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

ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE EROSIVO – ABRASIVO DE AÇOS INOXIDÁVEIS E AÇOS DE BAIXO CARBONO

Autor: João Antonio Bastos Ferreira
Orientador: Edison Gustavo Cueva

Brasília, DF
2016

JOÃO ANTONIO BASTOS FERREIRA

ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE EROSIVO – ABRASIVO DE AÇOS INOXIDÁVEIS E AÇOS DE BAIXO CARBONO

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

Orientador: D. Sc. Edison Gustavo Cueva Galárraga

Brasília, DF
2016

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Ferreira, João Antonio.
Estudo Comparativo do Desgaste Erosivo – Abrasivo de Aços Inoxidáveis e Aços de Baixo Carbono / João Antonio Bastos Ferreira. Brasília: UnB, 2016.

Monografia (Bacharel em Engenharia Automotiva) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2016. Orientação: Edison Gustavo Cueva Galárraga.

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

CDU Classificação

ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE EROSIVO – ABRASIVO DE AÇOS INOXIDÁVEIS E AÇOS DE BAIXO CARBONO

João Antonio Bastos Ferreira

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 16/08/2016 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr. Rhander Viana, UnB/ FGA
Membro Convidado

Msc. Artur Ribeiro de Oliveira
Membro Convidado

Brasília, DF
2016

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS
RESUMO
ABSTRACT
1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1. VEÍCULOS NÁUTICOS DE ESPORTE E LAZER 3
2.1.1. SISTEMAS DE PROPULSÃO DE VEÍCULOS NÁUTICOS 4
2.1.2. PROPULSOR NÁUTICO (HÉLICE) 6
2.1.3. MATERIAIS UTILIZADOS EM HÉLICES DE VEÍCULOS NÁUTICOS ... 8
2.1.3.1. AÇOS INOXIDÁVEIS E AÇOS CARBONO 9
2.1.4. MATERIAIS ALTERNATIVOS 10
2.1.5. FALHAS POR DESGASTE EM HÉLICES DE VEÍCULOS NÁUTICOS 11
2.2. MECANISMO DE DESGASTE DE MATERIAIS 12
2.2.1. DESGASTE OXIDATIVO 12
2.2.2. DESGASTE POR FADIGA SUPERFICIAL 14
2.2.3. DESGASTE ABRASIVO 15
2.2.4. DESGASTE EROSIVO 17
2.2.4.1. INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA PARTÍCULA ABRASIVA 18
2.2.4.2. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE IMPACTO DA PARTÍCULA ABRASIVA 19
2.2.4.3. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE IMPACTO DA PARTÍCULA ABRASIVA 20
2.2.4.4. INFLUÊNCIA DA DUREZA DA PARTÍCULA ABRASIVA E DO MATERIAL DESGASTADO 22
2.2.5. RECOBRIMENTOS RESISTENTES AO DESGASTE ABRASIVO-EROSIVO 22
2.3. ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO – ABRASIVO 23
2.4. OBJETIVOS 26
3. MATERIAIS E MÉTODOS 27
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS 27
3.1.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA 27

3.1.2. ANÁLISE METALOGRÁFICA 28
3.1.3. DUREZA 28
3.2. ENSAIO DE DESGASTE EROSIVO ABRASIVO 29
3.2.1. EQUIPAMENTO 29
3.2.2. CORPOS DE PROVA 31
3.2.2.1. AÇO DE BAIXO CARBONO 31
3.2.2.2. AÇO INOXIDÁVEL 32
3.2.3. MISTURA EROSIVA 32
3.2.4. PERDA DE MASSA 33
3.2.5. CONDIÇÕES E TEMPO DE ENSAIO 34
3.2.6. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE 36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS 37
4.1.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA 37
4.1.2. ANÁLISE METALOGRÁFICA 38
4.1.3. DUREZA 39
4.2. ENSAIOS DE DESGASTE 40
4.2.1. ENSAIO 1 – AÇO DE BAIXO CARBONO – ÁGUA + AREIA 40
4.2.1.1. PERDA DE MASSA 40
4.2.1.2. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE 45
4.2.2. ENSAIO 2 – AÇO DE BAIXO CARBONO – ÁGUA COM SAL + AREIA 48
4.2.2.1. PERDA DE MASSA 48
4.2.2.2. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE 49
4.2.3. ENSAIO 3 – AÇO INOXIDÁVEL – ÁGUA + AREIA 55
4.2.3.1. PERDA DE MASSA 55
4.2.3.2. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE 57
4.2.4. ENSAIO 4 – AÇO INOXIDÁVEL – ÁGUA COM SAL + AREIA 58
4.2.4.1. PERDA DE MASSA 58
4.2.4.2. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE 60
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 66
6. CONCLUSÕES 69
7. TRABALHOS FUTUROS 70
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 71

LISTA DE FIGURAS

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

Figura 23 - Equipamento de ensaio de desgaste por impacto e abrasão (Kennedy, et al., 1996) 25
Figura 24 - Máquina de desgaste construída por Oliveira (2015) 25
Figura 25 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) 27
Figura 26 - Microscópio Óptico Pantec 28
Figura 27 - Durômetro Durotwin -D Plus 29
Figura 28 – Estrutura inicial e estrutura com modificações, respectivamente 29
Figura 29 - Disco porta-amostras 30
Figura 30 - Amostras posicionadas em um ângulo 60 graus 30
Figura 31 – Sistema no qual as amostras são inseridas 31
Figura 32 - Amostras de aço de baixo carbono 31
Figura 33 - Amostras de aço inoxidável 32
Figura 34 - Amostras dos dois materiais polidas 32
Figura 35 - Peneira industrial Bertel 33
Figura 36 - Balança Semi-Analítica OHAUS 34
Figura 37 – Comparativo da microestrutura do aço estudado (esquerda) com a do aço estudado por Carvalho (direita), com modificações, imagens obtidas por microscopia óptica após ataque com ácido Nital 3% durante 2 minutos 38
Figura 38 – Comparativo da microestrutura do aço inoxidável estudado (esquerda) com a de um aço inoxidável austenítico (direita), com modificações, imagens obtidas por microscopia óptica após ataque eletrolítico com ácido oxálico 10% por dois minutos 38
Figura 39 - Dureza das amostras estudadas e de suas respectivas referências 39
Figura 40 - Taxa de desgaste de amostras de aço de baixo carbono em função do tempo para diversos ângulos, ensaiadas com água e areia 40
Figura 41 - Efeito do ângulo de incidência da partícula abrasiva na superfície (Oliveira, 2015) 41
Figura 42 - Taxa de desgaste de amostras de aço de baixo carbono em função do ângulo de impacto, ensaiadas com água e areia após 5h 41
Figura 43 - Influencia do ângulo de impacto na taxa de desgaste, Finnie (1995) 41
Figura 44 - Suporte com amostras dentro do galão 42
Figura 45 - Partícula abrasiva impactando amostra a 0° 43
Figura 46 - Partícula impactando amostra a 30° 43
Figura 47 - Partícula abrasiva impactando amostra a 45° 44

Figura 48 - Partícula impactando a amostra a 60° 44
Figura 49 - Partícula abrasiva impactando amostra a 90° 45
Figura 50 - Superfícies das amostras de aço de baixo carbono após 5h de ensaio com água e areia em vários ângulos 46
Figura 51 - Desgaste erosivo causado pela abrasão de partículas sobre a superfície em ângulos agudos (Oliveira, 2015) 47
Figura 52 - Mecanismo de desgaste erosivo, na qual as partículas erosivas chocam-se em ângulo altos (Oliveira, 2015) 47
Figura 53 - Taxa de desgaste de amostras de aço de baixo carbono em função do tempo para diversos ângulos, ensaiadas com água, areia e sal 48
Figura 54 - Taxa de desgaste em função do ângulo de impacto após 5 horas de ensaio com solução abrasiva (água, areia e sal) em amostras de aço de baixo carbono. 49
Figura 55 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 0º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 50
Figura 56 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 30º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 51
Figura 57 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 45º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 52
Figura 58 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 60º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 53
Figura 59 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 90º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 54
Figura 60 - Detalhe da cratera formada em um angulo de 90º 55
Figura 61 - Taxa de desgaste de amostras de aço inoxidável em função do tempo para diversos ângulos, ensaiadas com água e areia 56
Figura 62 – Taxa de desgaste em função do ângulo de impacto após 5 horas de ensaio com solução abrasiva (água e areia) em amostras de aço inoxidável 57
Figura 63 - Superfícies das amostras de aço inoxidável após 5h de ensaio com água e areia em vários ângulos 58
Figura 64 – Taxa de desgaste de amostras de aço inoxidável em função do tempo para diversos ângulos, ensaiadas com água, areia e sal 59
Figura 65 - Esquemático do mecanismo de remoção da camada passiva por impacto de partícula erosiva Ochoa (2007) 60

Figura 66 - Taxa de desgaste em função do ângulo de impacto após 5 horas de ensaio com solução abrasiva (água, areia e sal) em amostras de aço inoxidável 60
Figura 67 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 0º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 61
Figura 68 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 30º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 62
Figura 69 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 45º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 63
Figura 70 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 60º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 64
Figura 71 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 90º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal 65
Figura 72 - Taxa de desgaste global das amostras de aço de baixo carbono e de aço inoxidável em um ângulo de 30º 66
Figura 73 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono e aço inoxidável após 5 horas de ensaio em todos os ambientes e todos os ângulos 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes do sistema de propulsão e suas funções 5
Tabela 2 - Esquemático do ensaio 1 e 3 de desgaste abrasivo-erosivo 35
Tabela 3 - Esquemático do ensaio 2 e 4 de desgaste abrasivo-erosivo 36
Tabela 4 - Composição química das amostras de aço de baixo carbono (%massa) 37
Tabela 5 - Composição química do aço dúctil CA24 (%massa) 37
Tabela 6 - Composição química das amostras de aço inoxidável (%massa) 37
Tabela 7 - Composição química máxima do aço inoxidável 302 (%massa) 37
Tabela 8 - Dureza das amostras 39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MCP	motor de combustão interna
FPP	hélice de passo fixo
CPP	hélice de passo variável
V	velocidade da embarcação
V`	velocidade real da embarcação
P	passo do hélice
N	número de rotações
RPM	rotações por minuto
RTM	moldagem por transferência de resina
µm	micro metro
mm	milímetros
m/s	metros por segundo
MEV	microscópio eletrônico de varredura
EDS	espectroscopia de energia dispersiva
NAB	níquel-alumínio-bronze
MAB	manganês-alumínio-bronze
SAE	society of automotive engineers
NORMAN	normas de autoridade marítima

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo geral, fazer um estudo comparativo da resistência ao desgaste erosivo-abrasivo de amostras de aço de baixo carbono e de aço inoxidável utilizadas na fabricação de componentes náuticos (hélice de rotores). Na etapa inicial do trabalho foram realizadas adaptações numa bancada de ensaios de desgaste construída na Faculdade do Gama da Universidade de Brasília, e depois verificada seu correto funcionamento por meio de ensaios de desgaste em amostras de aço de baixo carbono em solução aquosa contendo areia grossa como abrasivo. Posteriormente o mesmo ensaio foi realizado com um aço inoxidável. Novos ensaios utilizando uma solução aquosa contendo sal e areia foram realizados em amostras dos dois materiais. As amostras foram fixadas a um disco porta amostras de tal forma que as partículas impactassem nas amostras com ângulos predeterminados de 0º, 30º, 45º, 60º e 90º. O tempo total dos ensaios foi de 5 horas, para cada ângulo examinado. No primeiro ensaio a cada 30 minutos os ensaios foram interrompidos para quantificar a perda de massa sofrida, no segundo ensaio as paradas eram de 1 hora. Os resultados mostraram que as amostras ensaiadas com ângulo de 30º foram as que mais se desgastaram, seguidas das amostras ensaiadas a 45º, 90º, 60º e 0º e que as amostras de aço inoxidável obtiveram menores perdas de massa nos ensaios. Estes resultados, em geral, corroboram com outros apresentados na literatura cientifica, a exceção dos valores medidos a 90º cujo comportamento pode ser explicado em função do arranjo experimental utilizado. A dinâmica de movimentação da solução erosiva faz com que parte das partículas erosivas impactem as amostras com ângulos diferentes aos previstos nos ensaios.

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

ABSTRACT

This study has the general objective of making a comparative research of resistance to erosive-abrasive wear of low carbon steel samples and stainless steel used in the manufacture of water components (propeller rotors). In the initial stage were done adjustments in a wear test workbench built in the Faculdade do Gama da Universidade de Brasília and then verified its correct operation through wear tests of low carbon steel samples in an aqueous solution containing coarse sand as an abrasive. Subsequently the same test was performed with stainless steel and further testing in aqueous solution containing salt and grit were conducted on samples of the two materials. Samples were fixed in a holder such that the particles impacting the samples with predetermined angles 0 °, 30 °, 45 °, 60 ° and 90 °. The total time of the test was 5 hours for each angle considered. In the first assay in every 30 minutes the tests were stopped to measure the weight loss in the second test the stop times were of 1 hour. The results showed that the samples tested with 30 ° angle were the ones most worn, followed by the test samples 45, 90, 60 and 0º and the stainless steel samples had lower weight loss during the tests. These results generally agree with other presented in the scientific literature, with the exception of the 90º measured values whose behavior can be explained by experimental arrangement used. The dynamic handling of the erosive solution causes of the erosive particles impacting the samples with different angles to those of tests.

Keywords: Erosive-abrasive wear. Stainless steel. Low carbon steel. Erosion-abrasion resistence.

1. INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

Inicialmente, foram realizadas adaptações à bancada de ensaios de desgaste erosivo–abrasivo construída por Cueva (2015) e depois foi verificado seu funcionamento por meio de ensaios preliminares em amostras de aço de baixo carbono.

Na sequência do trabalho, foram complementados os ensaios com o aço e a seguir, ensaios semelhantes foram realizados com amostras de aço inoxidável, para finalmente serem realizadas as comparações pretendidas.

O trabalho encontra-se dividido em oito capítulos, o capítulo 1 é destinado a inserir o leitor no conteúdo abordado. O capítulo 2 é destinado a inserir o conteúdo teórico necessário para o entendimento e realização deste trabalho, no capítulo 3 é descrito os materiais e métodos utilizados no ensaio. No capítulo 4 são abordados os resultados adquiridos após os ensaios, bem como uma discussão a respeito, já no capítulo 5 é apresentado as considerações finais à respeito dos dados coletados, em seguida uma conclusão sobre o trabalho é apresentada, no capítulo 7 é apresentado algumas propostas de trabalhos futuros. Por fim, no capítulo 8 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na confecção deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. VEÍCULOS NÁUTICOS DE ESPORTE E LAZER

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

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

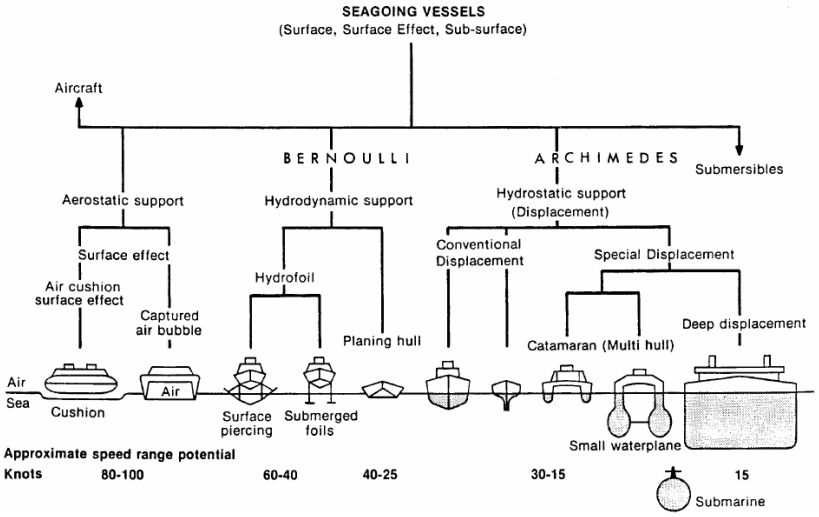

Figura 1 - Tipos de embarcações (Fujarra, 2006)

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

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

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

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

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

2.1.1. SISTEMAS DE PROPULSÃO DE VEÍCULOS NÁUTICOS

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

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

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

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

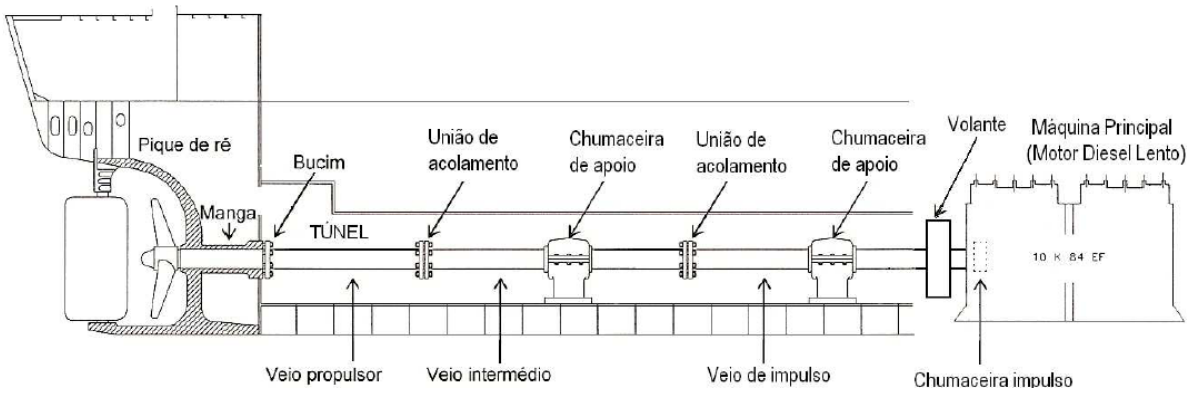

Figura 2 - Exemplo de sistema de propulsão direta (Baptista, 2013)

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

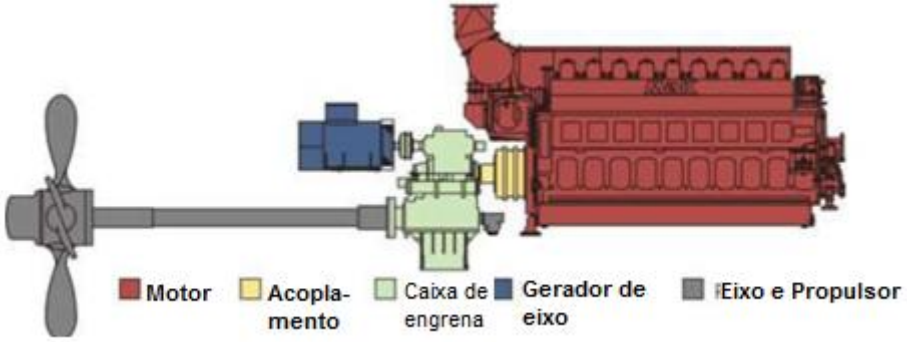

Figura 3 - Exemplo de sistema de propulsão indireta (Baptista, 2013)

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

Tabela 1 - Componentes do sistema de propulsão e suas funções (Adaptada de Baptista, 2013)

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

2.1.2. PROPULSOR NÁUTICO (HÉLICE)

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

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

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

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

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

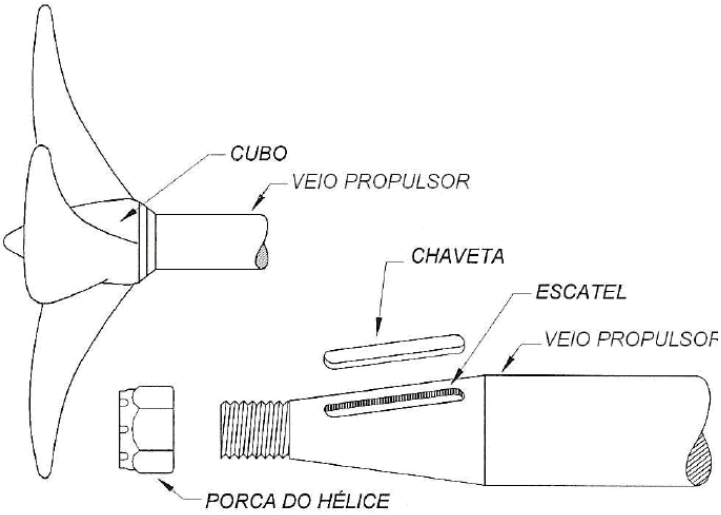

Figura 5 - Partes de um hélice (Geer, 1989)

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

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

O passo do hélice é entendido de forma didática como a distância percorrida pela embarcação a cada rotação completa do propulsor, isto seria verdade se a água fosse um meio rígido. Para hélices FPP, mais utilizadas em embarcações comerciais, a velocidade do navio adotando que a água seja um meio rígido poderia ser expressa pela Eq. (1).

$$V = p \times n \tag{1}$$

Onde V é a velocidade do navio, p o passo do hélice e n o número de rotações por unidade de tempo, normalmente mensurada em função dos minutos (RPM), no entanto, como

a água é um elemento deformável ocorre que o avanço da embarcação não seja igual ao passo fixo. Para cálculo da velocidade real da embarcação é necessário o cálculo do recuo do hélice visto na Eq. (2).

$$\mathrm{coef}_{\mathrm{recuo}} = \frac{\mathrm{V} - \mathrm{V}'}{\mathrm{V}} \tag{2}$$

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

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

2.1.3. MATERIAIS UTILIZADOS EM HÉLICES DE VEÍCULOS NÁUTICOS

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

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

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

2.1.3.1. AÇOS INOXIDÁVEIS E AÇOS CARBONO

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

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

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

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

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

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

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

2.1.4. MATERIAIS ALTERNATIVOS

Atualmente nota-se no mercado marítimo uma tendência no uso de materiais compósitos em substituição aos metais na utilização como insumo de fabricação de estruturas náuticas. Propriedades mecânicas, anisotropia e o custo do ciclo de vida de estruturas feitas em material compósito tornam a utilização deste material como uma alternativa dos materiais mais utilizados na indústria náutica (Fontoura, 2009). Exemplos de hélices fabricados em materiais compósitos são vistos na Fig. (6).

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

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

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

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

2.1.5. FALHAS POR DESGASTE EM HÉLICES DE VEÍCULOS NÁUTICOS

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

Baptista (2013) diz que devido a aceleração do fluido pelo movimento da pá do hélice, a pressão pode diminuir até o ponto de ser menor que a pressão mínima na qual ocorre a vaporização do fluido, isto gerará uma vaporização local do fluido dando origem a bolhas de vapor. Estas bolhas de vapor podem se deslocar para regiões onde a pressão cresça novamente a um valor superior ao da pressão mínima, causando assim a implosão das bolhas.

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

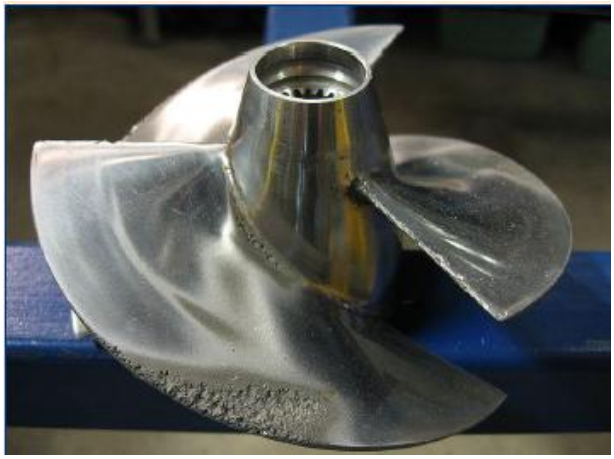

Figura 7 - Consequências da cavitação (Baptista, 2013)

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

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

2.2. MECANISMO DE DESGASTE DE MATERIAIS

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

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

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

Segundo Cueva (2002) no mecanismo de desgaste superficial ocorre fadiga mecânica (processo de criação e propagação de trincas) devido a existência de tensões cíclicas, resultando em fraturas frágeis rompendo o material.

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

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

2.2.1. DESGASTE OXIDATIVO

Segundo Cueva (2002) a área de contato real entre as superfícies é pequena (asperezas), o que ocasiona elevadas pressões que podem provocar o surgimento de trincas

nessas ilhas de óxido gerando partículas não metálicas (debris) devido ao desgaste, se o sistema estiver inserido em um ambiente contendo oxigênio, estas partículas serão constituídas de variados óxidos que variam conforme a temperatura do sistema. Em temperaturas baixas só ocorrerá oxidação nas regiões de contato real, no entanto, em elevadas temperaturas a oxidação pode acontecer em toda superfície.

O mecanismo pelo qual as partículas de óxido se tornam partículas de desgaste pode ser explicado por uma teoria: as regiões de contato real entre as superfícies são as asperezas das superfícies, no contato algumas pontas das asperezas contem óxidos e são quebradas, a nova região será oxidada devido a temperatura e novamente irá se quebrar em um posterior contato, esse processo é conhecido como oxidação-raspagem-reoxidação. As partículas quebradas se concentram podendo gerar partículas grandes que podem provocar abrasão das superfícies antes de serem removidas. O mecanismo de desgaste oxidativo pode ser observado esquematicamente na Fig. (8).

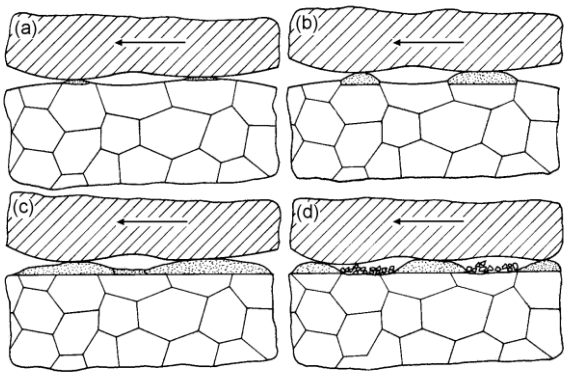

Figura 8 - a) contato entre as asperezas, b) formação de ilhas de óxido, c) crescimento das ilhas de óxido, d) quebra das pontas oxidadas, formação de novas áreas oxidadas e aglomeração de partículas (Zum Gahr, 1987).

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

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

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

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

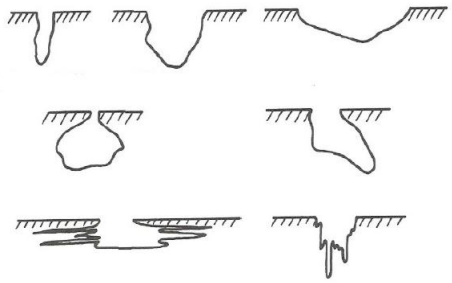

Figura 9 - Geometria de diferentes pites (ASTM – G 48)

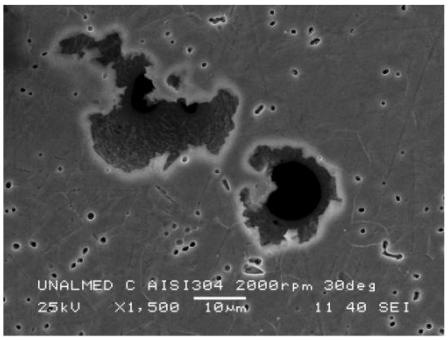

Figura 10 - Pites na superfície de aço AISI 304 (Ochoa, 2007)

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

2.2.2. DESGASTE POR FADIGA SUPERFICIAL

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

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

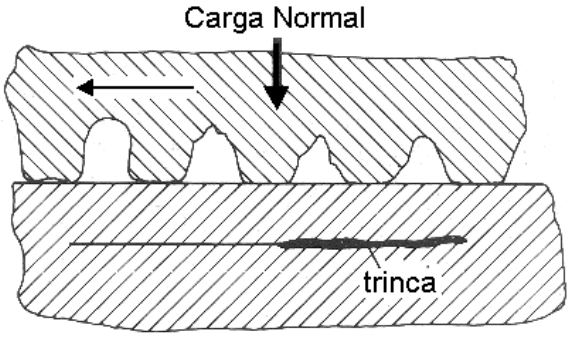

Figura 11 - Fadiga sub-superficial propagando-se paralela à superfície (Gahr., 1987)

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

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

2.2.3. DESGASTE ABRASIVO

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

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

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

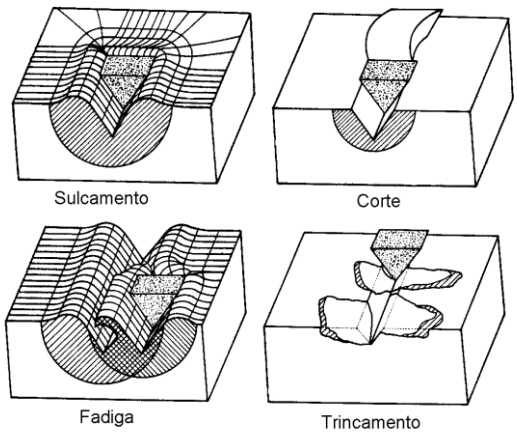

Figura 12 - Mecanismos do desgaste abrasivo (Gahr, 1987)

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

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

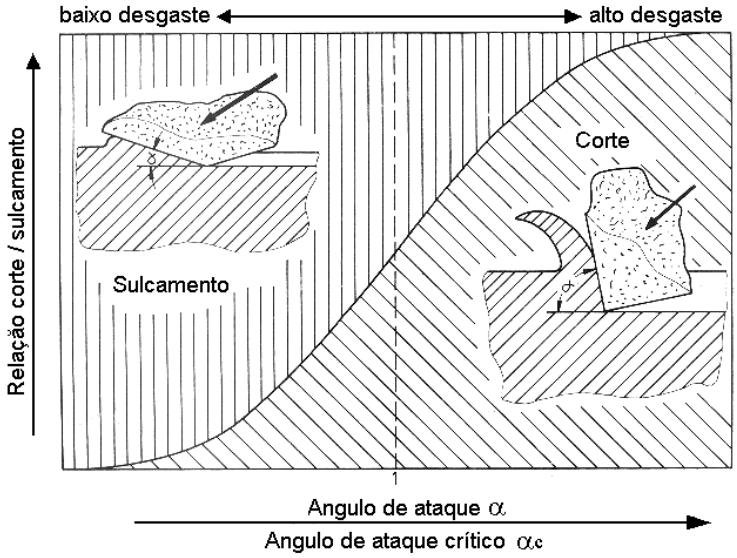

Figura 13 - Relação entre ângulo de ataque nos mecanismos de corte e sulcamento com a taxa de desgaste (Gahr, 1987)

2.2.4. DESGASTE EROSIVO

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

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

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

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

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

2.2.4.1. INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA PARTÍCULA ABRASIVA

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

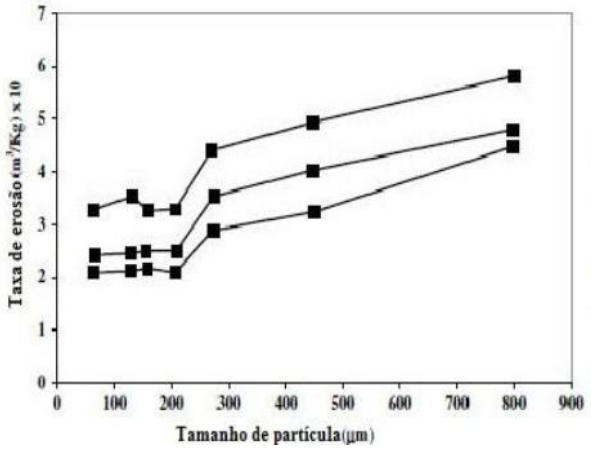

Figura 15 - Influencia do tamanho da partícula (Tabakoff, et al., 1983)

Zhou (1989) investigou a taxa de desgaste do aço inox 304 submetido a desgaste erosivo-corrosivo com partícula abrasiva de SiC, a temperatura de trabalho do teste foi de

650°C, ângulo de impacto de 30° e velocidade da partícula abrasiva de 65 m/s, os resultados são mostrados na Fig. (16).

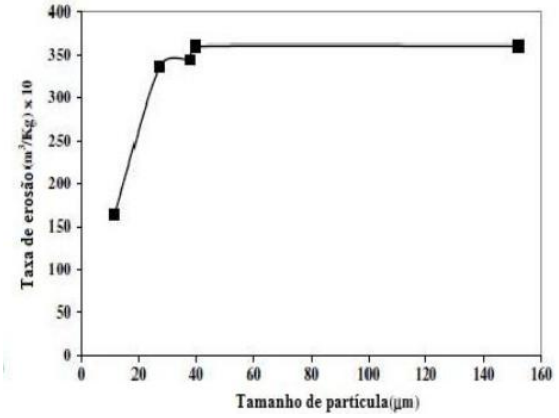

Figura 16 - Efeito do tamanho da partícula no desgaste erosivo do aço inox a 650°C (J.Zhou, et al., 1989)

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

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

2.2.4.2. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE IMPACTO DA PARTÍCULA ABRASIVA

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

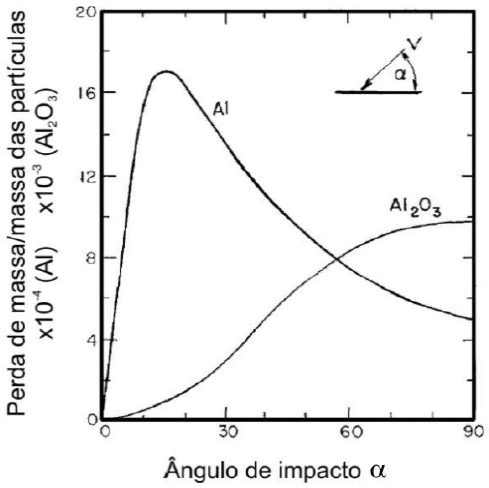

Figura 17 - Influencia do ângulo de impacto na taxa de erosão (Finnie, 1995)

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

2.2.4.3. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE IMPACTO DA PARTÍCULA ABRASIVA

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

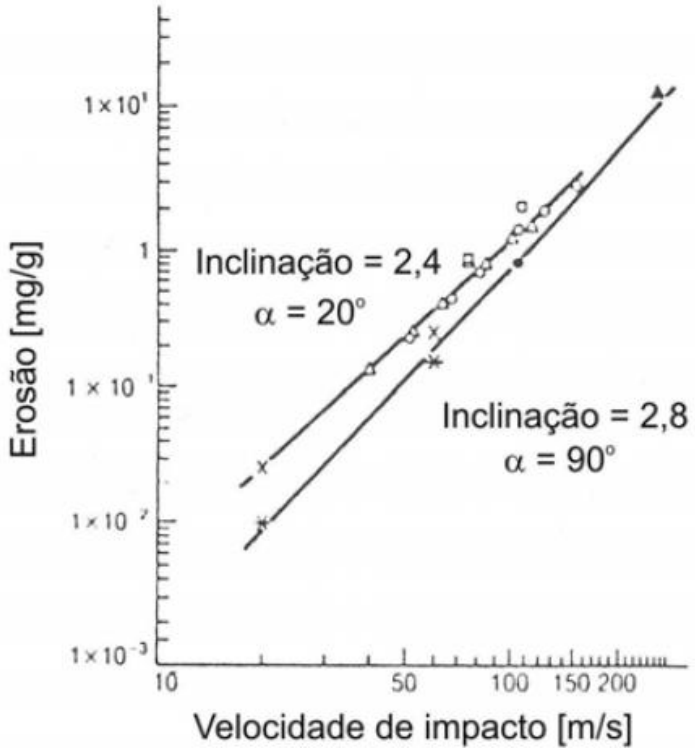

Figura 18 - Taxa de erosão em função da velocidade de impacto (Hutchings 1992)

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

mostrando que a para este caso a combinação entre ângulo reto e aumento da velocidade causará mais danos as amostras.

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

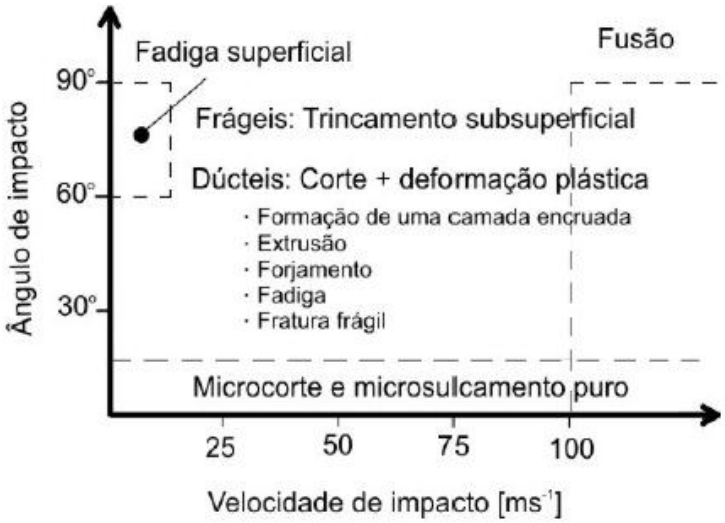

Figura 19 - Influência da velocidade e do ângulo nos mecanismos de desgaste (Ochoa, 2007)

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

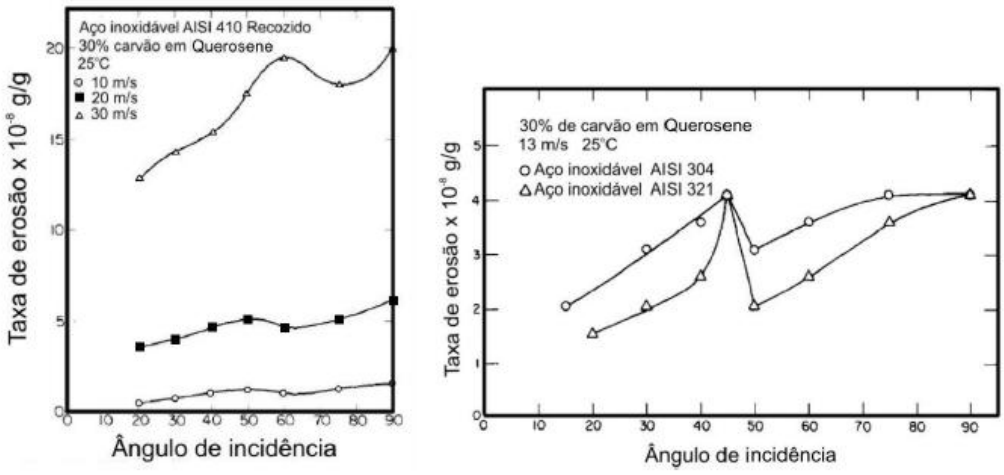

Figura 20 - Efeito da velocidade e ângulo de impacto na taxa de erosão de um aço inoxidável martensítico e um austenítico em um meio aquoso, respectivamente (Ochoa, 2007)

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

2.2.4.4. INFLUÊNCIA DA DUREZA DA PARTÍCULA ABRASIVA E DO MATERIAL DESGASTADO

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

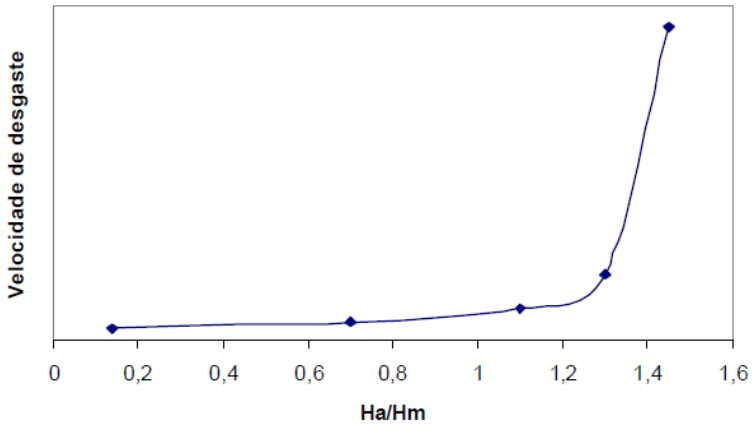

Figura 21 - Velocidade de desgaste em função da dureza dos elementos (partícula abrasiva e superfície desgastada) (Wainer, et al., 1992)

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

2.2.5. RECOBRIMENTOS RESISTENTES AO DESGASTE ABRASIVO-EROSIVO

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

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

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

A resistência ao desgaste para os dois abrasivos também aumentou consideravelmente com fração volumétrica de carbonetos nas ligas hipoeutéticas, já em composições hipereutética a resistência ao desgaste diminuiu em situações na qual se utilizava areia como abrasivo, Ribeiro (2004) diz que isso ocorreu devido o trincamento dos carbonetos.

Ribeiro (2004) conclui que com o aumento das frações volumétricas de carbonetos M_7C_3 em ligas hipoeutéticas devido a adição de Cr e C aumenta-se a resistência ao desgaste abrasivo.

2.3. ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO – ABRASIVO

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

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

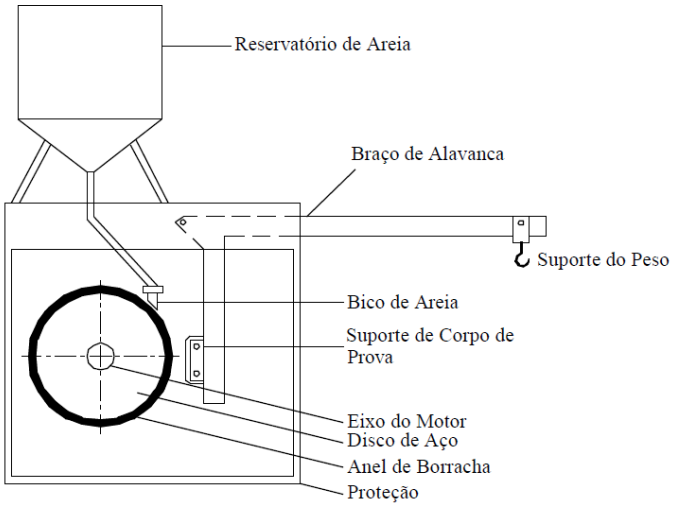

Figura 22 - Esquemático do equipamento utilizado pela norma ASTM G 65-91 (ASTM, 1991)

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

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

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

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

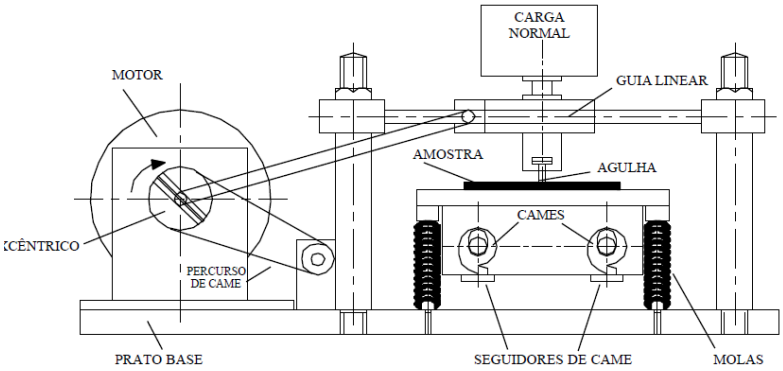

Figura 23 - Equipamento de ensaio de desgaste por impacto e abrasão (Kennedy, et al., 1996)

Oliveira (2015) estudou o desgaste erosivo sofrido por um aço inoxidável de um hélice de moto aquática, tipo Jet Ski, para tanto construiu um equipamento para realização do seu estudo. O equipamento é constituído por um motor de 3440 RPM e um suporte no qual as amostras de hélices eram fixadas, como é mostrado na Fig. (24).

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

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

2.4. OBJETIVOS

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

Objetivos específicos:

- Adaptar uma bancada de ensaios de desgaste erosivo-abrasivo construída por Cueva (2015), na Universidade de Brasília, para realizar ensaios de desgaste, em condições diferentes as utilizadas pelo pesquisador.
- Verificar o correto funcionamento da máquina por meio de ensaios de desgaste preliminares (5 horas de duração com paradas de 30 minutos) realizados em amostras de aço de baixo carbono e aço inoxidável em solução aquosa contendo areia.
- Realização de novos ensaios de desgaste em solução aquosa com sal e areia, com amostras de aço de baixo carbono e aço inoxidável com duração de 5 horas e paradas a cada 1 hora.
- Realização de uma análise comparativa dos resultados para definição de qual material obteve melhor comportamento para os ensaios.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS

Para realização do estudo, amostras de dois metais foram necessárias. O primeiro material trata-se de um aço estrutural proveniente de uma barra chata doada por uma loja de ferragens.

O segundo material trata-se também de uma barra chata de aço inoxidável proveniente de uma loja especializada em peças deste tipo.

3.1.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília visto na Fig. (25) foi utilizado para análise dos componentes químicos que constituem as amostras por meio de EDS (energy dispersive x-ray detector).

As amostras foram lixadas e polidas e analisadas via MEV por EDS, no qual um feixe de elétrons incide sobre um ponto do material, há uma excitação dos elétrons mais externos dos átomos e dos íons que o constituem, mudando assim de níveis energéticos, ao retornarem para a posição inicial liberam energia que é medida através de um detector instalado no MEV, sendo assim possível determinar quais elementos químicos estão presentes no ponto estudado.

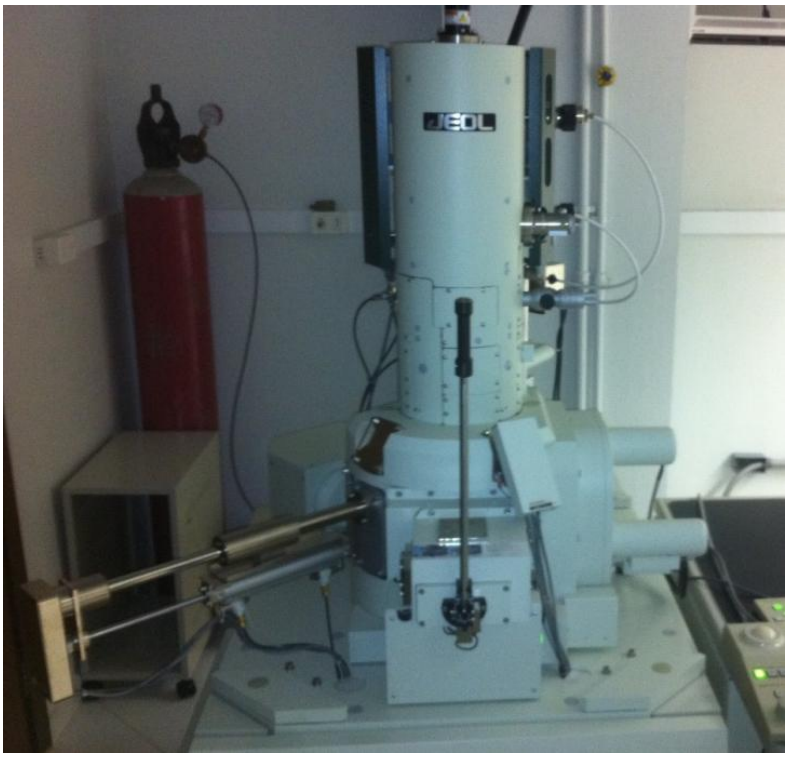

Figura 25 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

3.1.2. ANÁLISE METALOGRÁFICA

Partes de material foram retiradas das amostras e embutidas a frio para análises metalográficas. As superfícies dessas partes foram lixadas com lixas d´água até 1200 mesh utilizando-se água como lubrificante, logo em seguida os pedaços foram polidos com alumina.

Um ataque químico com Nital 3% durante 2 minutos foi usado para analisar as amostras de aço de baixo carbono. Para as amostras de aço inoxidável realizou-se um ataque químico eletrolítico com ácido oxálico 10% durante 2 minutos com 10 volts de tensão para revelar seus microconstituintes, assim como fez Sabará (2013).

O microscópio óptico (marca Pantec) da Faculdade do Gama da Universidade de Brasília visto na Fig. (26) foi utilizado para capturar imagens da microestrutura.

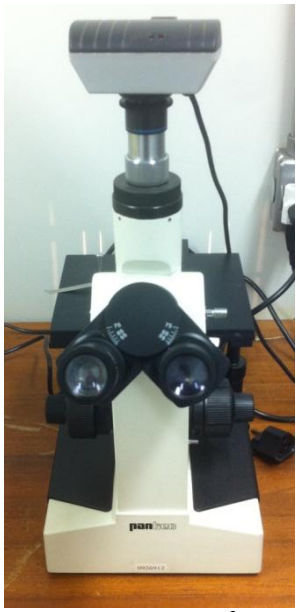

Figura 26 - Microscópio Óptico Pantec

3.1.3. DUREZA

A dureza dos materiais das amostras foi determinada por meio de medidas de dureza Rockwell B (HRB) com carga de 100 kgf. Cinco medições foram feitas em diferentes partes das peças, para assim ser feito uma média da dureza dos materiais.

O durômetro pertencente à Faculdade do Gama da Universidade de Brasília utilizado é visto na Fig. (27).

Figura 27 - Durômetro Durotwin -D Plus

3.2. ENSAIO DE DESGASTE EROSIVO ABRASIVO

3.2.1. EQUIPAMENTO

O equipamento foi desenvolvido por Cueva et. al. (2015), o intuito da máquina é estudar o comportamento de materiais utilizados na fabricação de hélices de embarcações náuticas quando submetidas ao desgaste erosivo-abrasivo. Para a realização deste estudo, modificações estruturais na máquina foram feitas. A máquina pode ser vista na Fig. (28).

Figura 28 – Estrutura inicial e estrutura com modificações, respectivamente

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

Na polia de menor diâmetro é acoplado um eixo, no qual foi fixado um disco porta-amostras, como pode ser visto na Fig. (29).

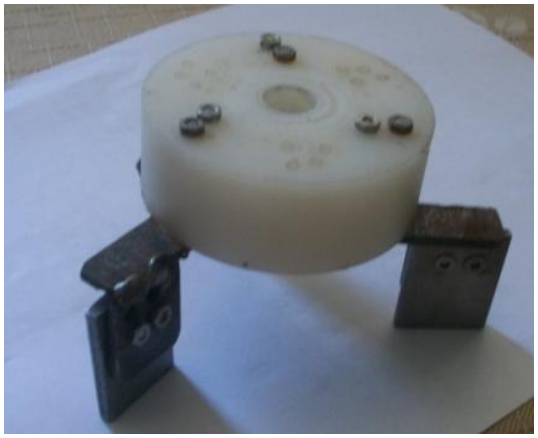

Figura 29 - Disco porta-amostras

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

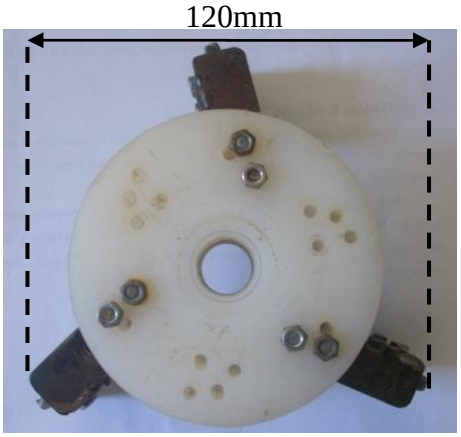

Figura 30 - Amostras posicionadas em um ângulo 60 graus

O galão de água no qual a solução abrasiva foi mantida pode ser vista na Fig. (31). O galão possui diâmetro interno de 267 mm e encontra-se concêntrico ao eixo no qual o suporte com as amostras está fixado.

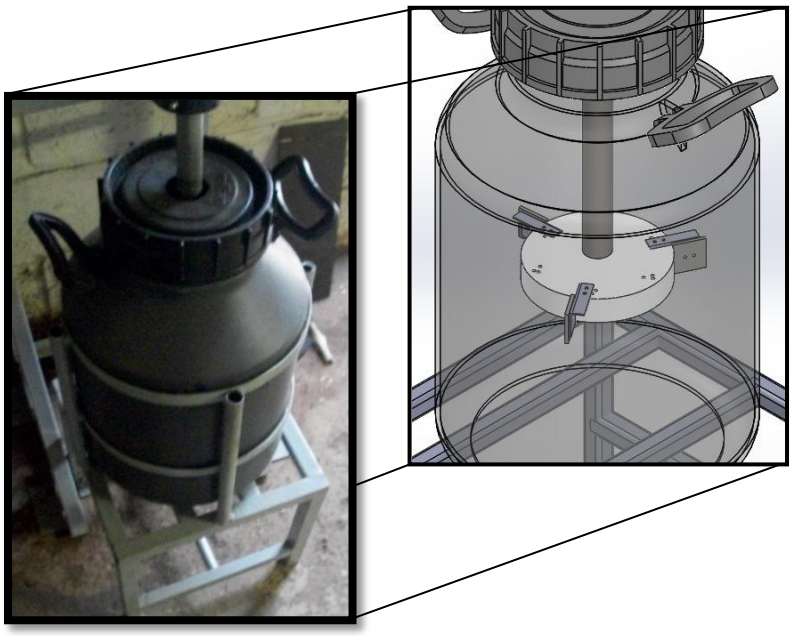

Figura 31 – Sistema no qual as amostras são inseridas

3.2.2. CORPOS DE PROVA

3.2.2.1. AÇO DE BAIXO CARBONO

As amostras utilizadas nos ensaios foram de aço de baixo carbono, com dimensões de 35 x 25 x 4 mm.

As amostras possuem estas dimensões, pois são próximas das utilizadas por Oliveira (2015) e Cueva (2015) em seus trabalhos com aço inoxidável extraídas de um hélice de Jet ski. As amostras são vistas na Fig. (32).

Figura 32 - Amostras de aço de baixo carbono

3.2.2.2. AÇO INOXIDÁVEL

Para a realização dos ensaios, amostras de aço inoxidável com as mesmas dimensões das amostras anteriores foram utilizadas. As amostras de aço inoxidável são vistas na Fig. (33).

Figura 33 - Amostras de aço inoxidável

Para a realização dos ensaios as superfícies das amostras passaram por lixamento com lixas d'água até lixa 1200 mesh. Este processo foi realizado entre um experimento e outro para que a superfície não influenciasse no próximo experimento, as amostras polidas são vistas na Fig. (34).

Figura 34 - Amostras dos dois materiais polidas

3.2.3. MISTURA EROSIVA

As amostras fixadas ao suporte foram ensaiadas em duas situações distintas. O primeiro cenário utilizado para atestar o correto funcionamento da máquina possuía solução aquosa de quinze litros de água com duzentos gramas de areia. Com o intuito de realizar ensaios de desgaste acelerados, foi escolhida uma concentração de 13,3 g de areia para cada litro de água, por tratar-se de uma concentração 250 vezes maior a de 0,05 g/L normalmente encontrada em rios navegáveis do Brasil (Oliveira, 2015).

A segunda rotina de ensaios utilizou uma solução aquosa novamente com quinze litros de água e duzentos gramas de areia, no entanto, foram acrescentados trezentos gramas de sal, de tal forma que a concentração de matéria na solução fosse de 33,3 g/L, que segundo Godoi (1998) está dentro da faixa de salinidade (quantidade de matéria dissolvida para cada quilograma de água) de águas superficiais de regiões oceânicas, que compreende desde 33 a 37 g/L.

A utilização do sal justifica-se pelo fato do equipamento náutico que é objeto de estudo deste trabalho (hélice de rotor) ser utilizado em condições na qual ele é inserido dentro de ambientes que possuem sal, como o ambiente marítimo.

Duas peneiras industriais foram utilizadas para atingir uma granulometria entre 710µm e 1 mm nas partículas de areia. Na Figura (35) é visto a peneira de 710µm.

Figura 35 - Peneira industrial Bertel

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

3.2.4. PERDA DE MASSA

Para a medição da massa das amostras, da areia e do sal utilizados nos ensaios foi utilizada a balança semi-analítica OHAUS, que possui precisão de quatro casas decimais. A balança pertencente a Universidade de Brasília é vista na Fig. (36).

Figura 36 - Balança Semi-Analítica OHAUS

3.2.5. CONDIÇÕES E TEMPO DE ENSAIO

A metodologia dos ensaios foi dividida em etapas, as três primeiras são comuns a todos os ensaios:

Etapa 1: Lixar as amostras com lixa até 1200.

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

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

As demais etapas são distintas para cada ensaio.

Ensaio 1 - Aço de baixo carbono – Água + Areia

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

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

Etapa 6: Repetir todas as etapas anteriores para outro ângulo de impacto.

Ensaio 2 – Aço de baixo carbono – Água com sal + Areia

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

Etapa 5: Após 1 hora, retirar as amostras, limpá-las com água, secar para pesá-las e anotar o valor da massa da amostra. Esta etapa é repetida cinco vezes, totalizando cinco horas de teste para cada ângulo.

Etapa 6: Repetir todas as etapas anteriores para outro ângulo de impacto.

Ensaio 3 - Aço inoxidável – Água + Areia

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

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

Etapa 6: Repetir todas as etapas anteriores para outro ângulo de impacto.

Ensaio 4 – Aço inoxidável – Água com sal + Areia

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

Etapa 5: Após 1 hora, retirar as amostras, limpá-las com água, secar para pesá-las e anotar o valor da massa da amostra. Esta etapa é repetida cinco vezes, totalizando cinco horas de teste para cada ângulo.

Etapa 6: Repetir todas as etapas anteriores para outro ângulo de impacto.

Em todos os ensaios as soluções aquosas foram trocadas a cada 2 horas de ensaio e para cada ângulo foi coletado os dados (massas das amostras), para ser feito o cálculo da taxa de desgaste, perda de massa da amostra por área desgastada para cada amostra.

Nas Tabelas (2) e (3) é possível ver resumidamente o esquemático dos ensaios realizados.

Tabela 2 - Esquemático do ensaio 1 e 3 de desgaste abrasivo-erosivo

Amostras		Solução aquosa contendo	Ângulo de impacto				
Aço de baixo carbono	Aço inoxidável	Areia (13,3 g/L)	0°	30°	45°	60°	90°
X	X	X	x				
X	X	X		x			
X	X	X			x		
X	X	X				x	
X	X	X					x

Tabela 3 - Esquemático do ensaio 2 e 4 de desgaste abrasivo-erosivo

Amostras		Solução aquosa contendo	Ângulo de impacto				
Aço de baixo carbono	Aço inoxidável	Areia + Sal - (33g/L)	0°	30°	45°	60°	90°
X	X	X	x				
X	X	X		x			
X	X	X			x		
X	X	X				x	
X	X	X					x

3.2.6. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE

As superfícies das amostras desgastadas foram analisadas por meio de fotografias obtidas pelo MEV. As fotografias para os ensaios 1 e 3 foram obtidas após as cinco horas de ensaio, já para os ensaios 2 e 4 foram obtidas fotografias das superfícies a cada parada de uma hora para cada ângulo estudado.

O objetivo das imagens é verificar o dano superficial das amostras em relação ao tempo de ensaio e ao ângulo de impacto das partículas abrasivas.

Esquematicamente a estrutura da metodologia do trabalho é vista na Fig. (37), ela foi dividida primeiramente nos dois materiais estudados e posteriormente em cada análise e método utilizado para cada material durante a confecção do trabalho.

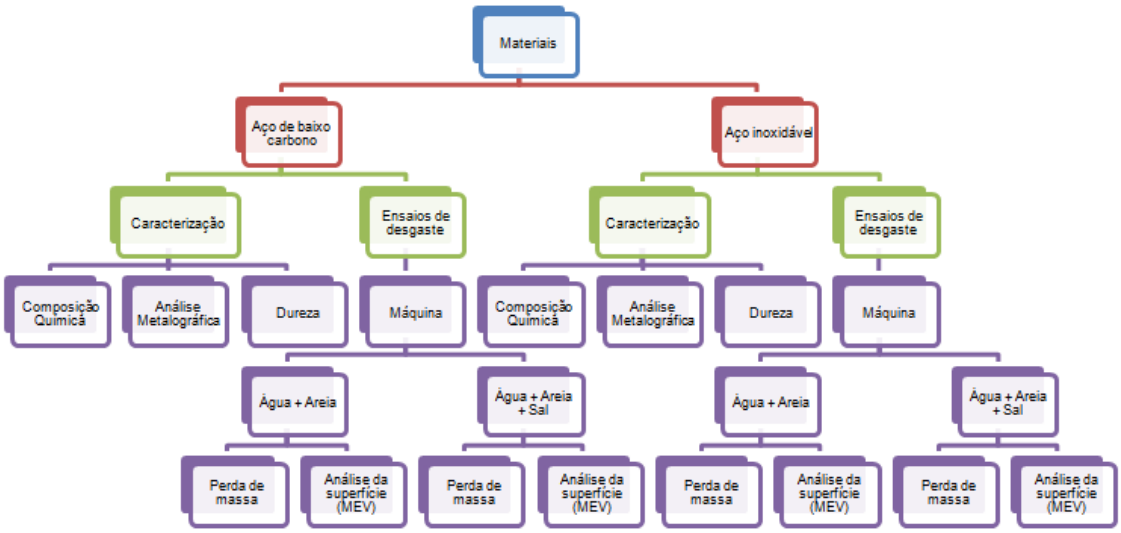

Figura 37 - Estrutura da metodologia

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS

4.1.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Com uma análise da Tab. (4) que contêm os componentes químicos obtidos das amostras de aço de baixo carbono, nota-se que ele possui semelhança ao aço CA24 utilizado por Carvalho (2014), cuja composição química é vista na Tab. (5), este material possui boa ductilidade como uma de suas principais características.

Tabela 4 - Composição química das amostras de aço de baixo carbono (%massa)

Fe	C	Si	Mn	P	S
99,2±0,01	0,16±0,01	0,14±0,01	0,43±0,02	0,005±0,007	0,01±0,01

Tabela 5 - Composição química do aço dúctil CA24 (%massa)

Fe	C	Si	Mn	P	S
99,4	0,17	0,15	0,44	0,01	0

Os elementos químicos constituintes do aço inoxidável são vistos na Tab. (6), eles encontram-se dentro dos intervalos de proporção vistos na Tab. (7), que segundo Tebecherani (2003) caracteriza o aço inoxidável austenítico 302, que é um material dúctil.

Tabela 6 - Composição química das amostras de aço inoxidável (%massa)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,14±0,01	0,51±0,02	1,86±0,02	0,03±0,007	0,02±0,01	18,75±0,27	9,18±0,06

Tabela 7 - Composição química máxima do aço inoxidável 302 (%massa)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,15	1	2	0,045	0,03	17-19	8 -10

4.1.2. ANÁLISE METALOGRÁFICA

A Figura (38) é mostrada a esquerda a microestrutura obtida do aço de baixo carbono estudado e a direita de um aço estrutural dúctil obtida por Carvalho (2014). Nas imagens é possível ver as fases ferrita – grãos brancos com contornos pretos - e perlita presentes no material, a perlita se encontra em geral nos contornos da ferrita.

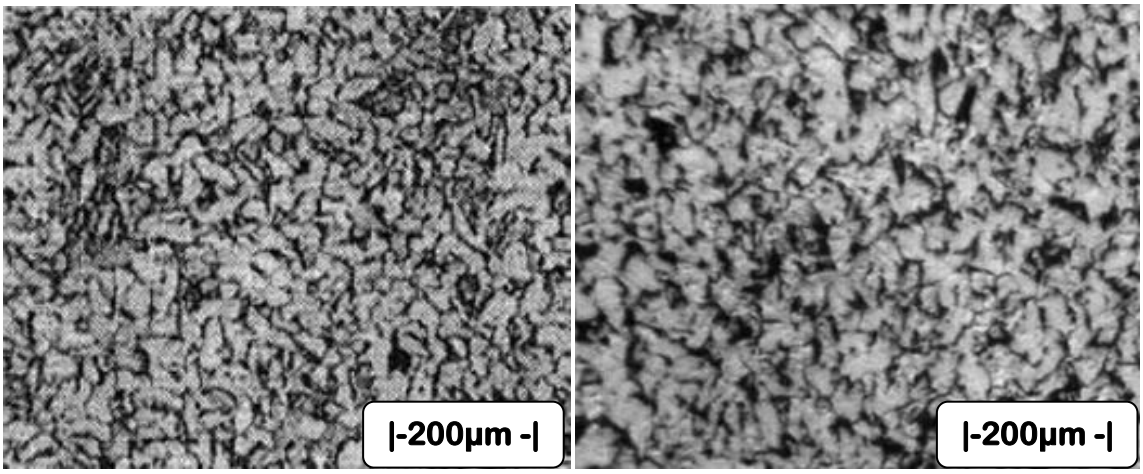

Figura 38 – Comparativo da microestrutura do aço estudado (esquerda) com a do aço estudado por Carvalho (direita), com modificações, imagens obtidas por microscopia óptica após ataque com ácido Nital 3% durante 2 minutos

A Figura (39) possui a esquerda a imagem obtida após a análise metalográfica da amostra de aço inoxidável estudada e à direita a retirada por Fonseca (2004) de um aço inoxidável austenítico, verifica-se a presença de grãos com contornos bem delineados que segundo Sabará (2013) é uma das principais características do aço inoxidável austenítico, assim como a elevada resistência à corrosão e elevada resistência ao impacto.

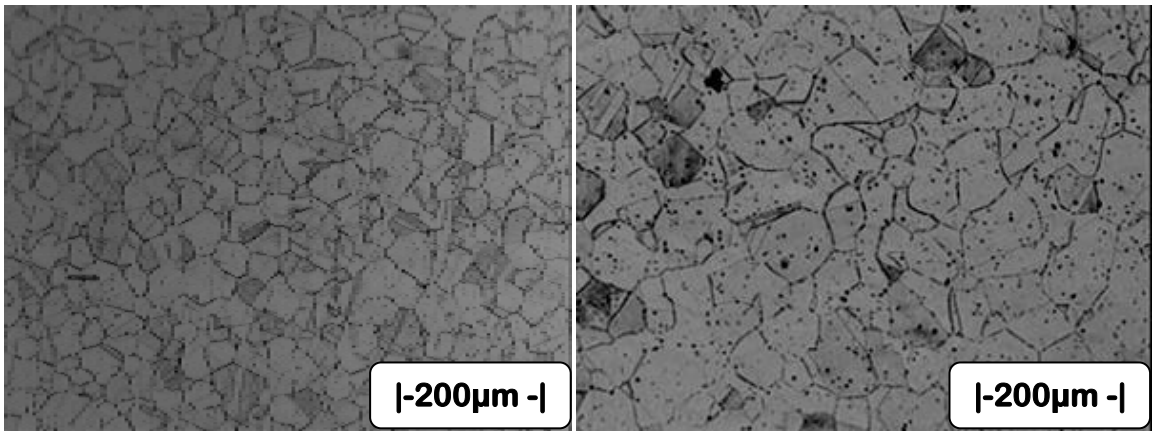

Figura 39 – Comparativo da microestrutura do aço inoxidável estudado (esquerda) com a de um aço inoxidável austenítico (direita), com modificações, imagens obtidas por microscopia óptica após ataque eletrolítico com ácido oxálico 10% por dois minutos

4.1.3. DUREZA

Ensaios de dureza foram realizados com a finalidade de verificar as propriedades mecânicas dos aços, para assim serem comparados com literaturas existentes a fim de melhor caracterizar os aços. Os resultados dos ensaios de dureza realizados nos materiais estudados e da literatura científica são vistos na Tab. (8).

Segundo Carvalho (2014), a dureza que o aço CA24 deve possuir é de 76 HRB, ou seja, este dado é mais uma ferramenta que possibilita inferir que o material estudado trata-se possivelmente do aço CA24 que possui como uma das suas principais características a boa ductilidade.

Segundo Teberachi (2003) a dureza do aço inoxidável 302 é de 85 HRB, comparando a dureza encontrada com o da referência possivelmente trata-se do aço 302, que possui dentre suas principais características a ótima ductilidade.

Tabela 8 - Dureza das amostras

Material	**Dureza (HRB)**	
	Ensaio	**Referência**
Aço de baixo carbono	75 ± 1	76
Aço Inoxidável	85 ± 2	85

As informações vistas na Tab. (8) também são vistas na Fig. (40), na qual é possível visualizar a dureza HRB das amostras e de suas respectivas referências.

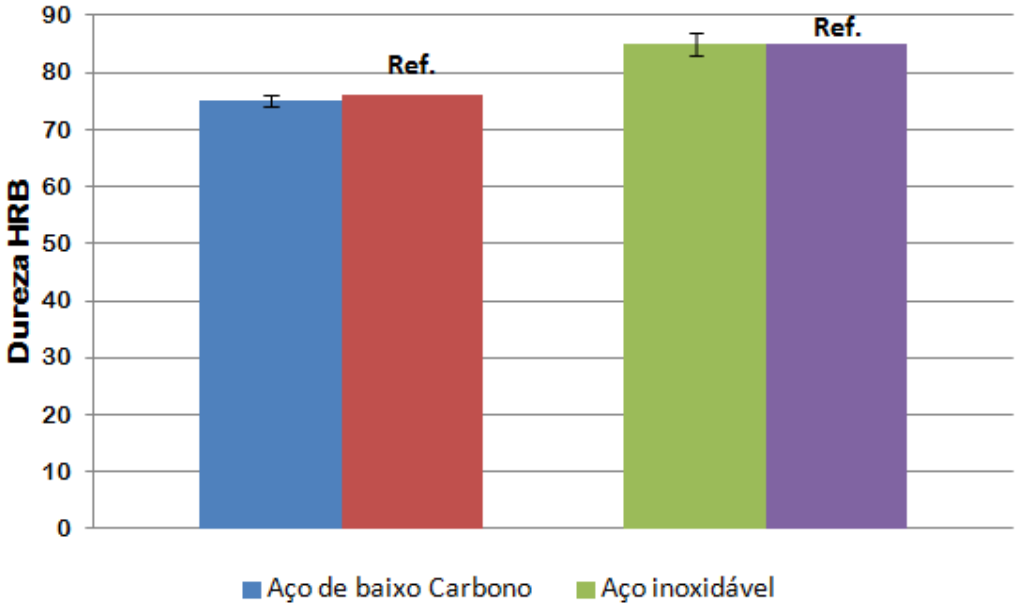

Figura 40 - Dureza das amostras estudadas e de suas respectivas referências

4.2. ENSAIOS DE DESGASTE

4.2.1. ENSAIO 1 – AÇO DE BAIXO CARBONO – ÁGUA + AREIA

4.2.1.1. PERDA DE MASSA

A taxa de desgaste acumulada média do ensaio 1 para amostras de aço de baixo carbono é vista na Fig. (41). No gráfico nota-se que a maior taxa de desgaste até duas horas de ensaio ocorreu com as amostras ensaiadas com ângulo de 90º seguido dos ângulos de 45º e 30º. Verifica-se também, que os desgaste das amostras ensaiadas a 0 e 60º são praticamente iguais entre si até o tempo de duas horas.

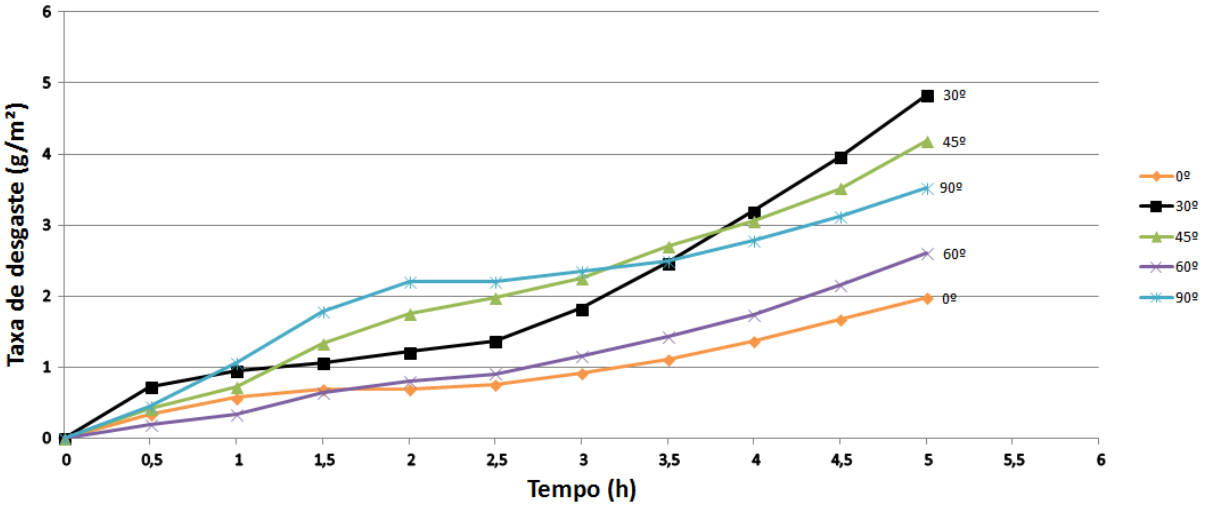

Figura 41 - Taxa de desgaste de amostras de aço de baixo carbono em função do tempo para diversos ângulos, ensaiadas com água e areia

A posição dos segmentos de retas até duas horas contrariam outros resultados encontrados na literatura cientifica (Finnie, 1995), segundo Oliveira (2015) a taxa de desgaste em materiais dúcteis é maior para ângulos mais agudos, pois o mecanismo de corte é mais atuante do que a deformação plástica que ocasionará perda de material por fadiga superficial.

Com o decorrer do ensaio a taxa de desgaste torna-se maior para superfícies que foram desgastadas por partículas abrasivas que a atingiram em ângulos mais agudo (30º e 45º) e menor para ângulos próximos de 90º. Segundo Oliveira (2015) este fato justifica-se devido à imagem da Fig. (42), que é apropriada para materiais dúcteis: baixos ângulos de incidência podem acarretar maiores defeitos na superfície, o que pode acarretar uma maior retirada de material.

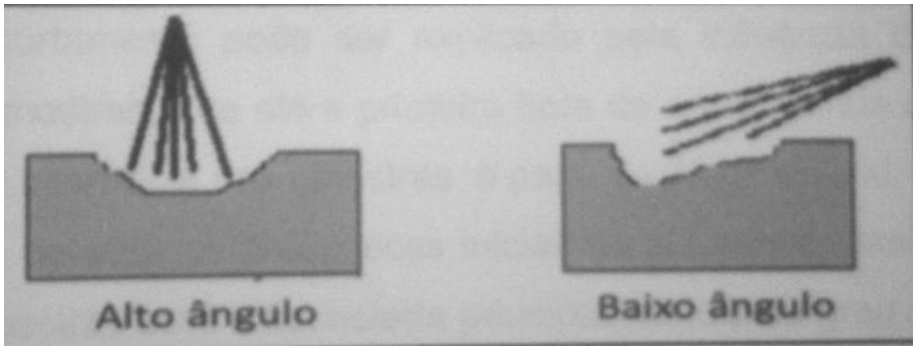

Figura 42 - Efeito do ângulo de incidência da partícula abrasiva na superfície (Oliveira, 2015)

Ao final das cinco horas do ensaio, o ângulo que mais desgastou as amostras foi o ângulo de 30º, seguido dos ângulos de 45º, 90º, 60º e 0º como pode ser visto na Fig. (43).

Comparando este resultado com o da literatura científica (Finnie, 1995) vista na Fig. (44), nota-se que o maior desgaste ao final do experimento também ocorreu para o ângulo de 30º e o menor desgaste para o ângulo de 0º, no entanto, o único resultado discrepante está relacionado ao desgaste para o ângulo de 90º que obteve maior taxa que o ângulo de 60º.

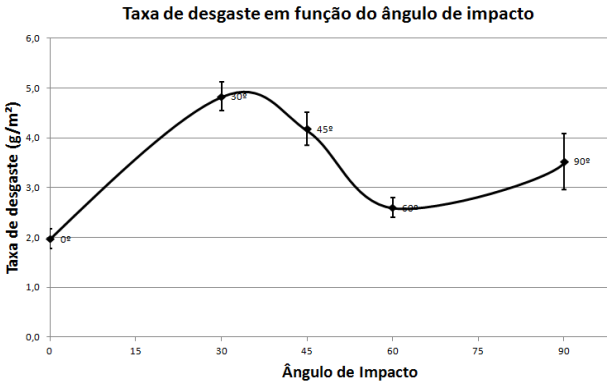

Figura 43 - Taxa de desgaste de amostras de aço de baixo carbono em função do ângulo de impacto, ensaiadas com água e areia após 5h

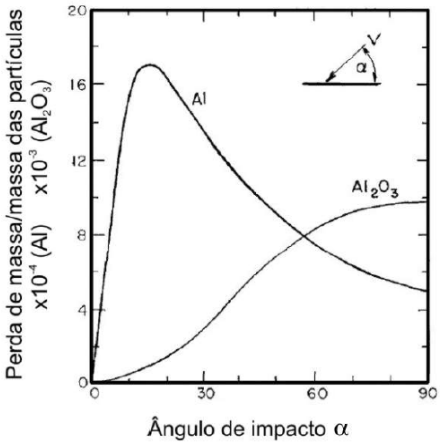

Figura 44 - Influencia do ângulo de impacto na taxa de desgaste, Finnie (1995)

Uma das possíveis causas que explicaria a posição dos segmentos de retas obtidos na Fig. (41) e (43) estaria relacionada com o sistema no qual o ensaio foi realizado: a parede interna do galão fica muito próxima das amostras, como é visto na Fig. (45). Durante a movimentação da solução aquosa, a turbulência gerada promoveria a incidência de partículas abrasivas em ângulos diferentes aos selecionados inicialmente.

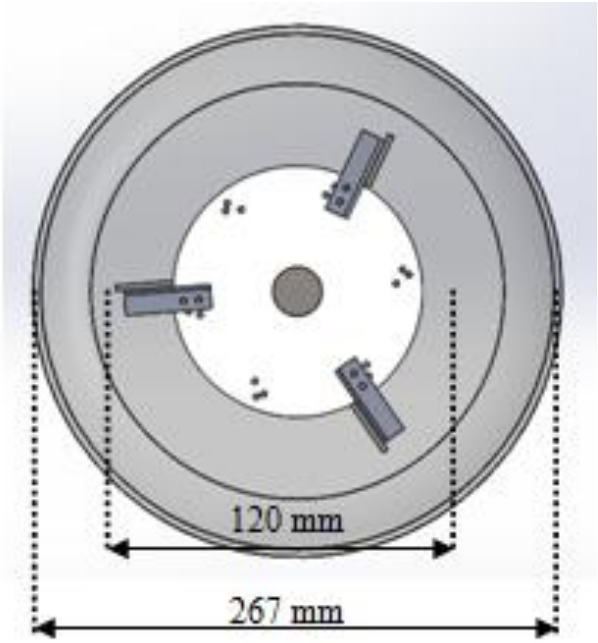

Figura 45 - Suporte com amostras dentro do galão

A dinâmica do sistema causa movimentos repetitivos das partículas abrasivas, ou seja, a partícula ao se chocar com a amostra é repelida na direção da parede interna do galão causando novamente uma repulsão.

As situações demonstradas nas Fig. (46), Fig. (47), Fig. (48), Fig. (49) e Fig. (50) nas quais a amostra é fixada em ângulos de 0°, 30°, 45°, 60° e 90° respectivamente, foram analisadas antes e depois do impacto.

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

Levando em consideração o tempo descrito anteriormente, as rotações por minuto das amostras (1221 RPM) e os ângulos de impacto da partícula, cada suporte contendo as

amostras estará aproximadamente nas posições indicadas nas Fig. (46), Fig. (47), Fig. (48), Fig. (49) e Fig. (50).

Na Fig. (46) é possível perceber, que teoricamente a partícula não atingiria a amostra, no entanto, a dinâmica do sistema (turbulência da solução, partícula ricocheteada) causa o impacto da amostra com a partícula abrasiva em algum momento, ocasionando desgaste. Mesmo com estes desgastes o ângulo de 0° continua sendo o de menor taxa de desgaste.

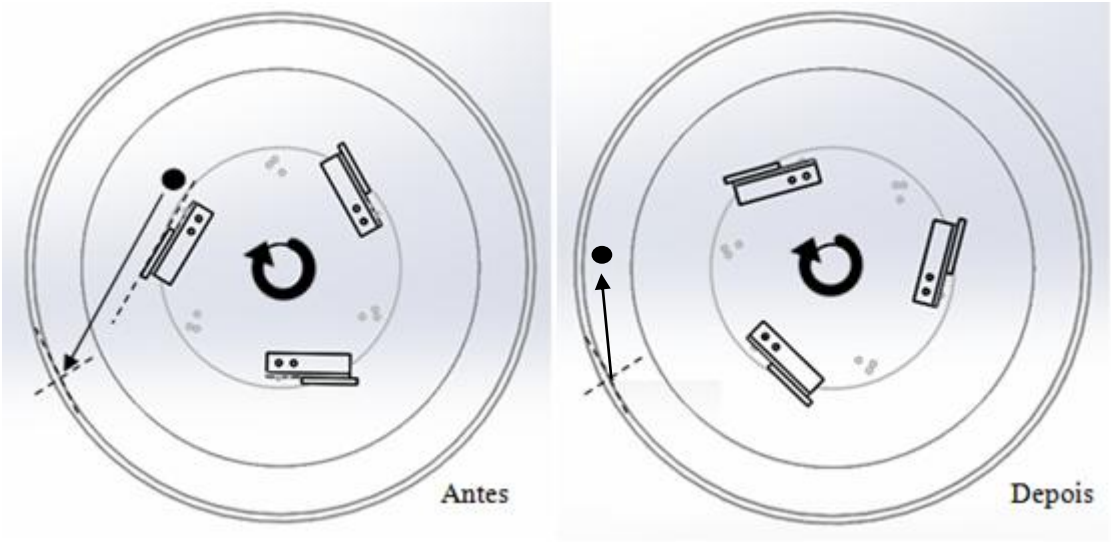

Figura 46 - Partícula abrasiva impactando amostra a 0°

Na Fig. (47) é possível perceber, que após a partícula atingir a amostra a 30º ela é repelida contra a parede interna do galão atingindo-a e sendo novamente repelida. Após esta repulsão a partícula poderá ser repelida de forma a impactar a próxima na amostra.

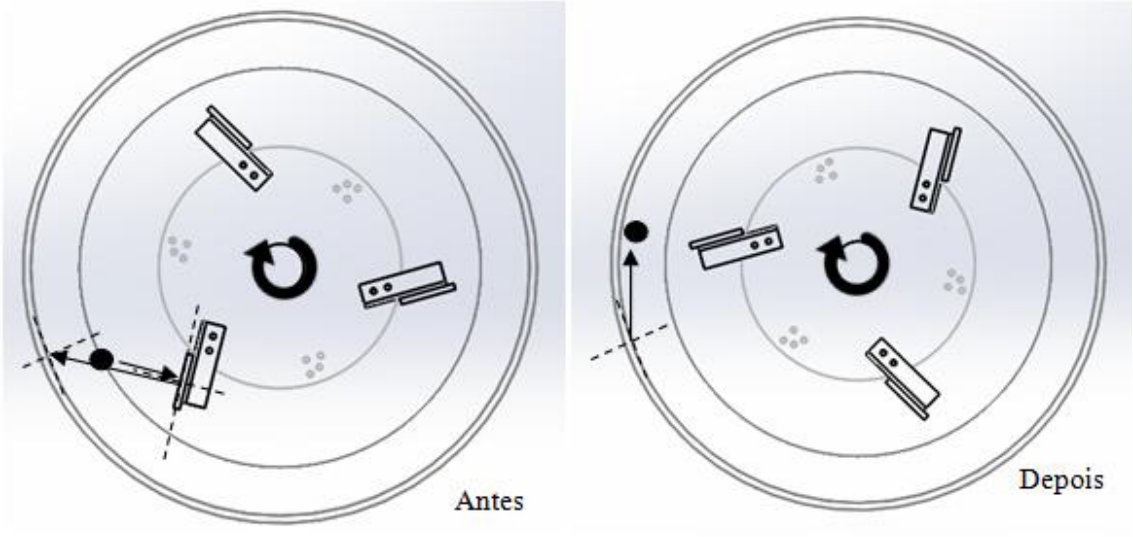

Figura 47 - Partícula impactando amostra a 30°

Na Fig. (48) é possível perceber, que a partícula ao atingir a amostra posicionada em um ângulo de 45° é repelida para a parede interna do galão, sendo novamente repelida ao impactar a parede, o que pode ocasionar que ela impacte a próxima amostra.

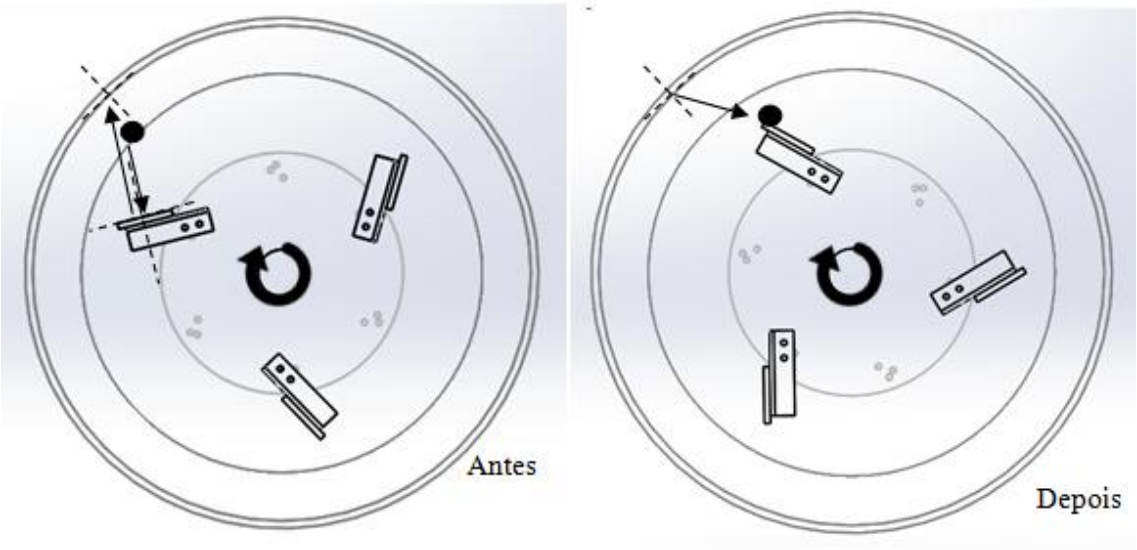

Figura 48 - Partícula abrasiva impactando amostra a 45°

Na Fig. (49) é possível perceber, que a partícula ao atingir a amostra em um ângulo de 60° é repelida para a parede interna do galão em um ângulo de 30°, sendo novamente repelida ao impactar a parede, podendo não impactar a próxima amostra.

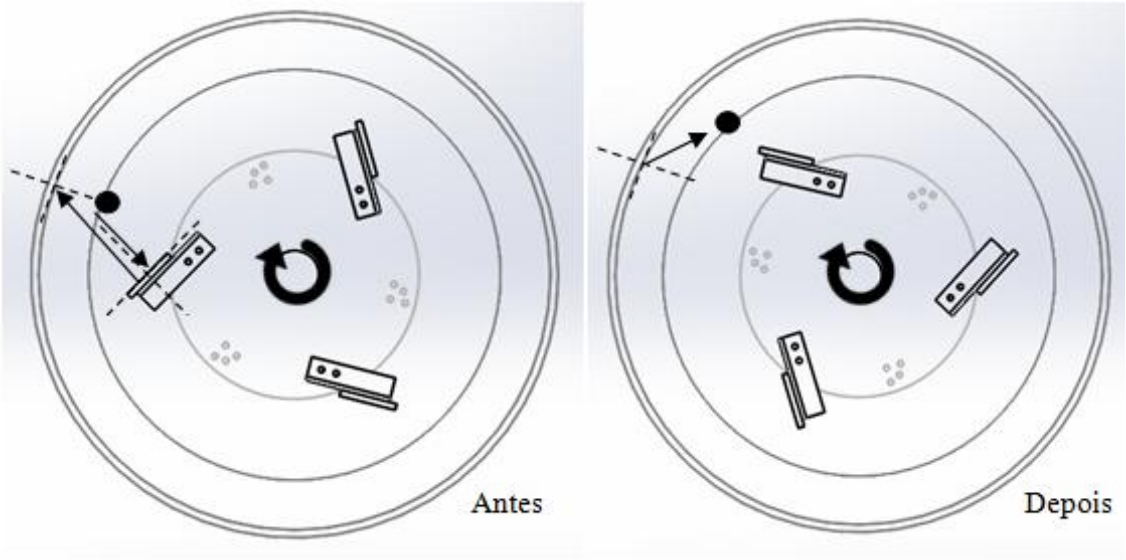

Figura 49 - Partícula impactando a amostra a 60°

Na situação vista na Fig. (50), a partícula atinge a amostra em um ângulo de 90°, sendo impulsionada contra a parede do galão em um ângulo reto, o que ocasionará outra repulsão, só que desta vez possivelmente na direção contrária a da próxima amostra.

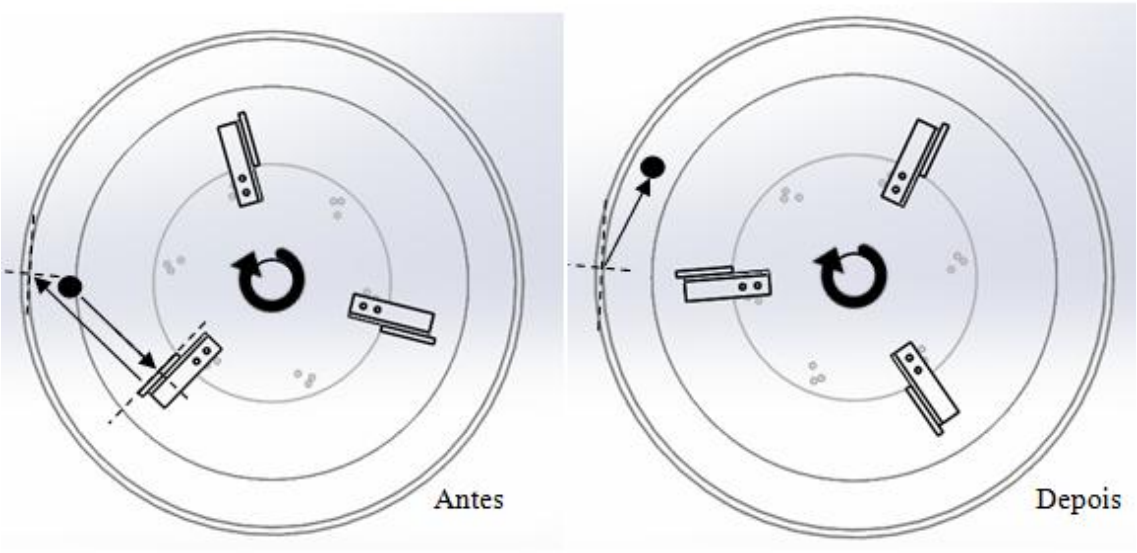

Figura 50 - Partícula abrasiva impactando amostra a 90°

As situações descritas nas figuras anteriores podem ter influenciado nos resultados, pois as partículas são repelidas podendo atingir ou não a próxima amostra, no entanto, os resultados seguem algumas tendências vistas na literatura à respeito do tema (Finnie, 1995).

4.2.1.2. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE

Ao final das cinco horas do ensaio 1, imagens das superfícies das amostras foram obtidas através do MEV, elas são vistas na Fig. (51). O objetivo das imagens é auxiliar no entendimento dos resultados da taxa de desgaste obtidos para cada ângulo, a imagens foram colocadas em ordem crescente de acordo com a taxa de desgaste, ou seja, da menor taxa de desgaste para a maior, e com a taxa de desgaste inclusa.

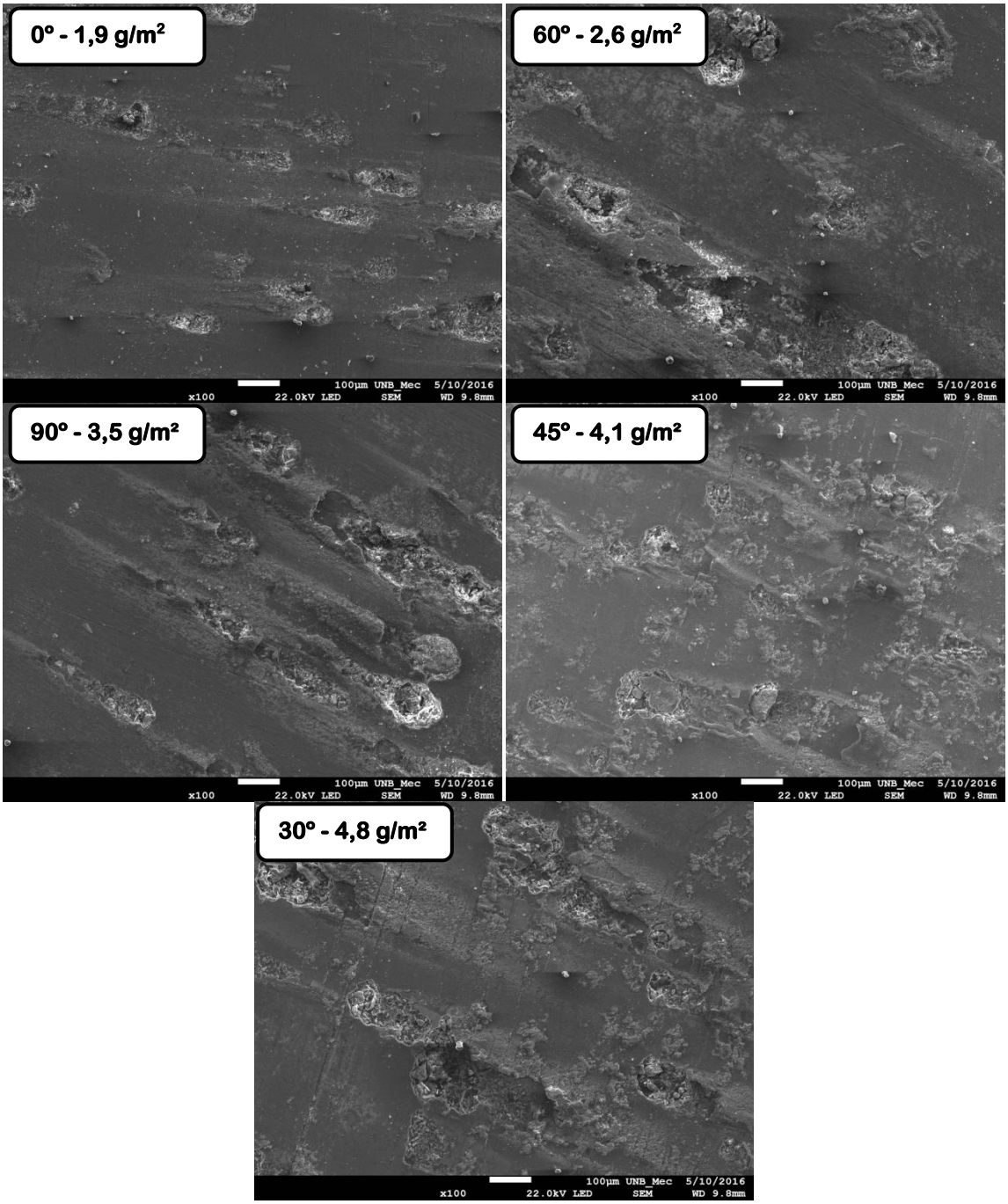

Figura 51 - Superfícies das amostras de aço de baixo carbono após 5h de ensaio com água e areia em vários ângulos

A partir da análise da imagem percebe-se que a superfície que mais possui danos (crateras) ao final do ensaio é a da amostra ensaiada a 30º, seguida das amostras ensaiadas nos ângulos de 45º, 90º, 60º e 0º, essa análise vai de encontro com os resultados obtidos para a perda de massa.

Para as amostras ensaiadas em ângulos mais agudos como o de 30º um dos possíveis mecanismos de desgaste superficial foi o sulcamento e corte, segundo Oliveira (2015) nesse

mecanismo a deformação plástica superficial está orientada no sentido da incidência das partículas erosivas, conforme pode ser vista esquematicamente na Fig. (52).

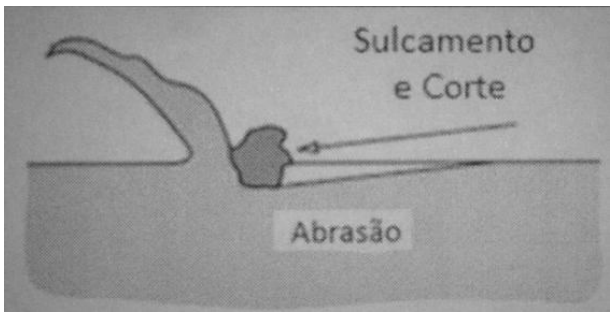

Figura 52 - Desgaste erosivo causado pela abrasão de partículas sobre a superfície em ângulos agudos (Oliveira, 2015)

No mecanismo de sulcamento e corte as partículas ao se chocarem com a superfície das amostras causam defeitos (crateras) e devido ao ângulo ser agudo há remoção de material por sulcamento e corte, este fato gera grande remoção de material.

Nas amostras ensaiadas em ângulos maiores, possivelmente o mecanismo de desgaste das superfícies foi diferente, segundo Oliveira (2015) as partículas abrasivas ao se chocarem com a superfície em ângulos maiores devem gerar crateras profundas, este fato gera a expulsão de material para a periferia da cratera (deformação plástica) que com as demais colisões subsequentes são removidas, conforme visto esquematicamente na Fig.(53).

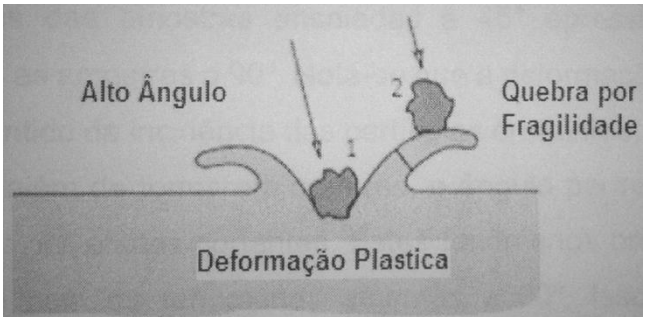

Figura 53 - Mecanismo de desgaste erosivo, na qual as partículas erosivas chocam-se em ângulo altos (Oliveira, 2015)

O ambiente estudado neste ensaio não possui a presença de cloreto de sódio em abundância, portanto pode ser considerado um ambiente não salino, consequentemente os efeitos do desgaste causado pela corrosão do material são menos perceptíveis.

Segundo Gomes (2005), em ambientes nos quais há presença do desgaste erosivo e do desgaste corrosivo, a perda de massa resultante do aço de baixo carbono é superior quando

comparada a perda de massa quando este material é desgastado somente por corrosão ou erosão.

Segundo Gomes (2005), a atuação do desgaste erosivo-abrasivo pode gerar o aparecimento de pequenas regiões anódicas em contato com grande regiões catódicas, o que pode ocasionar a aceleração da taxa de desgaste do material, evidenciada pela formação de sulcos, cratera, ondulações e furos arredondados e no sentido do impacto das partículas abrasivas.

O ambiente que possui elevada salinidade é estudado no ensaio 2, as amostras de aço de baixo carbono foram desgastadas em solução aquosa contendo sal e areia, possivelmente gerando o desgaste erosivo-corrosivo.

4.2.2. ENSAIO 2 – AÇO DE BAIXO CARBONO – ÁGUA COM SAL + AREIA

4.2.2.1. PERDA DE MASSA

Para as amostras de aço de baixo carbono o gráfico obtido para a taxa de desgaste em função do tempo é visto na Fig. (54). O gráfico confirma os resultados obtidos no ensaio 1 para amostras de aço de baixo carbono no intervalo de tempo de até duas horas de ensaio, no qual foram obtidos taxas de desgastes máximas nos ângulos de 90º, 45º, 30º, 60 e 0º respectivamente.

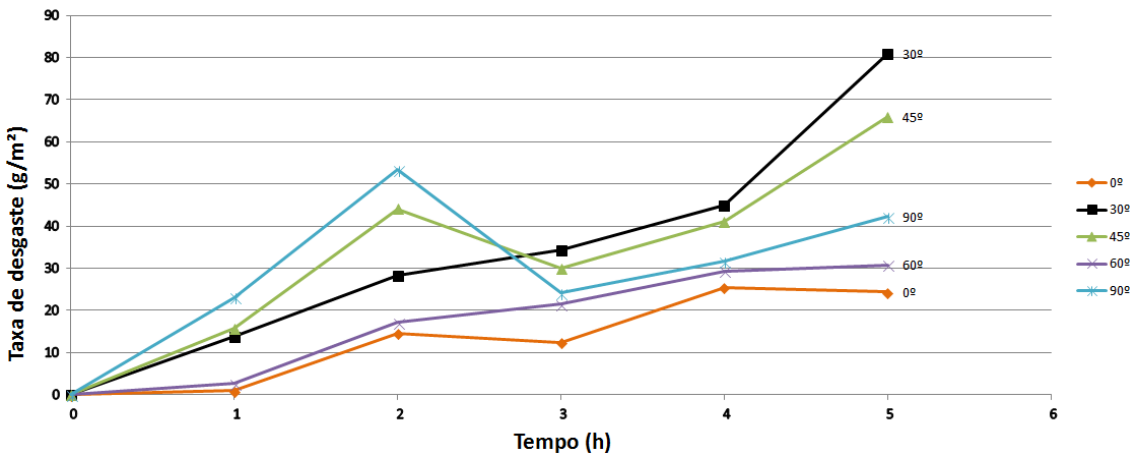

Figura 54 - Taxa de desgaste de amostras de aço de baixo carbono em função do tempo para diversos ângulos, ensaiadas com água, areia e sal

Após as cinco horas de ensaio é possível notar que o ângulo que mais provocou taxa de desgaste nas amostras é o ângulo de 30º, seguido do ângulo de 45º, 90º, 60º e 0º. Esse resultado, assim como o do ensaio 1, coincide parcialmente com o da literatura científica (Finnie, 1995), que diz que para ângulos mais agudos em materiais dúcteis a taxa de desgaste

é maior. O resultado foge do padrão ao apresentar o ângulo de 90º com maior taxa de desgaste que o de 60º.

Na Fig. (55) na qual é visto a influência do ângulo de impacto na taxa de desgaste para o material estudado durante o ensaio 2 verifica-se que o ângulo de 45º ocasiona uma taxa de desgaste menor quando comparado ao de 30º e maior que o de 60º, no entanto, o ângulo de 90º ocasiona uma taxa de desgaste superior a do ângulo de 60º, assim como no ensaio 1 este fato não deveria ocorrer conforme Finnie (1995).

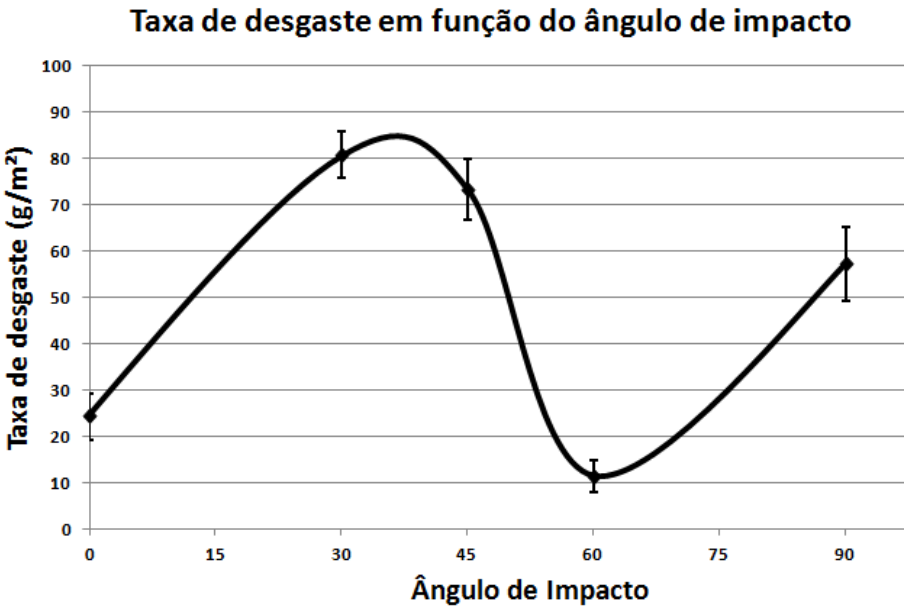

Figura 55 - Taxa de desgaste em função do ângulo de impacto após 5 horas de ensaio com solução abrasiva (água, areia e sal) em amostras de aço de baixo carbono.

4.2.2.2. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE

Após a realização do ensaio 2, imagens das superfícies das amostras foram obtidas através do MEV, o objetivo das imagens é auxiliar no entendimento dos resultados da taxa de desgaste obtidos para cada ângulo.

Para o ângulo de 0 graus após a realização da rotina de ensaio e para as paradas programadas, as imagens das superfícies são mostradas na Fig. (56). Durante a primeira hora de ensaio a superfície da amostra sofreu pouco desgaste e após duas horas de ensaio surgem algumas crateras discretas causadas pelo desgaste.

A superfície da amostra após três horas de ensaio quando comparada a superfície de duas horas apresenta maiores danos causados pelo desgaste da partícula erosiva ao se chocar com a superfície. Nas superfícies de 4 e 5 horas de ensaio há indícios do desgaste sofrido pela superfície, principalmente na ultima imagem.

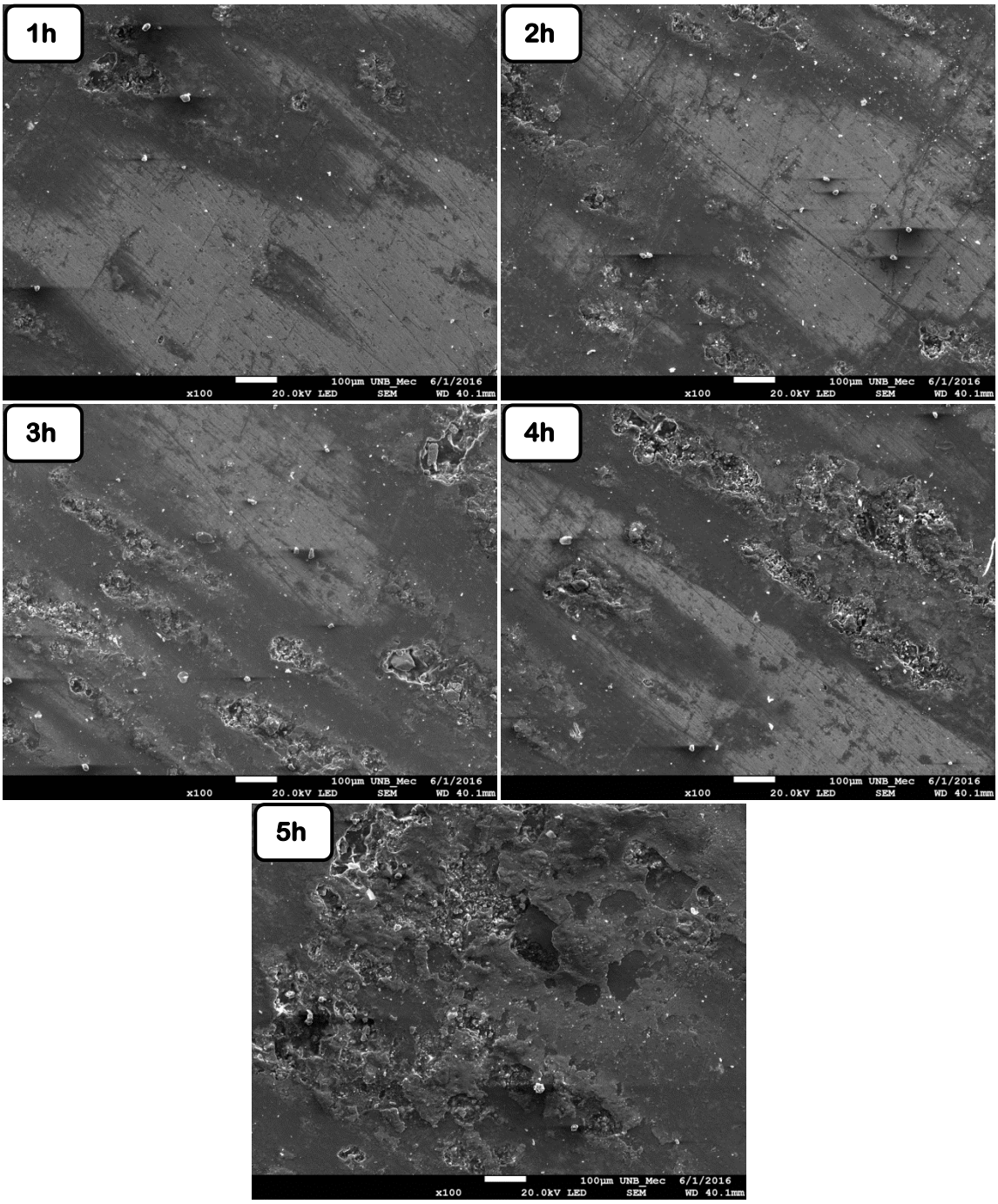

Figura 56 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 0º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

Segundo Oliveira (2015) o possível mecanismo de desgaste deste ângulo possui o efeito cortante das partículas abrasiva mais brando ou até mesmo eliminado, devido à baixa intensidade ou inexistência da força normal com que as partículas atingem a superfície da amostra.

As imagens das superfícies desgastadas para o ângulo de 30º são mostradas na Fig. (57). Com o decorrer do ensaio a quantidade de crateras que surgem na superfície das

amostras tornam-se significativas, chegando ao ponto máximo no tempo de cinco horas de ensaio.

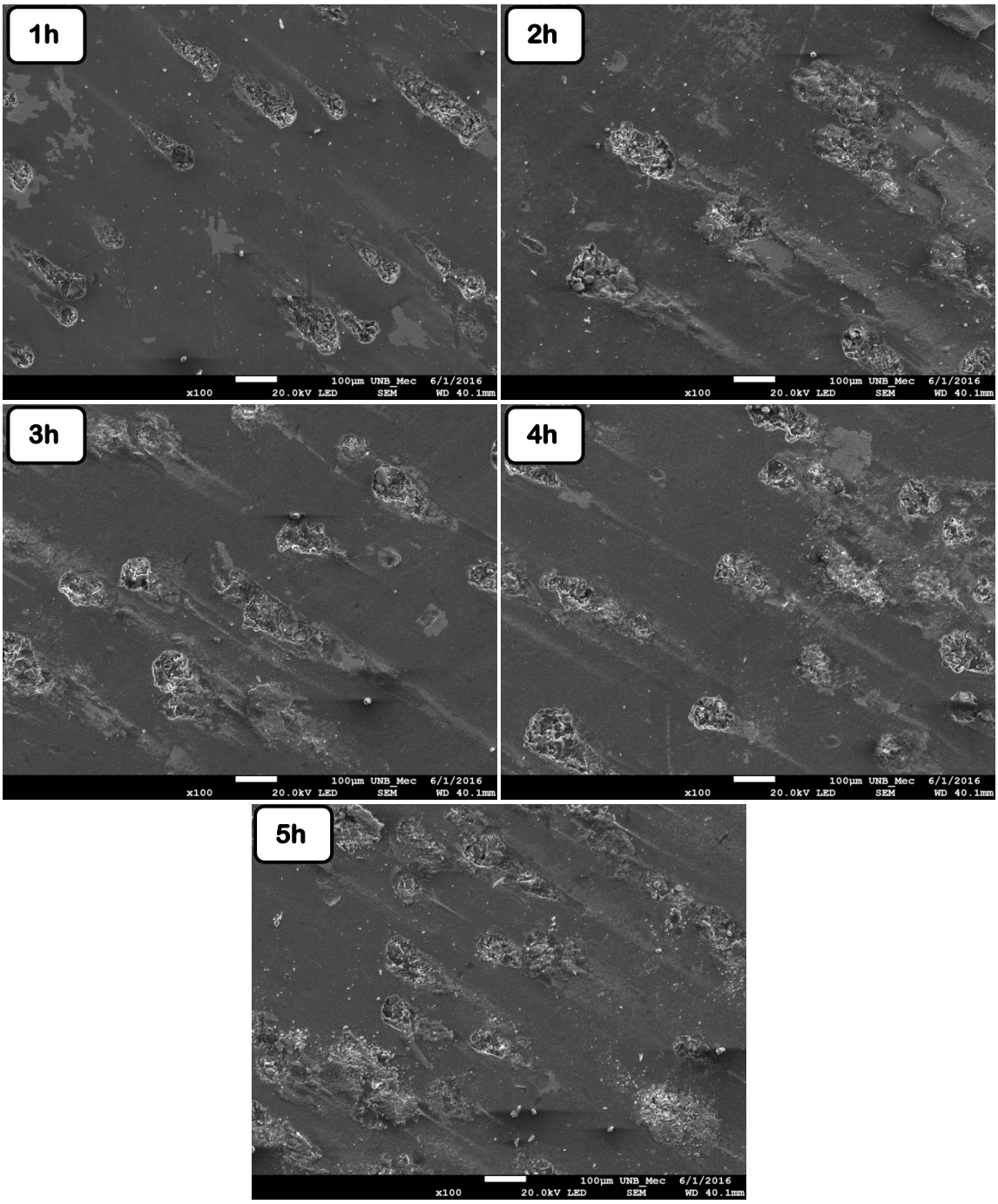

Figura 57 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 30º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

Para o ângulo de 45º após a realização da rotina de ensaio e para as cinco paradas programadas, as imagens das superfícies são mostradas na Fig. (58), assim como no ângulo de 30º a primeira hora de ensaio apresenta poucos defeitos causados pelo desgaste.

A superfície apresenta um desgaste mais evidente de sua superfície após duas horas de ensaio, as três e quatro horas o desgaste torna-se novamente moderado, atingindo seu ponto máximo após cinco horas de ensaio.

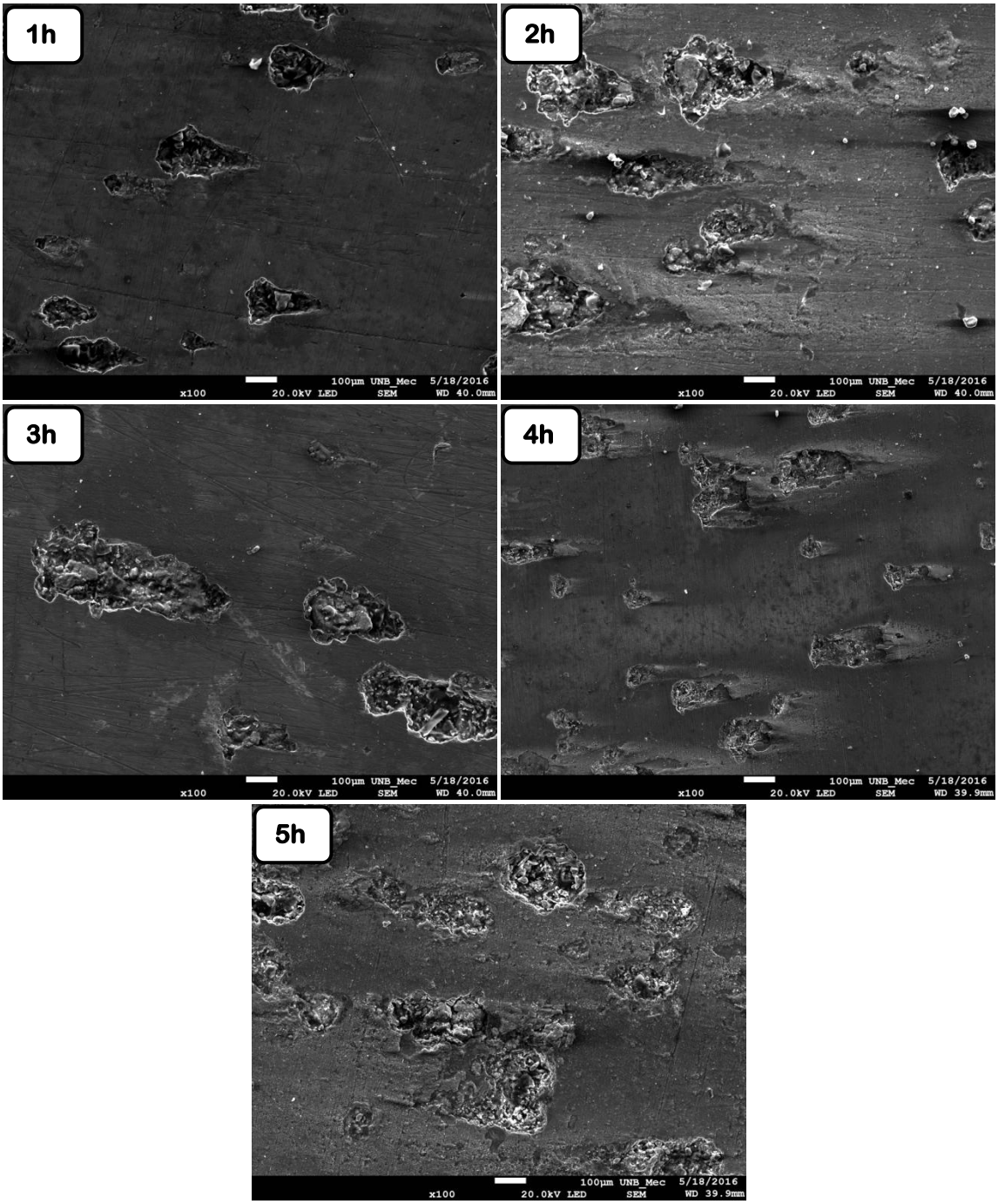

Figura 58 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 45º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

As imagens das superfícies desgastadas para o ângulo de 60º são mostradas na Fig. (59), até 2 horas de ensaio, a superfície da amostra sofreu pouco desgaste causado pelo impacto das partículas abrasivas, assim como no ângulo de 0º.

A partir da terceira imagem, nota-se um surgimento mais evidente de defeitos causados pelo desgaste no ensaio. Possivelmente os defeitos existentes foram causados por deformação plástica, no entanto, deve existir ainda o mecanismo de sulcamento e corte atuando no desgaste da superfície.

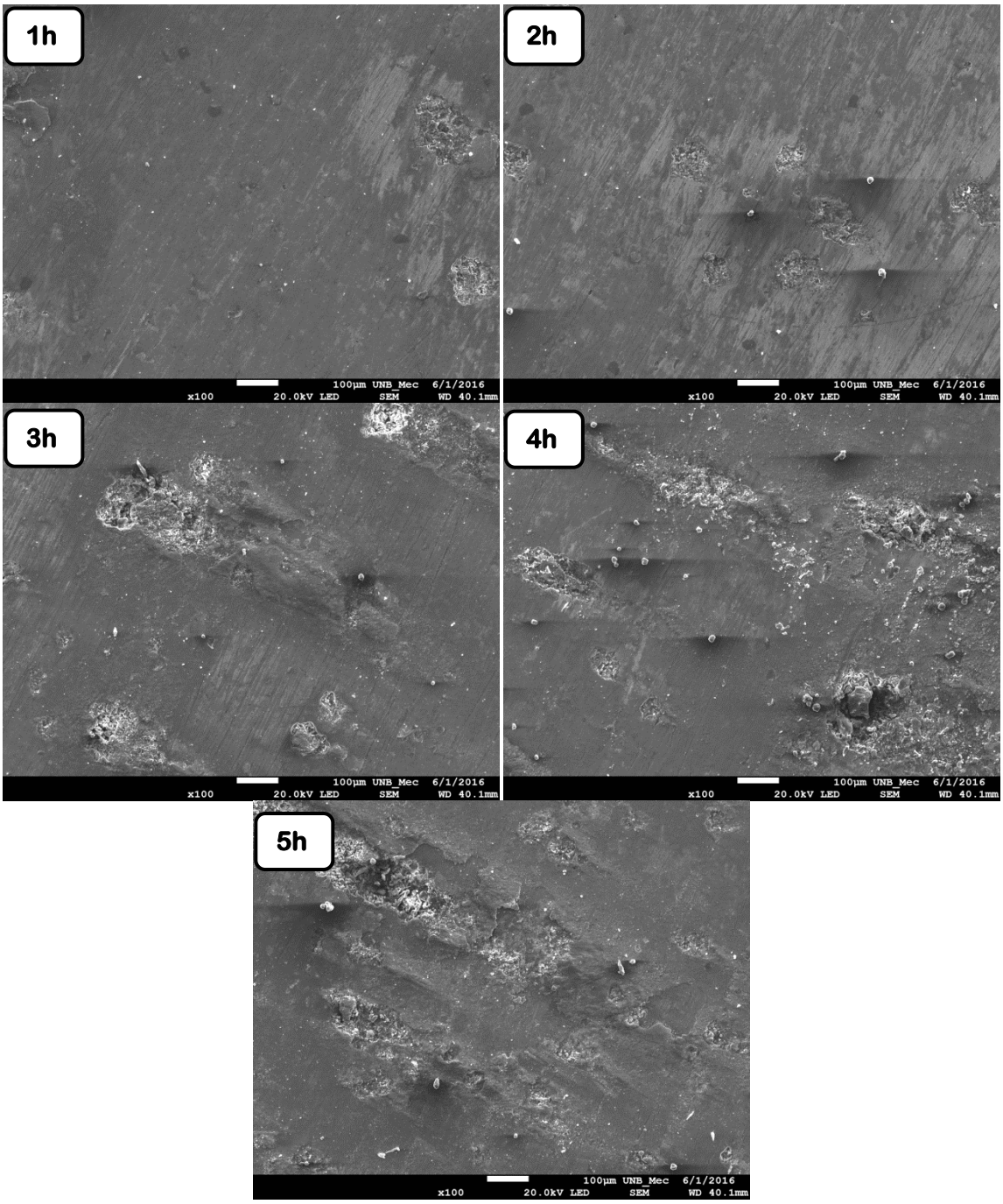

Figura 59 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 60º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

Para o ângulo de 90º após a realização da rotina de ensaio e para as paradas programadas, as imagens das superfícies são mostradas na Fig. (60).

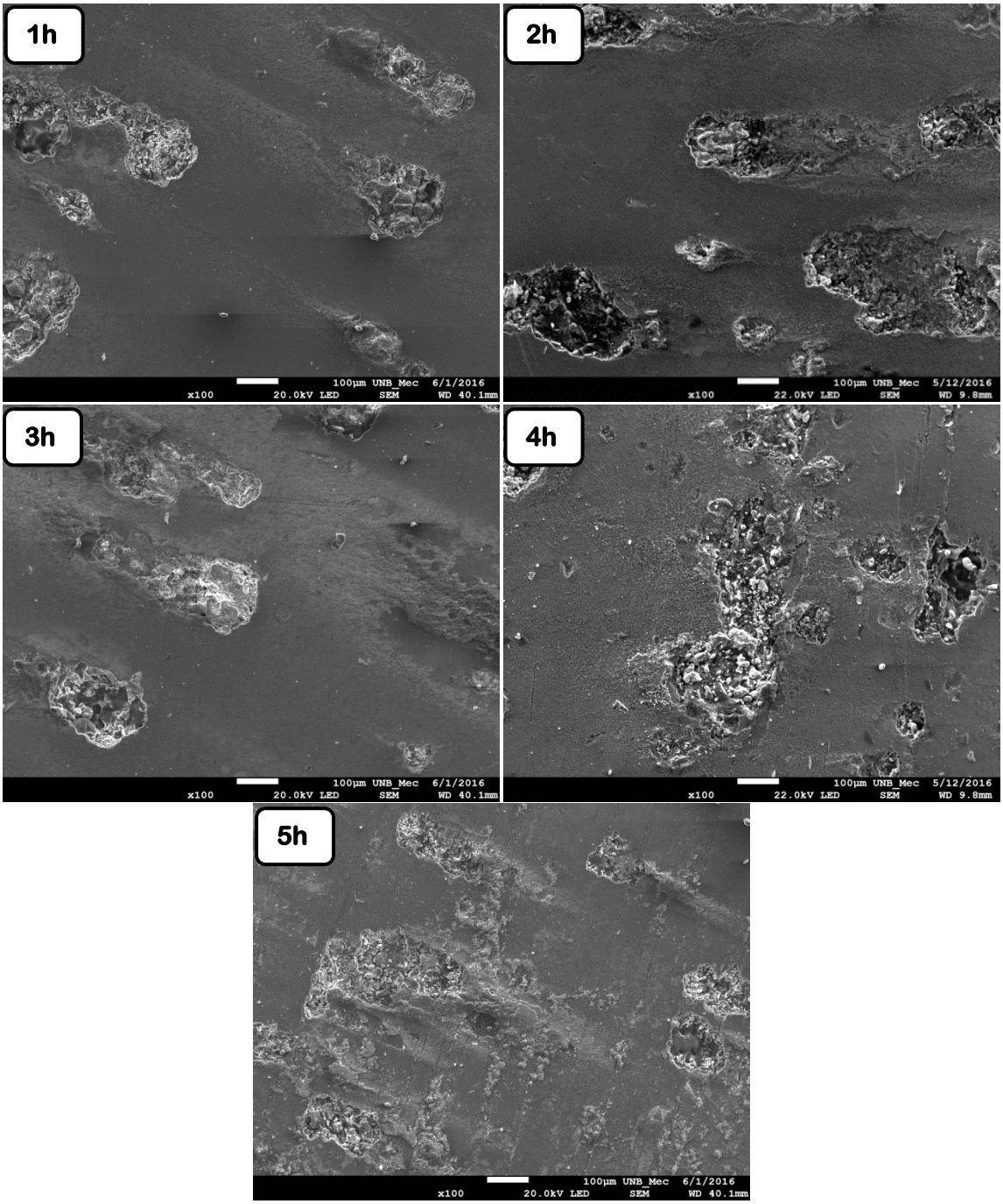

Figura 60 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono ensaiadas a 90º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

No começo do ensaio, vários são os defeitos ocasionados pelo desgaste, como pode ser visto na imagem anterior, nota-se que a maioria da crateras formadas não possuem sentido de orientação.

A partir de 3 horas a geometria bem definida das crateras que estão na superfície é melhor notada, elas são formadas devido à colisão das partículas abrasivas com a superfície do material, conforme é visto na Fig. (61).

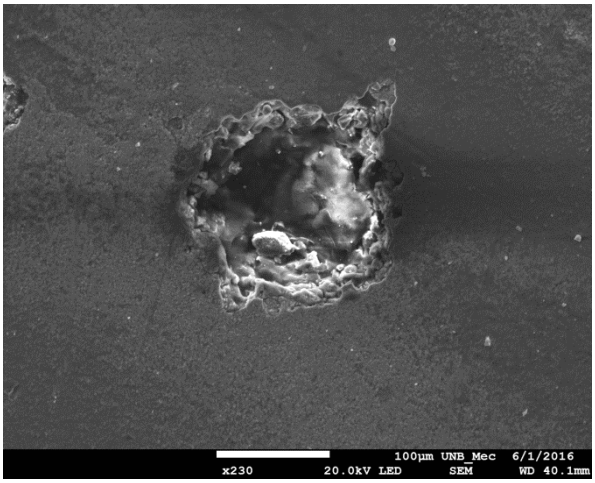

Figura 61 - Detalhe da cratera formada em um angulo de 90º

Comparando os resultados tanto da taxa de desgaste em função do tempo quanto das imagens das superfícies logo após o ensaio 2 com os mesmos dados do ensaio 1 nota-se uma diferença considerável.

A taxa de desgaste aumentou mais de dez vezes e a superfície das amostras apresentou maiores desgaste já nas primeiras horas de ensaio, mostrando que para este ensaio com este material, o ambiente salino é mais prejudicial. Possivelmente um fator que foi de fundamental importância para que ocorresse esse aumento no desgaste foi a presença do desgaste corrosivo no sistema, gerado devido à salinidade.

Segundo Gomes (2005), em situações na qual o aço de baixo carbono está submetido ao desgaste erosivo e corrosivo ao mesmo tempo, ocorre o fenômeno da sinergia, na qual o desgaste do material é potencializado, podendo ser superior até mesmo aos valores da soma de cada desgaste quando estes atuam separadamente.

Gomes (2005) diz que nesse desgaste há o aparecimento de diversos defeitos na superfície do material, como crateras, sulcos, ondulações e furos arredondados e no sentido do impacto da partícula abrasiva, portanto possivelmente os desgastes vistos nas superfícies das amostras foram resultados do desgaste erosivo-corrosivo.

4.2.3. ENSAIO 3 – AÇO INOXIDÁVEL – ÁGUA + AREIA

4.2.3.1. PERDA DE MASSA

A taxa de desgaste acumulada média do ensaio 3 para amostras de aço inoxidável é vista na Fig. (62). No gráfico nota-se que a maior taxa de desgaste ao final do ensaio ocorreu

para amostras ensaiadas com ângulo de 30º e a menor ocorreu para o ângulo de 0º. Verifica-se também, que ao final do ensaio o desgaste das amostras ensaiadas a 0º e 60º são iguais.

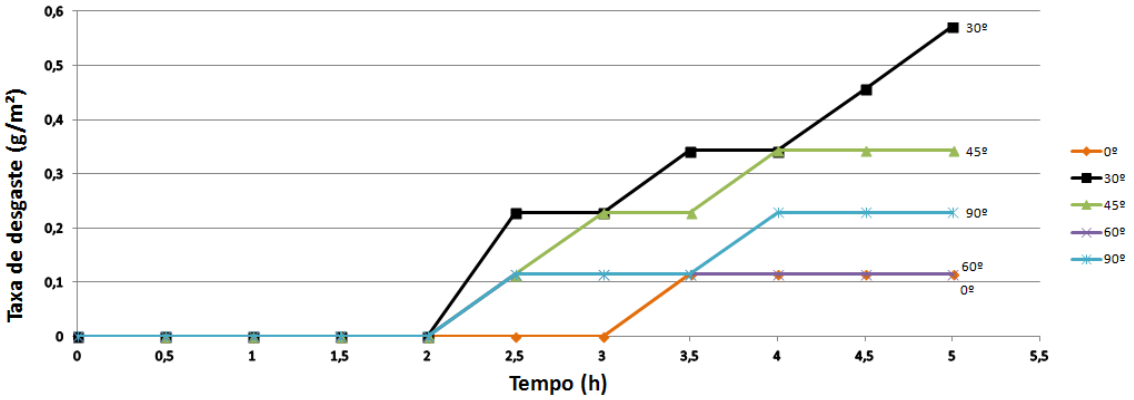

Figura 62 - Taxa de desgaste de amostras de aço inoxidável em função do tempo para diversos ângulos, ensaiadas com água e areia

No ensaio 3 a perda de massa das amostras só é notada a partir de duas horas para todos os ângulos com exceção do ângulo de 0º, cuja perda de massa torna-se evidente somente a partir de três horas.

Para o ângulo de 30º, no qual houve maior taxa de desgaste ao final do ensaio, a evolução da taxa segue certo padrão, até duras horas não foi possível detectar perda de massa, durante os trinta minutos seguintes o material sofreu uma perda de material significativa, em seguida não houve perda de material até três horas e novamente durante os trinta minutos seguintes ocorreu um desgaste, até quatro horas houve uma estabilização e por fim uma perda de material considerável.

Este comportamento é visto em outros ângulos e possivelmente está relacionado a microestrutura do material, por tratar-se de um aço austenítico cuja característica principal é a ductilidade, com o decorrer do tempo e consequentemente do fluxo de partículas abrasivas que se chocam com o material, este acaba encruando e se tornando mais duro, e com isso, mais resistente ao desgaste, depois de um certo ponto sofre fratura frágil com o impacto de novas partículas, até que novamente a característica dúctil seja retomada.

A influência do ângulo de impacto na taxa de desgaste no ensaio 3 para amostras de aço inoxidável é visto na Fig. (63). A taxa de desgaste foi maior para o ângulo de 30 graus assim como para os ensaios anteriores, no entanto, a taxa de desgaste para os ângulos de 0º e 60º são iguais, o que contraria a literatura (Finnie, 1995).

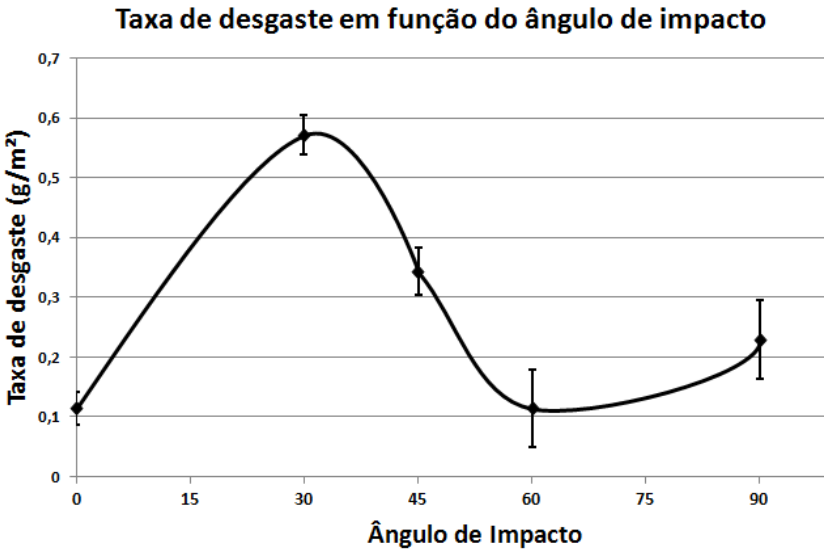

Figura 63 – Taxa de desgaste em função do ângulo de impacto após 5 horas de ensaio com solução abrasiva (água e areia) em amostras de aço inoxidável

4.2.3.2. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE

Na Figura (64) são vistas as superfícies das amostras após cinco horas de ensaio para cada ângulo, as imagens novamente foram colocadas em ordem crescente de acordo com a taxa de desgaste e com as taxas de desgastes inclusas.

Analisando a superfície de cada amostra nota-se que poucos foram os desgastes existentes após as cinco horas de ensaio, as amostras que possuíram maiores quantidades de desgastes foram as amostras ensaiadas a 30º e 45º.

Segundo Ochoa (2007), o aço inoxidável possui uma camada de proteção chamada de camada passiva que protege contra os efeitos da corrosão, esta camada só não realiza essa função quando inserida em um ambiente nocivo. Um ambiente que possua salinidade elevada e partículas abrasivas chocando-se contra a peça pode ser considerado nocivo ao aço inoxidável.

O ambiente no qual as amostras estavam inseridas neste ensaio pode ser considerado pouco nocivo ao aço inoxidável, pois a solução aquosa do sistema não possuía salinidade elevada, este fator pode ter influenciado no desgaste das amostras, pois segundo Ochoa (2007) na presença do íon cloreto o aço inoxidável pode sofrer desgaste por pites (pequenas cavidades na superfície da amostra), ocasionando uma perda de material mais acelerada.

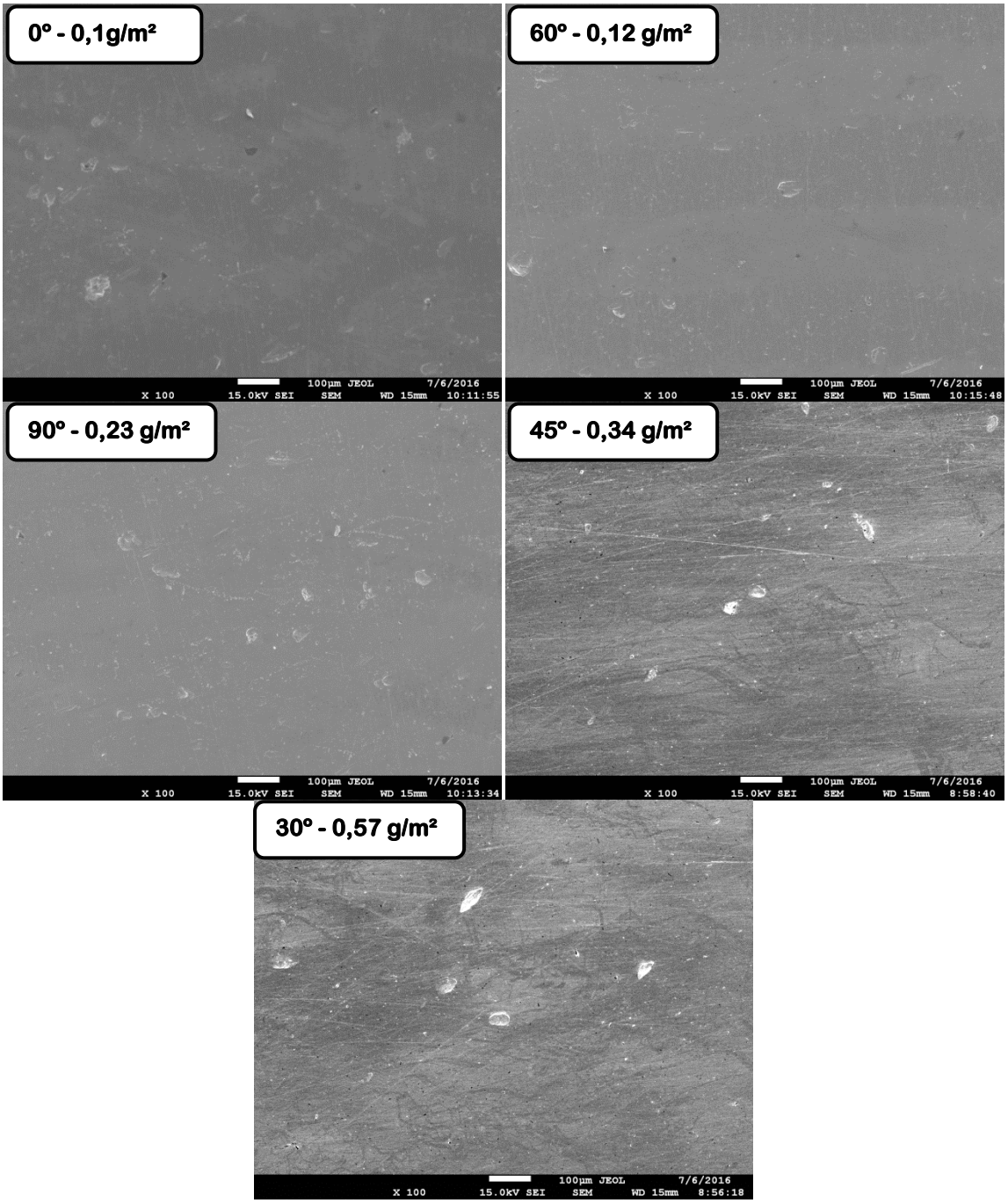

Figura 64 - Superfícies das amostras de aço inoxidável após 5h de ensaio com água e areia em vários ângulos

4.2.4. ENSAIO 4 – AÇO INOXIDÁVEL – ÁGUA COM SAL + AREIA

4.2.4.1. PERDA DE MASSA

Para o aço inoxidável a taxa de desgaste em função do tempo de ensaio é visto na Fig. (65), na qual é possível notar que, após as cinco horas de ensaio, houve também uma

tendência em manter a maior taxa de desgaste para o ângulo agudo de 30º, seguido dos ângulos 45º, 90º, 60º e 0º.

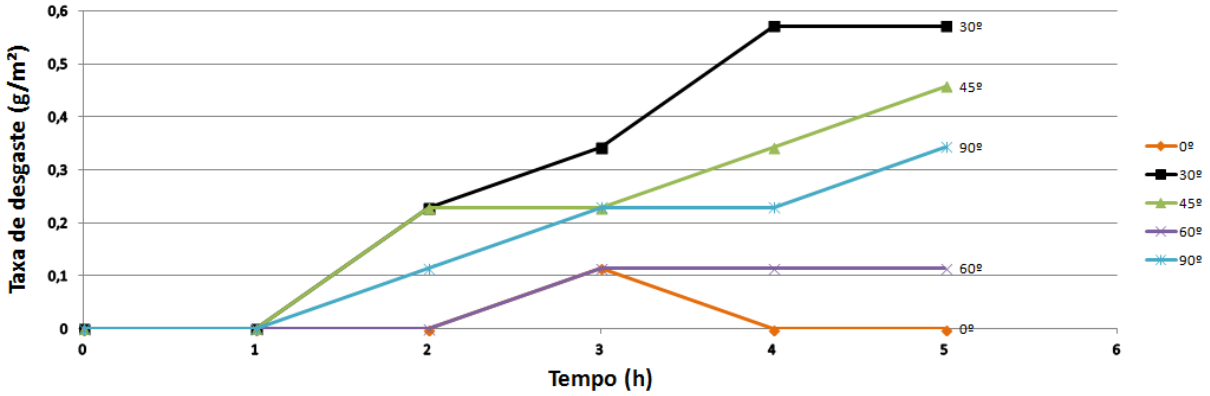

Figura 65 – Taxa de desgaste de amostras de aço inoxidável em função do tempo para diversos ângulos, ensaiadas com água, areia e sal

Até uma hora de ensaio nota-se que não houve mudança igual ou superior a quatro casa decimais na massa das amostras. A tendência vista na Fig. (44) é vista a partir de três horas de ensaio, na qual as amostras de aço inoxidável ensaiadas a 30 graus apresentam maior taxa de desgaste, seguidos dos ângulos de 45º, 90º, 60º e 0º respectivamente.

Ao comparar a evolução da taxa de desgaste das amostras de aço inoxidável dos ensaios 3 e 4 percebe-se que as amostras ensaiadas no último ensaio apresentaram de forma geral perdas de massa em um intervalo de tempo menor, acredita-se que o motivo pelo qual isso aconteceu esteja relacionado ao sistema do ensaio.

O sistema no qual as amostras de aço inoxidável foram ensaiadas possuía salinidade elevada e havia impacto de partículas abrasivas contra a superfície, portanto pode ser considerado nocivo ao material.

Ochoa (2007) diz que quando a erosão e a corrosão estão presentes num sistema, os mecanismos de desgaste se atenuam mutuamente ocorrendo um sinergismo erosão-corrosão, fazendo com que ocorra uma aceleração na taxa de perda de material.

A contínua remoção da camada passiva devido à erosão e o reaparecimento da camada constituem um aumento na taxa de desgaste quando comparado aos desgastes erosivo e corrosivo separadamente, o mecanismo deste sinergismo é visto na Fig. (66).

Figura 66 - Esquemático do mecanismo de remoção da camada passiva por impacto de partícula erosiva Ochoa (2007)

O ângulo de 30º foi o que mais desgastou as amostras após as 5 horas de ensaio, em seguida o ângulo de 45º. Os ângulos de 0º e 60º apresentaram os menores desgastes da superfície e o ângulo de 90º novamente apresentou distinção quando comparado à resultados experimentais obtidos por Oliveira (2015), pois apresentou taxa de desgaste maior que o ângulo de 60º. O gráfico obtido para as amostras de aço inoxidável da taxa de desgaste em função do ângulo de impacto, após 5 horas de ensaio, é visto na Fig. (67).

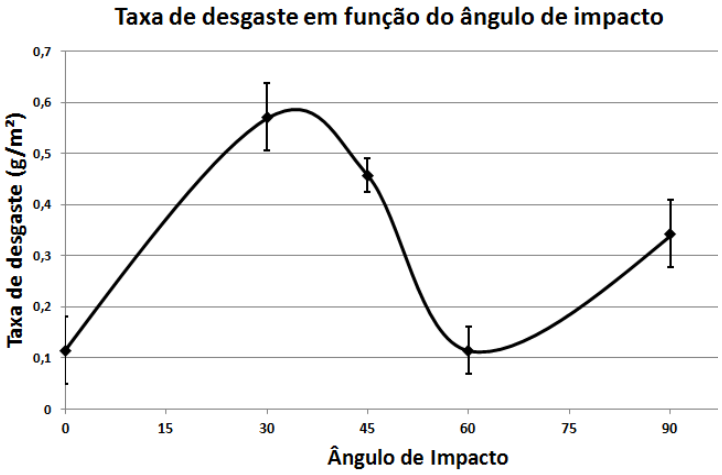

Figura 67 - Taxa de desgaste em função do ângulo de impacto após 5 horas de ensaio com solução abrasiva (água, areia e sal) em amostras de aço inoxidável

As possíveis causas que podem ter influenciado nos resultados das amostras de aço inoxidável também estão relacionadas ao sistema no qual o experimento foi realizado, assim como nos resultados das amostras de aço de baixo carbono.

4.2.4.2. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE

Para o ângulo de 0º após a realização da rotina de ensaio e para as paradas programadas, as imagens obtidas são as vistas na Fig. (68). Durante as duas primeiras horas de ensaio, tanto na análise de perda de massa com o auxílio da balança de precisão quanto na análise da superfície com MEV, não é possível notar desgaste evidente

Somente na amostra de três horas que surge um defeito causado pelo desgaste do impacto de partículas abrasivas contra a superfície. Nas duas últimas horas finais de ensaio, as amostras estudadas não apresentaram defeito evidente em sua superfície.

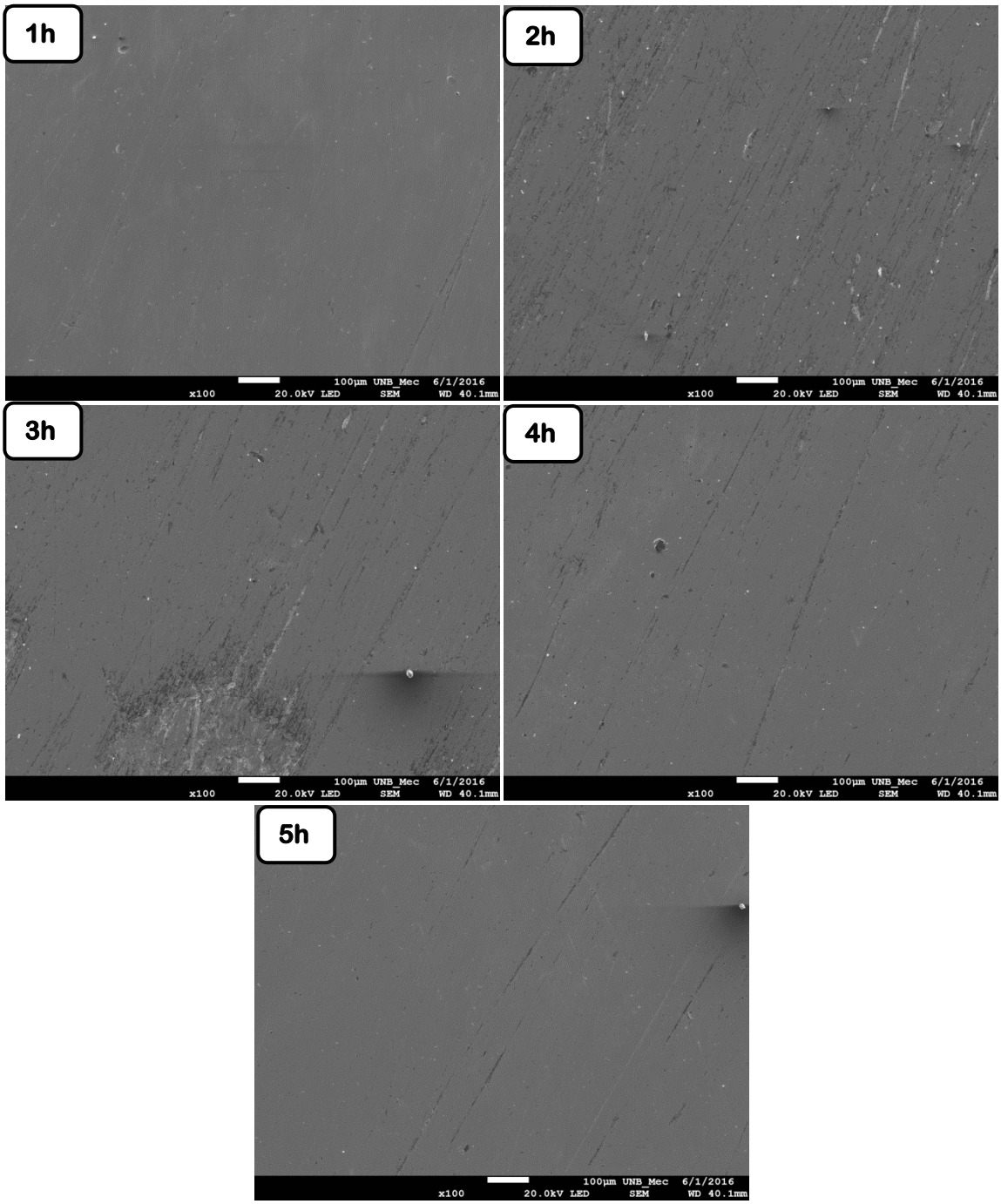

Figura 68 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 0º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

Após a realização da rotina de ensaio as imagens das superfícies ensaiadaa em um ângulo de 30º são mostradas na Fig. (69). Após uma hora de ensaio poucos defeitos surgem em sua superfície, eles são discretos e nem representam perda de massa para a balança de

precisão. Para as imagens obtidas após 2, 3, 4 e 5 horas de ensaio surgem alguns defeitos causados na superfície das amostras, que fazem com que seja notada variação de massa através da balança.

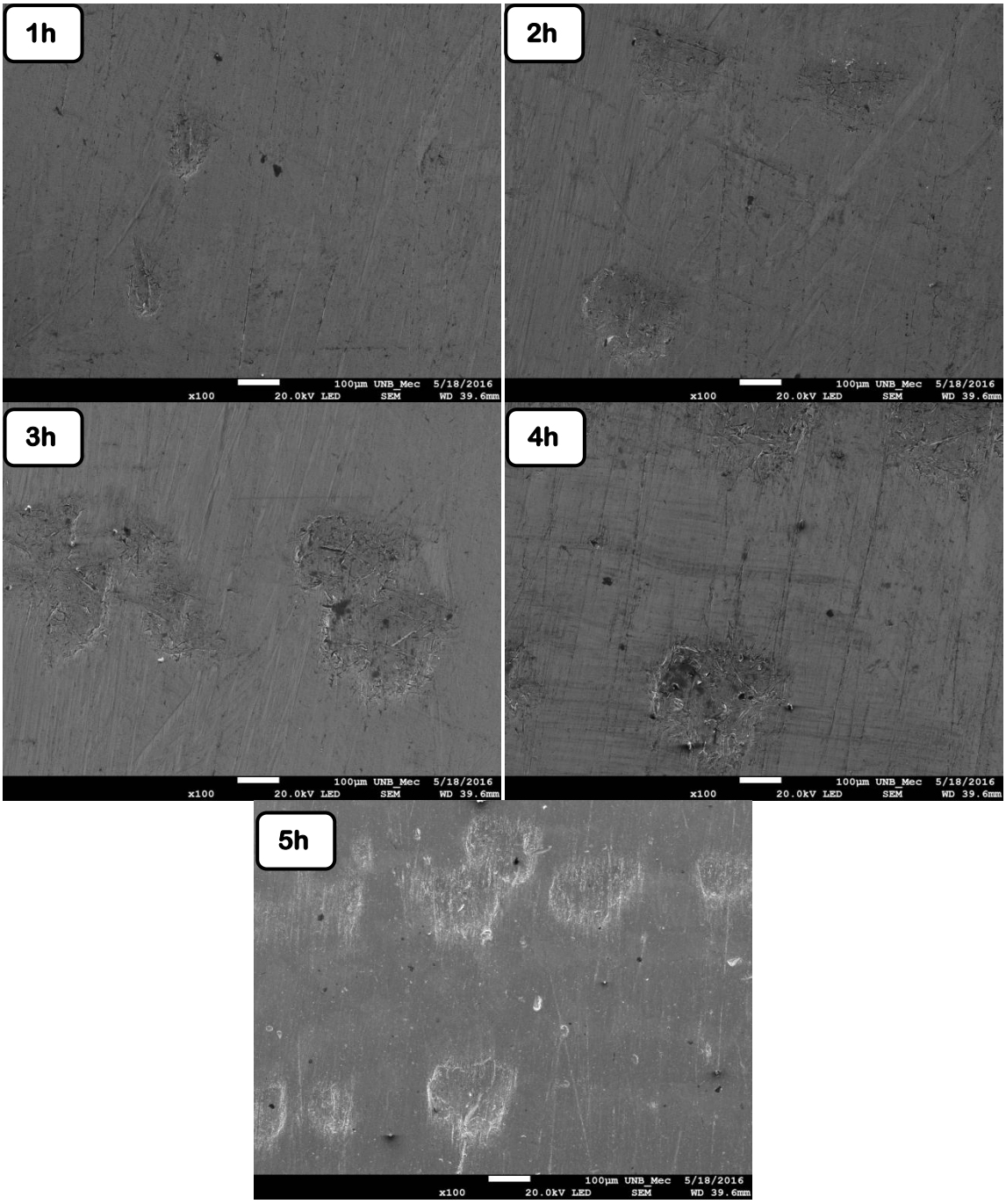

Figura 69 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 30º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

Para o ângulo de 45º após a realização da rotina de ensaio e para as paradas programadas, as imagens das superfícies são mostradas na Fig. (70). Até duas horas de ensaio

o desgaste na superfície das amostras foi bastante discreto, surgindo alguns defeitos após as três horas de ensaio.

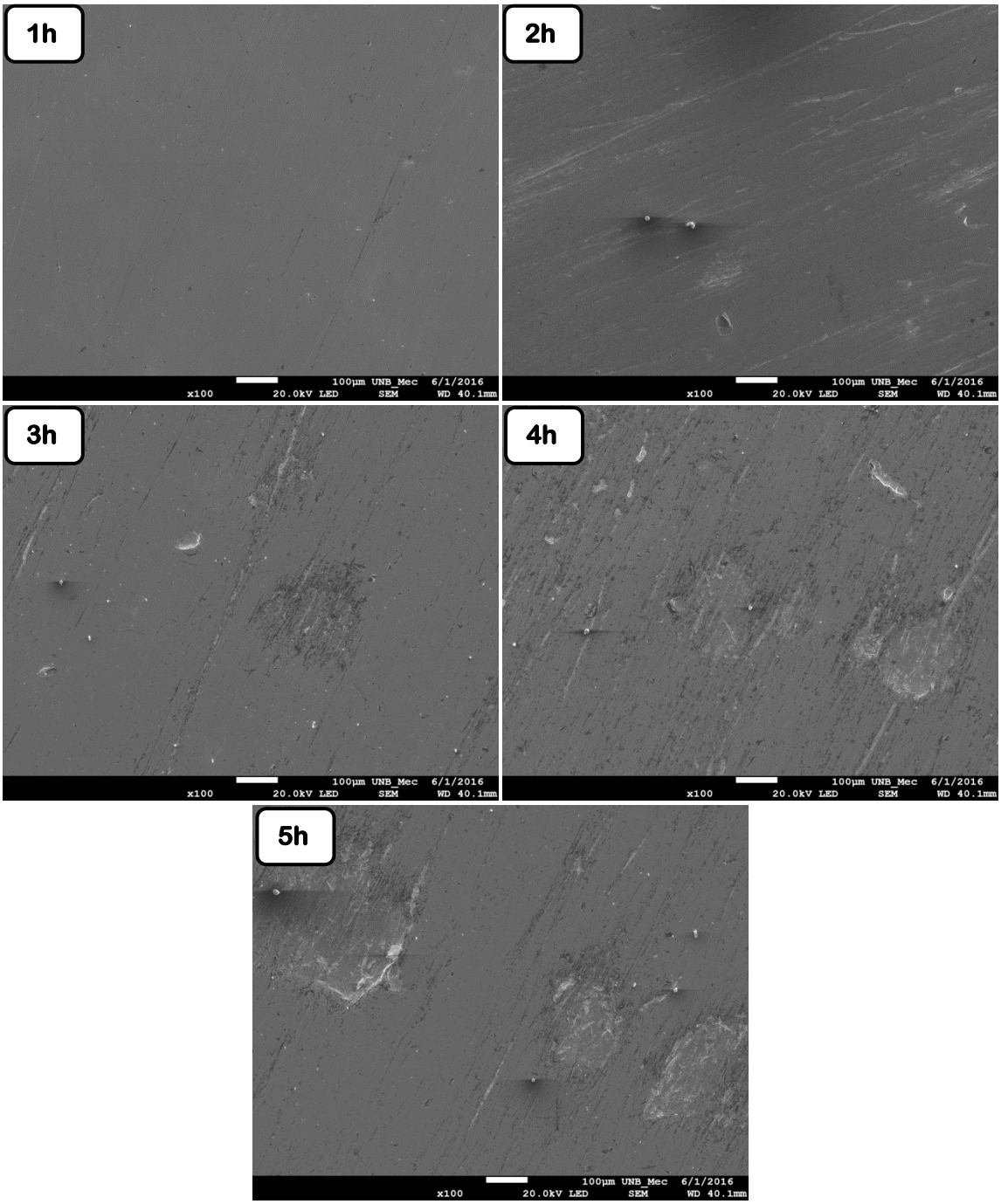

Figura 70 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 45º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

A Figura (71) contêm imagens da superfície das amostras posicionadas em um ângulo de 60º após o ensaio de desgaste, assim como ocorreu no ângulo de 0º, o desgaste no ângulo de 60º foi quase imperceptível, sendo notado variação de massa apenas após as três horas de

ensaio, mesmo assim pelas imagens não é possível notar defeitos na superfície causado pelo desgaste do ensaio.

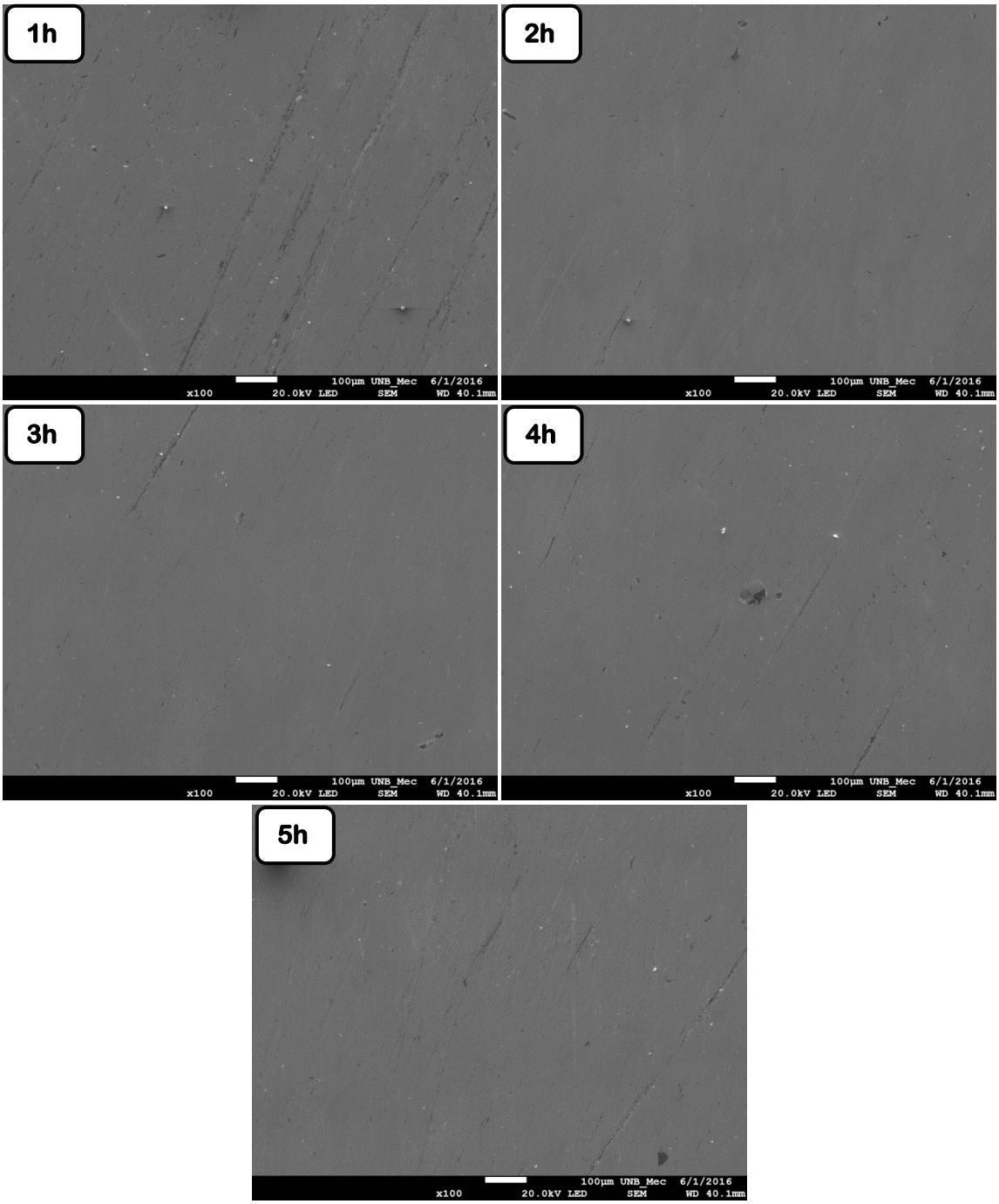

Figura 71 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 60º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

Para o ângulo de 90º após a realização do ensaio as imagens das superfícies são mostradas na Fig. (72). A superfície da amostra ensaiada após 1 hora não apresenta desgastes evidentes, assim como não houve variação de massa perceptível pela balança de precisão.

Após duas e três horas de ensaio notam-se alguns defeitos na superfície, no entanto, os maiores desgastes são notados nas imagens das superfícies de 4 e 5 horas, sendo visto na última imagem as crateras formadas, cujo formato é circular.

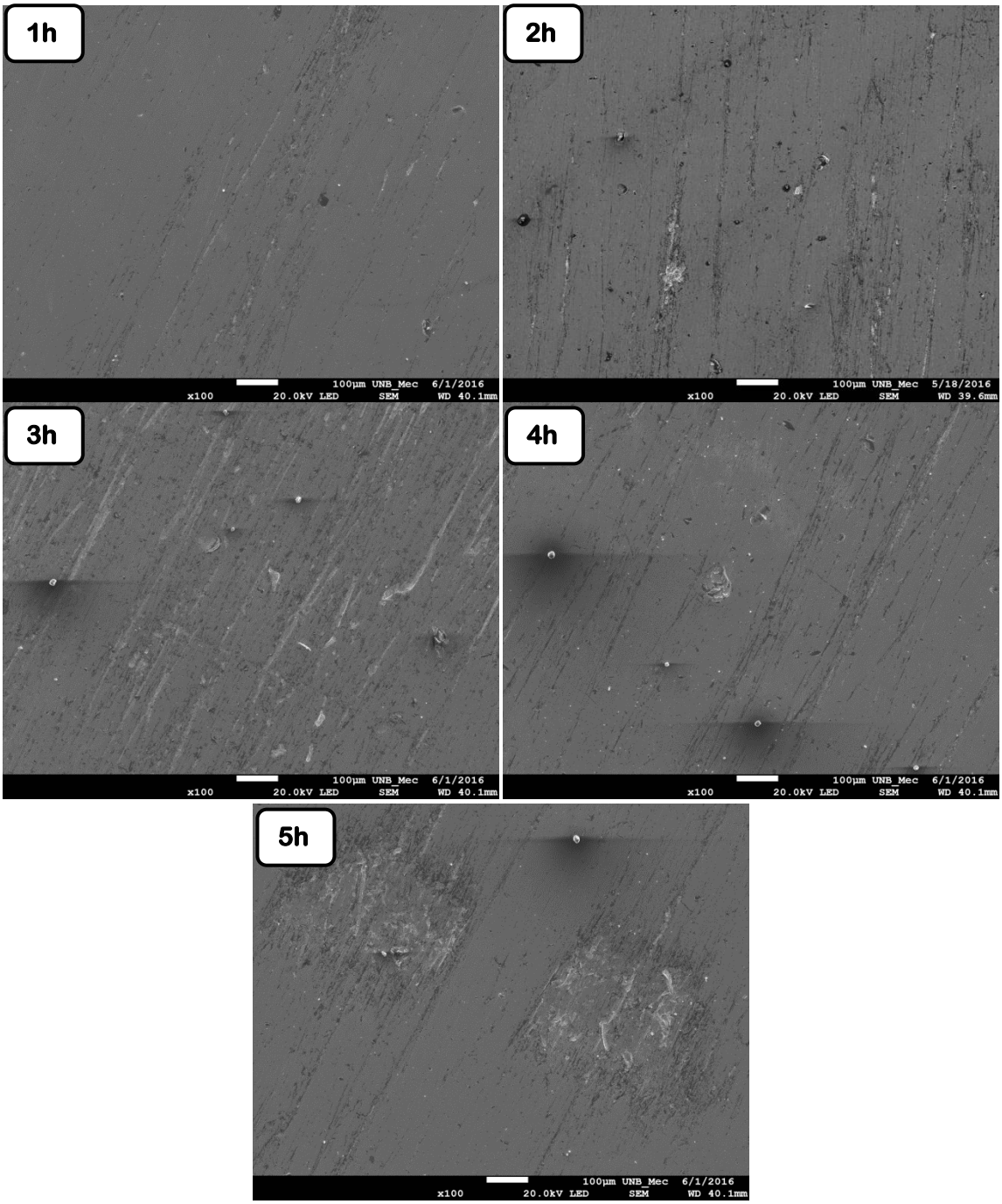

Figura 72 - Superfície das amostras de aço inox ensaiadas a 90º após 1, 2, 3, 4 e 5 horas em água, areia e sal

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a análise de forma global da Fig.(73), no qual contêm os dados obtidos nos ensaios de desgaste das amostras estudadas em um ângulo de 30º, que causou maiores desgaste, é possível inferir que o aço inoxidável obteve menores taxas de desgastes nos dois ambientes estudados, água com areia e água com sal e areia.

O ângulo que mais desgastou as amostras constituídas pelos materiais estudados foi o de 30º, possivelmente isto ocorreu devido o mecanismo de desgaste que ocorre neste ângulo. Oliveira (2015) diz que as partículas abrasivas ao se chocarem em ângulos mais agudos com a superfície, ocasiona a perda de material pelo mecanismo de corte e sulcamento que gera um desgaste considerável.

Segundo Oliveira (2015), o mecanismo no qual a partícula abrasiva ao se chocar com a superfície da amostra gera uma cratera com deformação plástica em sua periferia que posteriormente será atingida por outra partícula abrasiva e removida deve ocorrer em ângulos maiores, como o de 90º. Nesse mecanismo a perda de material é menor quando comparada com o sulcamento e corte, no entanto, os resultados obtidos foram diferentes ao da literatura, possivelmente isto ocorreu devido ao sistema no qual os ensaios ocorreram.

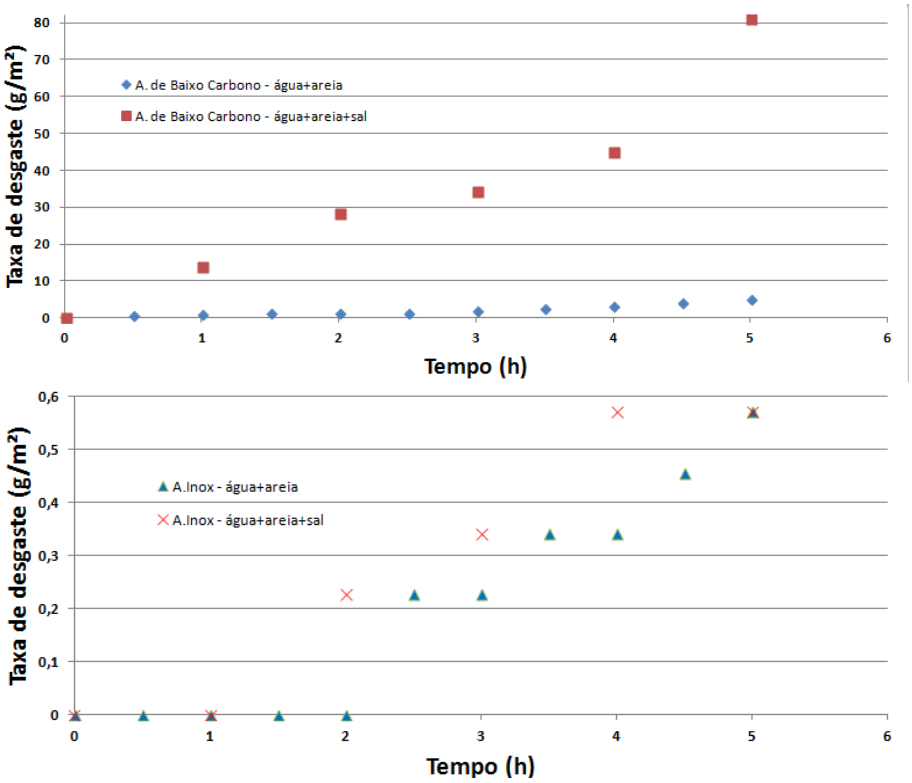

Figura 73 - Taxa de desgaste global das amostras de aço de baixo carbono e de aço inoxidável em um ângulo de 30º

No ambiente no qual há solução aquosa contendo sal e areia há uma aceleração na evolução da taxa de desgaste das amostras, tanto para as amostras de aço de baixo carbono quanto para as amostras de aço inoxidável.

Nesses sistemas possivelmente ocorreu o fenômeno conhecido por sinergismo erosivo-corrosivo, Ochoa (2007) diz que nesta situação a perda de material das amostras é acelerada devido a atuação do desgaste erosivo juntamente com o erosivo, a atuação concomitante destes desgastes ocasiona perdas de material mais significativas do que quando estes atuam isolados.

Segundo Gomes (2005), no aço de baixo carbono este fenômeno gera o aparecimento de crateras, sulcos, furos arredondados e no sentido de impacto da partícula abrasiva, já para as amostras de aço inoxidável há a remoção da camada passiva, proporcionando que ocorra corrosão da superfície gerando pequenas cavidades na superfície do material.

As imagens obtidas das superfícies das amostras após cada ensaio auxiliaram a compreender os resultados das taxas de desgastes. As amostras de aço de baixo carbono sofreram diversos danos em sua superfície já nas primeiras horas de ensaio tanto no primeiro ambiente quanto no segundo, por outro lado as amostras de aço inoxidável apresentaram poucos danos em suas superfícies, muitas vezes até imperceptíveis.

Na Figura (74) é apresentada uma comparação da superfície das amostras após 5 horas de ensaio em todos os ambientes e todos os ângulos. Comparando a superfície das amostras dos materiais ensaiados, nota-se que o desgaste foi mais evidente para as amostras de aço de baixo carbono, tanto no ensaio 1 quanto no ensaio 2, havendo maiores danos (crateras) nas amostras inseridas no sistema que possuía salinidade elevada (ensaio 2), fato que pode ter ocorrido devido o fenômeno da sinergia erosão-corrosão.

As amostras de aço inoxidável apresentam poucos desgastes em sua superfície nos dois ensaios finais quando comparadas as do outro material, no entanto, as amostras ensaiadas com água, sal e areia apresentam uma taxa de desgaste em um menor intervalo de tempo, demonstrando novamente que a inclusão da salinidade no meio influencia na taxa de desgaste.

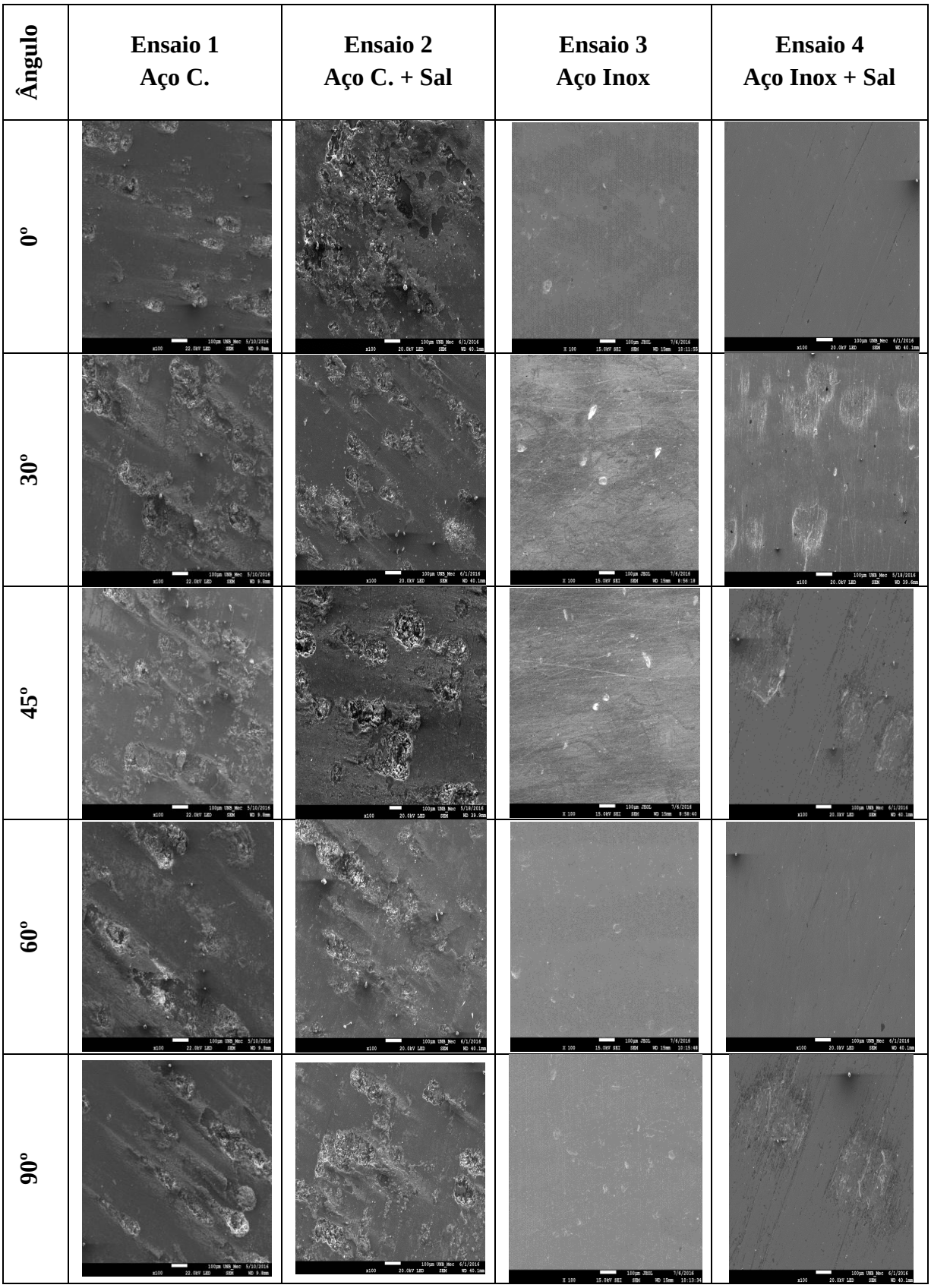

Figura 74 - Superfície das amostras de aço de baixo carbono e aço inoxidável após 5 horas de ensaio em todos os ambientes e todos os ângulos

6. CONCLUSÕES

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

- A máquina construída com o intuito de estudar o desgaste abordado neste trabalho atendeu aos requisitos do trabalho, pois permitiu simular as condições de uso de materiais utilizados na construção de componentes náuticos em ambientes aquosos e abrasivos.
- Os resultados obtidos da taxa de desgaste para as amostras ensaiadas no ambiente que continha água, areia e sal foram mais expressivas quando comparadas ao ambiente que não possuía sal, demonstrando que um ambiente que possua salinidade é mais nocivo para os materiais estudados que o segundo.
- A taxa de desgaste seguiu a tendência de ser a menor para o ângulo de 0° para os quatro ensaios, pois nesta situação teoricamente não ocorre mecanismo de retirada de material por corte nem por fadiga superficial, apenas por sulcamento.
- Ângulos agudos como 30° e 45° foram os que mais retiraram material das amostras durante os experimentos, a retirada de material provavelmente deu-se principalmente pelos mecanismos de corte e sulcamento.
- A taxa de desgaste das amostras para o ângulo de 90° segundo a literatura deveria ser menor quando comparada ao ângulo de 60º, no entanto, a influência da dinâmica do sistema no qual o experimento é realizado possivelmente influenciou para a não confirmação desta afirmação.
- As amostras feitas de aço inoxidável apresentaram menores taxas de desgastes quando comparadas ao aço de baixo carbono, demonstrando que possivelmente o primeiro material é mais resistente em ambientes nos quais este trabalho reproduziu.

7. TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento deste trabalho proporcionou o aumento do conhecimento à respeito do tema, esclarecimento de dúvidas relacionadas ao desgaste de componentes náuticos e principalmente despertou o desejo de trabalhar com pesquisas à respeito do tema.

Para enriquecimento do estudo a seguir são propostas algumas sugestões:

- Equipamento

Desenvolvimento de equipamento que permita uma simulação cada vez mais fiel das condições que o equipamento náutico é utilizado.

- Novas amostras

Utilização de novas amostras que possuam tratamento térmico de nitretação, para que a característica de serem mais resistentes mecanicamente seja colocada em estudo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM. 1991. *Standard Test Mehod for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/rubber Wheel Apparatus (ASTM G-65).* 1991.

Baptista, Luis Filipe. 2013. Sistemas de Propulsão e Governo. *Tecnologia Marítima.* 2013.

Brasil, Marinha do. 2011. *Normas da autoridade marítima para navegação e cartas náuticas 28.* s.l. : Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2011.

Carvalho, Leonardo Gomes de Sá e. 2014. *Resistência à Corrosão dos Aços CA24 e CA50 Frente à Ação dos Cloretos.* 2014.

Cueva, Edison Gustavo. 2002. *Estudo do Desgaste em Materiais Utilizados em Discos de Freio de Ferro Fundido com Grafita Lamelar e Vermicular.* São Paulo : s.n., 2002.

Doctors, Corrosion. Corrosion Doctors. *Corrosion Doctors.* [Online] [Citado em: 14 de Maio de 2015.] www.corrosiondoctors.com.

Edison Gustavo Cueva Galárraga, Evelin da Rocha de Lima, Isabele da Silva Paiva, Lorena dos Santos de Jesus, Thais Luane Antunes de Araújo, Lorena Freitas Gobira, Carlos Abel Nuñez Lazo. 2015. Resistência ao Desgaste Erosivo de Aços Inoxidáveis. 2015.

Finnie, I. 1995. *Some reflections on the past and future of erosion.* 1995.

Fontoura, Cláudia Moreira da. 2009. *Desenvolvimento de hálice de material compósito polimérico utilizando a moldagem por transferência de resina.* Porto Alegre : s.n., 2009.

Fujarra, André Luis Condino. 2006. Arquitetura Naval. *Especialização em Engenharia Naval.* São Paulo : Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, 2006.

Gahr, K.H.Zum. 1987. *Microstructure and wear of materials.* s.l. : Elsevier Science Publishers, 1987.

Geer, D. 1989. *Propeller Handbook: The Complete reference for Choosing, Installing and Understanding Boat Propellers.* New York : McGraw-Hill-International Marine, 1989.

Godoi, Sueli Susana de. 1998. *Fundamentos de Oceanografia Física.* 1998.

—. 1998. *Fundamentos de Oceanografia Física.* 1998.

GOMES, ANA CAROLINA TEDESCHI. 2005. *ANÁLISE DA CORROSÃO E DA EROSÃO-CORROSÃO DO.* 2005.

Gomes, C.R.C. 1981. *Arquitetura Naval* . Rio de Janeiro : s.n., 1981.

Hutchings, I.M. 1992. *Tribology: Friction and wear of engineering materials.* s.l. : Edward Arnold, 1992.

J.P.Ramalho e L.Gimenez. 1997. *Processo com eletrodo revestido.* 1997.

J.Zhou e Bahadur, S. 1989. *Corrosion and Particle Erosion at High Temperature.* s.l. : Srinivasan and K Vedula, 1989.

—. 1989. *Corrosion and Particle Erosion at High Temperature.* 1989.

Kennedy, D.M. e Hashmi, M.S.J. 1996. *Test rig design and experimental results of coated systems under imapct abrasion conditions.* s.l. : Surface and Coatings Technology, 1996.

Levy, A. e Yau, P. 1984. *Erosion of steels in liquid slurries.* 1984.

Lin, H.J., Lin, J.J. e T.J.Chuang. 2005. *Strength Evaluation of a Composite Marine Propeller Blade.* 2005.

Lula, R.A. 1986. *Stainless steels.* s.l. : American Society for Metals, 1986.

MacKenzie, P.M. and Forrester, M.A. 2008. *Sailboat propeller drag.* s.l. : Ocean Engineering, 2008.

Marcelo Alves da Fonseca, Simone Gonçalves Silva Campos,Reginaldo P. Barbosa. 2004. *Recristalização de um Aço Inoxidável Austenítico/ Uma Abordagem.* 2004.

Marsh, G. 2004. *A new star for marine propellers* . 2004.

Motley, M.R., Liu, Z. e Young, Y.L. 2009. *Utilizing fluid-structure interactions to improve energy efficiency of composite marine propellers in spatially varying wake.* 2009.

Mouritz, A.P., et al. 2001. *Review of advanced composite structures for naval ships and submarines.* 2001.

Nasseh, J. 1999. *Hélice: Os conceitos básicos (parte 1).* s.l. : Revista Náutica, 1999.

Ningshen, S., et al. 2007. *Semiconducting and passive film propeties of nitrogen-containing type 316LN stainless steels* . 2007.

Ochoa, Diana Maria López. 2007. *Estudo do Desgaste Erosivo-Corrosivo de Aços Inoxidáveis de Alto Nitrogênio em Meio Lamacento.* São Paulo : s.n., 2007.

Oliveira, Artur Ribeiro de. 2015. *Comportamento ao desgaste erosivo de um aço inoxidável utilizado em hélice de moto aquática.* 2015.

Ribeiro, Rubens. 2004. *Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria Sucroalcooleira.* Ilha Solteira : s.n., 2004.

Roy, M. 2006. *Elevated temperature erosive wear of metallic materials.* s.l. : Journal of Physics, 2006.

Sabará, Ely Wagner Ferreira. 2013. *Caracterização Microestrutural e Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Austeníticos utilizados em aplicações como Biomateriais.* 2013.

Searle, T. 1998. *Composites Final Frontier* . 1998.

Sendriks, A. J. 1996. *Corrosion of Stainless steels* . New York : Wiley Inter-science, 1996.

Tabakoff, W. e Vittal, B.V.R. 1983. *High Temperature Erosion Study of INCO 600 Metal.* 1983.

Talbot, D. e Talbot, J. 1998. *Corrosion Science and Technology.* 1998.

Tebecherani, Ciro de Toledo Piza. 2007. *Aços Inoxidáveis.* 2007.

Wainer, E., Brandi, D.S. e Homen, F.D. 1992. *Soldagem Processos e Metalurgia.* São Paulo : Edgard Blucher, 1992.

Young, Y.L. 2008. *Fluid-structure interaction analysis of flexible composite marine propellers.* s.l. : Journal of Fluids and Structures, 2008. Vol. 24.