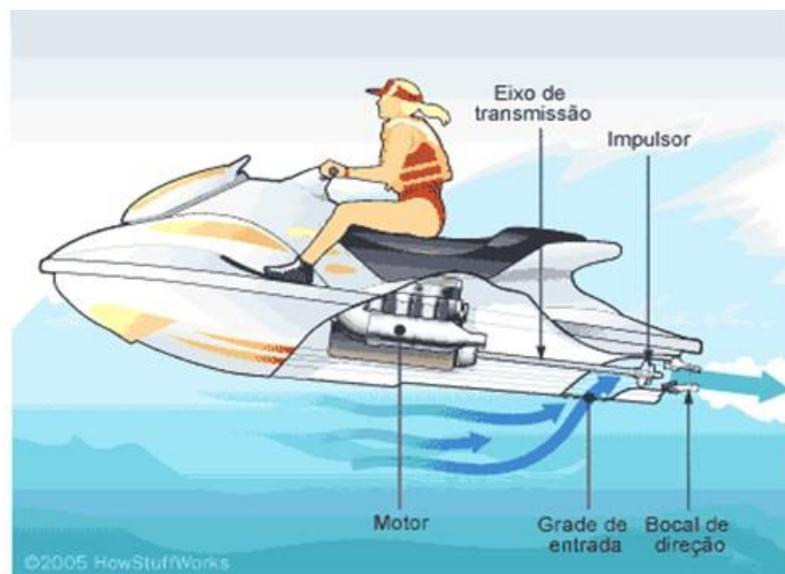


**Figura 2.2** – Casco de um PWC em GRP Quebrado (HEMMEL, 2010).

## 2.4 SISTEMAS DE PROPULSÃO DE MOTOS AQUÁTICAS

### 2.4.1 Motores e Hélices

As motos aquáticas possuem um motor movido a combustão e um sistema de propulsão movido por uma bomba a jato de água, um eixo é acoplado direto do motor a uma hélice que se encontra dentro da bomba a jato de água localizada na parte traseira baixa da moto aquática, a figura 2.3 ilustra como isso ocorre, desde modo o fluxo de água gerado pela bomba é responsável pelo deslocamento da moto aquática sobre a água (BRP, 2014).

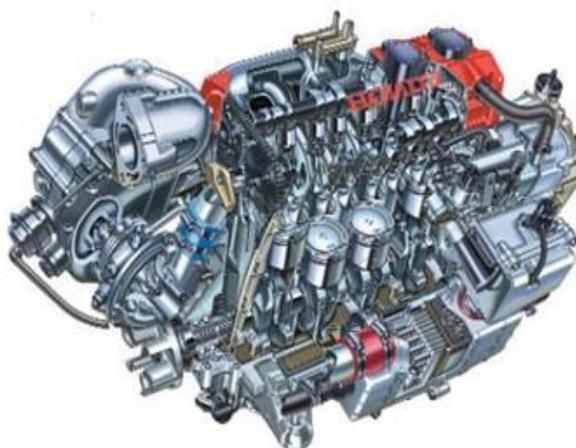


**Figura 2.3** – Mecanismo de Propulsão de uma Moto Aquática (adaptado de WILSON, 2005).

A bomba de hidrojato é um dispositivo cujo princípio de funcionamento consiste em converter a energia potencial, devido à pressurização do fluido, em energia cinética, quando o fluido atravessa o bocal de condução em alta velocidade. Devido à alta velocidade cria-se um jato responsável por criar uma área de baixa pressão na câmara de aspiração fazendo com que o fluido bombeado flua para dentro desta câmara (HAMMOUD, 2006).

Desde o surgimento das primeiras motos aquáticas, os PWC possuíam tecnologia de motores 2 tempos, o mesmo motor utilizado até hoje por alguns

fabricantes de motores de popa marítimos, que, somente na década passada; passaram a realizar mudanças em seus projetos de motores, atualmente maior parte dos PWC são compostos de sistemas sofisticados como: injeção direta, limitadores de velocidade, melhorias de conforto, acessórios com sistemas de localização como GPS (*Global Positioning System*) e motores 4 tempos representados na figura 2.4, que começaram a ser implantados em 2003 e sempre estão a ganhar melhorias a cada ano. Além disso as motos aquáticas atuais ainda possuem sistemas de escape modernos com catalisadores de 2 estágios, casco isolado e uma criteriosa seleção de materiais que juntos reduzem em até 70% os ruídos gerados em comparação com os modelos desenvolvidos em 1990 (PWIA, 2006).

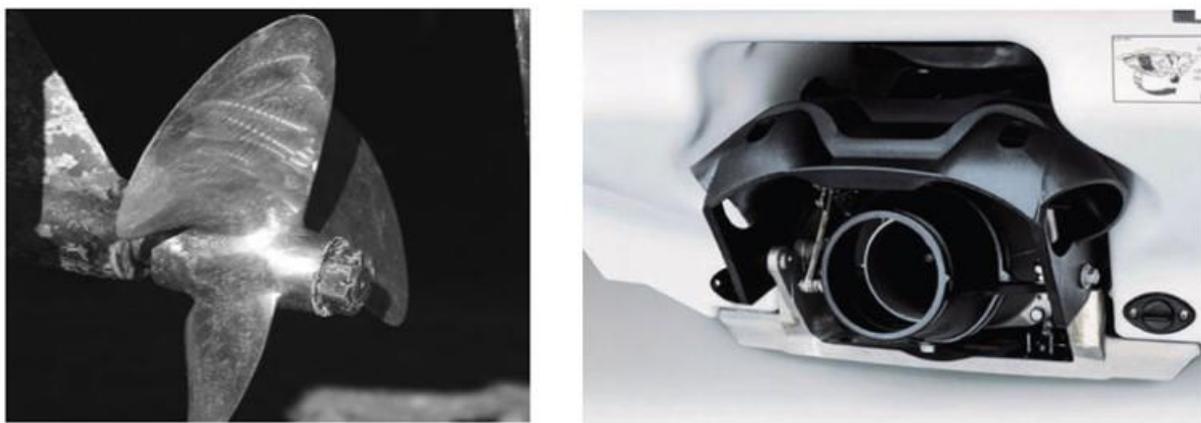


**Figura 2.4** – Motor de um PWC 4 tempos - Produzido Conforme Determinações Ambientais (PWIA, 2006).

Assim como a maioria dos barcos, a velocidade dos PWC tem aumentado consideravelmente com o passar dos anos, desde os primeiros modelos que possuíam apenas 34 cv em 1974, a potência das motos aquáticas em 1998 já possuíam 100 cv ou mais em 16 modelos que eram comercializados, para conseguir um alto desempenho, modificações nos rotores foram propostas afim de se obter tal façanha, desde então, a implementação de hélices de 3 pás começaram a ser utilizados nos modelos de pré-venda, pois estes melhoravam a performance dos PWC. Neste período 25% dos proprietários de PWC fizeram modificações e

alterações mecânicas em suas motos aquáticas e outros 18% realizaram modificações para aumentar o desempenho do motor (NTSB, 1998).

Os PWC atuais também sofreram modificações em relação a exposição de suas hélices, os modelos de décadas passadas possuíam suas hélices expostas como mostra a figura 2.5, já os modelos da nova geração possuem suas hélices no interior de uma carcaça, o jato de água criado pela hélice é direcionado para um bocal na parte baixa traseira da moto aquática quando o acelerador é acionado pelo piloto (PWIA, 2006).

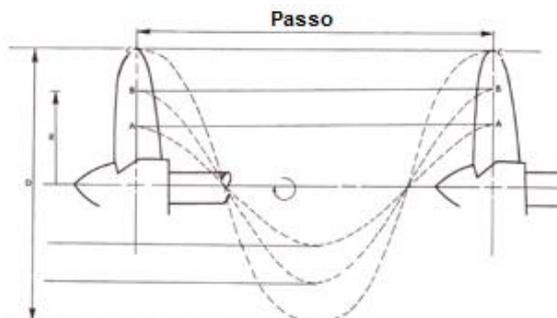


**Figura 2.5** – Evolução dos Modelos de Exposição do Hélice – a Esquerda Sistema Tradicional, a Direita Sistemas Atuais (adaptado de PWIA, 2006).

A grande maioria de hélices utilizadas, nos mais variados tipos de equipamentos, possuem uma geometria peculiar e complexa que, ainda hoje é motivo de pesquisas na comunidade científica. Estes trabalhos visam à obtenção de uma geometria que permita alcançar o melhor desempenho dos veículos náuticos, assim como melhorar os processos de fabricação. No projeto de uma hélice, deve-se levar em consideração alguns fatores importantes, como por exemplo: um bom sistema de coordenadas para descrever seu movimento no espaço, e vários parâmetros geométricos, tais como: (BOAS, 2006).

- **Diâmetro da Hélice** – Faz referência ao círculo gerado pela projeção da ponta da pá da hélice, sendo sua medida uma referência para os demais parâmetros geométricos.

- Passo da Hélice – A distância percorrida pela hélice ao longo do eixo x a cada revolução, figura 2.6 abaixo.



**Figura 2.6** – Definição do passo da hélice (BOAS, 2006).

- Deslocamento Axial – Inclinação da lâmina da pá da hélice (responsável por aumentar o empuxo da hélice sem haja uma alteração de diâmetro).
- Ângulo de Enviesamento – Ângulo de referência da pá e a linha de referência da hélice (este ângulo reduz as vibrações geradas pelas pás, fazendo com que a hélice corte a água mais suavemente).
- Número de Pás – Geralmente varia entre 2 e 7 pás, um número maior de pás significa uma geração maior de empuxo, porém muitas pás diminui a eficiência e aumenta as vibrações.
- Área da Pá – A soma das áreas reais de uma superfície, de cada uma das pás (este parâmetro está relacionado diretamente com a eficiência da hélice, quanto maior seu valor maior será o arrasto gerado pela hélice, diminuindo assim sua eficiência).
- Perfil da Pá – São obtidos pela interseção de uma superfície cilíndrica com a pá (os perfis mais utilizados são aqueles que possuem uma distribuição de tensão uniforme e baixo risco de cavitação).

Fica claro que as hélices de motos aquáticas também devem ser bem projetadas, pois sua geometria influencia diretamente na eficiência de navegação destas motos. Na figura 2.7 são apresentados alguns tipos de hélices utilizadas em motos aquáticas.



**Figura 2.7** – Modelos e tipos de hélices de motos aquáticas (GOOGLE IMAGES/IMPELLER JET SKI, 2015).

## **2.5 MECANISMOS DE DESGASTE EM SISTEMAS DE PROPULSÃO**

### **2.5.1 Introdução ao Desgaste**

Para que se tenha um bom desempenho da maioria de equipamentos industriais, faz-se necessário o estudo do desgaste, este é responsável direto quando se busca por exemplo redução de custos, aumento da vida útil dos equipamentos e diminuição da reposição de peças, pois este de certa forma é responsável por interferir

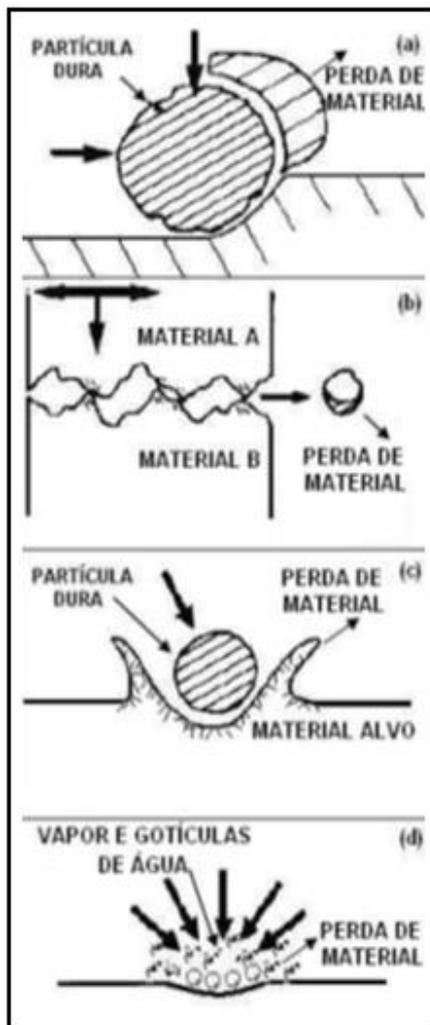
no desempenho e qualidade de vários produtos industriais afetando diretamente o sistema financeiro de uma empresa.

Conforme afirma Hutchings (1992) entende-se por tribologia, a ciência e a tecnologia que estuda a interação do movimento relativo que existe entre as superfícies dos materiais, essas interações além de provocar modificações em suas superfícies, também é responsável por levar os mesmos a uma perda progressiva de material, ou seja, desgaste.

A norma ASTM G 190-06 ainda afirma que o desgaste é um fenômeno complexo, que pode envolver dois ou mais corpos com um ou mais materiais, e é dependente de uma grande variedade de fatores como, movimento, carregamento e meio ambiente, ela ainda ressalta que diferentes materiais podem apresentar diferentes mecanismos de desgaste em uma mesma situação. Para que se tenha uma melhor análise do processo de desgaste a norma afirma que tanto as propriedades do material quanto as propriedades do sistema são de suma importância para avaliação do comportamento ao desgaste, o grupo de elementos que afetam este comportamento é definido pela norma como tribosistema.

De acordo com Marques (2006), existem quatro tipos básicos de desgaste, sendo eles: a adesão, abrasão, erosão e a reação triboquímica (uma mistura de corrosão e desgaste), ele ainda faz referência a outras formas de desgastes como a fadiga de contato, cavitação e o *“fretting”* e *“scuffing”*, que também são vistos como mecanismos de degradação de superfícies. Os mecanismos de desgaste podem ser vistos mais detalhados na figura 2.8 adiante, o desgaste erosivo será detalhado para fins de revisão de literatura desta pesquisa.

Para Sundararajan (1987) o desgaste abrasivo é caracterizado pela remoção de material sólido a partir de uma superfície pela ação de deslizamento unidirecional de partículas discretas de um material rígido sobre outro material, é o mecanismo de degradação mais comum encontrado pela indústria de engenharia, o desgaste abrasivo ainda pode ser constituído por dois ou mais corpos envolvidos em um processo de abrasão por partículas duras entre suas superfícies formando assim o tribosistema. Marinescu *et al.* (2004) ainda afirma que para uma melhor compreensão do sistema tribológico é preciso levar em consideração fatores como: movimentos, materiais, energias envolvidas e vibrações que podem em alguns casos ser controlável, mas que nem sempre é possível de se evitar.



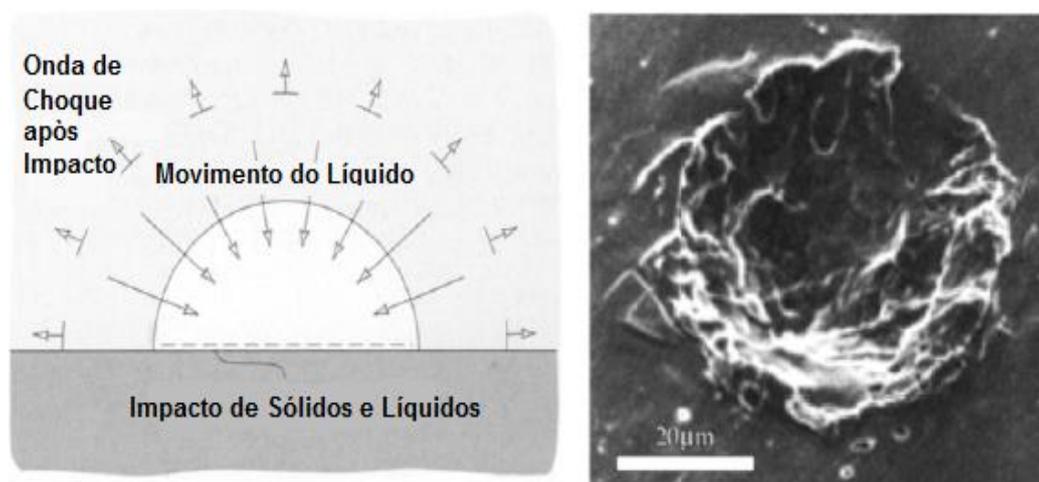
**Figura 2.8** - Tipos de Desgaste: (a) Abrasivo; (b) Adesivo; (c) Erosivo e (d) Cavitação (MARQUES, 2006).

Marques (2006) ainda ressalta que neste mecanismo a taxa de desgaste irá depender do grau de penetração do abrasivo na superfície que está a se desgastar, sendo a dureza do abrasivo grande por consequência o desgaste será maior, ainda com uma carga elevada em áreas pequenas pode-se ter deformação plástica na matriz e fratura de fases duras que compõem a superfície.

Conforme a norma ASTM G 40-13 diz, o desgaste adesivo refere-se a um tipo de desgaste gerado pelo deslizamento de uma superfície sólida ao longo de uma outra superfície, a perda de material ocorre devido a ligações localizadas entre superfícies sólidas que resultam em transferência de material entre ambas gerando assim o desgaste. Para Ludema (1992) e Marques (2006) estas ligações localizadas estão

associadas a pontos de contato que estão sujeitos a ação de forças de atração como: iônicas, covalentes, metálicas, pontes de hidrogênio e forças de Van der Waals, onde a deformação plástica e a ausência de impurezas podem facilitar ainda mais o processo de adesão.

Outra forma de desgaste é a cavitação, esta é caracterizada por danos causados em equipamentos como hélices, pás de turbinas, tubulações e alguns tipos de válvulas, levando estes a uma série furos e buracos na superfície exposta a cavitação, este mecanismo de desgaste está descrito na figura 2.9 abaixo, ele ocorre devido ao colapso de microbolhas na superfície sólida em contato com um fluido, devido a variação de pressão as bolhas são formadas quando o fluxo de líquido entra em uma geometria divergente saindo de um diâmetro menor para um diâmetro maior gerando assim uma baixa pressão e se eclodem em regiões de alta pressão, o método ideal de prevenir a cavitação é evitar pressões negativas próximo as superfícies, mas na prática isso é praticamente impossível (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).



**Figura 2.9** – Mecanismo de Degaste por Cavitação: a) mecanismo do colapso de bolhas e b) evidência do dano superficial causado por cavitação em um material metálico (irídio) (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

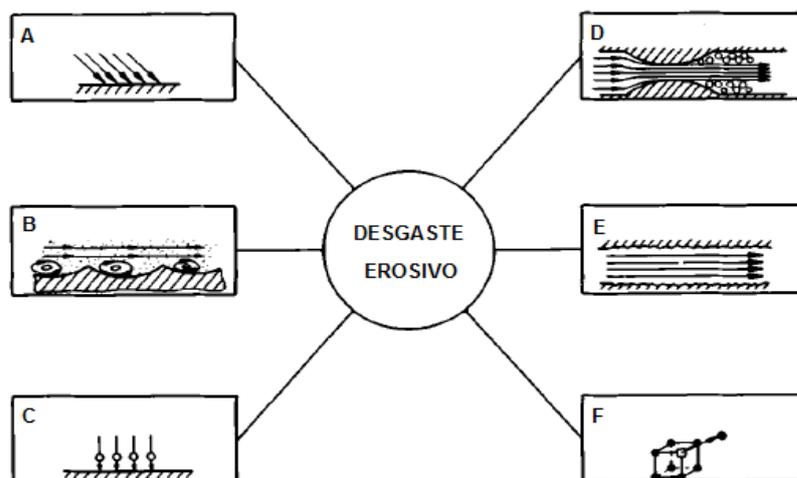
O pesquisador Bhushan menciona ainda que os materiais resistentes ao desgaste por fadiga (duros, mas não frágeis) também possuem boa resistência ao desgaste por cavitação (BHUSHAN, 2013).

## 2.5.2 Desgaste Erosivo

Entende-se por desgaste erosivo a perda de material causado pelo impacto de partículas de um sólido ou um fluido com outros componentes contra a superfície de um corpo, este tipo de desgaste pode ocorrer em uma grande variedade de equipamentos, sendo mais comum em pás de turbinas e rotores de bombas em sistemas de tratamento de lama de minerais, sendo as principais variáveis responsáveis por este tipo de desgaste: as propriedades da partícula de erosão (conhecida como erodente), as propriedades do material a sofrer desgaste (material erodido) e as características de operação, é com a análise destas três propriedades em conjunto que melhor compreende-se este tipo de desgaste (FINNIE, 1960; STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005; HUTCHINGS, 1992).

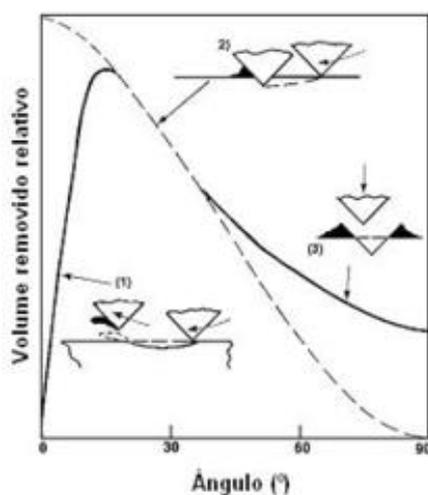
A norma ASTM G 40-13, ainda confirma que o desgaste erosivo é caracterizado por uma perda progressiva de material de uma dada superfície sólida provocada pela interação mecânica entre aquela superfície e um fluido, um fluido de componentes múltiplos, colisão de líquidos ou partículas sólidas.

Segundo Zum Ghar (1987), o desgaste por erosão é caracterizado pelos modos de desgaste descritos na figura 2.10 abaixo.

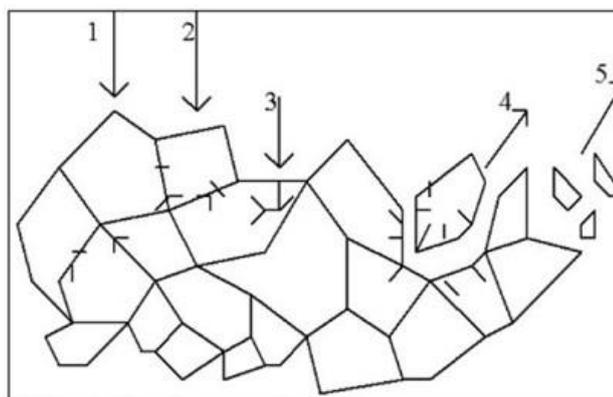


**Figura 2.10** – Classificação dos Modos de Desgaste Erosivo. A) Erosão através de partículas sólidas em meio gasoso; B) Erosão através de partículas sólidas em meio de líquidos C) Erosão causada pela ação de gotas de líquidos D) Cavitação-Erosão; E) Erosão-Corrosão; F) Erosão com processo Térmico (adaptado de ZUM GHAR, 1987).

Materiais de natureza dúctil como os metais, tendem a sofrer um desgaste por deformação plástica, em que o material é removido pela ação de corte ou de deslocamento da partícula de erosão, como pode ser visto na figura 2.11 adiante. Em contrapartida para os materiais frágeis como os cerâmicos que são mais sensíveis a trincas e microfissuras, o desgaste ocorre através de trincas que se interligam devido aos choques da partícula erodente com a superfície erodida como mostra a figura 2.12 adiante (FINNIE, 1960).



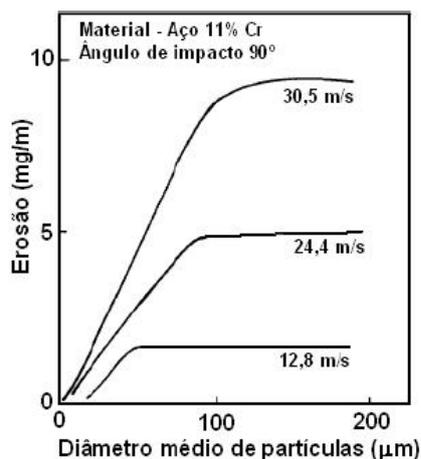
**Figura 2.11** – Resultados Experimentais para a Erosão de um Material Dúctil (FINNIE, 1995).



**Figura 2.12** – Mecanismo de Desgaste. 1 – Fadiga de fase Intergranular; 2 – Microtrinca no Contorno de grão; 3 – Indução de Microtrincas no grão; 4 – Desprendimento do grão; 5 – Desprendimento de Fragmentos do Grão (MARQUES, 2006).

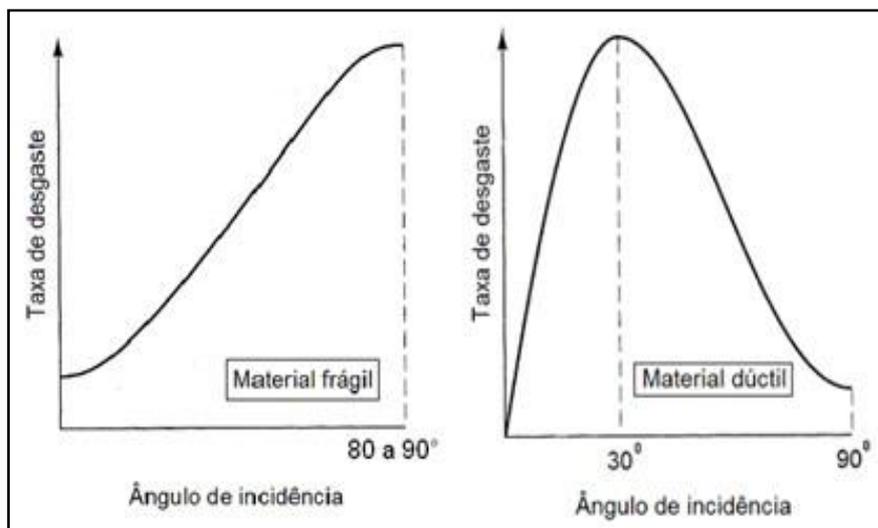
A taxa de desgaste erosivo pode ser alterada quando se tem o controle de certos parâmetros como: o número de partículas que atingem a superfície erodida em um determinado tempo, velocidade e direção de impacto na superfície e condições do fluxo de fluido, segundo Finnie estas características são de grande importância para o estudo do desgaste erosivo seja para materiais dúcteis ou frágeis (FINNIE, 1972).

Dentre as propriedades das partículas erodentes é visto que seu tamanho pode influenciar a taxa de desgaste, as partículas que estão compreendidas entre 5 e 500  $\mu\text{m}$  de diâmetro são as principais responsáveis pelos problemas de erosão (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005). Porém Kossel (1992) verificou que o tamanho das partículas erodentes tem pouco ou nenhum efeito sobre a taxa de erosão de materiais dúcteis, desde que o tamanho da partícula seja superior a 100  $\mu\text{m}$  conforme figura 2.13 mostra, entretanto a taxa de erosão diminui com a diminuição do tamanho da partícula; quando ela está abaixo de 100  $\mu\text{m}$ .



**Figura 2.13** – Variação da taxa de erosão com o tamanho da partícula em um aço utilizando um ângulo normal de impacto com diferentes velocidades de ataque (MARQUES, 2006).

O ângulo de incidência da partícula erodente é mais um fator que pode variar a taxa de erosão dos materiais, a figura 2.14 mostra que, para materiais com superfícies mais dúcteis; têm-se um desgaste mais acentuado próximo de 20° a 30°, já para superfícies mais frágeis o desgaste maior ocorre para ângulos de 90° (HUTCHINGS, 1992 e STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).



**Figura 2.14** – Representação esquemática do efeito do ângulo de impacto sobre as taxas de desgaste de materiais dúctil e frágeis (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

O formato das partículas erodentes também é um fator essencial que altera fortemente a taxa de erosão, erodentes com formatos mais pontiagudos tem uma tendência maior ao desgaste que aqueles com formatos arredondados, estas diferenças podem resultar em alterações na taxa de desgaste por um fator que pode chegar a ser até dez vezes maior, entretanto identificar e qualificar as características de forma destas partículas é uma tarefa difícil devido a sua forma tridimensional complexa (HUTCHINGS, 1992).

Conforme salienta Locatelli (2009) em sua pesquisa, os impactos de partículas com formas arredondadas causam poucas deformações nas superfícies de contato fazendo com que o número de impactos seja maior para que haja perda de material por deformação plástica.

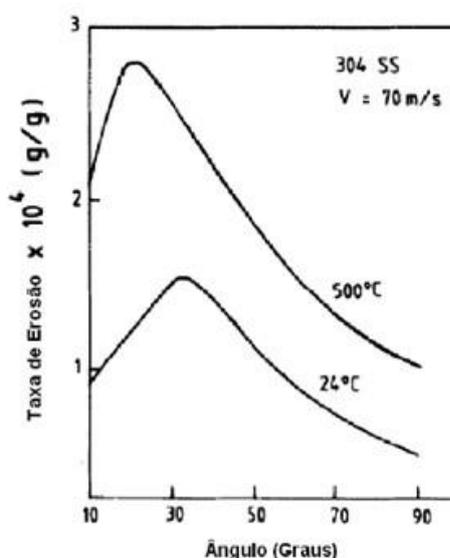
Outra característica que também se une as citadas anteriormente contribuindo para o controle da taxa de desgaste, é a dureza da partícula erodente, de acordo com Bolsser *et al.* (2013), quando a dureza destas partículas é menor que a dureza da superfície de erodida, a taxa de desgaste pode ser muito baixa podendo provocar modificações no mecanismo de remoção de material, em contra partida se a dureza da superfície desgastada for menor que a dureza das partículas erodentes, a taxa de erosão sofrerá um aumento considerável, desde modo é notável que tanto a dureza

da partícula erodente como a do material alvo, está diretamente relacionada com a taxa de erosão.

Para Stachowiak e Batchelor (2005) o mecanismo de desgaste assim como a taxa de erosão, são diretamente influenciados pela temperatura, quando o desgaste ocorre em meio oxidativo um dos primeiros efeitos da temperatura é proporcionar o amolecimento do material erodido e conseqüentemente aumentar as taxas de desgaste, em um certo momento a altas temperaturas o desgaste ocorre com maior frequência por oxidação da superfície erodida na forma de óxidos frágeis do que a própria erosão da superfície em si, deixando claro que existe uma relação forte entre propriedades mecânicas do material, taxa de erosão e temperatura.

Outra característica responsável por comprometer a taxa de erosão é o regime de escoamento, este quando se encontra em regime turbulento causa um maior desgaste quando comparado ao regime laminar, isto ocorre devido as partículas erodentes no regime laminar serem atraídas paralelamente a superfície de desgaste, fato que não ocorre no regime turbulento (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

Já para Sundararajan e Roy (1997), a taxa de erosão para materiais que não sofrem corrosão é baixa devido a influência da temperatura tanto no erodente como na superfície erodida ser relativamente pouca, a figura 2.15 mostra como isso pode ocorrer para um aço inoxidável 304 em determinadas condições de desgaste.



**Figura 2.15** – Erosão por partícula sólida de um aço Inox 304 a uma velocidade de 70 m/s em função do ângulo para temperaturas de 24 e 500 C° (SUNDARARAJAN e ROY, 1997).

### 2.5.3 Desgaste Oxidativo

Conforme salienta Matamoros (2004), desgaste oxidativo refere-se ao desgaste causado pelo oxigênio atmosférico, bem semelhante a este, o desgaste corrosivo é um termo geral relativo a qualquer forma de desgaste depende de processos químicos ou corrosivos, estas duas formas de desgaste podem provocar um surpreendente aumento na taxa de perda de material e geralmente provocam a diminuição do coeficiente de atrito, prosseguindo, Matamoros ainda afirma que os metais em geral oxidam-se quando estão a temperaturas altas em meios oxidantes ou no ar, isso faz com que o processo de oxidação seja uma das mais importantes reações de corrosão em grandes temperaturas.

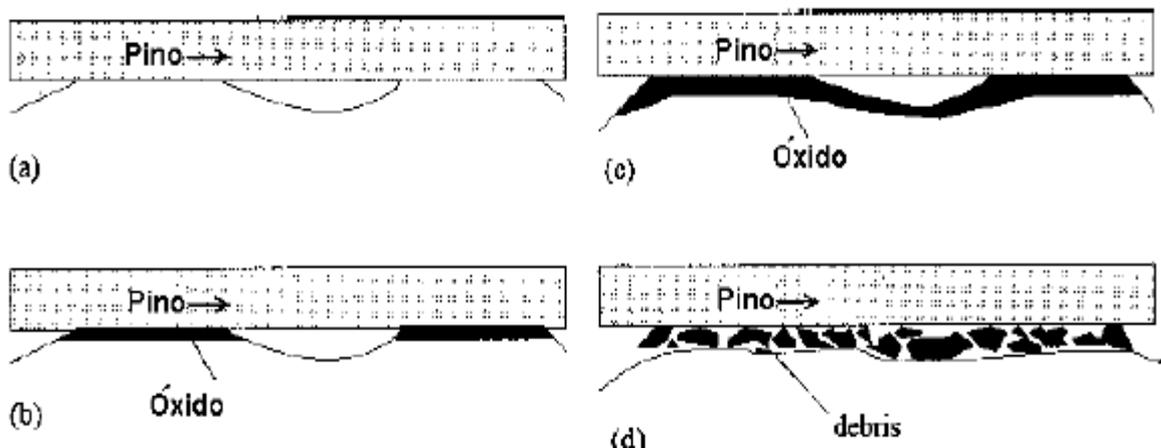
Mas foi em 1930, que Fink publicou o primeiro trabalho em que a oxidação foi identificada como um componente no desgaste de metais, em seu trabalho ficou claro que tanto sob atmosferas normais ou inertes, o oxigênio era indispensável para que este tipo de desgaste ocorresse (QUINN, 1983).

Para outros, desgaste oxidativo trata-se do desgaste de metais não lubrificados secos na presença de ar ou oxigênio atmosférico, pois este muda radicalmente os coeficientes de atrito e taxas de desgaste de metais deslizantes, através de testes com metais, foi visto que quando a carga e velocidade de deslizamento eram altas, a temperatura se elevava a centenas de graus Celsius, isso fez com que os detritos de desgaste mudassem para óxidos de ferro ao invés de permanecerem ferro metálico, formando assim uma camada de filme acima da real superfície de contato, fazendo com que as taxas de desgaste fossem mais suaves. As reações químicas que ocorrem nas superfícies dos materiais podem ser benéficas por exemplo protegendo a superfície de um possível desgaste adesivo, em outros casos ela pode não ser tão boa assim, pois quando estas reações não são bem controladas, a superfície desgastada poderá a vir ter uma perda considerável de material subjacente a superfície por formação de oxido, além de também perder material por uma outra forma de desgaste, nestas ocasiões podem ocorrer quatro processos distintos citados adiante (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

- A formação de uma película protetora que inibi tanto a corrosão quanto o desgaste;

- A formação de uma película fraca com curto tempo de vida que pode gerar uma alta taxa de desgaste devido à formação e destruição regular destes filmes;
- As películas de proteção da superfície podem ser usadas por *pitting*, e um acoplamento galvânico entre os filmes restantes e a camada logo abaixo de substrato podem resultar em uma rápida corrosão da área desgastada na sua superfície;
- Os processos de desgaste e de corrosão podem atuar independentes, e juntos ocasionar uma perda maior de material.

Uma teoria de mecanismo de desgaste oxidativo, em aços com baixo teor de carbono e ferros fundidos, citada por Quinn, 1984 e Matamoros, 2004 afirma que, quando dois corpos estão em contato a uma determinada velocidade sem lubrificação e submetidos a uma certa carga, no estágio inicial, estes corpos sofreram um desgaste alto, e logo entraram em regime de conformidade, com o aumento da área de contato a temperatura tende a aumentar, a um certo instante o acréscimo de temperatura facilitará a formação de óxidos, com o aumento do atrito, estas camadas de óxidos tendem a aumentar até certo ponto quando se tornam frágeis e se rompem formando os “*debris*”, posteriormente as camadas limpas da superfície de desgaste iniciam este ciclo novamente, a figura 2.16 ilustra como isso ocorre (QUINN, 1984, *apud* MATAMOROS, 2004).



**Figura 2.16** – Mecanismo de Formação de Desgaste Oxidativo (a) Formação do Patamar de óxido; (b) Crescimento do Patamar; (c) Expansão dos Óxidos; (d) Quebra dos Óxidos Formação de Partículas (MATAMOROS, 2004).

#### 2.5.4 Desgaste por Fadiga Superficial

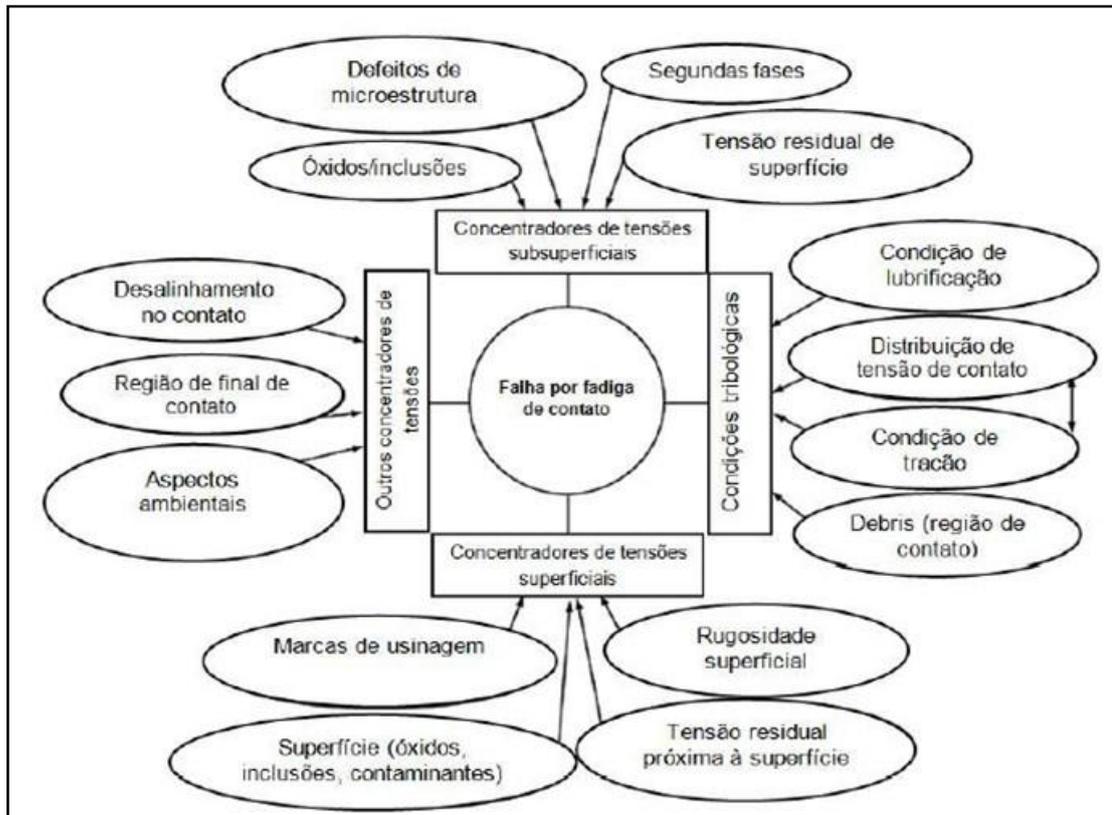
Este tipo de desgaste pode ser caracterizado pela formação de fissuras e descamação de material devido a uma carga alternada repetida em superfícies sólidas, ou seja, que passam por um processo de ciclagem. Como exemplo têm-se o processo de laminação, onde as superfícies sólidas sofrem contato deslizante por longos períodos, além disso o impacto de sólidos e líquidos também podem resultar em um processo de ciclagem levando o material a sofrer desgaste, a fadiga superficial ainda pode ocorrer em escala microscópica devido ao contato repetitivo de asperezas nas superfícies dos sólidos (ZUM GHAR, 1987).

Para muitos contatos em que se tem um bom sistema de lubrificação é visto que a adesão entre as duas superfícies são praticamente insignificantes, mesmo assim ainda percebe-se que a taxa de desgaste é alta e não deve ser desprezível, este desgaste é ocasionado devido as deformações sofridas pelas asperezas e camadas superficiais que se atritam com a superfície oposta, estes contatos entre asperezas são acompanhados por grandes tensões locais que se repetem por um enorme número de vezes tanto no rolamento quanto no deslizamento, este mecanismo é responsável por gerar partículas de desgaste por fadiga provocando trincas e rachaduras nos mateias (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

Conforme Santos (2012) afirma em sua pesquisa, são dois os locais mais propícios ao início de falha por fadiga de contato, sendo eles:

- Região Sub-Superficial – (localizada em uma região onde a tensão de cisalhamento é máxima).
- Região de Superfície do Material – (influenciada por fatores ligados a concentração de tensões tais como: qualidade das superfícies, inclusões, partículas que estão livres em meio no lubrificante ou de segunda fase).

A figura 2.17 ilustra vários fatores que estão relacionados com a falha de fadiga por contato, Santos ainda ressalta que ao se estudar estes fatores separadamente se faz necessário ter um programa de estudo onde se mantém controlado ou constantes os demais.



**Figura 2.17** – Fatores que afetam a vida em fadiga de um componente (SANTOS, 2012).

Conforme a teoria de delaminação de trincas sub-superficiais proposta por Suh em 1973, o desgaste por deslizamento é causado por trincas (geradas pelos constantes carregamentos cíclicos) que se encontram abaixo da superfície e vazios gerados pelas deformações plásticas (ocasionadas por uma grande concentração de tensões), deste modo as partículas de desgaste são criadas quando as trincas alcançam esta superfície, esta teoria ainda diz que os desgastes por adesão, fadiga e abrasão são causados pelo mesmo mecanismo, também é proposta uma equação para o cálculo volumétrico de desgaste gerado por um corpo duro sobre um corpo mole, mais esta é dependente de características da superfície e propriedades metalúrgicas de alto nível de complexidade (SUH, 1973 *apud* TOMANIK, 2000).

Como forma de reduzir o desgaste por fadiga Magee (1992) verificou que alguns tratamentos de superfície como nitretação e cementação, aumentam a dureza superficial do material e a distribuição de tensões residuais, como resultado verificou-se que o desgaste por fadiga foi reduzido.

### 2.5.5 Recobrimentos Resistentes ao Desgaste Erosivo

A fim de se obter uma proteção ao desgaste erosivo a comunidade científica tem buscado nos últimos anos alternativas para minimizar o mesmo, através por exemplo de métodos com tratamentos térmicos, buscando a obtenção de superfícies que sejam mais resistentes, este desgaste quando não controlado pode vir a causar enormes prejuízos nas mais variadas peças que circulam pelas indústrias em geral, a seguir será abordado alguns métodos que visam garantir determinado grau de resistência para alguns materiais em relação a este tipo de desgaste.

Conforme descrito por Stachowiak e Batchelor, (2005) os aços dúcteis são os mais resistentes ao desgaste erosivo, é visto também que o desgaste erosivo destes aços possui característica de erosão dúctil clássica, ou seja, há uma taxa máxima de desgaste a um ângulo de impacto de aproximadamente 30°, fato também comprovado por Hutchings (1992), isso deixa claro que a resistência ao desgaste dos aços a erosão sofre limitação pela falta de ductilidade, mas como regra geral para os aços, em vez de ductilidade a dureza deve ser melhorada (maior) visando a obtenção de uma resistência a erosão.

Os aços inoxidáveis são bastante resistentes a vários tipos de desgaste e corrosão sendo empregado em uma grande gama de indústrias, geralmente os aços inoxidáveis austeníticos que possuem teor alto de nitrogênio, apresentam uma melhora significativa a alguns tipos de desgaste, fato que é comprovado por fatores como uma maior resistência a deformação plástica, deformação plástica distribuída com homogeneidade e um maior consumo de energia do impacto de bolhas, além disso o uso deste tipo de aço inoxidável se torna mais atraente, pois seu preço quando comparado aos aços inoxidáveis tradicionais são similares, além disso ele ainda possui um preço pequeno quando comparado a ligas a base de cobalto que são utilizadas para tentar combater problemas de desgaste (TSCIPTSCHIN *et al.*, 2010).

Toro *et al.* (2001), ressalta que os aços inoxidáveis martensíticos também possuem uma elevada resistência em suas propriedades mecânicas e uma moderada resistência à corrosão, porém quando são submetidos ao desgaste por erosão com presença de partículas mais duras em soluções aquosas, verifica-se que há uma redução de resistência ao desgaste, fato que pode ser explicado por um efeito sinérgico entre a corrosão e os mecanismos de desgaste, assim tanto para o aço

inoxidável austenítico quanto para o martensítico, pequenas quantidades de nitrogênio obtidos através de técnicas de nitretação, são capazes de aumentar sua resistência ao desgaste podendo provocar mudanças radicais que beneficiam tanto as propriedades mecânicas quanto as propriedades de corrosão dos aços.

Ochoa (2007), diz que um aço inoxidável de alto nitrogênio (*High Nitrogen Stainless Steels HNSS*) é considerado de alto nitrogênio quando o seu teor é aumentado intencionalmente, entretanto por convenção, Ochoa ainda afirma que estes aços são classificados conforme a concentração de nitrogênio que neles estão presentes, sendo:

- Aços Martensíticos > 0,08 % de Nitrogênio
- Aços Austeníticos > 0,4 % de Nitrogênio

Dentre os processos de nitretação existentes, Ochoa menciona que o processo de nitretação gasosa é bastante eficaz, pois este além de aumentar a dureza e a resistência ao desgaste e corrosão em ambientes variados, evita a precipitação de nitretos de cromo, que são formados com grande intensidade por processos de nitretação convencionais, o que pode reduzir a resistência a corrosão dos aços.

### **2.5.6 Desgaste em Sistemas de Propulsão de Motos Aquáticas**

Apesar de trazer aos seus condutores momentos inesquecíveis de laser as motos aquáticas também possuem seu lado desagradável, as manutenções necessárias destes equipamentos as vezes são de alto custo e ocorrem constantemente devido à má experiência de pilotagem ou falta de treino dos pilotos, um dos componentes que necessita de reparo com frequência é o sistema de propulsão, este sofre danos capazes de afetar o desempenho do equipamento, o que para muitos se torna irritante, sair para navegar com seu PWC e perder performance principalmente com perda de velocidade, além de aumentar consideravelmente as vibrações.

De acordo com o manual BRP (2014), o uso dos PWC em águas com profundidade menor que 90 cm figura 2.18 deve ser evitada, deste modo previne-se que uma grande quantidade de areia e outros detritos sejam captados pelo sistema

de propulsão, o que danificaria o hélice e outros componentes do mesmo em um curto prazo de operação.



**Figura 2.18** – Rasura mínima em que um dos modelos de moto aquática deve trafegar, A = 90 cm (BRP, 2014).

Adiante, a figura 2.19 apresenta algumas hélices de motos aquáticas danificadas por desgaste erosivo e corrosivo, na imagem é possível observar que a ação das partículas abrasivas juntamente com a corrosão deixa as pás da hélice finas e quebradiças, gerando uma perda de material, e assim, comprometendo o desempenho da bomba de hidrojato.

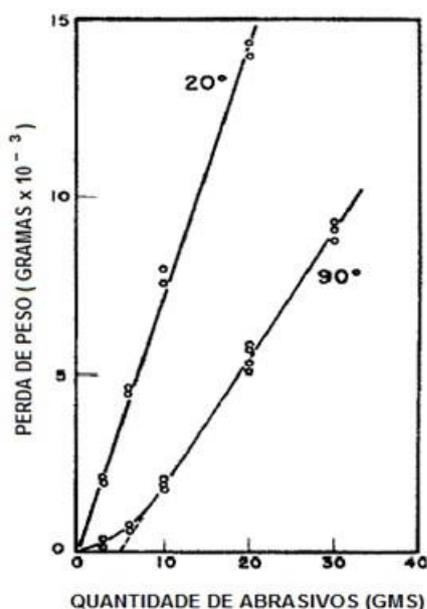


**Figura 2.19** – Hélices desgastadas por erosão e corrosão (GOOGLE IMAGES/ WEAR IN IMPELLER OF JET SKI, 2015).

Navegar em águas rasas além de danificar o sistema de propulsão pode fazer com que o motor dos PWC superaqueçam, navegar nestes locais faz com que a grade de captação fique obstruída com detritos e vegetais de superfície provocando assim um superaquecimento do motor devido ao alto número de detritos que impedem por exemplo a hélice de trabalhar em suas condições ideais, para evitar este superaquecimento o operador deve parar a navegação com o PWC e manualmente limpar o local e só então retomar a atividade em águas mais profundas (CURREY, 2002).

Entretanto vale ressaltar que nem sempre as motos aquáticas que estão a trafegar pelos rios ou lagos sempre trabalham em águas com a mesma condição de concentração de abrasivos, devido à falta de prática de condução dos pilotos e conhecimento das vias navegáveis, estes ignoram uma série de regras impostas pelos fabricantes e pela legislação aquaviária, uma das principais regras que está diretamente ligada ao desempenho das motos aquáticas é navegabilidade em águas rasas.

Conforme Marques (2006) e Finnie (1960) afirmam, a quantidade de partículas abrasivas afeta diretamente a taxa de erosão como pode ser visto na figura 2.20 abaixo.



**Figura 2.20** – Variação da Perda de Peso com a Quantidade de Abrasivos aço SAE 1020, com abrasivos de carbeto de silício malha 60, e velocidade de 76 m/s (FINNIE, 1960).

Em períodos de seca, os lagos e principalmente os rios estão em seus níveis mais críticos de capacidade com pouca água e enormes praias espalhadas ao longo de seu curso que se torna um atrativo anual para aqueles que estão em período de férias nos acampamentos e ou resorts nas praias formadas as margens dos rios levando consigo um enorme número de veículos náuticos para desfrutarem de momentos de lazer, devido ao leito dos rios se estreitarem neste período, o má conhecimento do local de navegação e o nível baixo de água; faz com que os condutores de PWC trafeguem em alta velocidade sobre bancos de areia que estão muito próximos a superfície da água por centenas de metros durante todos os dias de seu passeio, levando o sistema de propulsão a uma condição extrema de desgaste, em alguns casos navegando sobre meio lamacento, apesar da concentração de abrasivos neste período ser menor em relação ao período de cheia dos rios e lagos, o número frequente de PWC, barcos, lanchas, canoas e outros tipos de veículos náuticos que trafegam durante todo o dia, faz com que o nível de partículas em dispersão na água se eleve bastante, contribuindo assim com o processo de desgaste.

Portanto, é possível observar que, o desgaste do sistema de propulsão além de se desgastar pelo processo comum, também é beneficiado pela má conservação e principalmente pela condução de seus pilotos.

Conforme Chen (2002) diz, o processo de erosão por cavitação pode ocorrer com frequência em rotores de bombas, tubos de trocadores de calor, nas superfícies de hélices, lâminas de turbina hidráulica e vários outros equipamentos hidráulicos que estão em contato com líquidos a alta velocidade sujeitos a variação de pressão.

Devido ao sistema de propulsão de uma moto aquática operar em alta velocidade em contato com líquido (água), nota-se também que além do desgaste erosivo provocado por partículas sólidas em meio líquido o processo de cavitação também contribui com perda de material do hélice, danificando com frequência suas pás conforme a figura 2.21 pode mostrar.

Chen ainda afirma que o controle deste método de desgaste não está relacionado somente com as propriedades do material (composição, estrutura, tratamento térmico, a geometria, a rugosidade da superfícies e etc.), mas também com fatores como a propriedade dos líquidos, características de vibração, temperatura, pressão e principalmente velocidade de fluxo; pois esta é responsável

por dar origem a regiões de extrema baixa pressão, por esta razão uma das maneiras mais eficazes de se reduzir problemas de cavitação é diminuir a velocidade de fluxo.



**Figura 2.21** – Hélice de uma moto aquática danificada por cavitação (disponível em Boattest.com, 2009).

Nota-se, portanto, que tanto o desgaste erosivo causado principalmente por detritos como a areia e o desgaste por cavitação são os principais responsáveis por danificar o sistema de propulsão de motos aquáticas, o manual BRP (2014), recomenda que quando o hélice ou anel de desgaste da bomba de hidrojetos que envolve o hélice no sistema de propulsão estão danificados, os mesmos deveriam ser substituídos por novos exemplares. Entretanto devido ao custo elevado destes periféricos e a rápida deterioração conforme o uso, maior parte dos condutores optam por reparar seus rotores através de processos como: soldagem (visando a recuperação de material perdido por processos de desgaste), usinagem através de tornos mecânicos (feito após o processo de soldagem com o intuito de deixar os hélices com medidas originais de fábrica) e acabamentos superficiais como o polimento e o jateamento, assim eles diminuem o custo de uma manutenção.

## 2.6 OBJETIVOS

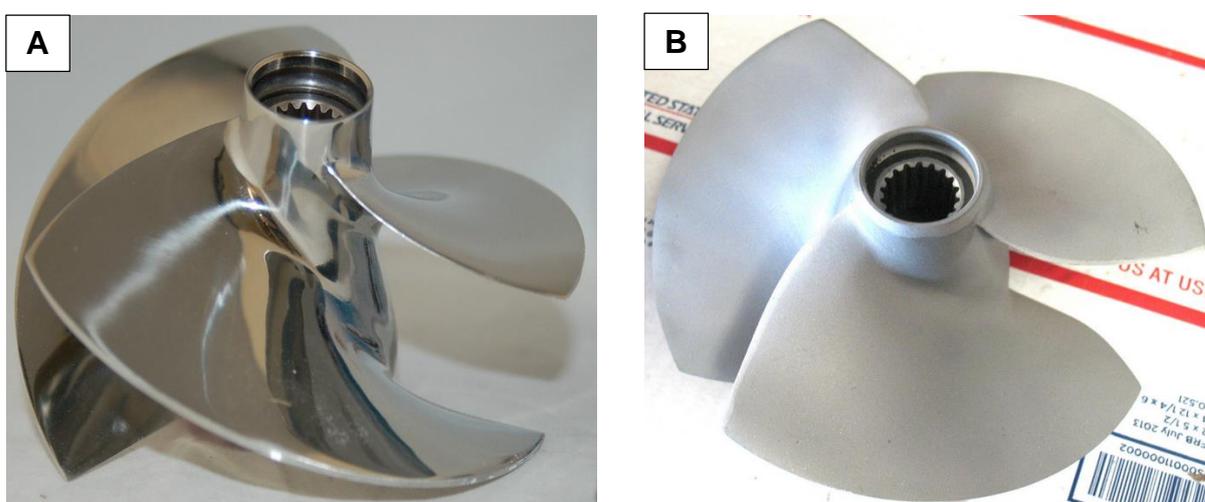
Após discutir alguns métodos de desgaste presentes em hélices dos mais variados tipos de equipamentos incluído as motos aquáticas, os objetivos propostos para realização da pesquisa foram:

- Criar um equipamento capaz de simular desgaste por erosão em meio líquido.
- Avaliar o comportamento ao desgaste erosivo da superfície de materiais que constituem os hélices do sistema de propulsão de motos aquáticas (*Jet Ski*), com tratamentos superficiais de polimento e jateamento.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DA HÉLICE DE MOTO AQUÁTICA

As análises de desgaste foram realizadas com o material de uma hélice usada de um Jet Ski marca Sea Doo, modelo GSX, ano 1997, mostrado na figura 3.1. Neste modelo de Jet Ski a hélice tem aproximadamente 155 mm de diâmetro e gira em uma velocidade máxima de 7000 rpm.



**Figura 3.1** – Hélice de uma moto aquática marca Sea Doo, modelo GSX, ano 1997, a) polida e b) jateada.

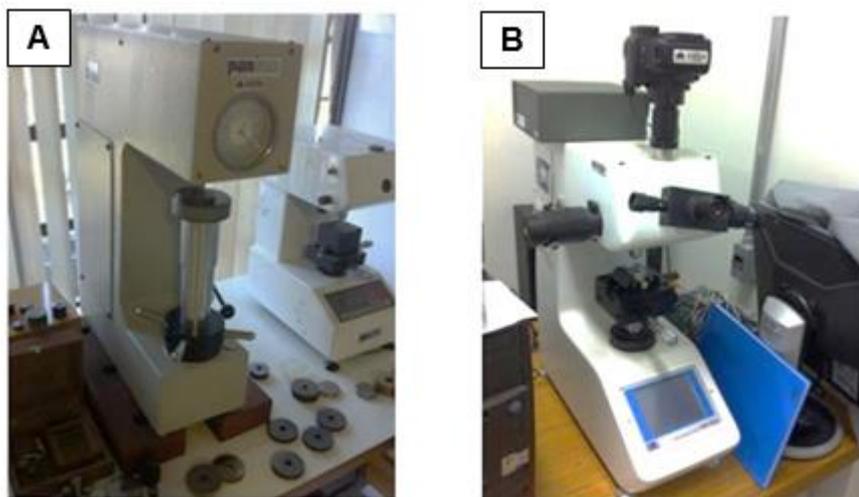
##### 3.1.1 Composição Química

Análises de composição química foram realizadas no material por meio de análises de Fluorescência de Raio-x.

##### 3.1.2 Dureza

A dureza do material da hélice foi determinada por meio de medidas de dureza Rokwell C com carga de 150 kgf (durômetro Zwick/Roell modelo ZHU250) e medidas de microdureza Vickers com carga de 1 kgf (microdurômetro marca Fisher modelo HV 100). Pelo menos cinco medições foram realizadas com cada tipo de ensaio visando

minimizar os erros. Na figura 3.2 são mostrados os equipamentos utilizados nestes ensaios.



**Figura 3.2** – a) Durômetro e b) Micro-Durômetro.

### 3.1.3 Análises Metalográficas

Pedaços de material foram retirados do hélice e embutidas a frio para realização de análises metalográficas. As superfícies destes pedaços foram preparadas para observações metalográficas usando métodos convencionais de polimento, ou seja: lixamento (lixas 180, 220, 320, 400, 600 e 1200) utilizando-se água como lubrificante e seguido de polimento com alumina de  $1\mu\text{m}$ .

Para revelar os microconstituintes foi realizado um ataque químico eletrolítico utilizando-se uma solução de ácido oxálico 10% e 6 V (BIRD, 1994).

As imagens da microestrutura foram captadas através do Microscópio Ótico Confocal Axio Imager Z2m (marca Zeiss), mostrado na figura 3.3, do Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – Crti da Universidade Federal de Goiás – UFG.

Análises quantitativas das fases presentes foram realizadas com a ajuda do software *ImageJ*.



**Figura 3.3** – Microscópio Ótico Confocal Axio Imager Z2m (Zeiss).

### 3.2 PARTÍCULAS ABRASIVAS

O abrasivo, usado para a realização dos ensaios desgaste erosivo, foi areia do Rio Araguaia (Centro-Oeste do Brasil). A areia foi coletada das margens do rio, de locais onde a prática de esportes náuticos é intensa o ano todo, principalmente com o uso de veículos tipo jet-ski.

A areia coletada foi peneirada manualmente, utilizando peneiras de construção civil (figura 3.4). Foram removidas pedras e partículas estranhas a areia, assim como também, areia muito fina. Foram utilizadas peneiras com abertura de malha de 1000  $\mu\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ , o tamanho das partículas utilizadas nos ensaios ficou entre 300 e 600  $\mu\text{m}$ , pois entre estes dois diâmetros encontra-se as partículas que estão entre as principais responsáveis por causar desgaste erosivo.



**Figura 3.4** – Peneiras utilizadas na seleção dos abrasivos do ensaio de desgaste.

### 3.2.1 Composição Química

A composição química dos abrasivos foi determinada por meio de análises por Fluorescência de Raio-x.

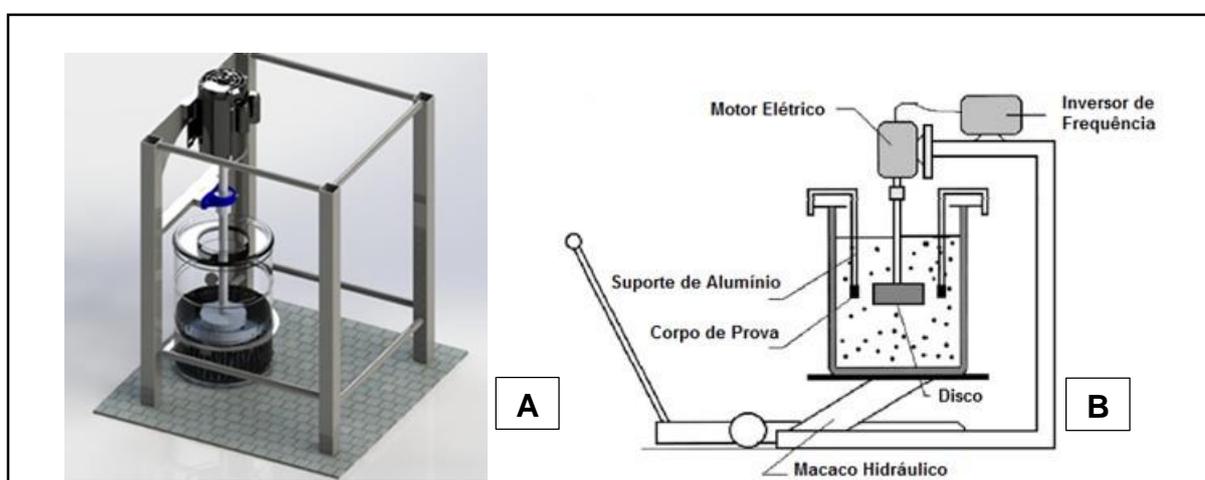
### 3.2.2 Análises Microscópicas

A geometria dos grãos abrasivos foi analisada por meio de observações via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

## 3.3 ENSAIO DE DESGASTE EROSIVO

### 3.3.1 Equipamento

Para simular o desgaste por erosão, foi construído um equipamento semelhante ao utilizado por Toro *et al.* (2001), como é mostrado na figura 3.5.



**Figura 3.5** – Representação esquemática dos equipamentos. a) Desenvolvido nesta pesquisa e b) Utilizado por Toro (TORO *et. al* 2001).

Como diferencial, o estudo desta pesquisa foi feito com os corpos de prova em movimento, e não estáticos como no estudo de Toro, este movimento foi possível através do uso de um motor elétrico trifásico de 3440 rpm.

Segundo o manual BRP (1997) da fabricante do Jet Ski marca Sea Doo, modelo GSX, a velocidade de rotação da hélice varia de 2000 a 7000 rpm. Portanto, os 3440 rpm do motor, usado na máquina, simulariam o uso do jet-ski em condições moderadas.

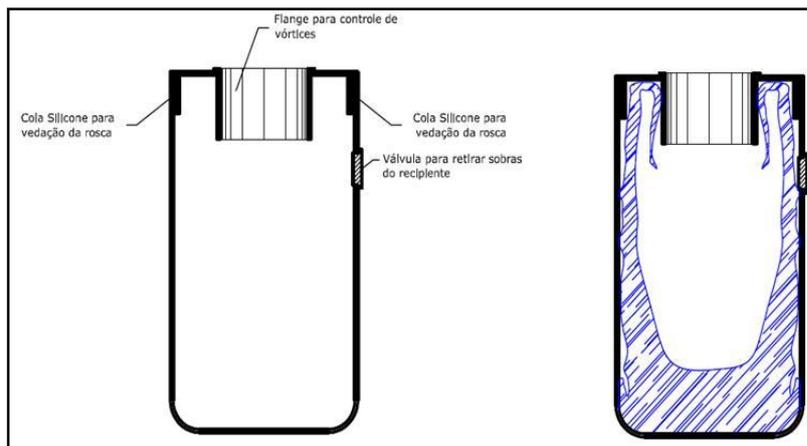
Para fixar as amostras foi construído um porta-amostras com o formato de um disco, conforme é mostrado na figura 3.6. O porta-amostras permite ensaiar 3 amostras simultaneamente. A combinação de diâmetro do disco, velocidade de rotação do motor e posição das amostras no disco sugerem uma velocidade linear tangencial de aproximadamente 32 m/s; semelhante a encontrada na periferia da hélice da moto aquática.



**Figura 3.6** – Disco porta amostras.

O disco porta-amostras possui rasgos que permitem fixar os corpos de prova em ângulos de  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $0^\circ$  em relação ao eixo de transmissão. Deste modo foi possível ensaiar o material em pelo menos 3 ângulos diferentes de incidência das partículas abrasivas.

Um recipiente de plástico foi utilizado para conter a mistura água e abrasivos, sendo que a boca foi adaptada para evitar a saída do líquido, mostrado esquematicamente na figura 3.7.



**Figura 3.7** – Recipiente responsável por comportar a água com abrasivos; e simulação do comportamento do fluido dentro dele.

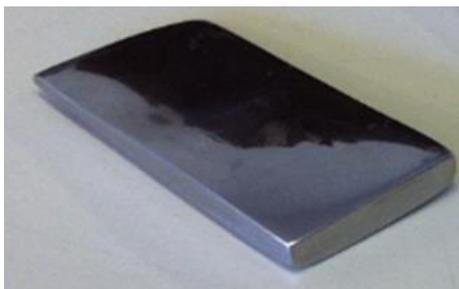
Na figura 3.8 abaixo, é mostrada a máquina de desgaste após sua construção, e o recipiente utilizado responsável por conter a mistura erosiva.



**Figura 3.8** – Máquina de desgaste construída

### 3.3.2 Corpos de Prova

Os corpos de prova, para a realização do ensaio de desgaste foram extraídos das pás da hélice. Foram retiradas 6 amostras com aproximadamente 40 mm de comprimento, 20 mm de largura e 2,5 mm de espessura (figura 3.9).



**Figura 3.9** – Amostras utilizadas nos ensaios de desgaste erosivo.

As amostras foram divididas em 2 conjuntos, cada um com 3 unidades. Um grupo de amostras foi ensaiado com suas superfícies na condição de Polidas; e o outro com suas superfícies na condição de Jateadas com areia (como é fabricada a maioria das hélices de motos aquáticas).

O polimento superficial das amostras foi realizado com o auxílio de uma politriz de bancada, utilizando uma sequência de lixas com granulometria de 220 a 1200 *mesh* e por fim, polimento com alumina de 1  $\mu\text{m}$ .

O jateamento superficial das amostras foi realizado com grãos de areia, com tamanhos de até 1 mm de diâmetro, e tempo de jateamento de 1 minuto, este tempo foi adotado em função dos maiores valores de dureza encontrados. O equipamento utilizado neste processo é mostrado na figura 3.10.



**Figura 3.10** – Máquina utilizada para o jateamento de amostras.

O jateamento foi realizado seguindo as recomendações sugeridas por Davis (1994) para aços inoxidáveis, com as superfícies das amostras previamente polidas,

limpas, secas e livres de graxas e/ou óleos. As amostras foram movimentadas perpendicularmente ao jato de areia visando homogeneizar, em toda a superfície, as consequências provocadas por este processo, tais como: grau de deformação plástica e encruamento superficial, e nível de tensões residuais compressivas.

### 3.3.3 Condições de Ensaio

No total foram realizados 6 ensaios desgaste, nas condições mostradas na tabela 3.1. Em cada ensaio, 3 amostras foram testadas simultaneamente na mesma condição. Com isto, pode se obter uma média e um desvio padrão dos resultados em cada uma das condições.

**Tabela 3.1 – Condições dos Ensaios Realizados.**

<b>Ângulo de Impacto</b> <b>Tipo de Superfície</b>	<b>0°</b>	<b>45°</b>	<b>90°</b>
<b>Polida</b>	1	1	1
<b>Jateada</b>	1	1	1

### 3.3.4 Tempo de Ensaio

Cada ensaio teve uma duração total de 25 h. O tempo de ensaio adotado segue as recomendações de manutenção de motos aquáticas sugerida no manual BRP (1997). O manual estipula que, depois das primeiras 25 horas de uso, o sistema de propulsão deve passar por um processo de inspeção, tendo a hélice como um dos principais componentes a serem inspecionados, pois sua integridade afeta diretamente o desempenho destes veículos.

Os ensaios foram divididos em 7 etapas, com interrupções a cada certo período de tempo para examinar as amostras por meio de medições de perda de massa, rugosidade superficial e análises microscópicas das superfícies.

Na primeira etapa, com duração de 1 h, foram feitas várias paradas. Duas a cada 5 min e depois cinco a cada 10 min. O intuito desta etapa foi analisar a influência do jateamento na resistência ao desgaste do material da hélice.

Na segunda etapa, também com duração de 1 h, foram feitas duas paradas a cada 30 min de ensaio. Na terceira etapa, três paradas com intervalos de 1 h cada; e a partir da quarta etapa, cada parada foi realizada com intervalos de 5 h cada.

Este procedimento permitiu acompanhar em detalhe o comportamento em desgaste do material.

Na tabela 3.2 é apresentado o esquema de paradas utilizado durante os ensaios e o intervalo de tempo entre elas.

**Tabela 3.2 – Esquema de Paradas para Cada Ensaio de Desgaste.**

<b>Etapas de Paradas</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>4º</b>	<b>5º</b>	<b>6º</b>	<b>7º</b>	<b>Tempo Total (min)</b>
	05	30	60	300	300	300	300	
	05	30	60					
	10		60					
	10							
	10							
	10							
	10							
<b>(min)</b>	60	60	180	300	300	300	300	1500

### 3.3.5 Mistura Erosiva

A concentração de partículas sólidas medida em uma amostra de água coletada no rio Araguaia, em média, foi 0,05 g/L. Entretanto, é conhecido que em certas épocas do ano e/ou em certos locais dos rios, essa concentração pode aumentar significativamente, formando-se inclusive poças de lama e bancos de areia. Motos aquáticas são às vezes expostas a este tipo de ambiente por condutores desavisados ou inexperientes, forçando exageradamente seus equipamentos. Assim, a mistura água/areia, empregada neste trabalho, teve o intuito de se realizar ensaios

de desgaste acelerados, para se obter resultados com maior rapidez; e ao mesmo tempo simular uma condição extrema de uso de uma moto aquática.

Todos os ensaios foram realizados utilizando-se uma mistura de água potável e areia de rio, na proporção: 500 g de areia em 28 L de água (17,8 g/L).

Em todos os ensaios, a mistura água/areia foi trocada a cada 1 h de ensaio visando manter as condições de abrasividade das partículas durante todo o ensaio.

### 3.3.6 Perda de Massa

A perda de massa dos copos de prova foi acompanhada por meio de medidas feitas numa balança analítica de precisão, representada na figura 3.11.

Antes de cada pesagem, as amostras foram lavadas com água corrente, para retirada de impurezas que possam ter se fixado em sua superfície, depois secas com ar quente, e finalmente, esfriadas ao ar até a temperatura ambiente.



**Figura 3.11** – Balança analítica de precisão AG 200 GEHAKA.

### 3.3.7 Análise das Superfícies

**Microscopia:** As superfícies desgastadas foram analisadas por meio de fotografias obtidas via microscopia eletrônica de varredura (MEV). As fotos foram tiradas depois de 5, 15, 25 h de ensaio. Deste modo, foi possível verificar o dano superficial ocorrido nas amostras, em função do ângulo de impacto dos abrasivos e do tempo de ensaio.

**Rugosidade:** Medidas de rugosidade foram realizadas, antes e depois dos ensaios de desgaste, visando complementar as análises realizadas via MEV. Um rugosímetro portátil, da marca Mitutoyo, modelo SJ 210 foi utilizado para determinar os parâmetros de rugosidade Ra e Rz. Em cada amostra, foram realizadas pelo menos 5 medições, em locais aleatoriamente escolhidos, utilizando-se um cut-off de 0,8 mm.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DA HÉLICE

#### 4.1.1 Composição Química

Os resultados das análises de fluorescência de raios x, são representados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** – Composição química do material da hélice (% peso).

Cr	Ni	Cu	Si	Al	Nb	Mo	S	Hg	P	Bi
15,08	4,37	3,77	1,03	0,57	0,22	0,21	0,11	0,10	0,06	0,03

De acordo com Washko e Aggen (1990), esta composição se refere a uma liga de cromo-níquel que contém elementos endurecíveis por precipitação como por exemplo o cobre e o alumínio, porém são mais conhecidas como, ligas de aço inoxidável endurecíveis por precipitação (*Precipitation Hardening Stainless Steel*). Estes aços podem ser tanto austeníticos quanto martensíticos na condição de recozidos, entretanto em maior parte dos casos estes aços atingem o endurecimento por precipitação na estrutura martensítica.

A composição química encontrada corresponde ao aço 15-5 PH de designação S15500, é um exemplo de liga que possui estrutura martensítica. É amplamente utilizado na indústria aeroespacial, química, petroquímica, de processamento de alimentos, papel e processamento de metais em geral, além de ter excelente resistência a corrosão (AK STEEL, 2007). Bajguirani (2002) afirma ainda que, devido a boa resistência a corrosão que a liga 15-5 PH possui, ela também é bastante utilizada na fabricação de pás de turbina.

Apesar de se tratar de uma liga que possui boas propriedades como dureza e resistência mecânica (atingidas após um tratamento de têmpera final), esta liga pode apresentar uma boa ductilidade devido à presença de austenita retida em sua estrutura. Austenita que se torna estável, a temperatura ambiente, devido aos altos teores de Ni deste aço. (ANDRIEU *et. al*, 2013).

### 4.1.2 Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza e microdureza realizados no material da hélice são mostrados na tabela 4.2.

**Tabela 4.2** – Medidas de dureza e microdureza do material da hélice.

Dureza	Microdureza
35 HRC $\pm$ 0	342,2 HV $\pm$ 5,5

O valor de dureza medido no aço é igual ao citado por AK Stell (2007), que afirma que a dureza do aço 15-5 PH, como recebido da usina, é de exatos 35 HRC.

Este valor sugere que o material da hélice estudado não passou por tratamentos térmicos posteriores a sua fabricação. Pois, conforme o tipo de tratamento térmico adotado algumas propriedades, como a dureza, podem ser alteradas para valores superiores aos da condição inicial entregue pela usina.

Tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento são amplamente utilizados para promover a precipitação de elementos como Cu, Al, Nb e outros, que juntos provocam um aumento da dureza e resistência mecânica, principalmente. (BERNARDELLI *et al.*, 2007 e MORENO, 2013).

Depois dos processos de jateamento, as amostras apresentaram uma dureza aumentada devido ao encruamento sofrido, como é mostrado na tabela 4.3.

**Tabela 4.3** – Medidas de dureza e microdureza do material da hélice após jateamento com areia.

Dureza	Microdureza
37 HRC $\pm$ 0,5	361,3 HV $\pm$ 6,1

### 4.1.3 Análises Metalográficas

Na figura 4.1 (A) é mostrada a microestrutura presente no aço da hélice estudada. Depois de poucos segundos de ataque com ácido oxálico 10%, são observados traços de ferrita delta. Na micrografia (B) são apresentadas evidências de

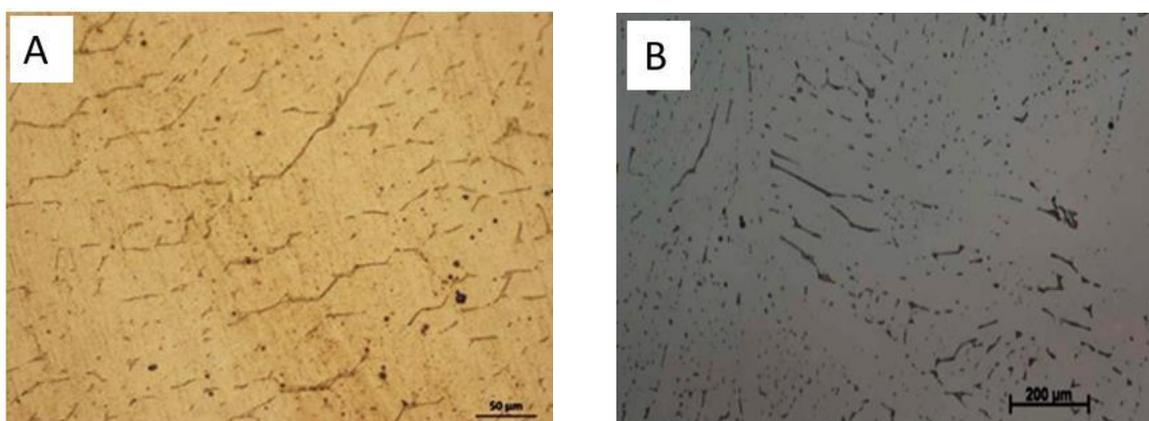
ferrita delta também encontradas por Vander Voort et al. (2004) e Houge (2014) em aços 15-5PH.

Análises de imagem, utilizando o software *imageJ*, permitiram determinar o teor de ferrita delta presente no aço. Para isso, imagens obtidas por microscopia óptica foram trabalhadas com este software, e deste modo foram obtidos valores de aproximadamente 3,42% de ferrita delta.

Moreno (2013) afirma que, teores elevados de ferrita delta presentes em ligas endurecíveis por precipitação podem diminuir a ductilidade e a tenacidade do aço.

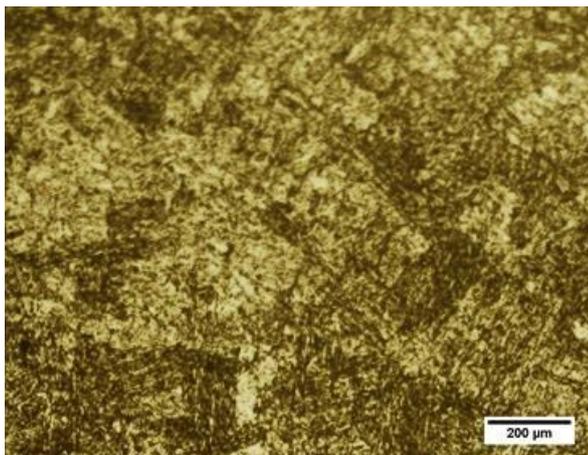
A liga 15-5 PH é uma variação da liga 17-4 PH. Esta última possui teores de ferrita delta que podem variar entre 0 e 8%, podendo em alguns casos ser até mais elevados. A liga 15-5 PH foi desenvolvida com a premissa de apresentar uma ductilidade aumentada comparada com a liga 17-4 PH. Este aumento está relacionado com a redução do teor de ferrita delta. Isto é, reduzindo o teor de cromo e aumentando os teores de cobre e níquel. (CLARKE e GARVIN, 1965).

Passos (2010) também verificou que o cromo trabalha como um agente promotor de ferrita delta em aços inoxidáveis austeníticos, e que uma redução deste componente na liga pode reduzir o teor de ferrita delta.



**Figura 4.1** – (A) Matriz com traços de ferrita delta no material da hélice. (B) Ferrita delta em aço 15-5PH. Vander Voort *et al.* (2004) e Houge (2014).

Com o prolongamento do tempo de ataque químico, revelou-se a estrutura da matriz, e foi constatado que a mesma é constituída totalmente de martensita, como mostrado na figura 4.2.



**Figura 4.2** – Matriz martensítica encontrada no aço da hélice 15-5 PH.

Nos trabalhos com aço 15-5 PH de Vander Voort *et al.* (2004) e Houge (2014) também foram encontradas matrizes martensíticas. Houge (2014) encontrou ainda, evidências de fase sigma.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ABRASIVOS

### 4.2.1 Composição Química

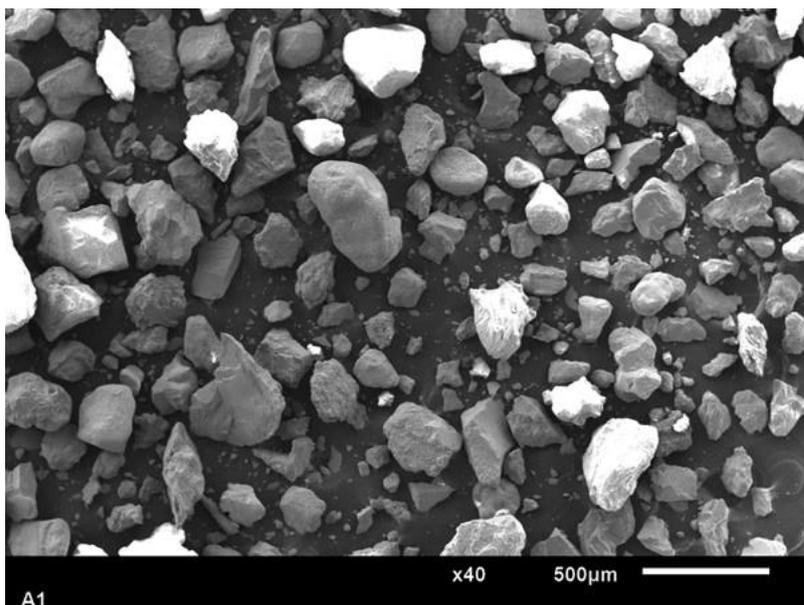
Os resultados das análises dos grãos abrasivos realizados por fluorescência de raios x, são apresentados na tabela 4.4.

**Tabela 4.4** – Composição química da areia utilizada nos ensaios (% peso).

Si	Al	K	Fe	Ca	Ti	Cs	S	Mn	W	V	Sr	Zr	Cu
84,51	6,49	3,35	2,69	1,24	0,54	0,48	0,37	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03

### 4.2.2 Análises Microscópicas

Na figura 4.3 é mostrada a imagem via MEV dos grãos abrasivos usados nos ensaios de desgaste.



**Figura 4.3** – Geometria das partículas abrasivas usadas nos ensaios de desgaste.

### 4.3 ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO

#### 4.3.1 Ensaio 01 - Amostras com Superfícies Polidas

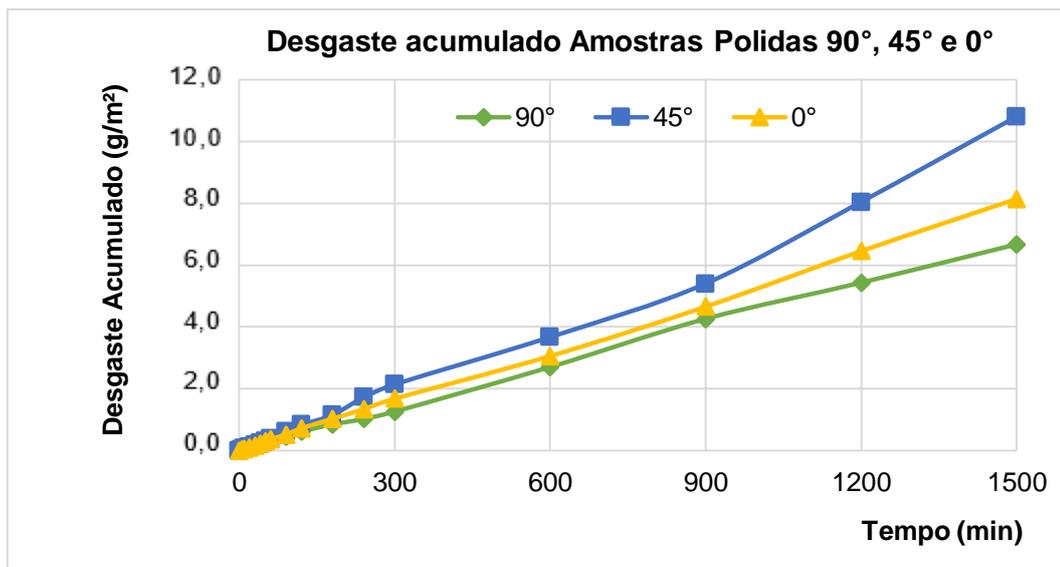
##### 4.3.1.1 Perda de Massa

Como citado no Capítulo 3, os ensaios de desgaste foram realizados em uma sequência de sete etapas, cada uma delas com uma duração estabelecida, totalizando 25 h de ensaio.

Na figura 4.4 são apresentados os valores de desgaste acumulado em função do tempo de ensaio das amostras **POLIDAS**, ensaiadas com ângulos de incidência de 90°, 45° e 0°.

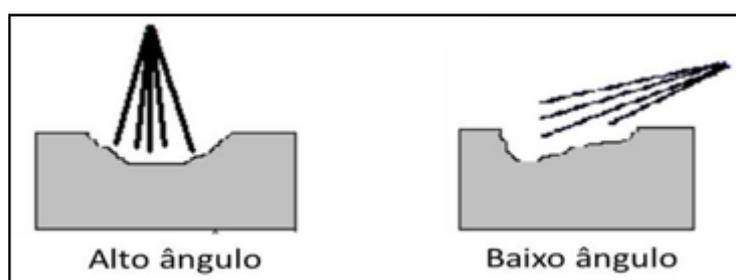
Nota-se que independentemente do ângulo de incidência dos abrasivos, o desgaste teve um crescimento constante no decorrer do tempo.

Ao comparar o desgaste acumulado nas três condições de ensaio realizadas, verifica-se que em média, as amostras ensaiadas a 45° foram as que mais se desgastaram, seguidas das amostras ensaiadas a 0° e por último as ensaiadas a 90°.



**Figura 4.4** – Desgaste acumulado de amostras polidas ensaiadas com ângulos de impacto do abrasivo de 90°, 45° e 0°.

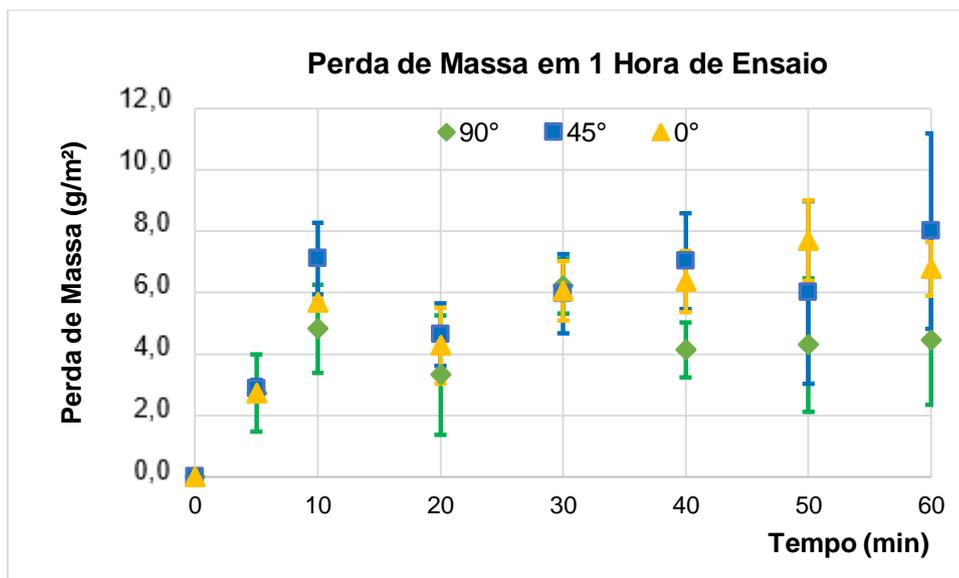
O maior desgaste das amostras ensaiadas a 45° pode ser explicado utilizando o esquema da figura 4.5, apropriada para materiais dúcteis. Nesta, é visto que baixos ângulos de incidência podem provocar maior dano superficial, o que poderia promover inclusive, uma maior remoção de material, e conseqüentemente, maior desgaste.



**Figura 4.5** – Efeito do ângulo de incidência no dano superficial.

Na figura 4.4 nota-se que, no início dos ensaios, tempo de até 2 h de ensaio, o comportamento ao desgaste das amostras é praticamente igual, independentemente do ângulo de incidência utilizado nas amostras. Análises mais detalhadas, com 1 hora de ensaio e apresentadas na figura 4.6, revelam que, desde o começo as amostras ensaiadas a 45° apresentaram uma perda de massa ligeiramente superior às

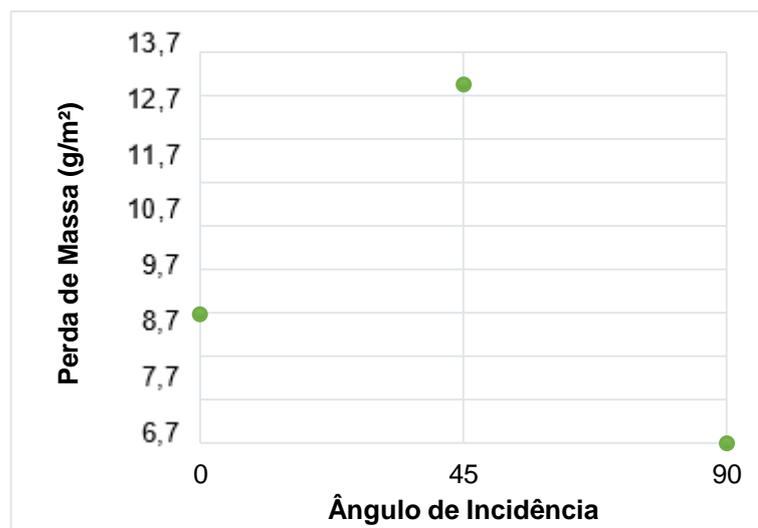
amostras ensaiadas com os outros dois ângulos. Verifica-se também, que as amostras ensaiadas a  $90^\circ$  são as que menos se desgastaram na primeira hora; e que amostras ensaiadas a  $0^\circ$  tiveram um comportamento intermediário com relação aos outros dois ângulos.



**Figura 4.6** – Perda de massa de amostras polidas após 1 hora de ensaio de desgaste erosivo a  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $0^\circ$ .

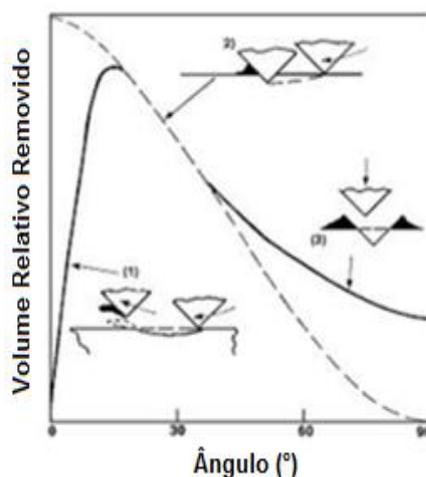
Este comportamento pode ser explicado pela influência do polimento nas superfícies das amostras, que até a primeira hora de ensaio ainda está presente em boa proporção na superfície das amostras, a partir de 2h de ensaio, este polimento já perdeu boa parte de suas características iniciais de superfície, deste modo, a perda de massa das amostras será influenciada principalmente pelo grau de incidência das partículas abrasivas.

Na figura 4.7, são mostrados os resultados do desgaste total acumulado no final das 25 h de ensaios, com as amostras polidas, em função do ângulo de incidência das partículas. Os resultados mostraram que, em média, com  $45^\circ$  se obteve 62% a mais de desgaste que com  $90^\circ$ ; com  $45^\circ$  se obteve 32,5% a mais de desgaste que com  $0^\circ$ ; e que com  $0^\circ$  se obteve 22,2% a mais de desgaste que com  $90^\circ$ .



**Figura 4.7** – Desgaste total das amostras polidas em função do ângulo de incidência das partículas abrasivas.

A posição dos pontos acima segue a mesma tendência observada por Bhushan (2013) e Finnie (1995) que, estudando o desgaste de materiais dúcteis, verificaram que as maiores taxas de desgaste ocorrem quando as partículas atingem as superfícies com ângulos próximos a  $30^\circ$ , condição na qual os mecanismos de remoção de material por efeitos cortantes são predominantes, enquanto que com ângulos maiores a deformação plástica provocada pelo sulcamento da superfície promove pouca ou nenhuma retirada de material, como é mostrado na figura 4.8 abaixo.



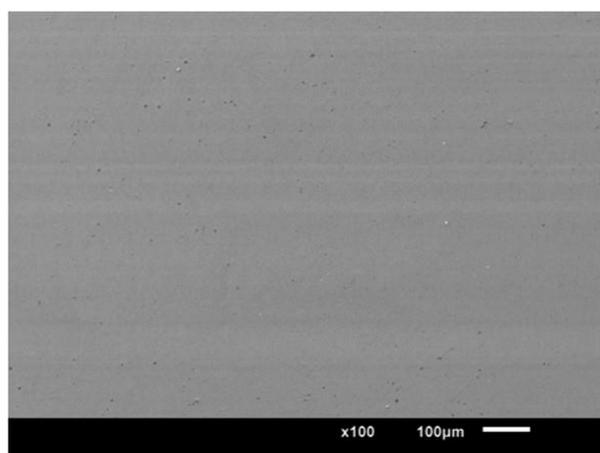
**Figura 4.8** – Desgaste erosivo em materiais dúcteis em função do ângulo de ataque das partículas (FINNIE, 1995).

Um resultado que chama a atenção quando se analisam as figuras 4.4 e 4.7 é que o desgaste das amostras ensaiadas com ângulo de  $0^\circ$  é, aproximadamente, 22% maior que o das amostras ensaiadas a  $90^\circ$ . Isto pode ser explicado em função da alta turbulência que a mistura água/areia sofre dentro do recipiente de ensaio. Assim, a incidência de partículas na superfície da amostra posicionada a  $0^\circ$  não ocorre exclusivamente nesse ângulo, podendo acontecer também, o impacto de muitas outras partículas com ângulos de incidência baixos que promoveriam uma maior retirada de material.

No caso das amostras a  $90^\circ$ , a turbulência também acabará afetando seu desgaste, entretanto, os ângulos de incidência das outras partículas continuaram sendo altos, e com isso, provocando menores taxas de remoção de material.

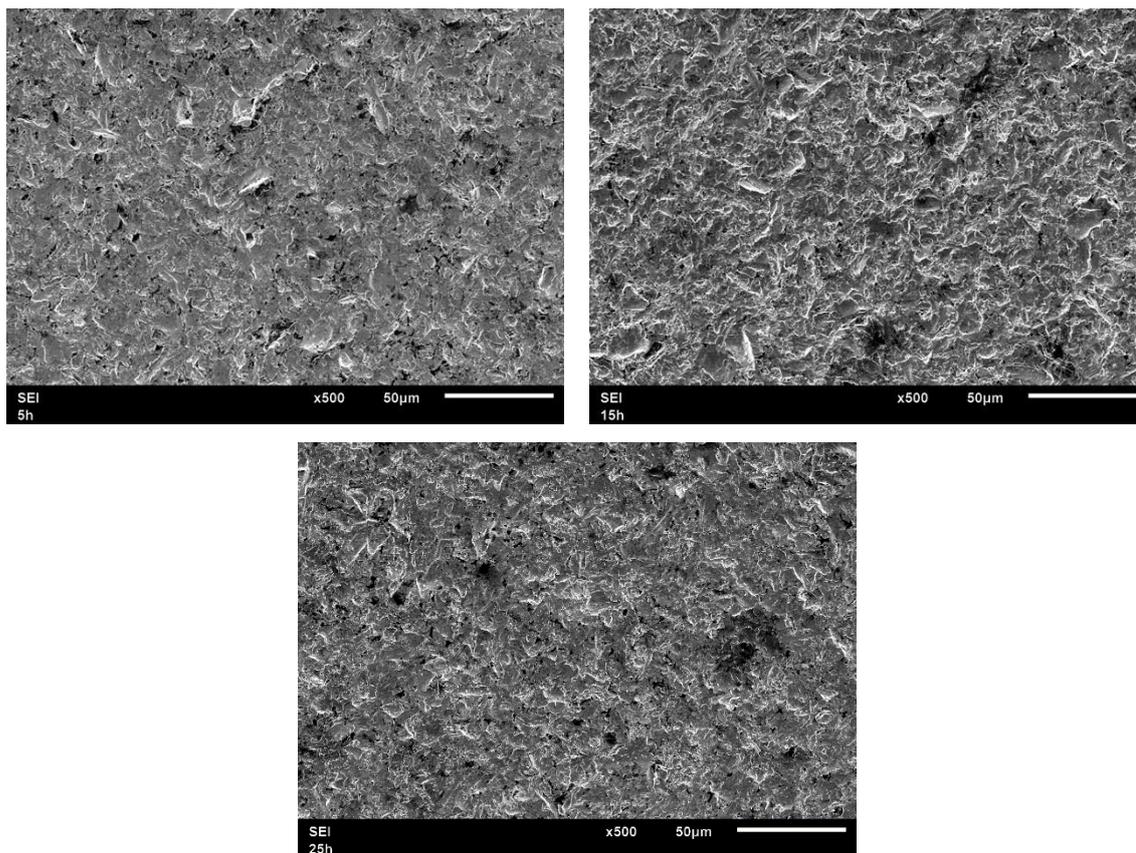
#### 4.3.1.2 Análise das superfícies

**Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV:** Na figura 4.9 é mostrada a imagem da superfície, na condição de polida, tal como foi usada no início de todos os ensaios.



**Figura 4.9** – Superfície de uma amostra polida antes de ser usada nos ensaios de desgaste.

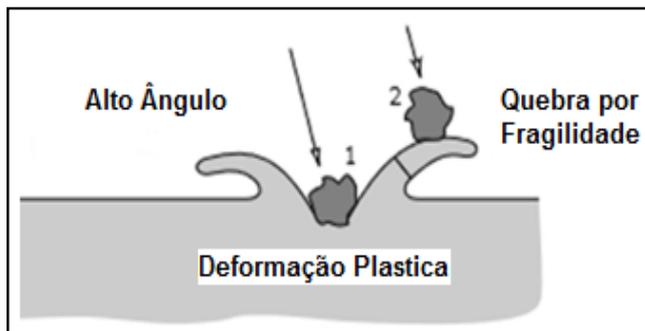
Na figura 4.10 são mostradas fotografias das superfícies de amostras ensaiadas a  $90^\circ$ , depois de 5, 15 e 25 horas de ensaio.



**Figura 4.10** – Superfícies de amostras polidas, que foram ensaiadas a 90°, após 5, 15 e 25 horas de ensaio de desgaste.

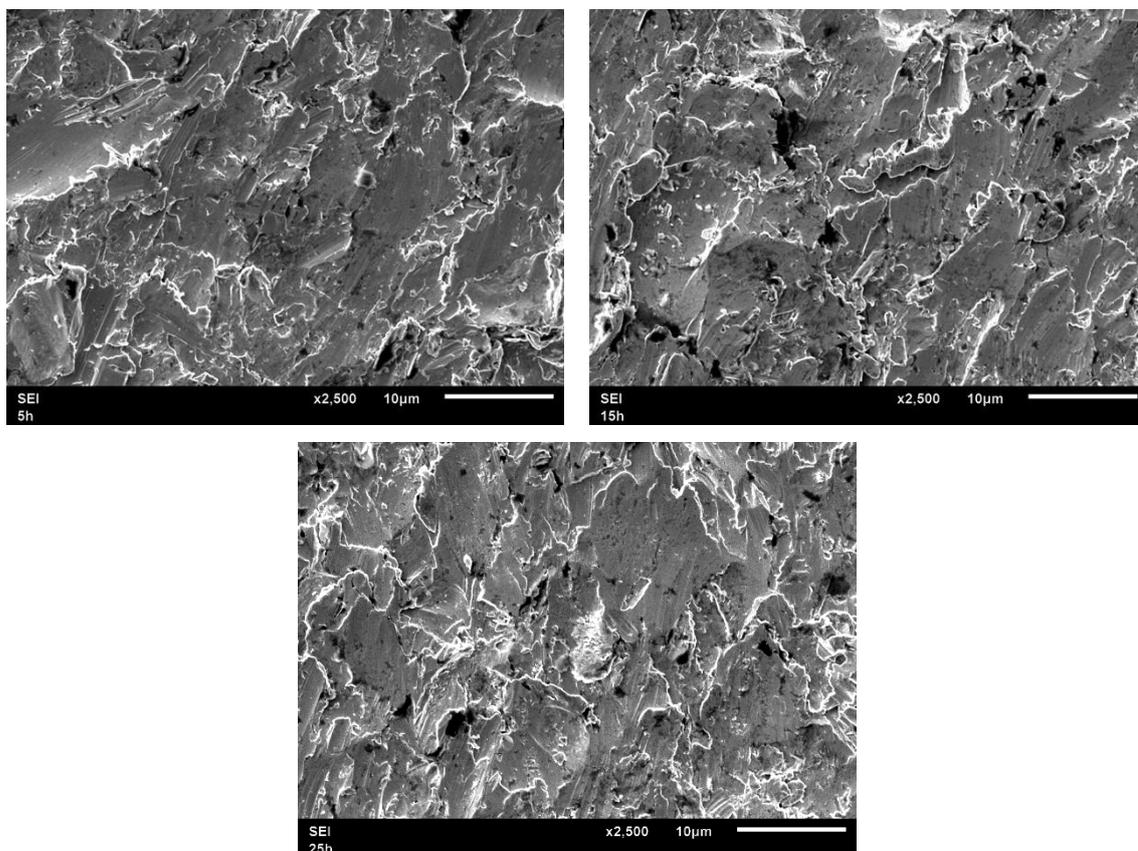
Nas fotografias da figura 4.10 são observadas várias crateras formadas pelo impacto das partículas erodentes na superfície do material. Isso mostra que as superfícies sofreram enorme dano superficial, caracterizado principalmente por grandes deformações plásticas. Adicionalmente, não são observadas evidências que insinuem a remoção de material por mecanismos cortantes.

Segundo Kossel (1992), as partículas ao se chocarem contra a superfície em altos ângulos formam crateras profundas, que resultam na expulsão de material para sua periferia, se tornando mais frágeis devido ao deslocamento de material. Com impactos subsequentes estas bordas se tornam quebradiças e conseqüentemente são removidas promovendo perda de material, porém em menor quantidade quando comparado com ângulos menos acentuados. Este mecanismo de perda de massa é mostrado esquematicamente na figura 4.11 adiante.



**Figura 4.11** – Um dos possíveis mecanismos de desgaste erosivo provocado por deformação plástica. Alto ângulo de incidência de partículas erodentes (adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

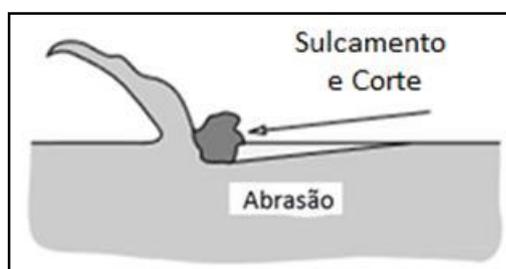
Na figura 4.12 são mostradas as superfícies desgastadas de amostras polidas que foram ensaiadas com ângulo de incidência de  $45^\circ$ , depois de 5, 15 e 25 horas de ensaio.



**Figura 4.12** – Superfícies de amostras polidas, que foram ensaiadas a  $45^\circ$ , após 5, 15 e 25 horas de ensaio de desgaste.

As superfícies das amostras ensaiadas a  $45^\circ$  apresentaram um aspecto diferente em relação as amostras a  $90^\circ$ . Nota-se que a deformação plástica superficial está orientada no sentido da incidência das partículas erodentes, que ao se chocarem contra a superfície, além de formarem crateras, o ângulo permite o sulcamento e a remoção de material por efeitos cortantes. Estes fenômenos provocam maior perda material comparada com os fenômenos atuantes a  $90^\circ$ . Isso explicaria o maior desgaste medido nesta condição de ensaio.

O mecanismo de remoção de material atuante a  $45^\circ$  é mostrado, esquematicamente, na figura 4.13.

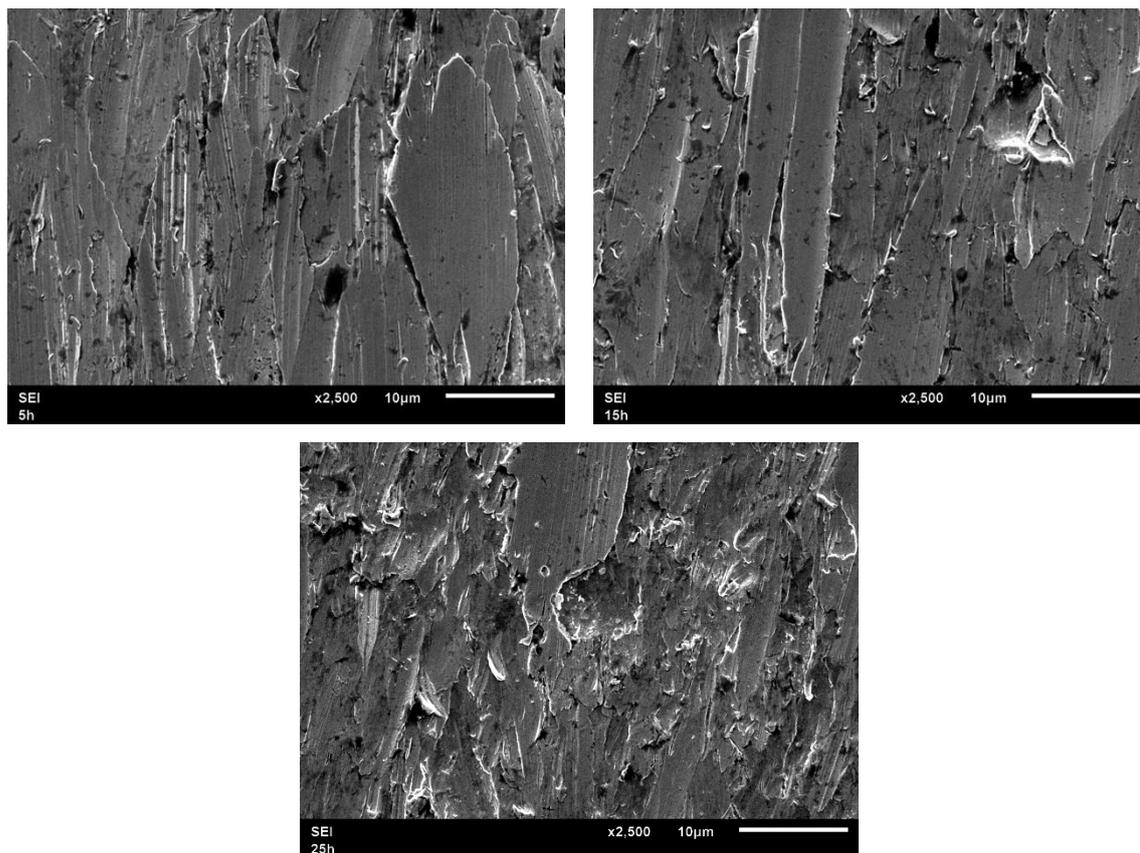


**Figura 4.13** – Mecanismos de desgaste erosivo provocado pela abrasão de partículas erodentes sobre a superfície com baixo ângulo de incidência de partículas erodentes (adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

Na figura 4.14 são apresentadas as superfícies desgastadas de amostras polidas que foram ensaiadas com ângulo de incidência de  $0^\circ$ , depois de 5, 15 e 25 horas de ensaio.

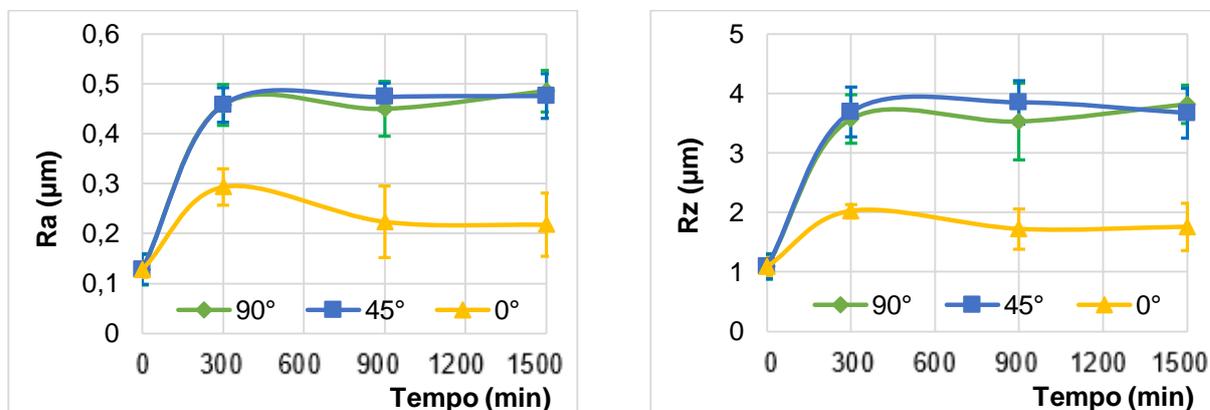
Com este ângulo de incidência, o processo de ataque das partículas erodentes é semelhante ao ataque feito nas superfícies a  $45^\circ$ , com vestígios de grandes deformações plásticas orientadas no sentido de incidência das partículas.

Entretanto, a remoção de material ocorre de forma menos severa que a  $45^\circ$ , pois nesse ângulo o efeito cortante das partículas erosivas é atenuado ou até eliminado, devido a pequena ou nula força normal com que atingem a superfície.



**Figura 4.14** – Superfície de amostras polidas após 5, 15 e 25 horas de ensaio de desgaste a  $0^\circ$ .

**Rugosidade:** Nas figuras 4.15 são apresentados os valores de rugosidade Ra e Rz medidos nas superfícies polidas, após os ensaios, em função do ângulo de incidência das partículas e o tempo de ensaio.



**Figura 4.15** – Parâmetros de Rugosidade Ra e Rz medidos durante os ensaios realizados com amostras polidas e ângulos de incidência de  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $0^\circ$ .

Observando o parâmetro Ra, nota-se que nas primeiras 5 h de ensaio ocorre um aumento considerável deste valor, independentemente do ângulo ensaiado; passando de 0,1  $\mu\text{m}$  para 0,5  $\mu\text{m}$  nas superfícies ensaiadas a 45° e 90°, e até 0,3  $\mu\text{m}$  nas ensaiadas a 0°. Isto se deve ao dano superficial sofrido pelas superfícies polidas que no decorrer dos ensaios vão se deteriorando pela ação abrasiva das partículas erodentes.

Depois das primeiras 5 horas de ensaio, a rugosidade Ra decai para valores próximos de 0,2  $\mu\text{m}$  com o ângulo de 0° e se estabiliza em valores próximos de 0,5  $\mu\text{m}$  com os ângulos de 45° e 90°. Estas evidências sugerem que, com o ângulo de 0°, as partículas que se chocam com a superfície não provocam danos significativos, promovendo apenas deformação plástica, e poucos sulcamentos e cortes.

Nos ensaios a 45° e 90°, a energia com que as partículas impactam a superfície é tão alta que, provocam maiores deformações plásticas, sulcamentos e cortes do que a 0°.

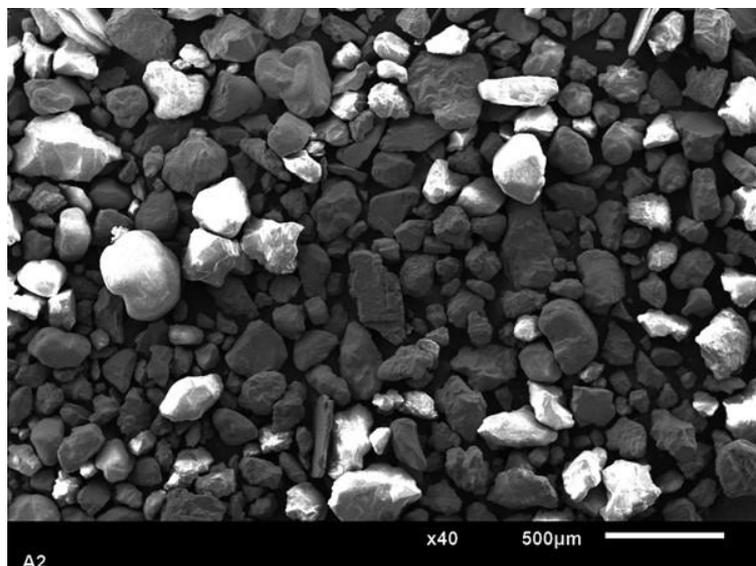
Os valores de Ra medidos indicam que as grandes deformações plásticas ocorridas a 90° provocariam danos superficiais semelhantes aos ocorridos por mecanismos de sulcamentos e corte desenvolvidos a 45°. Inclusive, verifica-se que o tamanho das imperfeições (saliências e reentrâncias) são semelhantes nas superfícies desgastadas ensaiadas com estes dois ângulos, como pode ser visto nos resultados do parâmetro Rz medido.

Os valores de rugosidade obtidos confirmam também, que a intensidade do dano superficial não indica, necessariamente, que a superfície tenha sofrido maior desgaste; pois o dano a 90° é maior que a 0°, e no entanto, o desgaste foi maior a 0° do que a 90°.

#### **4.3.1.3 Deterioração dos Abrasivos**

Com o decorrer dos ensaios, as partículas erodentes começaram a apresentar formas mais arredondadas quando comparado com a forma das mesmas antes dos ensaios, como é mostrado na figura 4.16 abaixo. Este fenômeno foi notado com apenas uma hora de ensaio, razão pela qual os abrasivos foram trocados a cada 1 hora de ensaio, visando manter uniformes as condições de corte do abrasivo. Pois, segundo afirma Locatelli (2009), a geometria do abrasivo pode alterar a taxa de

erosão, e partículas com formas mais arredondadas tendem a diminuir a taxa de erosão, pois causam menos deformações nas superfícies dos materiais.



**Figura 4.16** – Geometria das partículas erodentes após 1 hora de ensaio de desgaste erosivo (grãos mais arredondados por causa do desgaste).

### 4.3.2 Ensaio 02 - Amostras com Superfícies Jateadas

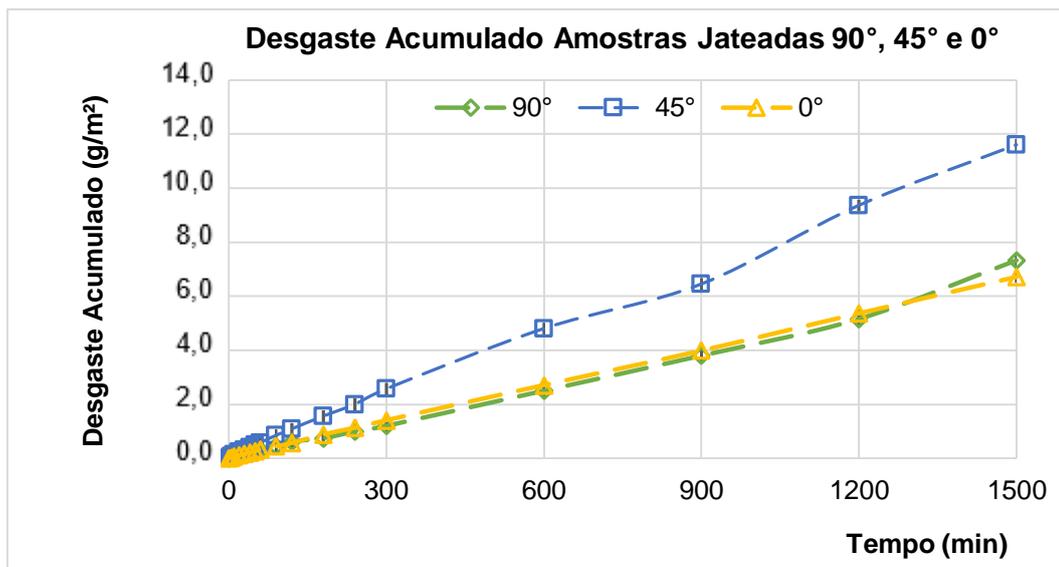
#### 4.3.2.1 Perda de Massa

Seguindo a mesma metodologia de ensaios realizados com as amostras polidas, novos ensaios foram realizados em amostras com as superfícies jateadas.

Na figura 4.17 são apresentados os valores de desgaste acumulado em função do tempo de ensaio, das amostras **Jateadas**, ensaiadas com ângulos de incidência de 90°, 45° e 0°.

Nesta figura nota-se também que, independentemente do ângulo de incidência dos abrasivos, o desgaste teve um crescimento constante no decorrer do tempo.

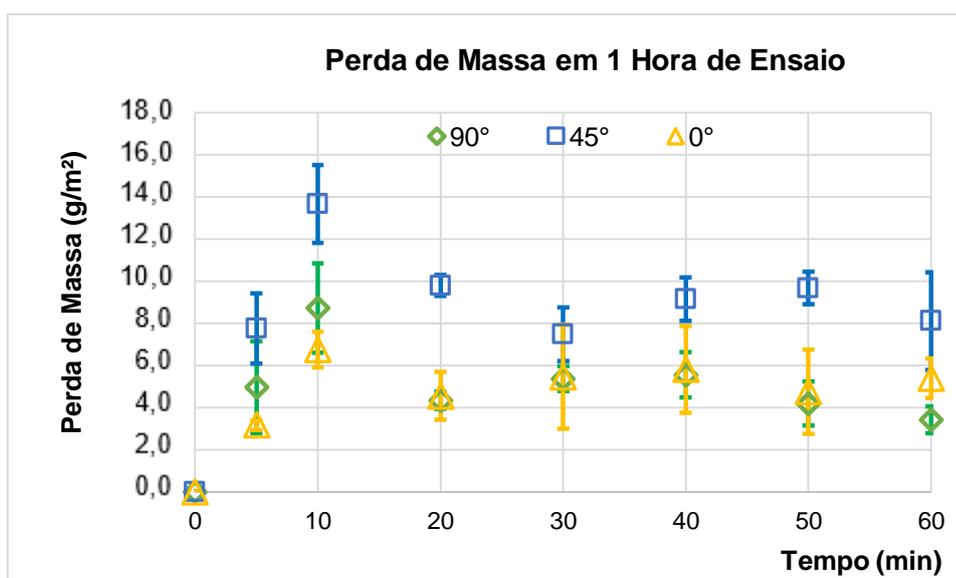
Analogamente aos resultados obtidos nos ensaios com amostras polidas, as amostras jateadas ensaiadas a 45° apresentaram os maiores níveis de desgaste. Entretanto, as amostras ensaiadas a 90° e 0°, exibiram um desgaste, rigorosamente, idêntico entre elas.



**Figura 4.17** – Desgaste acumulado de amostras jateadas ensaiadas com ângulos de incidência do abrasivo de 90°, 45° e 0°.

Foi visto também que, em média, amostras jateadas ensaiadas a 45° obtiveram 58,3% a mais de desgaste do que amostras ensaiadas a 90° e 0°.

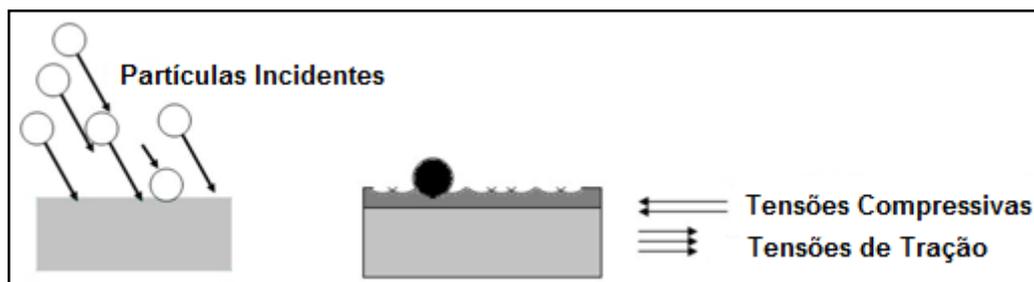
Na figura 4.18 abaixo, é apresentado detalhadamente o desgaste de amostras jateadas até o fim da primeira hora de ensaio para ângulos de 90°, 45° e 0°, assim como foi feito para amostras polidas.



**Figura 4.18** – Perda de massa de amostras jateadas durante a primeira hora de ensaio, utilizando ângulos de incidência do abrasivo de 90°, 45° e 0°.

Independentemente do ângulo de incidência utilizado, nota-se que a perda de massa ocorrida nos primeiros 10 min de ensaio é o dobro da perda de massa medida nos outros cinco intervalos de 10 min.

Este resultado pode ser explicado analisando o processo de jateamento mostrado na figura 4.19 abaixo.



**Figura 4.19** – Representação esquemática do processo de jateamento mostrando a geração tensões e de uma superfície formada por microcavidades.

Conforme apresentado esquematicamente na figura 4.19, a incidência das partículas abrasivas é responsável pelo surgimento de tensões compressivas na superfície e tensões de tração abaixo dela. Entretanto, este processo provoca também, a formação de uma textura superficial constituída de microcavidades cuja forma, tamanho e profundidade dependem das propriedades mecânicas das partículas incidentes, assim como, das condições cinemáticas destas, na hora do impacto.

As bordas das microcavidades, por terem sofrido deformações plásticas, estariam encruadas e fragilizadas; e durante os ensaios de desgaste, ao serem impactadas por outras partículas seriam facilmente quebradas e removidas, originando esse alto desgaste inicial.

Na figura 4.18 verifica-se também, que depois dos 10 min iniciais, onde ocorre a remoção das bordas das microcavidades, a remoção de material diminui e se estabiliza em patamares específicos para cada ângulo de incidência, tornando a perda de massa quase constante no tempo.

Na figura 4.20, são mostrados os resultados do desgaste total acumulado com as amostras jateadas em função do ângulo de incidência das partículas. Os resultados

mostraram que, com 45° se obteve 56% a mais de desgaste que o alcançado com os ângulos de 90° e 0°.



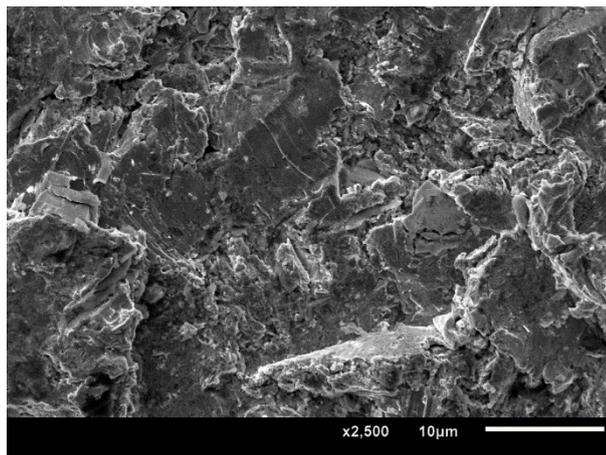
**Figura 4.20** – Desgaste total das amostras jateadas em função do ângulo de incidência das partículas abrasivas.

A posição dos pontos acima também segue a mesma tendência observada com as amostras polidas; onde as maiores taxas de desgaste ocorrem quando as partículas atingem as superfícies com ângulos próximos a 30°.

#### 4.3.2.2 Análise de Superfícies

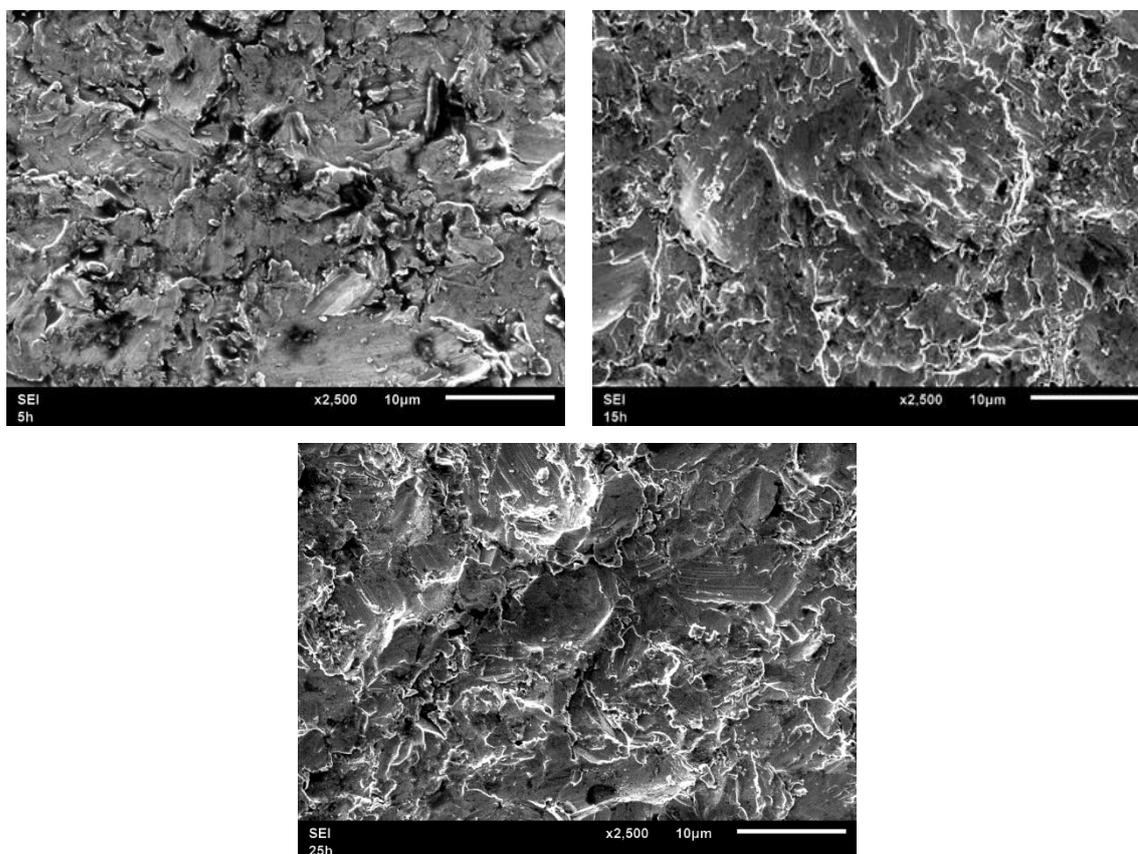
**Microscopia Eletrônica de Varredura:** Na figura 4.21 é mostrada a imagem da superfície, na condição jateada, tal como foi usada no início de todos os ensaios.

A superfície jateada apresenta marcas de deformação plástica, típicas de superfícies que sofreram este tipo de tratamento superficial, contudo, com cavidades de formato heterogêneo devido às irregularidades das partículas de areia utilizadas no processo.



**Figura 4.21** – Superfície de amostras jateadas antes de se iniciar o ensaio de desgaste a 90°.

A figura 4.22 adiante, mostra fotografias das superfícies de amostras jateadas ensaiadas a 90°, após um período de 5, 15 e 25 horas.



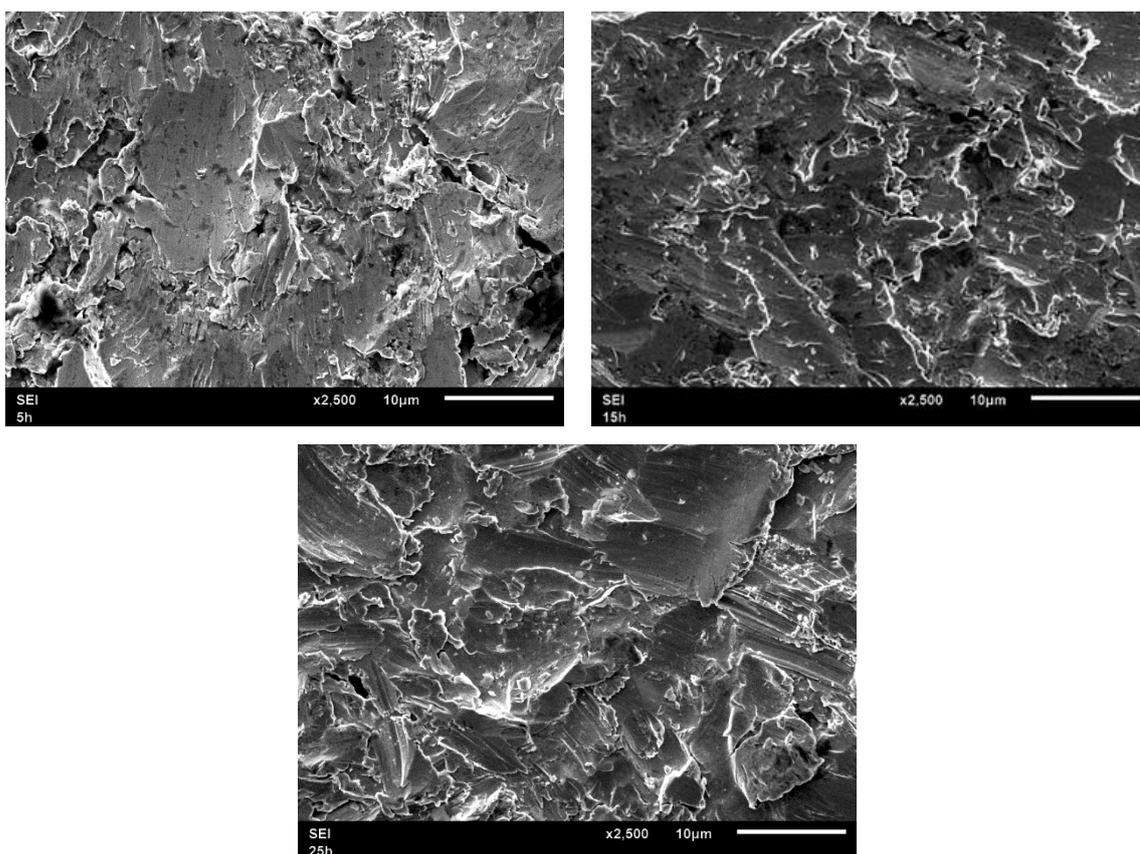
**Figura 4.22** – Superfície de amostras jateadas após 5,15 e 25 horas de ensaio de desgaste a 90°.

Nota-se que assim como no caso das amostras polidas ensaiadas a 90°, aqui também são observadas grandes deformações plásticas ocasionadas pelo deslocamento de material, e a presença de crateras ocasionadas pelo impacto das partículas erodentes.

Além disso, o aspecto das superfícies desgastadas é muito parecido com o das superfícies criadas pelo jateamento; pois em ambos os casos, as partículas incidentes tinham tamanhos semelhantes e impactaram as superfícies perpendicularmente.

Não são observadas evidências que insinuem a remoção de material por mecanismos cortantes. O mecanismo de perda de massa é igual aquele mostrado na figura 4.11.

Na figura 4.23, são mostradas as fotografias de superfícies de amostras jateadas a um ângulo de ataque de 45° para 5, 15 e 25 horas.

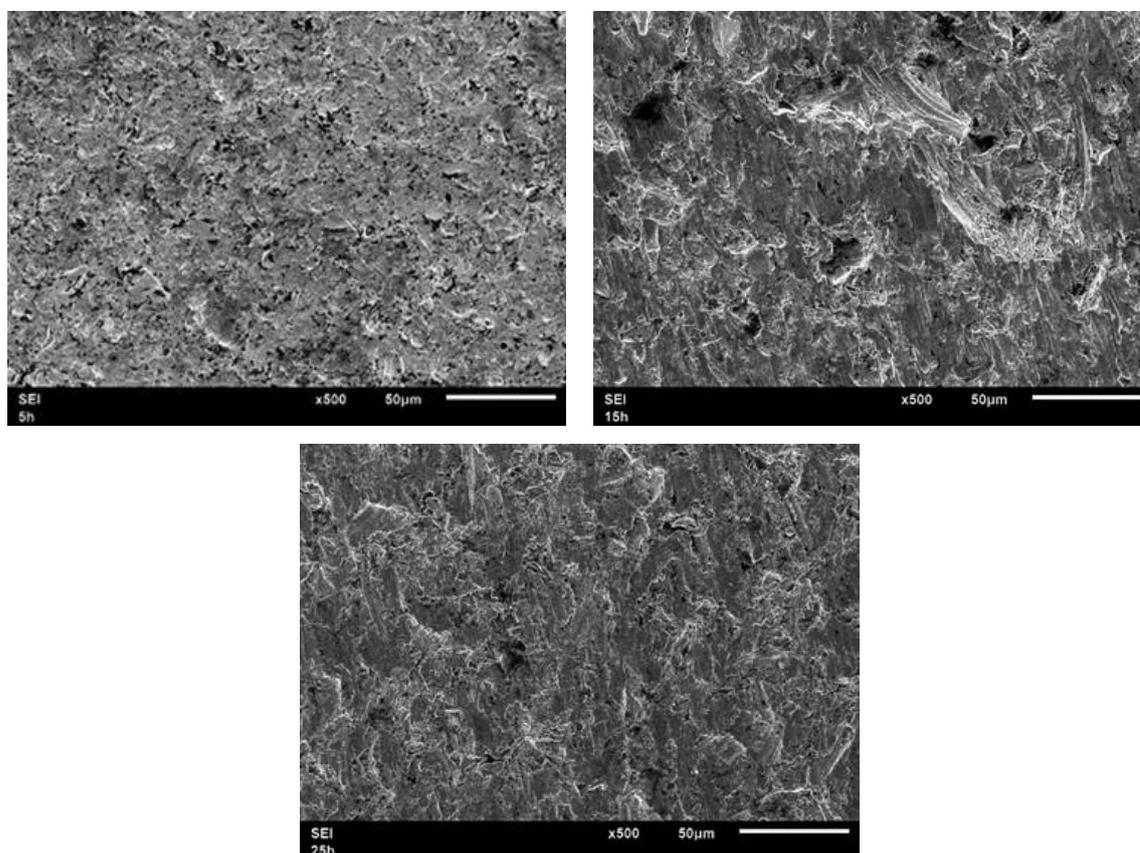


**Figura 4.23** – Superfície de amostras jateadas a após 5,15 e 25 horas de ensaio de desgaste a 45°.

Ao analisar as amostras jateadas ensaiadas a 45°, observa-se também uma situação similar com amostras polidas ensaiadas a 45°. Nota-se nas imagens que a superfície sofreu grande deformação plástica, seguindo a direção de impacto dos erodentes.

É observável ainda que as crateras formadas, são menos profundas que as observadas a 90°, e que juntas com os sulcos; sugerem que o dano superficial e o desgaste foram mais severos nesta condição de ensaio.

A figura 4.24 adiante, apresenta imagens de superfícies de amostras jateadas ensaiadas com um ângulo de 0° com 5, 15 e 25 horas.



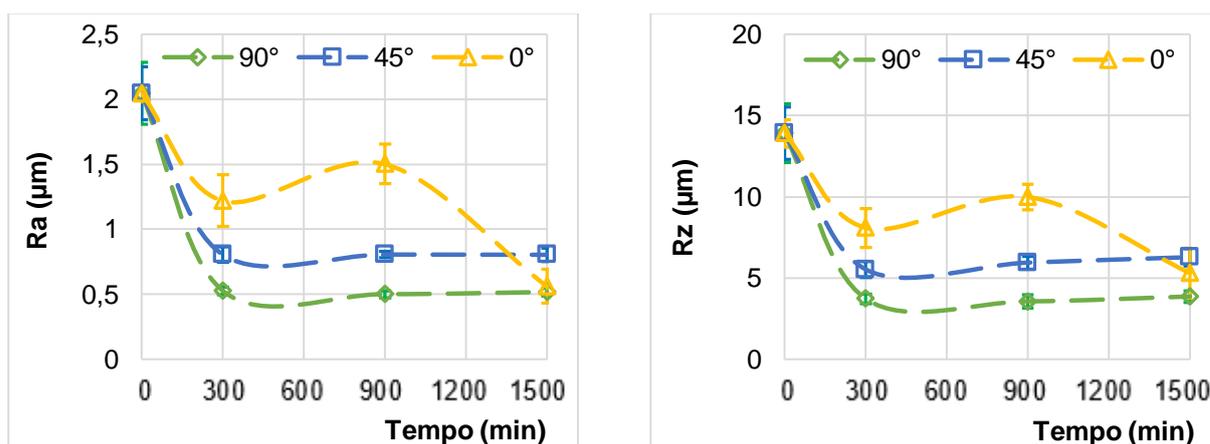
**Figura 4.24** – Superfície de amostras jateadas a após 5, 15 e 25 horas de ensaio de desgaste a 0°.

As imagens sugerem que, no decorrer do ensaio, o dano superficial sofrido pela superfície de desgaste resultou em um processo de alisamento. Pois ao comparar o aspecto da superfície jateada (figura 4.21) no início dos ensaios, com a ensaiada a 0°,

nota-se que as crateras antes observadas desapareceram dando lugar a uma superfície com marcas de deformação plástica orientada no sentido de fluxo dos erodentes e alguns indícios de sulcamento, que insinuam uma remoção de material por mecanismos cortantes.

De todas as maneiras, o dano superficial observado nesta condição de ensaio se mostrou menos severo que nos outros dois casos, indicando outra vez que, o efeito cortante das partículas erosivas é atenuado, devido a pequena força normal com que atingem a superfície.

**Rugosidade:** Na figura 4.25 são apresentados os valores de rugosidade Ra e Rz medidos nas superfícies jateadas, após os ensaios, em função do ângulo de incidência das partículas e o tempo de ensaio.



**Figura 4.25** – Parâmetros de Rugosidade Ra e Rz medidos durante os ensaios realizados com amostras jateadas e ângulos de incidência de 90°, 45° e 0°.

O processo de jateamento gera uma superfície com uma rugosidade média Ra de 2 µm e Rz de 14 µm, como mostrado na figura 4.25. Nesta figura nota-se também, que com o desenvolvimento dos ensaios as superfícies sofrem um processo de alisamento, diminuindo os valores dos parâmetros de rugosidade e mantendo-se quase constantes até fim dos testes. Observa-se também, que o alisamento das superfícies ensaiadas a 90° e 45° ocorre logo nas primeiras 5 horas de ensaio, alcançando valores de Ra próximos de 0,5 µm e 0,8 respectivamente.

Estas evidências indicam que, embora o dano superficial tenha sido semelhante nas duas superfícies, ele ocorreu de formas diferentes. A 90° a superfície sofreu principalmente deformação plástica, enquanto que a 45° sofreu deformação plástica, sulcamento e remoção de material.

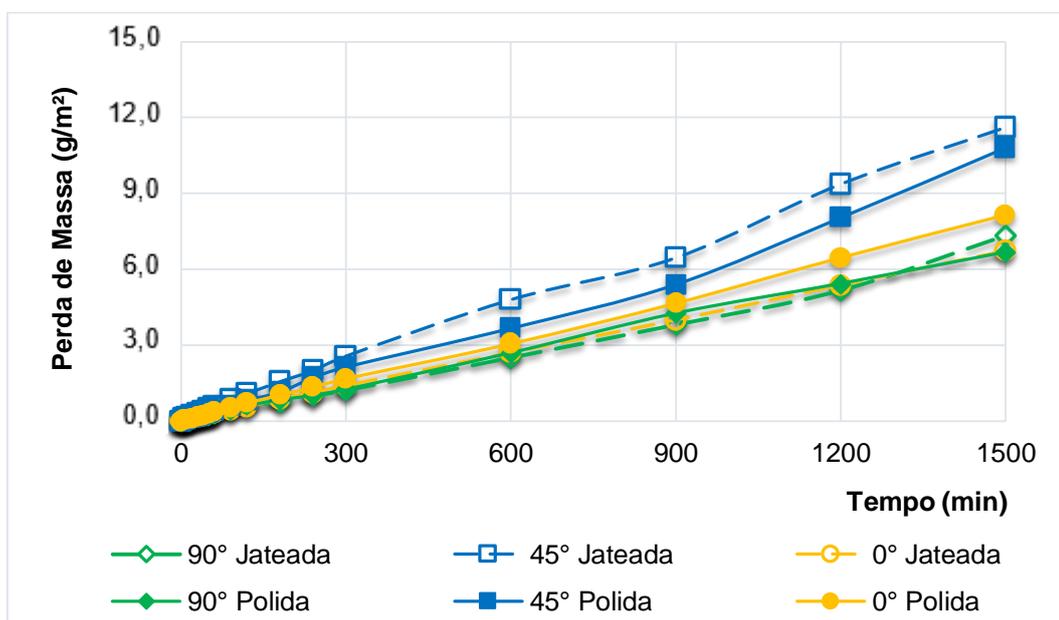
Os valores de Ra das amostras ensaiadas a 0° variaram com o tempo de ensaio. Depois das primeiras 5 h, a superfície sofre um leve alisamento, alcançando um valor de Ra próximo de 1,5  $\mu\text{m}$ , o mesmo que se mantém praticamente inalterado até as 15 h, e nota-se também, que no final dos ensaios as superfícies alcançaram valores de rugosidade semelhantes aos atingidos nos ensaios a 90° e 45°. Estes resultados sugerem que, apesar da menor capacidade de remoção de material observada nesta condição, a ação das partículas erodentes acaba promovendo danos superficiais iguais aos observados nas amostras ensaiadas a 90° e 45°.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios de desgaste erosivo realizados em amostras com superfícies polidas e jateadas, de aço inoxidável utilizado em hélices de motos aquáticas, mostraram que o processo de jateamento não influi na resistência ao desgaste do material da hélice.

Na figura 5.1 são apresentados de forma globalizada os resultados de perda de massa acumulada em função do tipo de superfície, ângulo de incidência das partículas erodentes e o tempo de ensaio. Nesta verifica-se que as maiores perdas de massa ocorreram quando as amostras foram ensaiadas com ângulo de 45°; independentemente, do tipo de superfície; e praticamente não há diferença de perda de massa entre as condições polidas e jateadas.

Uma situação semelhante é observada ao se analisar os resultados de desgaste obtidos com os ângulos de 90° e 0°; inclusive, nestas condições verifica-se que a perda de massa é praticamente igual, independentemente, do tipo de superfície.

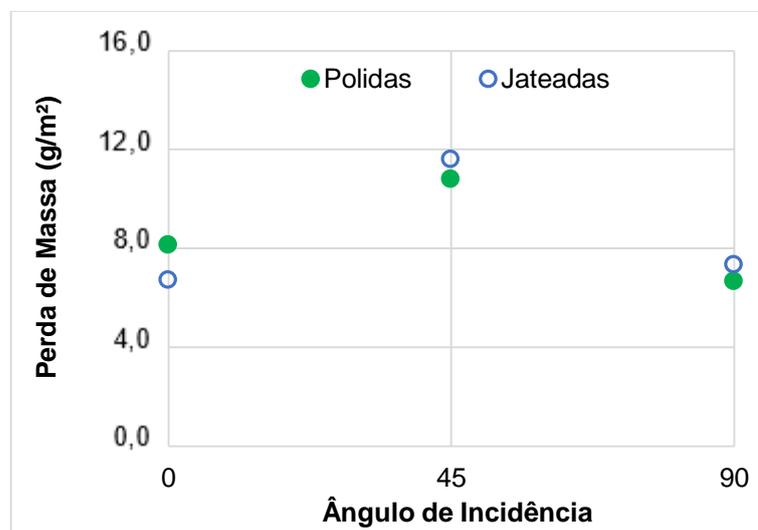


**Figura 5.1** – Perda de massa acumulada e globalizada em função do tipo de superfície, ângulo de incidência e tempo de ensaio de desgaste.

Apesar de ser quantificada uma diferença de perda de massa em função do ângulo de incidência e do tipo de superfície, como mostrado na figura 5.1; onde:

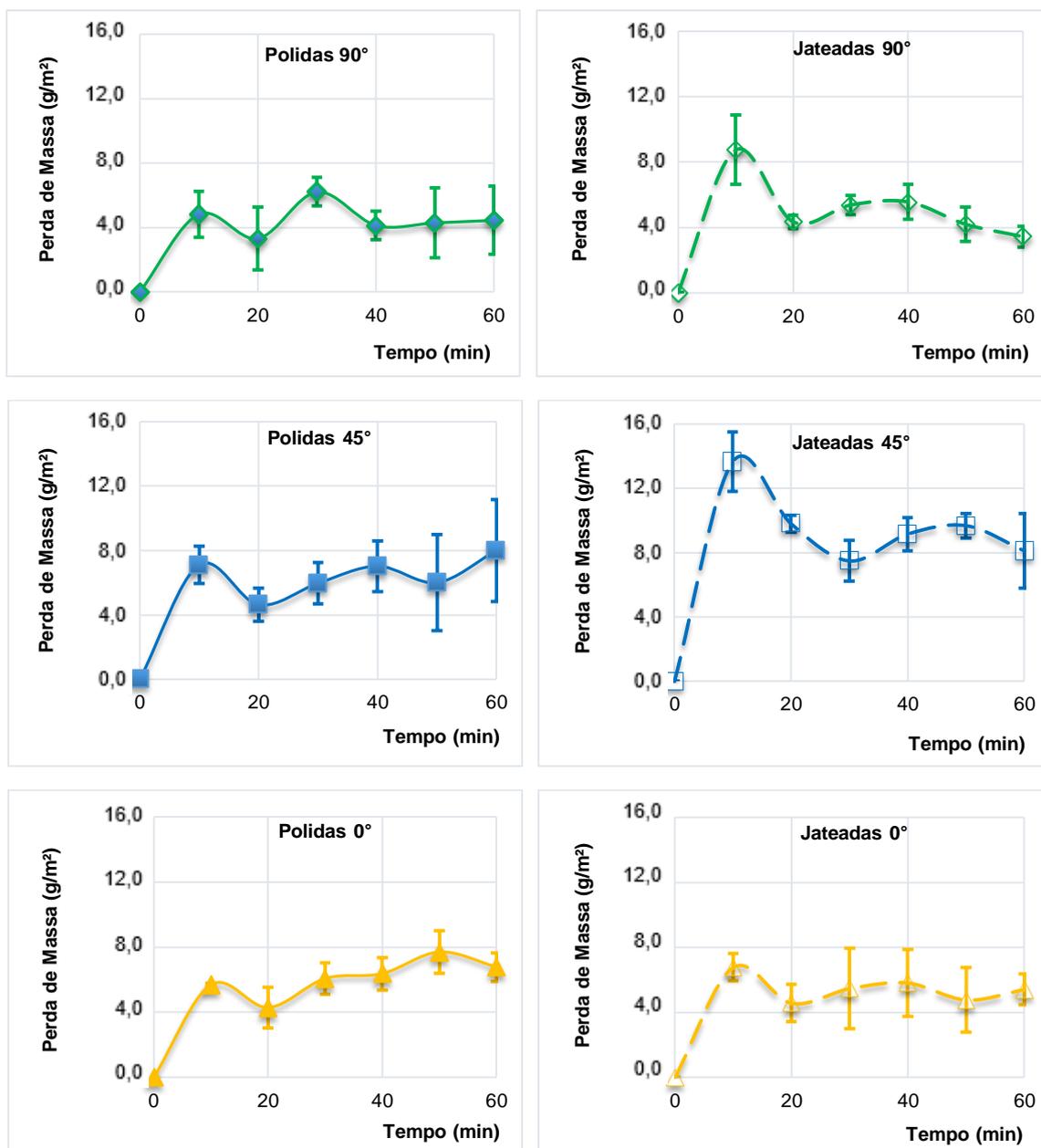
- A 90° Jateadas obtiveram 9,9% a mais de desgaste que Polidas.
- A 45° Jateadas obtiveram 7,4% a mais de desgaste que Polidas.
- A 0° Polidas obtiveram 21,3% a mais de desgaste que Jateadas.

Observa-se também na figura 5.2 que, o maior desgaste ocorre a 45° e que o desgaste a 90° e 0° são semelhantes entre si.



**Figura 5.2** – Desgaste acumulado de amostras polidas e jateadas em função do ângulo de ataque das partículas.

O comportamento do desgaste das amostras, no final dos ensaios, também foi observado na primeira hora de ensaio. Onde se notou que amostras polidas e jateadas perdiam massa de forma diferente, no entanto, no final desta primeira hora a média de perda de massa foi semelhante em cada ângulo analisado; como pode ser visto na figura 5.3. Em todas estas figuras verifica-se que nas amostras polidas a perda de massa é praticamente igual a cada 10 min de ensaio e continua assim ao longo dos ensaios. Enquanto que nas amostras jateadas, a perda de massa ocorre em dois estágios. O primeiro até 10 min, onde a perda de massa é muito intensa e a partir dos 20 min, a perda de massa é menor e estável até o final da hora.



**Figura 5.3** – Perda de massa de amostras polidas e jateadas durante a primeira hora de ensaio, utilizando ângulos de incidência do abrasivo de 90°, 45° e 0°.

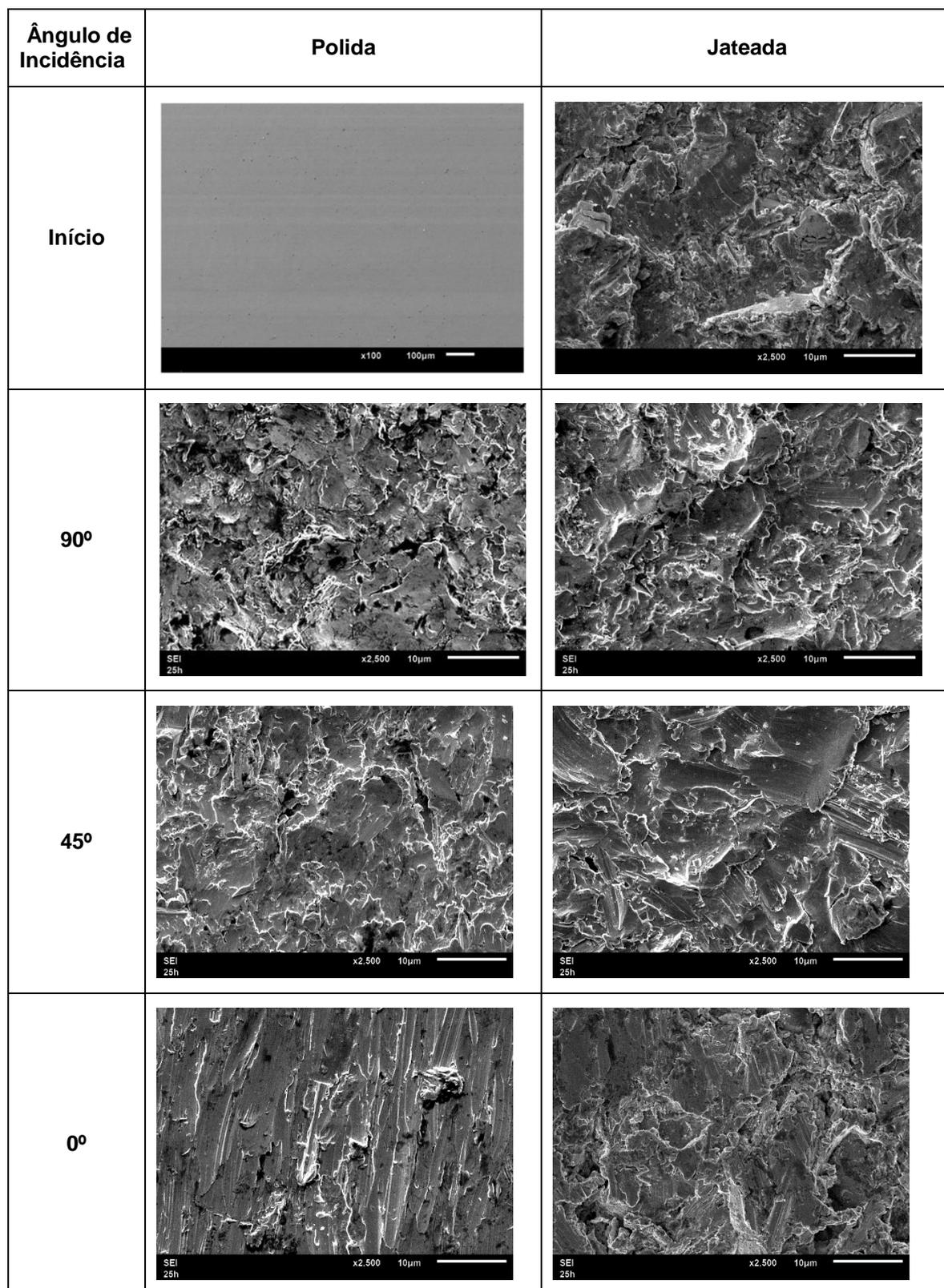
Nota-se também que, desde o início, as amostra ensaiadas a 45° apresentaram maiores perdas de massa do que as ensaiadas com os outros ângulos. E que os patamares de desgaste das amostras ensaiadas a 90° e 0° são muito semelhantes entre si. Estas tendências se mantêm inalteradas até o final das 25 h, como foi visto na figura 5.1 no início deste capítulo.

As imagens das superfícies desgastadas ajudam a entender os resultados de perda de massa obtidos.

Na figura 5.4 observa-se que as amostras ensaiadas a  $90^\circ$  sofrem dano superficial considerável, cuja intensidade promove grandes deformações plásticas e formação de crateras, deixando as superfícies com um aspecto muito parecido àquele oriundo do jateamento, independentemente se a amostra estava polida ou jateada no início dos ensaios. Verifica-se também que o tamanho das marcas deixadas pela ação abrasiva das partículas é menos severo que as deixadas pelo processo de jateamento; ou seja, a superfície parece ter sofrido um alisamento durante os ensaios. Isto pode ser explicado considerando que no processo de jateamento, as partículas usadas no jato também atingem a superfície a  $90^\circ$ , mas com maiores velocidades de impacto e tamanhos de partículas ( $> 1 \text{ mm}$ ), comparado com as partículas utilizadas neste trabalho que estavam entre 300 e 600  $\mu\text{m}$ . Assim, o jateamento promoveria danos superficiais mais acentuados que os provocados durante os ensaios; portanto, o ensaio sendo menos severo causaria novas deformações plásticas e pequena remoção de material que culminaria com uma superfície menos deteriorada. Além disso, com este ângulo, a possibilidade de as partículas erodentes conseguirem gerarem sulcos e provocar mais dano é muito pequena.

No caso das amostras ensaiadas a  $45^\circ$  nota-se, outra vez que, o dano superficial final é praticamente igual nas superfícies polidas e jateadas. Inclusive, comparando estas superfícies com a superfície jateada inicial, nota-se que o aspecto delas é muito semelhante. A única diferença é que nas superfícies desgastadas as marcas de deformação plástica estão orientadas no sentido de impacto das partículas, e há sulcos que sugerem a presença de microcorte e, portanto, maiores quantidades de material removido.

Analisando as superfícies ensaiadas a  $0^\circ$ , é visto que o dano superficial é muito pequeno, comparado com as superfícies obtidas com os outros dois ângulos de incidência. Neste caso são poucas as partículas que atingem as superfícies, pois estas trafegam paralelamente a ela. A baixa incidência destas promoveria também, menores deformações plásticas, entretanto, muito bem orientadas no sentido de fluxo do abrasivo. A superfície das amostras jateadas e ensaiadas, também sofrem pouca influência das partículas abrasivas e por isso, até o final do ensaio são observadas marcas do jateamento inicial.



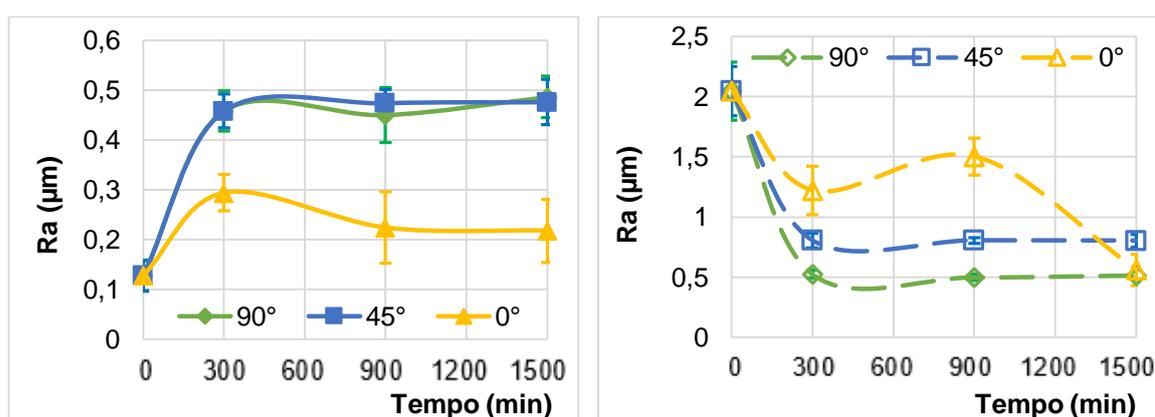
**Figura 5.4** – Aspecto das superfícies antes e depois dos ensaios de desgaste.

As medidas de rugosidade confirmam o dano superficial, visto nas imagens da figura 5.4, causado pelas partículas abrasivas no decorrer do tempo de ensaio.

Na figura 5.5 observa-se que, no início dos ensaios as superfícies polidas sofrem um aumento significativo de rugosidade devido às deformações plásticas e remoção de material por mecanismos abrasivos. Depois de 5 h, o valor da rugosidade se estabiliza e se matem assim até o final do teste. Nos ensaios realizados a  $0^\circ$  observa-se que o dano superficial é muito pequeno e quase não provoca variação da rugosidade. Enquanto que nas amostras ensaiados a  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , a rugosidade é a mesma durante todo o ensaio, indicando que o dano causado por mecanismos diferentes gera superfícies semelhantes.

No caso das amostras jateadas, ocorre um fenômeno contrário ao observado nas polidas; nestas acontece um alisamento das superfícies. Sendo que, com ângulos de  $45^\circ$  e  $90^\circ$  a rugosidade é igual ao longo de todo o ensaio após as primeiras 5 h. Nota-se também que, com amostras a  $0^\circ$  o alisamento ocorre de forma mais demorada, pois são poucas as partículas que atingem a superfície em relação a ângulos de incidência mais altos, mas no final das 25 horas, as superfícies são semelhantes às de  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

Finalmente, verifica-se também que no final das 25h de ensaio, independentemente, do tipo de superfície inicial a rugosidade Ra alcança um patamar próximo de  $0,5 \mu\text{m}$ .



**Figura 5.5** – Rugosidade Ra medida durante os ensaios realizados com amostras polidas (esquerda) e jateadas (direita) com ângulos de incidência de  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $0^\circ$ .

Todos os resultados obtidos neste estudo sugerem que, para as condições experimentais utilizadas, o jateamento não promoveu uma melhora da resistência ao desgaste do aço 15-5 PH usado em hélices de motos aquáticas; a pesar de ter ocorrido um aumento da dureza superficial de 35 para 37 HRC e de saber-se que o jateamento introduz tensões residuais de compressão superficiais.

## 6. CONCLUSÕES

Ao término deste estudo que avaliou o comportamento em desgaste erosivo de um aço usado na fabricação de hélices de motos aquáticas com tratamentos superficiais de polimento e jateamento, pode-se concluir que:

- O equipamento construído para estudar o desgaste erosivo de aços de hélices de motos aquáticas permitiu simular com precisão as condições de uso desses veículos e obter resultados coerentes com outros vistos na literatura científica.
- O tratamento superficial de jateamento, embora tenha aumentado a dureza superficial, não influenciou decisivamente na resistência ao desgaste do material da hélice, nas condições utilizadas neste estudo.
- Os maiores desgastes ocorreram quando o ângulo de incidência foi de  $45^\circ$ , independentemente do tipo de superfície. Nesta condição as partículas abrasivas promovem a remoção de material por sulcamento e corte.
- O desgaste medido com ângulos de incidência de  $90^\circ$  e  $0^\circ$  foram idênticos entre si, independentemente do tipo de superfície. Entretanto, a remoção de material ocorreu por mecanismos diferentes. A  $90^\circ$ , por microfadiga devido as contínuas deformações plásticas sofridas pela superfície; e a  $0^\circ$  por sulcamento e corte.
- A turbulência gerada dentro do recipiente pode ter influenciado os valores de desgaste obtidos, especialmente, durante os ensaios realizados a  $0^\circ$ , isso explicaria por que a perda de massa foi praticamente igual, com estes dois ângulos de incidência.
- Durante o processo de desgaste as superfícies polidas tiveram um acréscimo da rugosidade, devido ao dano superficial provocado pelo impacto das partículas, que criaram crateras, sulcos e extensa deformação plástica. Enquanto que, com as amostras jateadas houve um alisamento das superfícies, já que o dano superficial causado pelo processo de jateamento é mais severo que aquele provocado pelas partículas usadas nos ensaios de desgaste.

## 7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desta pesquisa, além de esclarecer algumas dúvidas relacionadas ao desgaste materiais de hélice de moto aquática, também permitiu revelar as inúmeras variáveis que poderiam influenciar nos resultados obtidos.

A seguir são propostas algumas ações que podem ser desenvolvidas para enriquecer o estudo:

### **Equipamento**

- Utilizar um inversor de frequência no equipamento para possibilitar a variação de velocidade do ensaio, pois a velocidade de incidência das partículas na superfície é vista como um dos principais fatores responsáveis por alterar a taxa de erosão.
- Procurar outra forma de fixação das amostras de tal maneira que a turbulência gerada dentro do recipiente seja minimizada ou direcionar o fluxo de tal forma que o impacto ocorra somente no ângulo desejado.

### **Mistura Erosiva Água / Areia**

- Realizar ensaios de desgaste com água salgada, simulando ambiente marinho ou oceânico, visto que muitos propulsores podem vir a sofrer com corrosão e oxidação devido à salinidade da água.
- Usar misturas mais densas que simulem ambientes lamacentos, semelhantes aos encontrados na beira dos rios, bancos de areia e/ou praias.

### **Condições de Ensaio**

- Realizar tratamentos térmicos de Nitretação nas amostras, o que altera a superfície dos materiais deixando-os mais duros e conseqüentemente mais resistentes ao desgaste erosivo.

- Realizar os ensaios de desgaste com outros metais que possam constituir as hélices de motos aquáticas com intuito de observar seu comportamento ao desgaste erosivo.
- Estudar o sinergismo entre desgaste erosivo e cavitação, que juntos culminam em uma perda de material mais intensa.
- Estudar a influência do desgaste erosivo em uma hélice real com diferentes tipos de tratamentos superficiais.
- Modificar as condições de Jateamento.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOBAR, Associação Brasileira dos Construtores de Barcos e Seus Implementos, **Industria Náutica Brasileira: Fatos e Números 2005**, Relatório Anual, 2005.

AK STEEL, **Product Data Bulletin 15-5 PH Stainless Steel**, AK Steel Corporation, 2007. p. 3-10.

ANDRIEU, E.; DANOIX, F.; GIBERT, A.; LACAZE, J.; HOUMMADA, K.; MANGELINCK, D. **Effect of external stress on the Fe–Cr phase separation in 15-5 PH and Fe–15 Cr–5Ni alloys**, Ultramicroscopy, 2013. p. 193-198.

ASTM G 190-06, **Standard Guide for Developing and Selecting Wear Tests**, ASTM International.

ASTM G 40-13, **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**, ASTM International.

BAJGUIRANI, H. R. H. **The effect of ageing upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5 PH stainless steel**, Materials Science and Engineering, 2002. p. 142-159.

BATCHELOR, A. W.; STACHOWIAK, G. W. **Engineering Tribology**, Elsevier Butterworth-Heinemann, 3 rd Edition, 2005.

BERNARDELLI, E. A.; SANTOS, L.M.; BORGES, P. C. **Tratamento Concomitante de Nitretação e Envelhecimento a Plasma do Aço Inoxidável 15-5 PH**, Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, Vol. 26, N° 4, 2007. p. 217-223.

BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**, 2 nd Edition, United States: John Wiley & Sons Ltd, 2013.

BIRD, C. R. **Metallographic Techniques and Microstructures**, ASM Handbook, Metallographic and Microstructures, ASM International, Vol. 09, 1985. p. 568.

BOAS, F.V. **Desenvolvimento de uma Ferramenta de CAD Aplicada ao Projeto de Hélices para Veículos Aquáticos não Tripulados**, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. p. 47-67. Dissertação.

BOATTEST.COM. **Does Your Prop Have Secret Cavitation ?**, Dez. 2009. Disponível em: <[http://www.boattest.com/resources/view\\_News.aspx?NewsID=3643](http://www.boattest.com/resources/view_News.aspx?NewsID=3643)> Acesso em 02 de Dezembro de 2014.

BOLSSER, E.; MARTINU, L.; KLEMBERG-SAPIEHA, J. E. **Solid Particle Erosion Mechanisms of Hard Protective Coatings**, Surface & Coatings Technology, 2013. p. 383-393.

BRP, Bombardier Recreational Products INC., **Operator's Guide: Includes Safety, Watercraft and Maintenance Information**, BRP, 1997.

BRP, Bombardier Recreational Products INC., **Operator's Guide: Includes Safety, Watercraft and Maintenance Information**, BRP, 2014.

CAIACH, S.; JEFFERY, R. S. **Waterbike Injuries**, British Journal of Sports Medicine, Br J Sports Med, 1991. p. 232-234.

CHEN, Y.-M. **Industry Examples of Cavitation Failure**, ASM Handbook, Failure Analysis and Prevention, ASM International, Vol. 11, 2002. p. 2180-2192.

CLARK, W. C.; GARVIN, H. W. **Effect of Composition and Section Size on Mechanical Properties of Some Precipitation Hardening Stainless Steels**, ASTM International, 1965. p. 151-158.

CNC, Confederação Nacional do Comércio de Bens, Serviços e Turismo, **Turismo Náutico: Busca da Regulamentação dos Cruzeiros Marítimos no País**, Rio de Janeiro, CNC, 2011.

CURREY, S.; CZM, Massachusetts Coastal Zone Management Office, **Personal Watercraft (PWC) Management Guide: a Comprehensive Reference Handbook**, Massachusetts Office of Coastal Zone Management, 2002.

DAVIS, J. R. **Surface Engineering of Stainless Steels**, ASM Handbook, Surface Engineering, ASM International, Vol. 5, 1994. p. 1998.

DOTTORI, M. **Jet Ski Pescador**, Pesca Esportiva, São Paulo, N° 159, p. 50-54, 2010.

FINNIE, I. **Erosion of Surfaces by Solid Particles**, Wear, 1960. p. 87-103.

FINNIE, I. **Some Observations on the Erosion of Ductile Metals**, Wear, 1972. p. 81-90.

FINNIE, I. **Some Reflections on the Past and Future of Erosion**, Wear, 1995. p. 186-187.

GOOGLE IMAGES. **Impeller Jet Ski**, Disponível em: <  
[https://www.google.com.br/search?q=impeller+jet+ski&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0CAYQ\\_AUoAWoVChMI9LOeh4jDyAIVibgeCh3-6gYP](https://www.google.com.br/search?q=impeller+jet+ski&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMI9LOeh4jDyAIVibgeCh3-6gYP)> Acesso em 13 de Outubro de 2015.

GOOGLE IMAGES. **Wear in Impeller of Jet Ski**, Disponível em: <  
[https://www.google.com.br/search?q=wear+in+impeller+of+jet+ski&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAcQ\\_AUoAmoVChMIxYLEtYnDyAIVSx4eCh2\\_RQO-#](https://www.google.com.br/search?q=wear+in+impeller+of+jet+ski&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAcQ_AUoAmoVChMIxYLEtYnDyAIVSx4eCh2_RQO-#)> Acesso em 13 de Outubro de 2015.

HAMMOUD, A. H. **Effect of Design and Operational Parameters on Jet Pump Performance**, 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, Elounda, Greece, August 21-23, 2006. p. 245-252.

HEMMEL, J. **How to Repair Personal Watercraft Hull Damage**, Nov. 2010. Disponível em: < <http://www.personalwatercraft.com/features/how-to-repair-personal-watercraft-hull-damage-1019.html>> Acesso em 02 de Dezembro de 2014.

HOUGE, F. **The Importance of Metallographic Etching for Failure Analysis of Metals**, Microscopy Society of America, 2014. p. 1854-1855.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**, Butterworth-Heinemann, 1992.

KOSSEL, T. H. **Solid Particle Erosion**, ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International, Vol. 18, 1992. p. 376.

LOCATELLI, A. **Determinação do Comportamento ao Desgaste Erosivo a Diferentes Temperaturas de um Revestimento a Base de Fe, Nb, Cr e W Aplicado pela Técnica de Arco Elétrico**, Porto Alegre, Escola de Engenharia, Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. p. 15. Trabalho de Diplomação.

LUDEMA, K.C. **Sliding and Adhesive Wear**, ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International, Vol. 18, 1992. p. 436-438.

MAGEE, J. H. **Wear of Stainless Steels**, ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International, Vol. 18, 1992. p. 1456.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W. B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of Abrasive Machining Processes**, 1 st Edition, United States: William Andrew Inc., 2004. p. 35.

MARQUES, C. M. **Relação Entre Microestrutura e Desgaste Erosivo a Frio e a Quente em Materiais Cerâmicos à Base de Alumina**, Porto Alegre, Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. p. 32-66. Tese.

MARSH, G. **GRP Meets the Jet Ski Challenge**, Reinforced Plastics, Vol. 41, Ed. 11, 1997. p. 34-38.

MATAMOROS, E. P. **Modelo de Desgaste Oxidativo Baseado em Parâmetros Termodinâmicos**, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. p. 24-25. Tese.

MESA, D. H.; GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN, A. P. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Erosivo Gerado por Cavitação em Aços Inoxidáveis Austeníticos com Alto Teor de Nitrogênio: Estudo dos Mecanismos de Desgaste**, REM. Revista Escola de Minas, Vol. 63, 2010. p. 147-152.

MINISTÉRIO DO TURISMO, **Turismo Náutico: Orientações Básicas**, Brasília, 3ª Edição, 2010.

MORENO, R. F.; **Estudo das Variáveis que Afetam a Tenacidade e a Ductilidade do Aço PH 13-8Mo Utilizado na Indústria Aeronáutica**, São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais PPECM, Universidade Federal de São Carlos, 2013. p. 3-11. Dissertação.

MOURA, D. A. **Análise dos Principais Segmentos da Indústria Marítima Brasileira: Estudo das Dimensões e dos Fatores Críticos de Sucesso Inerentes à sua Competitividade**, São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. p. 104. Tese.

NIXON, M. **The Personal Watercraft Phenomenon**, Abril. 2003. Disponível em: <<http://www.motorcycleproject.com/motorcycle/text/phenom3.html>> Acesso em 21 de Outubro de 2014.

NTSB, **National Transportation Safety Board**, Personal Watercraft Safety: Safety Study, NTSB/SS-98/01, Washington, D.C., 1998.

OCHOA, D. M. L. **Estudo do Desgaste Erosivo-Corrosivo de Aços Inoxidáveis de Alto Teor de Nitrogênio em Meio Lamacento**, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. p. 60-77. Tese.

PASSOS, D. O. **A Influência da Ferrita Delta em Aços Inoxidáveis Austeníticos Forjados**, REM. Revista Escola de Minas, Vol. 63, 2010. p. 057-063.

PWIA, **Personal Watercraft Industry Association**, The History; Evolution; and Profile of Personal Watercraft, PWIA, 2006.

QUINN, T.F.J. **Review of Oxidational Wear Part I: The Origins of Oxidational Wear**, Tribology International, Vol. 16, Nº 05, 1983, p. 257-271.

SANTOS, C. E. R. **Avaliação Comparativa da Resistência à Fadiga de Contato para Aço Ferramenta com Microestruturas Martensíticas e Bainíticas**, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012, p. 22-26. Dissertação.

SUNDARARAJAN, G. ROY, M. **Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevator Temperatures**, Tribology International, Vol. 30, Nº 5, 1997. p. 339-359.

SUNDARARAJAN, G. **A New Model for Ho-Body Abrasive Wear Based on the Localization of Plastic Deformation**, Wear, 1987. p. 1-35.

TOMANIK, E. **Modelamento do Desgaste por Deslizamento em Anéis de Pistão de Motores de Combustão Interna**, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. p. 16. Tese.

TORO, A.; SINATORA, A.; TANAKA, D. K.; TSCHIPTSCHIN, A. P. **Corrosion-Erosion of Nitrogen Bearing Martensitic Stainless Steels in Seawater-Quartz Slurry**, Wear, Elsevier, 2001. p. 1257-1264.

VANDER VOORT, G.F.; LUCAS, G.M.; MANILOVA, E.P. **Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels**, ASM Handbook, Metallography and Microstructures, ASM International, Vol. 9, 2004, p. 1651.

WASHKO, S. D.; AGGEN, G. **Classification of Stainless Steels**, ASM Handbook, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, Vol. 1, 1990. p. 2012.

WILSON, T. V. **How Personal Watercraft Work**, Disponível em: <<http://adventure.howstuffworks.com/outdooractivities/watersports/personalwatercraft1.htm>> Acesso em 13 de Agosto de 2014.

ZUM GHAR, K.-H. **Microstructure and Wear of Materials**. Institute of Materials Technology, Tribology Series, Vol. 10, Elsevier, 1987. p. 531-532.