



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Instituto Politécnico

Victor Guilherme Amaral Springer

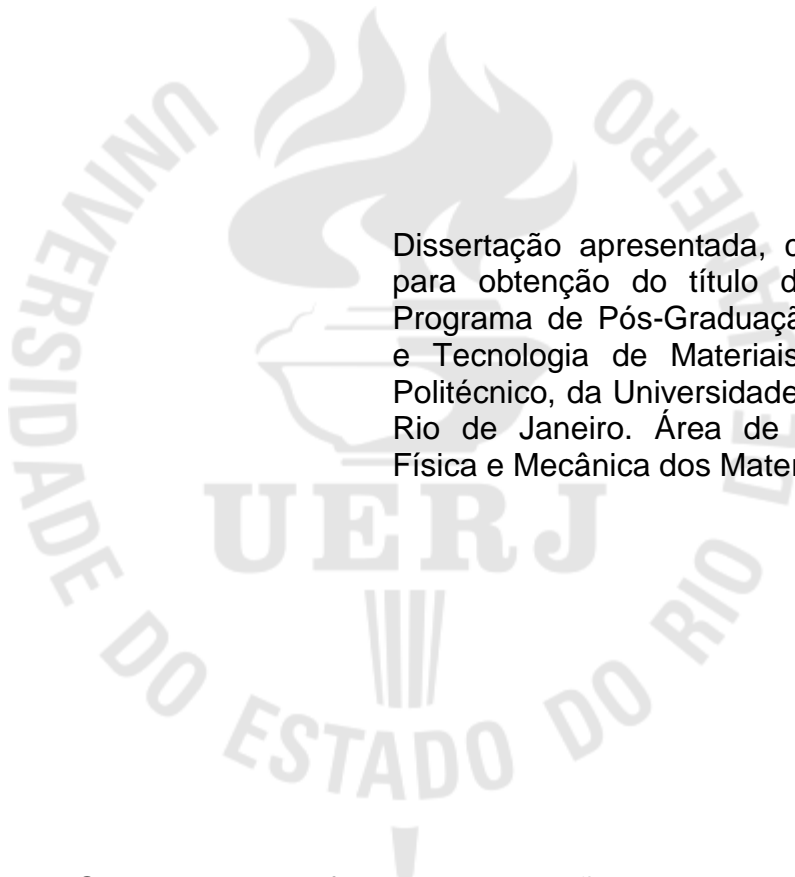
**Análise tribológica na interface aço carbono SAE 1020 e  
poliamida 11 em sistemas de deslizamento automotivos**

Nova Friburgo

2015

Victor Guilherme Amaral Springer

**Análise tribológica na interface aço carbono SAE 1020 e  
poliamida 11 em sistemas de deslizamento automotivos**



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e Mecânica dos Materiais.

Orientadores: Prof. Dr. Ivan Napoleão Bastos  
Prof. Dr. Ana Cristina Fontes Moreira

Nova Friburgo  
2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

S769 Springer, Victor Guilherme Amaral.  
Análise tribológica na interface aço carbono SAE 1020 e poliamida 11 em sistemas de deslizamento automotivos / Victor Guilherme Amaral Springer. - 2015. 89 f.: il.

Orientadores: Ivan Napoleão Bastos e Ana Cristina Fontes Moreira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Aço – Corrosão – Teses. 2. Corrosão e anticorrosivos – Teses. 3. Tribologia – Teses. 4. Desgaste mecânico – Teses. I. Bastos, Ivan Napoleão. II. Moreira, Ana Cristina Fontes. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. IV. Título.

CDU 620.19:669.14

Autorizo apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data


Victor Guilherme Amaral Springer

**Análise tribológica na interface aço SAE 1020 e poliamida 11 em sistemas de deslizamento automotivos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Física e Mecânica dos Materiais


Aprovada em 05 de outubro de 2015.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Ivan Napoleão Bastos (Orientador)

Instituto Politécnico - UERJ



Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Ana Cristina Fontes Moreira (Orientadora)

Instituto Politécnico - UERJ



Prof. Dr. Luis César Rodrigues Aliaga

Instituto Politécnico - UERJ



Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Maria da Penha Cindra Fonseca

Universidade Federal Fluminense

Nova Friburgo

2015

## DEDICATÓRIA

À minha esposa Carina, pelo incentivo e paciência em toda a trajetória de desenvolvimento do trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Ivan Napoleão Bastos – pela paciência e crédito na minha trajetória acadêmica.

À Professora Ana Cristina Fontes Moreira – pela confiança e apoio efetivo no desenvolvimento do trabalho.

Ao Colega Danilo Pedro Silva – pelo apoio e instruções para realização dos ensaios.

À Empresa NFP Automotive – pelo investimento realizado no trabalho.

Aos meus pais, Luiza Helena e José Guilherme – pela oportunidade da vida acadêmica.

A beleza está nos olhos de quem vê.

*Victor Springer*

## RESUMO

SPRINGER, Victor Guilherme Amaral. Análise tribológica na interface aço carbono SAE 1020 e poliamida 11 em sistemas de deslizamento automotivos. 2015. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2015.

Sistemas deslizantes com interface formada com aços baixa liga e polímeros variados são vastamente utilizados na indústria automotiva em sistemas de transmissão de torque submetidas à carregamento axial. Geralmente esses sistemas são acoplados aos sistemas de direção e interagem quase diretamente com o usuário final do veículo. Para conhecer as condições de desgaste mais severas as quais esses sistemas são submetidos e tentar minimiza-las, foi proposta a análise tribológica, em tribômetro do tipo pino-no-disco, da interface aço SAE 1020 com poliamida 11 em água destilada, solução aquosa com 5% em massa de cloreto de sódio e solução aquosa com 184,21 g/l. de areia natural, de acordo com as normas técnicas automotivas VW PV1210:2010-02 e VW PV2982:2013-07. Os ensaios foram realizados em frequências de 3,0 Hz e 1,5 Hz com quantidade fixada em 10.000 ciclos de rotação. O potencial de corrosão em circuito aberto foi monitorado ao longo dos ensaios e a taxa de desgaste foi calculada. Foram evidenciados maiores coeficientes de atrito, maiores taxas de desgaste e maiores amplitudes de potencial de corrosão nas amostras ensaiadas em solução de areia; com valores mais brandos para as amostras ensaiadas em água destilada e valores intermediários para as amostras ensaiadas em solução de cloreto de sódio.

Palavras-chave: Tribologia. Desgaste. Tribocorrosão. Mecanismos de desgaste.

Poliamida 11. Aço carbono SAE 1020.



## ABSTRACT

SPRINGER, Victor Guilherme Amaral. Tribological analysis in carbon steel SAE 1020 and polyamide11 interface in automotive sliding systems. 2015. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2015.

Sliding systems with interface formed by low alloy steels and various polymers are widely used in the automotive industry in torque transmission systems subjected to axial loading. Usually these systems are coupled to steering systems and interact almost directly with the final user of the vehicle. To know the most severe wear conditions which these systems are submitted and attempt to overcome them, the tribological analysis was proposed on tribometer of the pin-on-disk type, on an interface formed by SAE 1020 steel with polyamide 11 in distilled water, 5 wt% aqueous solution of sodium chloride and 184,21 g/l natural sand aqueous solution in accordance with the automotive technical standards VW PV1210: 2010-02 and VW PV2982: 2013-07. The tests were performed at frequencies of 3.0 Hz and 1.5 Hz with a fixed amount of rotation of 10,000 cycles. The corrosion potential on open circuit was monitored throughout the test and the wear rate was calculated. It was highlighted higher friction coefficients, higher wear rates and higher corrosion potential amplitudes in samples assayed in sand solution; with milder values for the samples tested in distilled water and intermediate values for samples tested with sodium chloride solution.

Keywords: Tribology. Wear. Tribocorrosion. Wear Mechanisms. Polyamide 11. Carbon Steel SAE 1020.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pintura rupestre demonstrando a aspersão de água para a redução de atrito no Egito 2.400 AC.....	18
Figura 2 - Tribômetros, desenvolvidos por Leonardo da Vinci, para a determinação da força de atrito.....	19
Figura 3 - Curvas de coeficiente de atrito das amostras revestidas e texturizadas...	20
Figura 4 - Taxa de desgaste da esfera de SAE 52100 em função do tipo de revestimento.....	21
Figura 5 - Curvas de coeficiente de atrito.....	22
Figura 6 - Relação de dureza das amostras antes e após os ensaios de desgaste.....	23
Figura 7 - Desenho esquemático do mecanismo de desgaste abrasivo.....	24
Figura 8 - Esquemas demonstrativos dos mecanismos de desgaste abrasivos.....	25
Figura 9 - Desenho esquemático do mecanismo de desgaste adesivo.....	25
Figura 10 - Desenho esquemático do mecanismo de desgaste corrosivo.....	26
Figura 11 - Desenho esquemático do mecanismo de desgaste por fadiga superficial.....	27
Figura 12 - Exemplo de perfil de rugosidade.....	28
Figura 13 - Curvas de coeficiente de atrito com variação da concentração da solução salina.....	29
Figura 14 - Curvas de coeficiente de atrito com variação do carregamento normal..	30
Figura 15 - Efeito do potencial no volume desgastado do tungstênio.....	31
Figura 16 - Correlação entre o coeficiente de atrito, a corrente de corrosão e a posição na trilha.....	32
Figura 17 - Efeito do potencial anódico aplicado nos ensaios de tribocorrosão.....	33
Figura 18 - Evolução no tempo do coeficiente de atrito do aço DIN 34CrNiMo6 com potencial aplicado de -0,65V vs. ESM.....	34
Figura 19 - Modelo genérico de eixo cardã.....	36
Figura 20 - Corte parcial do eixo cardã.....	36
Figura 21 - Esquema da localização das amostras no tribômetro.....	37
Figura 22 - Variação do coeficiente de atrito por pressão em função da distância percorrida no ensaio.....	40

Figura 23 - Variação da taxa de desgaste específica em função da pressão aplicada para velocidade de deslizamento de 1,0m/s.....	40
Figura 24 - Máquina de indução magnética FLEXITUNE®, da Inductotherm.....	46
Figura 25 - Equipamento para medição distribuição de tamanho de partículas.....	47
Figura 26 - Tribômetro do tipo pino no disco utilizado nos ensaios.....	47
Figura 27 - Esquema de ensaio pino no disco rotativo.....	48
Figura 28 - Curva de calibração da velocidade no equipamento.....	49
Figura 29 - Exemplo do sinal tratado de um ensaio no tribômetro.....	52
Figura 30 - Fluxograma de descrição das etapas de discussão dos resultados.....	55
Figura 31 - Distribuição média do tamanho de partícula da areia natural ensaiada..	57
Figura 32 - Comparação da distribuição média do tamanho de partícula das areias 004-D e da areia natural ensaiada.....	57
Figura 33 - Poliamida 11 ensaiada em água destilada e 3,0 Hz.....	62
Figura 34 - Poliamida 11 ensaiada em água destilada e 1,5 Hz.....	63
Figura 35 - Poliamida 11 ensaiada em solução aquosa a 5% em massa de NaCl e 3,0 Hz.....	64
Figura 36 - Poliamida 11 ensaiada em solução aquosa com areia.....	65
Figura 37 - Gráfico de efeitos dos parâmetros do tipo da solução utilizada.....	66
Figura 38 - Gráfico de efeitos dos parâmetros de tipo de solução utilizada.....	67
Figura 39 - Gráfico de efeitos dos parâmetros de tipo de solução utilizada.....	68
Figura 40 - Curvas do ensaio tribológico em água destilada com frequência de 3,0 Hz.....	69
Figura 41- Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 18.....	70
Figura 42 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 20.....	71
Figura 43 - Curvas do ensaio tribológico em água destilada com frequência de 1,5 Hz.....	72
Figura 44 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 27.....	73
Figura 45 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 8.....	73
Figura 46 - Curvas do ensaio tribológico em solução 5% em peso de cloreto de sódio com frequência de 3,0 Hz.....	74
Figura 47 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 9.....	75
Figura 48 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 15.....	76
Figura 49 - Curvas do ensaio tribológico em solução 5% em peso de cloreto de sódio com frequência de 1,5Hz.....	77

Figura 50 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 12.....	78
Figura 51 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 16.....	79
Figura 52 - Curvas do ensaio tribológico em solução 700g/gal. de areia com frequência de 3,0 Hz.....	80
Figura 53 - Superfície pós-ensaio tribológico em solução de areia a 3,0 Hz.....	81
Figura 54 - Curvas do ensaio tribológico em solução 700g/gal. de areia com frequência de 1,5 Hz.....	82
Figura 55 - Superfície pós-ensaio tribológico em solução de areia e 1,5 Hz.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço VC9 (% peso).....	20
Tabela 2 - Soluções para os ensaios tribológicos.....	34
Tabela 3 - Rugosidade das superfícies de acoplamento.....	37
Tabela 4 - Pressão de contato nas superfícies de desgaste da poliamida.....	37
Tabela 5 - Composição química catalogada do aço carbono SAE1020 ensaiado....	43
Tabela 6 - Mapa de Experimentos.....	50
Tabela 7 - Distribuição granulométrica da areia padronizada 004-D “air cleaner dust fine” .....	56
Tabela 8 - Distribuição granulométrica da areia natural ensaiada.....	56
Tabela 9 - Parâmetros Pré-teste do ensaio tribológico.....	58
Tabela 10 - Enumeração da taxa de desgaste nos ensaios tribológicos.....	60
Tabela 11 - Sequência das análises morfológicas da poliamida.....	62

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da Superfície exposta
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
$C_0$	Taxa de Corrosão
$C_w$	Taxa de Corrosão sob efeito de desgaste
ESM	Eletrodo de sulfato de mercúrio
$H_d$	dureza do disco
$H_p$	dureza do pino
HV	dureza Vickers
k	Taxa de Desgaste específica
L	Distância percorrida no teste
m	massa
M	molar
mm	milímetro
mV	milivolt
N	Newton
$N$	carga normal
rpm	rotações por minuto
S	componente do Efeito de Sinergia
t	tempo
T	Perda Total de material da amostra
V	volume desgastado
$W_0$	Taxa de desgaste
$W_c$	Taxa de Desgaste sob efeito de corrosão
wt%	weigh percentage
$\Delta$	variação
$\rho$	densidade do material

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
<b>1.1</b>	<b>Tribologia</b> .....	17
<b>1.2</b>	<b>Mecanismos de Desgaste</b> .....	23
1.2.1	<u>Mecanismo de desgaste abrasivo</u> .....	24
1.2.2	<u>Mecanismo de desgaste adesivo</u> .....	25
1.2.3	<u>Mecanismo de desgaste corrosivo</u> .....	26
1.2.4	<u>Mecanismo de desgaste por fadiga superficial</u> .....	26
<b>1.3</b>	<b>Tribocorrosão</b> .....	27
<b>1.4</b>	<b>Interface Aço – Polímero: Tribologia em conjuntos deslizantes de sistemas de transmissão de torque automotivos</b> .....	35
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	42
<b>2.1</b>	<b>Materiais</b> .....	42
2.1.1	<u>Aço SAE 1020</u> .....	42
2.1.2	<u>Poliamida 11</u> .....	43
<b>2.2.</b>	<b>Preparação das amostras</b> .....	44
2.2.1	<u>Discos de aço SAE 1020</u> .....	44
2.2.2	<u>Pinos Revestidos de Poliamida 11</u> .....	44
<b>2.3</b>	<b>Soluções</b> .....	45
2.3.1	<u>Solução de Areia: determinação da distribuição do tamanho de partícula</u> .....	45
<b>2.4</b>	<b>Equipamentos</b> .....	46
2.4.1	<u>Calibração da velocidade de rotação do tribômetro</u> .....	49
<b>2.5</b>	<b>Metodologia dos Ensaios</b> .....	50
2.5.1	<u>Delineamento do experimento (DOE)</u> .....	50
2.5.2	<u>Filtro de suavização de sinal</u> .....	51
2.5.3	<u>Avaliação do desgaste</u> .....	52
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	55
<b>3.1</b>	<b>Medição da distribuição de tamanho de partícula</b> .....	55
<b>3.2</b>	<b>Ensaio Tribológico</b> .....	58
3.2.1	<u>Taxa de desgaste</u> .....	59

3.2.2	<u>Avaliação Tribológica da Poliamida 11</u> .....	61
3.2.3	<u>Avaliação Tribológica do aço SAE1020</u> .....	66
3.2.3.1	Aço SAE1020 em Água Destilada.....	69
3.2.3.2	Aço SAE1020 em solução 5% de cloreto de sódio.....	74
3.2.3.3	Aço SAE1020 em solução 700g/gal. de areia natural.....	79
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	84
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	86



## INTRODUÇÃO

Atualmente, quando pensamos em adquirir um veículo, procuramos um produto capaz de nos proporcionar conforto e segurança. Usando a visão de conforto, componentes dos sistemas de direção dos veículos atuais são compostos por interfaces de deslizamento que propiciam, junto com o conjunto de amortecimento do carro, a sensação de conforto e estabilidade na condução. As interfaces deslizantes na direção de um veículo atuam sob carregamento axial oscilatório, movimento da suspensão do veículo na rodagem, e sob solicitação de torque, movimento de giro do volante. Esses componentes de deslizamento são compostos geralmente por interfaces metal-polímero, onde os materiais metálicos mais utilizados são os aços ligas especiais para conformação e os aços SAE1008, SAE1010 e SAE1020. Os materiais poliméricos consagrados para esse fim são as poliamidas 6,6, 10 e 11, com ou sem adição de poli(tetrafluoretileno) (PTFE TEFLON®). Visando a segurança no uso do veículo, a garantia da manutenção do desempenho da atuação do conjunto deslizante fez com que estudos e análises da erosão e da corrosão na interface fossem cogitados. A degradação dos materiais nessa interface pode ocasionar o desgaste prematuro dos componentes do sistema de direção, o ruído audível e a sensação de tranques, que causam desconforto ao motorista na condução do veículo, ou até o travamento do sistema, possibilitado pela formação de corrosão na superfície metálica, o que aumenta substancialmente o coeficiente de atrito na interface. A disposição da interface de atrito nesses sistemas se assemelha a da configuração dos ensaios tribológicos do tipo pino-no-disco – que, por este motivo, foi a metodologia de ensaios utilizada no presente trabalho – na qual foram realizadas análises de desgaste na interface formada com o aço SAE 1020 e poliamida 11, interface usada em sistemas de direção das maiores montadoras de veículos do mercado. Os ensaios tribológicos foram realizados com a interface submersa em água destilada, solução de 5% em massa de cloreto de sódio e solução de areia natural com concentração de 184,21 gramas de areia por litro de água destilada. A distribuição de tamanho de partícula do aglomerado de areia foi usada como parâmetro de caracterização do material. Os ensaios foram realizados com distância, percorrida no deslizamento, fixada em 10.000 ciclos de rotação (equivalente a aproximadamente 305 m lineares) em frequências de 1,5 Hz e 3,0

Hz. Os coeficientes de atrito dos ensaios foram medidos com carregamento normal igual a  $1.816,0 \pm 2,0$  gramas sobre a interface. As amostras de aço foram categorizadas em dois níveis de rugosidade média: menor que  $1,0 \mu\text{m}$  e maior ou igual a  $1,0 \mu\text{m}$ . O planejamento fatorial completo dos experimentos foi realizado utilizando o Software estatístico MINITAB<sup>®</sup>. O cálculo das taxas de desgaste nas amostras de aço e a análise morfológica das amostras metálicas e de poliamida permitiu conhecer quais parâmetros de entrada dos ensaios mais exercem influência nas taxas de desgaste e nos mecanismos de desgaste associados a cada análise morfológica em ambos os materiais. Os ensaios tribológicos em água destilada apresentaram taxas de desgaste mais brandas em ambos os tipos de material, enquanto que nos ensaios em solução de cloreto de sódio as taxas de desgaste do aço foram maiores que nos ensaios com solução de areia. Já na poliamida, onde a morfologia foi a principal análise, as amostras apresentara maior degradação nos ensaios em solução de areia.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O termo tribologia foi usado oficialmente em 1966 e definido como “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” por H. Peter Jost (JOST, 1990).

### 1.1 Tribologia

O termo tribologia vem do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo). Este termo pode ser transcrito como uma interação entre conceitos físico-químicos estudados nas ciências dos materiais para elucidar e mapear comportamentos químico e mecânico de interfaces sob efeito de carregamento, a fim de estudar fenômenos de lubrificação, atrito e desgaste dos materiais (ROSA, 2012).

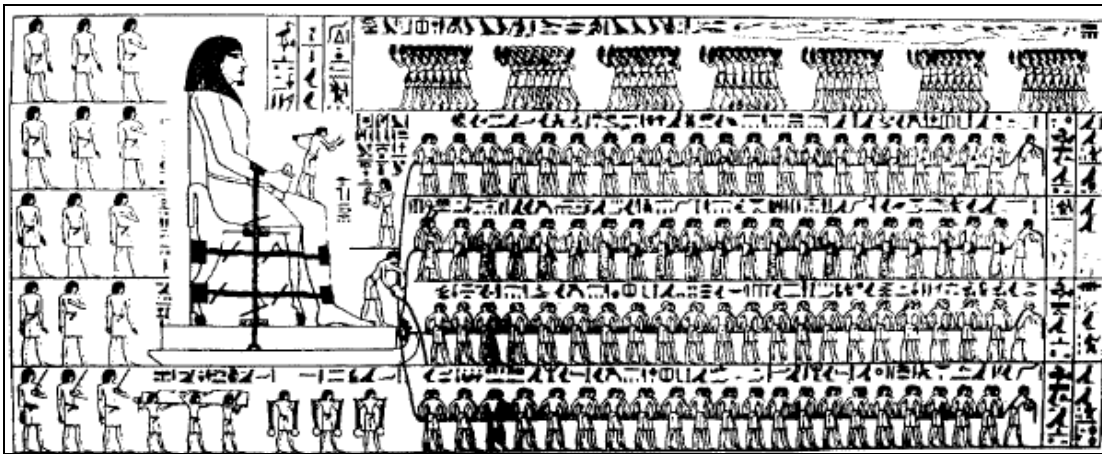
Quantidade significativa de material arqueológico demonstra a participação de conhecimentos associados à tribologia na história do desenvolvimento tecnológico da humanidade. O atrito entre lascas e pedaços de madeira e pedras era usado para gerar fogo por nômades durante o período Paleolítico<sup>1</sup>; enquanto no período Mesolítico<sup>2</sup>, há relatos da utilização de novos materiais e técnicas para utilização em ferramentas de trabalho e instrumentos de caça. Relatos do antigo Egito demonstram, na Figura 1, a utilização de líquido sob a área de atrito de uma imensa estátua com o solo para redução do atrito para movimentação a fim de possibilitar seu transporte (RADI et al., 2007).

---

1 Paleolítico: Também conhecido como Idade da Pedra Lascada, corresponde ao intervalo entre a primeira utilização de utensílios de pedra pelo homem (cerca de 2 milhões de anos atrás) até ao início do Neolítico (cerca de 10 mil A.C.).

2 Mesolítico: Período de transição entre o Paleolítico e o Neolítico. É marcado principalmente pelo fim das eras glaciais e adequação da temperatura da terra à prática da agricultura.

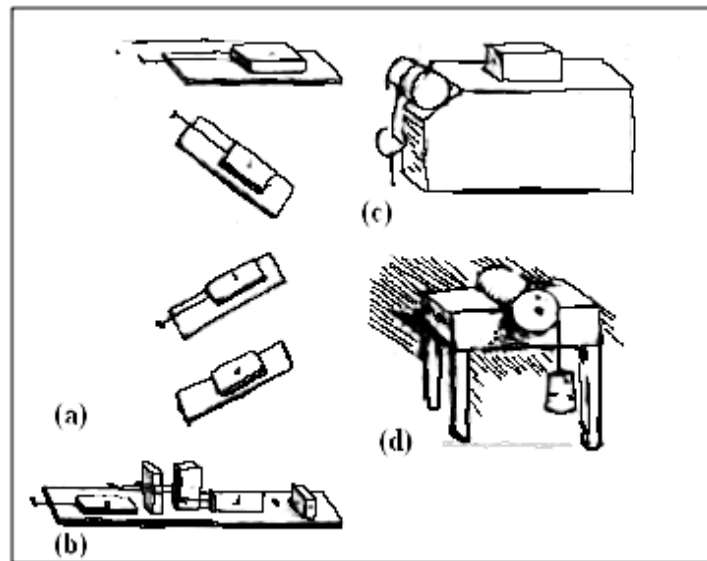
Figura 1 - Pintura rupestre demonstrando a aspersione de água para a redução de atrito no Egito 2.400 AC.



Fonte: LAYARD, 1853.

Os estudos realizados a partir da medição das forças de atrito em planos multidirecionais por Leonardo da Vinci (1452 – 1519), na Renascença, demonstraram a interdependência entre essas forças e a força normal ao cisalhamento na interface e independência da área de contato aparente. A partir daí, Leonardo propôs a distinção entre atrito de rolamento e atrito de escorregamento e definiu o coeficiente de atrito como sendo proporcional à carga normal à qual a interface estudada foi submetida (ZUM-GAHR, 1987). Podem ser apreciadas, na Figura 2, algumas representações de equipamentos para medição das forças de atrito desenvolvidos por Leonardo da Vinci.

Figura 2 - Tribômetros, desenvolvidos por Leonardo da Vinci, para a determinação da força de atrito



Legenda: (a) - em superfícies multidirecionais; (b) - considerando o efeito da área aparente; (c) - utilizando uma polia; e (d) - considerando o torque num cilindro.

Fonte: RADl et al., 2007.

O trabalho de Jost foi pioneiro na demonstração dos impactos positivos com respeito, principalmente, à redução de custos e perdas atribuídas aos fenômenos de desgaste e atrito com o uso dos conhecimentos adquiridos nos estudos tribológicos (JOST, 1966). Com base nessas demonstrações, vários estudos foram conduzidos a fim de conhecer a natureza dos fenômenos associados ao desgaste e as suas implicações.

Nos ensaios tribológicos realizados por Gonçalves Junior e Mello (2012), amostras de aço liga VC9, fornecido pela Divisão de Cilindros da Gerdau S. A., com composição química descrita na Tabela 1, foram utilizadas nos testes de desgaste. As amostras foram normalizadas a 920°C e revenidas a 600°C e posteriormente temperadas a 920°C com revenimento a 280°C para homogeneização da dureza na superfície de ensaio.

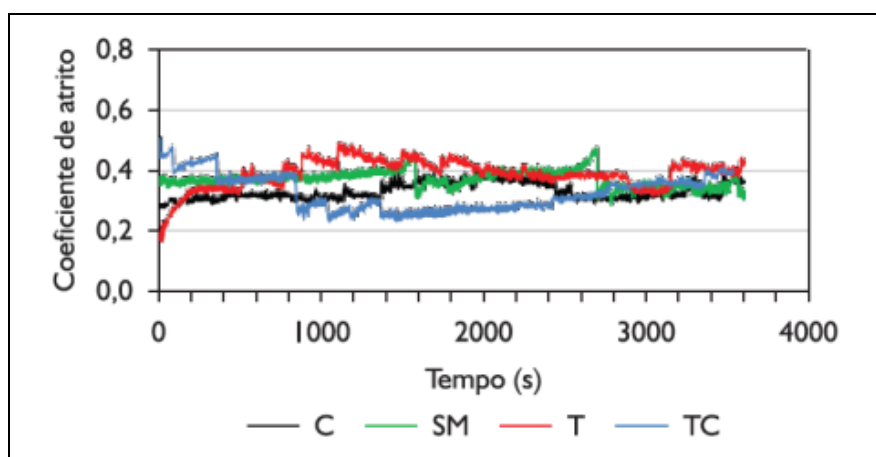
Tabela 1 - Composição química do aço VC9 (% massa)

<i>Elemento</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
Mínimo	0,81	0,20	0,2	0,0	3,4	0,33
Máximo	0,84	0,35	0,3	0,2	3,6	0,43
	<i>V</i>	<i>W</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>
Mínimo	0,0	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	0,1	0,10	0,02	0,02	0,02	0,25

Fonte: Adaptado de GONÇALVES JUNIOR; MELLO, 2012.

Depois de verificada a condição de homogeneidade da dureza, as amostras foram texturizadas com jatos de granalha de aço, de diâmetro 7 mm, e foi aplicada camada de cromo em banho ausente de flúor. Os grupos de amostras foram divididos em: amostras retificadas (SM), cromadas (C), cromadas e texturizadas (CT), texturizadas (T) e amostras texturizadas e cromadas (TC). Em seguida, mediu-se a micro dureza Vickers nas superfícies revestidas. Esferas de aço liga SAE 52100 com 10 mm de diâmetro foram usadas como contra corpo nos ensaios em tribômetro de movimento alternado, do tipo vai-e-vem, com curso de deslizamento de 10 mm e carga normal aplicada de 9,8 N. A Figura 3 mostra o comportamento das curvas de coeficiente de atrito dos ensaios tribológicos realizados.

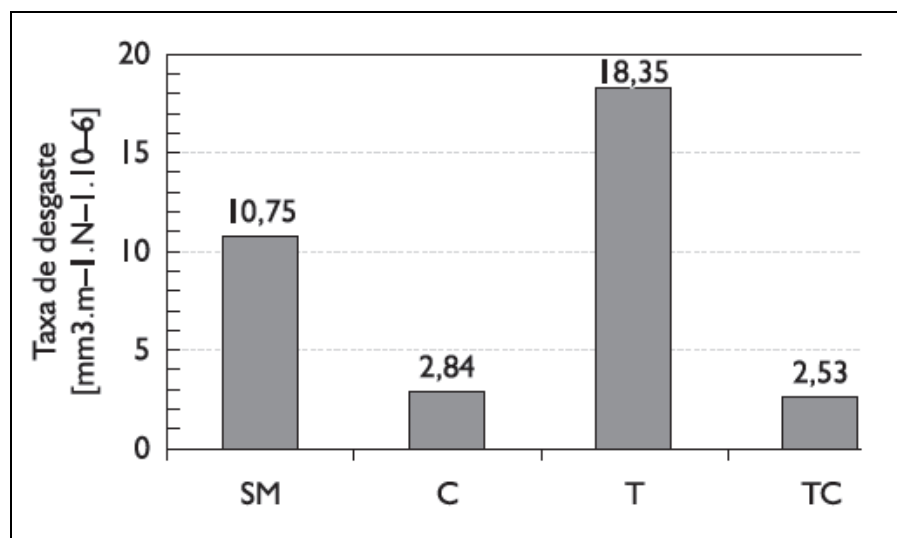
Figura 3 - Curvas de coeficiente de atrito das amostras revestidas e texturizadas



Fonte: GONÇALVES JUNIOR; MELLO, 2012.

Os autores verificaram que as amostras cromadas desgastaram menos o contra corpo esférico, enquanto que nas texturizadas a área desgastada no contra corpo foi maior. A taxa de desgaste foi calculada e verificou-se a ocorrência de mecanismo de desgaste abrasivo nos ensaios. A Figura 4 mostra a relação das taxas de desgaste calculadas com as amostras ensaiadas e nos permite associar as menores áreas desgastadas às menores taxas de desgaste.

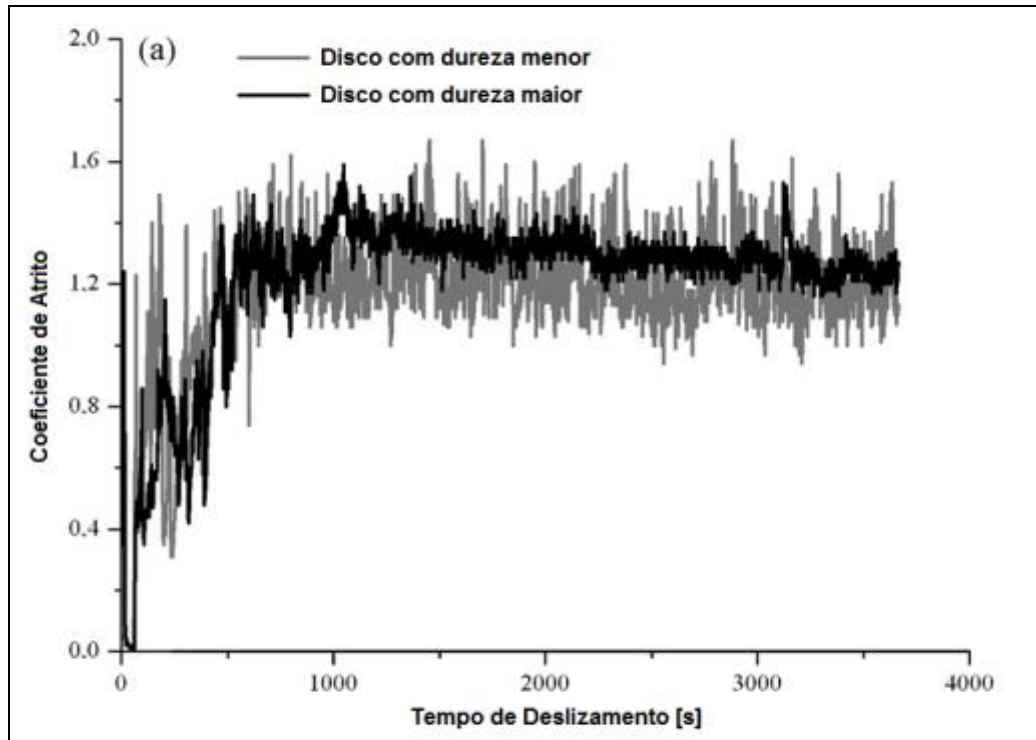
Figura 4 - Taxa de desgaste da esfera de SAE 52100 em função do tipo de revestimento



Fonte: GONÇALVES JUNIOR; MELLO, 2012.

Viáfara e Sinatora (2009) verificaram a influência da dureza dos corpos na taxa de desgaste da interface formada pelos aços AISI 4140 (amostra) e AISI H13 (contra corpo) por meio de ensaios tribológicos em equipamento do tipo pino-no-disco. Os discos de AISI 4140 foram limpos antes e imediatamente após os ensaios de desgaste em tanque com água, submetido à ultrassom. Foi aplicada carga normal de 10N sobre a interface, com velocidade de rotação de 30 rpm em um diâmetro médio de trilha de 50 mm, o que resultou em uma velocidade linear de 0,01 m/s. Os tempos de ensaio foram determinados em 3.600 segundos. Ambos os aços foram temperados para adquirir nível de dureza em  $433,5 \pm 15$  HV, para os pinos de AISI H13,  $460 \pm 19,7$  HV e  $525 \pm 27,7$  HV, para os discos de AISI 4140. A Figura 5 ilustra o comportamento das curvas de coeficiente de atrito em função do tempo de deslizamento para as amostras ensaiadas, onde se pode verificar a ocorrência de regime estacionário a partir de aproximadamente 900 segundos de deslizamento.

Figura 5 - Curvas de coeficiente de atrito

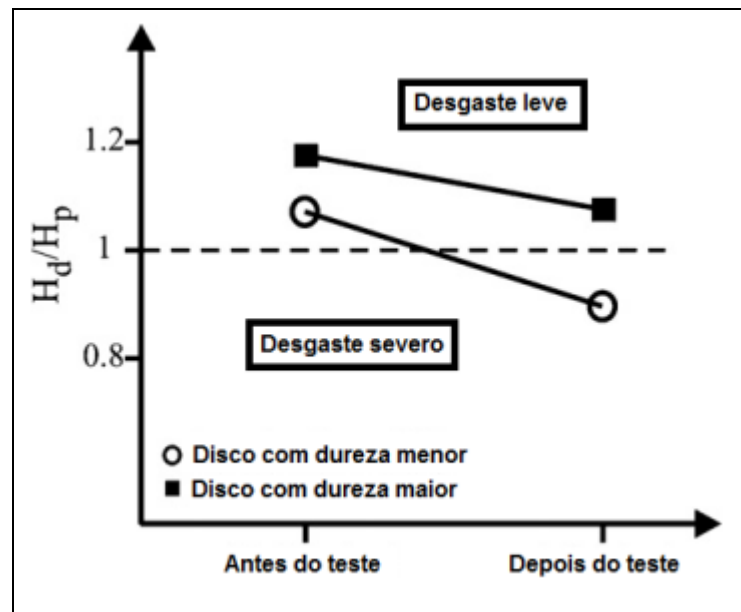


Fonte: Adaptado de VIÁFARA; SINATORA, 2009.

Na análise dos ensaios, foram verificados um regime leve e um regime severo de desgaste dos discos, para os discos de maior e menor dureza respectivamente. O regime de desgaste severo promoveu maior perda de material, como era de se esperar, e em ambos foram detectados decréscimos na dureza da superfície atritada em relação à dureza do disco antes do teste. A Figura 6 mostra a relação da proporção entre a dureza antes do teste e a dureza depois do teste com a realização dos próprios ensaios. Daí, os autores observaram que quando há diferença significativa na dureza entre os materiais da interface, o mecanismo de desgaste pode ser preponderantemente abrasivo, com desgaste por deformação plástica. E quando há pouca diferença entre essas durezas, há possibilidade de ocorrer desgaste adesivo na interface anterior ao desgaste abrasivo.



Figura 6 - Relação de dureza das amostras antes e após os ensaios de desgaste



Fonte: Adaptado de VIÁFARA; SINATORA, 2009.

## 1.2 Mecanismos de Desgaste

O desgaste é definido pela norma ASTM G40-05 como “dano a uma superfície sólida, geralmente envolvendo progressiva perda de material, devido ao movimento relativo entre esta e uma superfície de contato” e é proposto pela ciência dos materiais como efeito da erosão do material de uma superfície quando esta é submetida à ação de outra substância qualquer. Os efeitos do desgaste podem ser classificados pelo modo, que está relacionado ao tipo de contato entre as superfícies da interface (deslizamento, erosão, impacto, deformação plástica e rolagem), e mecanismos, que estão relacionados à maneira que o material é removido das superfícies da interface. Estes mecanismos de desgaste podem ser classificados como: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste corrosivo e desgaste por fadiga superficial; de acordo com a designação da norma DIN50320 (1979-12).

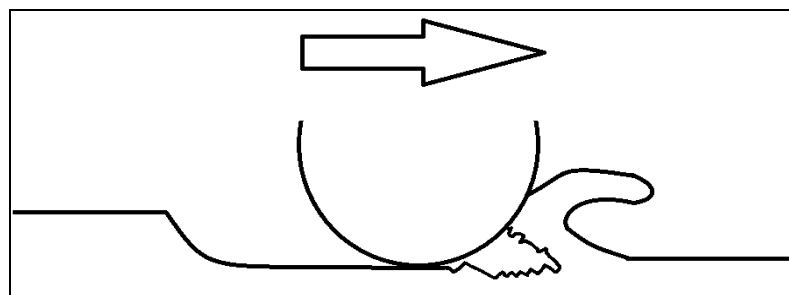
Durante o trabalho da interface submetida ao efeito do atrito, os mecanismos de desgaste podem ocorrer de maneira simultânea. A diferença entre as características mecânicas dos materiais que compõem as superfícies determinam o tipo de mecanismo de desgaste predominante. Diferenças significativas de dureza

entre as superfícies dos materiais da interface promovem predominância de mecanismo de desgaste abrasivo, por exemplo. Trabalhos em interfaces formadas com polímeros e metais promovem mecanismo de desgaste adesivo com maior frequência e, como mais um exemplo, atrito entre materiais que sofrem interações eletroquímicas em suas superfícies estão sujeitas predominantemente ao mecanismo de desgaste corrosivo (DIN50320 1979-12).

### 1.2.1 Mecanismo de desgaste abrasivo

Considerando uma interface composta de materiais com superfícies de dureza diferentes, sujeitas aos carregamentos normal e de cisalhamento, a superfície mais dura remove material da superfície mais macia quando os picos de rugosidade de ambas atritam. Essa configuração promove a formação de riscos e ranhuras à medida que as solicitações, normal e de cisalhamento, são incrementadas e descreve o mecanismo de desgaste abrasivo, conforme ilustra a Figura 7.

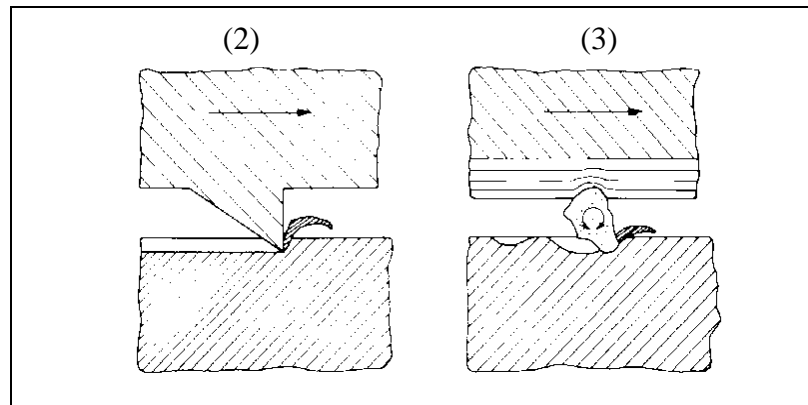
Figura 7 - Desenho esquemático do mecanismo de desgaste abrasivo



Fonte: ROSA, 2012.

Ainda considerando este mecanismo de desgaste, quando o desgaste ocorre por atrito direto do material de uma das superfícies da interface na outra, pode-se dizer que se trata do mecanismo de desgaste abrasivo de dois corpos. Já quando há ocorrência de ação de partículas sólidas pressionadas entre as superfícies da interface, o mecanismo passa a ser tratado como mecanismo de desgaste abrasivo de três corpos. A Figura 8 esquematiza a classificação destes mecanismos.

Figura 8 - Esquemas demonstrativos dos mecanismos de desgaste abrasivos

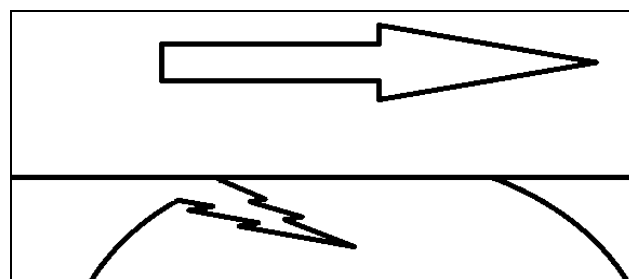


Legenda: (2) - de dois corpos; (3) - de três corpos.  
Fonte: Adaptado de SUSKI, 2004.

### 1.2.2 Mecanismo de desgaste adesivo

Quando as superfícies da interface submetida ao desgaste por meio de ensaio tribológico qualquer, ou solicitações de atrito variadas, estão sob carregamento, os picos de rugosidade de ambas, quando em contato, tendem a aderir uns aos outros devido às forças de atração entre as moléculas das superfícies. Ao provocar cisalhamento na interface, os picos de rugosidade aderidos rompem, carregando partículas da superfície menos resistente e gerando novas asperezas em ambas as superfícies, causando riscos e degradação nos materiais. Este mecanismo é conhecido como o mecanismo de desgaste adesivo, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Desenho esquemático do mecanismo de desgaste adesivo

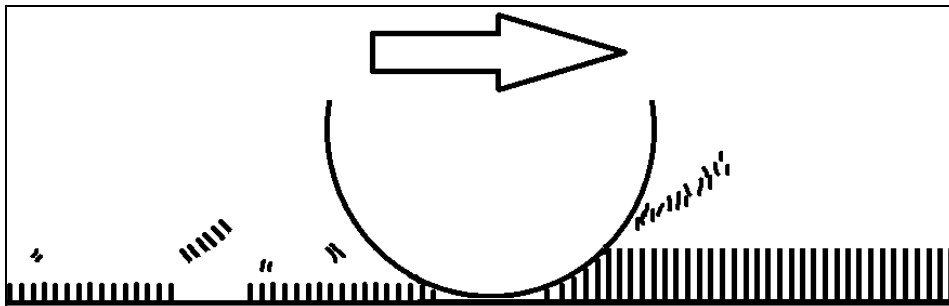


Fonte: ROSA, 2012.

### 1.2.3 Mecanismo de desgaste corrosivo

Considerando a interface imersa em ambiente corrosivo, as forças de cisalhamento promovem a ruptura e descamação das camadas passivantes salinas ou de óxidos formadas nas superfícies envolvidas, expondo o metal base ao ambiente. As partículas liberadas no descamamento dessas camadas passivantes, com o deslizamento entre as superfícies, incrementa o desgaste na interface através da formação de riscos e ranhuras. A descamação ou raspagem dos recobrimentos formados pela ocorrência de interações eletroquímicas entre os materiais da interface e o meio configuram o mecanismo de desgaste corrosivo. A Figura 10 mostra um desenho esquemático do mecanismo de desgaste corrosivo.

Figura 10 - Desenho esquemático do mecanismo de desgaste corrosivo



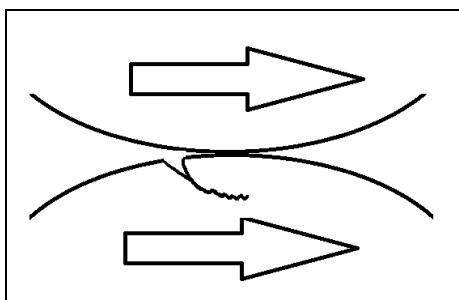
Fonte: ROSA, 2012.

### 1.2.4 Mecanismo de desgaste por fadiga superficial

As tensões de contato entre as superfícies de uma interface quando em modo de desgaste de rolamento, pode-se visualizar como dois cilindros rolando um sobre o outro, ocasionam valores máximos para as tensões de cisalhamento nas superfícies desta interface. Considerando a variação no perfil de rugosidade nestas superfícies, podem ocorrer variações nos gradientes de tensão que podem ser aproximadas para um comportamento oscilatório cíclico. Ao longo do tempo ao qual essa interface está sendo solicitada, este gradiente cíclico de tensões ocasiona

rupturas por fadiga em uma ou ambas as superfícies, gerando desgaste na interface. As micro variações de tensão nas superfícies e as rupturas por fadiga citadas explicitam o mecanismo de desgaste por fadiga superficial, ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Desenho esquemático do mecanismo de desgaste por fadiga superficial



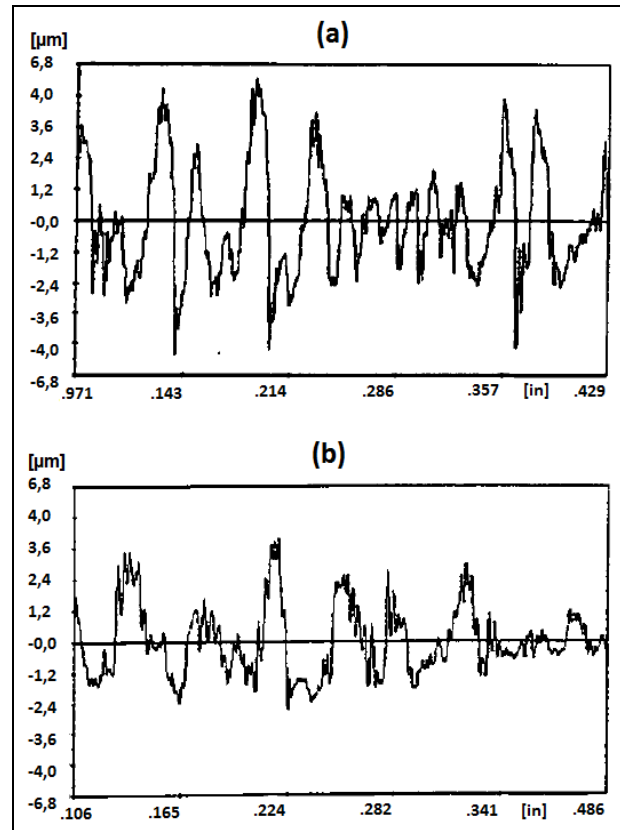
Fonte: ROSA, 2012.

### 1.3 Tribocorrosão

Quando duas superfícies distintas, sendo que pelo menos uma delas seja metálica ou que seja de um material composto com presença de material metálico em sua composição, quando sob influência de carregamento normal e submetidas a gradientes de cisalhamento na interface; há ocorrência de corrosão por atrito ou corrosão por fricção (*Fretting Corrosion*). (GENTIL, 1996).

Efeitos de fenômenos de atrito e fricção (gradientes de desgaste e perda de material nas interfaces) estão ligados ao desgaste puramente mecânico da interface. Ao adquirir o perfil de rugosidade das superfícies que compõem essa interface, nota-se a presença de micro picos de rugosidade. Quando esta é submetida aos carregamentos normal e de deslizamento, o atrito entre as duas superfícies pode ocasionar soldagem entre os micro picos de rugosidade e propiciar a ruptura destes picos por efeito de impacto. Como efeito, ocorre a atualização constante dos perfis de rugosidade das superfícies envolvidas, possibilitando a medição e avaliação do desgaste e da perda de material na interface. A Figura 12 ilustra perfis de rugosidade obtidos por meio de perfilômetro.

Figura 12 - Exemplo de perfil de rugosidade



Legenda: (a) - medição ao longo de uma linha axial;  
 (b) - perfil ao longo de uma linha radial.  
 Fonte: Adaptado de BOGARD; SCHMIDT; TABBITA,  
 1996.

O desgaste nas superfícies provém da conformação parcial e da ruptura, com descamamento, das camadas de proteção superficial de cada material envolvido, camada de passivação, revestimentos de proteção catódica, tratamentos de deposição salina e óxidos superficiais, que atuam como inibidores de corrosão.

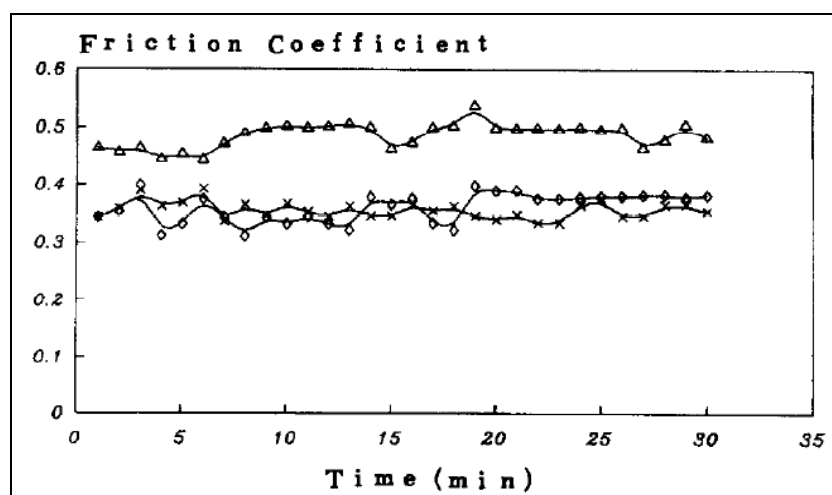
A exposição do metal base da superfície metálica, quando a proteção superficial é arrancada, propicia a formação de produtos de corrosão associados às reações eletroquímicas que ocorrem entre a solução na qual a interface está inserida (ar, soluções aquosas, misturas com lubrificantes etc.) e o material exposto; podendo ocorrer a formação de novos sais ou óxidos, hidratados ou não, ou a formação de ácidos ou hidróxidos e dissociação de gases, dependendo da natureza da solução. Deve-se considerar, também, o desprendimento de partículas do próprio metal base como agente modificador da superfície atritada, podendo este, incrementar o desgaste em ambas as superfícies da interface.

Essa interação entre os efeitos associados ao desgaste dos materiais mecânico – parcela correspondente aos fenômenos tribológicos – e os efeitos da formação dos produtos residuais das reações eletroquímicas – parcela correspondente aos efeitos associados à corrosão – é conhecida como fenômeno de tribocorrosão.

Nos estudos realizados por Wu (1993), amostras de aço inoxidável AISI 304 foram preparadas e embutidas em material isolante para somente a superfície de contato para o ensaio tribológico permanecer aparente. As amostras foram imersas em soluções controladas de cloreto de sódio (NaCl), com concentrações de 0,035, 0,35 e 3,5% em massa. A velocidade de teste foi fixada em 200 revoluções por minuto. O ensaio tribológico do tipo pino-no-disco foi realizado com a interface formada pelo aço inoxidável AISI 304 e por um pino de alumina pura ( $Al_2O_3$ ). O carregamento normal variou entre 0, 20, 40, e 60 N para demonstrar as influências destes carregamentos na progressão das curvas de medição do coeficiente de atrito.

O autor verificou, na Figura 13, que para um carregamento constante a velocidade de deslizamento no ensaio também constante, o coeficiente de atrito medido só foi significativamente incrementado quando a concentração de cloreto de sódio usada foi de 3,5% em massa.

Figura 13 - Curvas de coeficiente de atrito com variação da concentração da solução salina

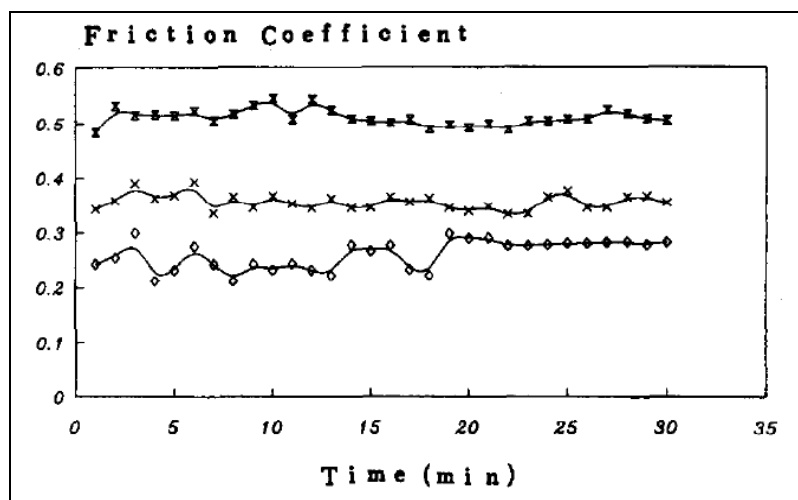


Legenda: (◇) - concentração de 0,035% em massa de NaCl; (X) - 0,35% em massa de NaCl; (△) - 3,5% em massa de NaCl.

Fonte: WU, 1993.

Já a condição descrita na Figura 14 mostra que o carregamento normal, quando aumentado (mantendo a velocidade de deslizamento e concentração da solução constantes), foi fator preponderante para o incremento do coeficiente de atrito medido. Assim, o autor verificou que para as condições ensaiadas houve relação proporcional entre o aumento da carga normal e o aumento no coeficiente de atrito.

Figura 14 - Curvas de coeficiente de atrito com variação do carregamento normal



Legenda: (◇) - 20N; (X) - 40N; (X com barra diagonal) - 60N de carga normal aplicada.  
Fonte: WU, 1993.

Já nos estudos de Landolt (2006), foram verificados e listados os fatores que afetam a taxa de tribocorrosão dos materiais. Nesses estudos, os materiais envolvidos, as solicitações mecânicas e o ambiente de ensaio são os que influenciaram significativamente os efeitos tribocorrosivos.

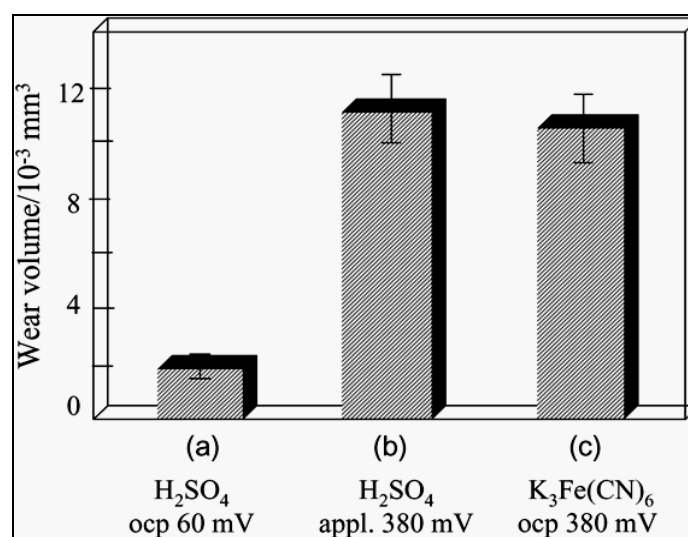
A composição química, topografia (rugosidade e revestimentos) e dureza da superfície de contato dos materiais da interface influenciaram na formação de produtos de corrosão, formação de filmes de óxidos (também, produtos de corrosão), na adsorção de moléculas orgânicas e na evolução do perfil de rugosidade da área de contato para desgaste com o tempo. Os ensaios realizados mostraram que os níveis de influência das solicitações mecânicas dependem das combinações entre as forças aplicadas sobre a interface e os tipos de contato; que podem ser contato por deslizamento, por atrito, por rolamento ou por impacto.



As cargas de deslizamento nos ensaios foram unidirecionais, visto que o equipamento utilizado foi de metodologia similar à de equipamentos do tipo pino-no-disco. Essa configuração elimina condições de teste sujeitas aos efeitos de “*stick-slip*” encontrados em ensaios onde há reversão no sentido de deslizamento ou descontinuidade na sua trajetória.

O ambiente de ensaio foi importante no que diz respeito à atmosfera corrosiva (gases ou solução para imersão), temperatura e umidade, principalmente para amostras metálicas. O desgaste em amostras submersas variou com a concentração, pH e composição química dos eletrólitos utilizados. As interações eletroquímicas ocorreram entre o material e o eletrólito, entre o material e a camada de passivação ou filme protetivo e entre o filme e o eletrólito, gerando diferenças de potencial mensuráveis. A Figura 15 mostra o volume desgastado de amostras de tungstênio em função dos ambientes de ensaio com potencial mensurado. Já a Figura 16 mostra a correlação entre o coeficiente de atrito, a corrente de corrosão e a posição na trilha em função do tempo de ensaio do desgaste de uma liga de titânio ( $Ti_6Al_4V$ ) com contra corpo de alumina em solução 0,15M NaCl; com carga aplicada de 10N, frequência de rotação de 1 Hz e potencial aplicado de 0,5 V com referência Ag/AgCl.

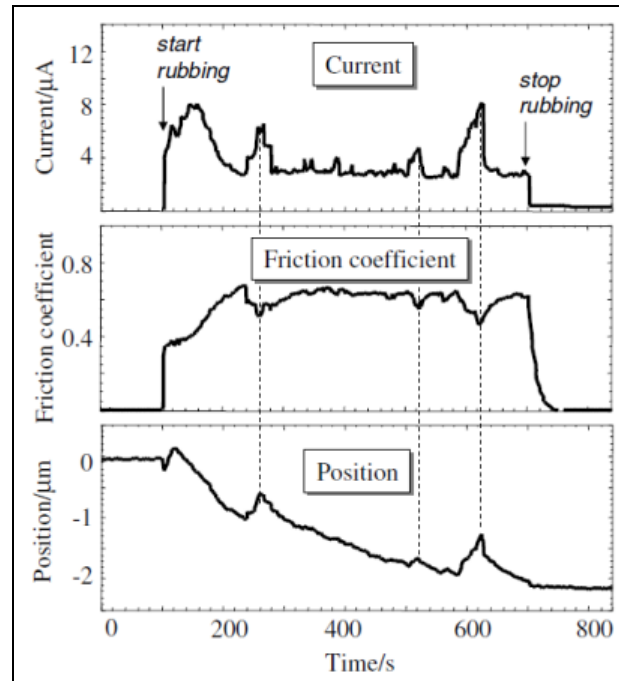
Figura 15 - Efeito do potencial no volume desgastado do tungstênio



Legenda: (ocp) - potencial de circuito aberto; (appl) - potencial aplicado.

Nota: Carga aplicada = 5N e eletrodo de referência de Ag/AgCl.  
Fonte: LANDOLT, 2006.

Figura 16 - Correlação entre o coeficiente de atrito, a corrente de corrosão e a posição na trilha



Nota: Em função do tempo de ensaio do desgaste de uma liga de titânio (Ti6Al4V) com contra corpo de alumina.

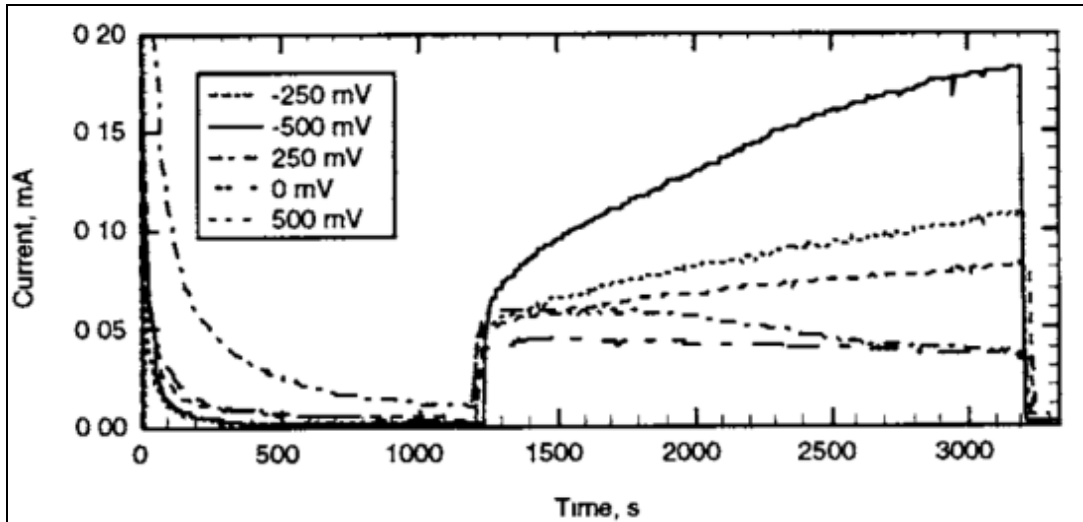
Fonte: LANDOLT, 2006.

Nos estudos de Stemp, Mischler e Landolt (2001), um tribômetro, também do tipo pino-no-disco, foi adaptado para controle eletroquímico durante os ensaios tribológicos. Os ensaios foram concebidos com as amostras imersas em soluções de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) com concentração de 0,5, 0,05 e 0,005 M e o controle eletroquímico foi feito com eletrodo de referência de sulfato de mercúrio (+658 mV vs. ESM – eletrodo de sulfato de mercúrio) e contra eletrodo de platina. As amostras foram confeccionadas em aço inoxidável AISI 430 com dureza de 205 HV 30. A frequência de rotação foi de 1 Hz e o carregamento normal aplicado foi 5 N.

A fim de estudar a cinética de repassivação, foram conduzidos ensaios com diversos índices de potencial anódico aplicados (-500, -250, 0, +250 e +500 mV vs. ESM). As amostras passaram por 20 minutos de processo de passivação antes do início do deslizamento e permaneceram por mais 30 minutos deslizando antes do término do ensaio. Nota-se, na Figura 17, que a corrente de corrosão teve decréscimo acentuado durante o processo de passivação e ao iniciar o deslizamento no ensaio, tempo de 1200 segundos, a corrente aumentou significativamente por

conta da descamação das camadas passivantes, passando a ser influenciada diretamente pelo potencial aplicado.

Figura 17 - Efeito do potencial anódico aplicado nos ensaios de tribocorrosão



Fonte: STEMP; MISCHLER; LANDOLT, 2001.

Os mecanismos de desgaste foram avaliados através de microscopia ótica, que mostraram a ocorrência de desgaste corrosivo, adesivo e abrasivo, segundo os autores. O volume desgastado das amostras foi calculado e relacionado com cada potencial aplicado nos ensaios.

No trabalho de Mischler et. al. (2001), foi estudada a degradação do aço DIN 34CrNiMo6 deslizando contra uma esfera de alumina em solução de hidróxido de sódio (NaOH) e em soluções tampão de borato com pH controlado em 8,4 sob potencial passivo aplicado. Os ensaios de tribocorrosão foram realizados com potenciais catódicos aplicados de forma a tornar a oxidação do ferro termodinamicamente impossível onde, portanto, nenhum filme passivo é formado. O equipamento utilizado nos ensaios tribológicos foi do tipo esfera-no-plano, equipado com uma célula eletroquímica. A aplicação de um potencial adequado possibilita a formação de filmes passivos induzidos na amostra. Foram usados os potenciais - 0,65 V vs. ESM (eletrodo de sulfato de mercúrio com potencial de referência +0,658 V) para passivação do ferro e o potencial catódico para análise das superfícies sem filme passivo. A tabela 2 mostra a composição das soluções utilizadas nos ensaios.

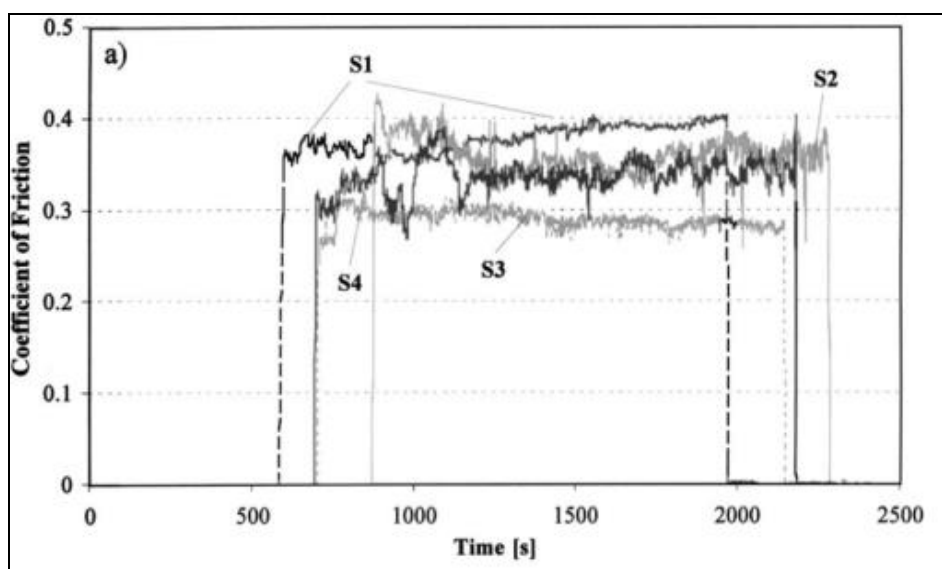
Tabela 2 - Soluções para os ensaios tribológicos

# solução	Solução	$H_3BO_3$ [M]	$Na_2B_4O_7$ [M]	$NaOH$ [M]	Outros	pH
1	Borato	0,3	0,075	-----	-----	8,4
2	Borato + Cloreto	0,3	0,075	-----	0,0172M NaCl	8,4
3	Borato + Cromato	0,3	0,075	-----	0,0038M $Na_2Cr_2O_7$	8,4
4	NaOH	-----	-----	1,0	-----	14

Fonte: Adaptado de MISCHLER et al., 2001.

Nos testes tribológicos foram usadas esferas de alumina com diâmetro de 6 mm, deslizando sobre discos do aço DIN 34CrNiMo6 na condição nominal de composição química, 0,34% C, 1,5% Cr, 0,2% Mo e 1,5% Ni, submersos nas soluções. A esfera oscilou num curso de 5 mm com frequência de 5 Hz sob carregamento normal de 5 N por 1400 segundos. Num primeiro momento, as amostras foram passivadas antes do início do deslizamento. A Figura 18 mostra as curvas de comportamento do coeficiente de atrito para as diferentes soluções.

Figura 18 - Evolução no tempo do coeficiente de atrito do aço DIN 34CrNiMo6 com potencial aplicado de -0,65 V vs. ESM



Legenda: (S1) - borato; (S2) - borato + cloreto; (S3) - borato + cromato; (S4) - NaOH.  
Fonte: Adaptado de MISCHLER et al., 2001.

Então, os autores concluíram que a degradação do aço ocorreu pelo contato das partículas desprendidas, através dos mecanismos de desgaste de adesão,

abrasão, delaminação e corrosão, com a sua superfície. Essa degradação teve como resultado manchas de oxidação no metal e partículas isoladas fora da trilha. Concluíram também, que a natureza do filme passivo foi preponderante para as propriedades mecânicas da superfície do metal.

#### **1.4 Interface Aço – Polímero: Tribologia em conjuntos deslizantes de sistemas de transmissão de torque automotivos**

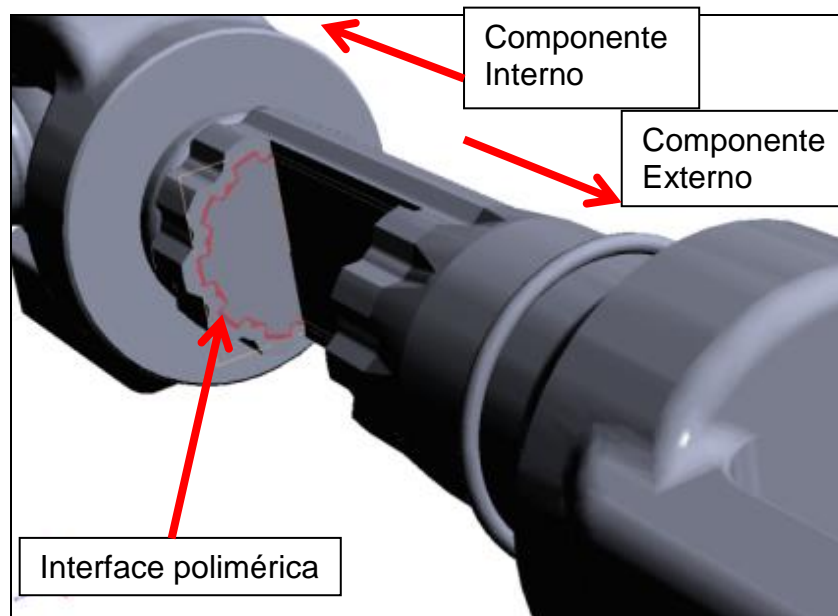
A condução de estudos tribológicos em interfaces formadas com polímeros e aços tem, em muitos casos, motivação na substituição ou incremento de sistemas de atrito com interfaces aço – aço (UNAL; SEN; MIMAROGLU, 2004). Trabalhos voltados ao estudo tribológico dos polímeros, destacando a substituição de componentes de máquinas, foram publicados por Briscoe (1990), Friedrich (1986) e Lancaster (1973). Já os mecanismos de desgaste por deformação e adesão podem ser atribuídos ao atrito entre polímeros, a partir dos trabalhos de Hutchings (1992), Lancaster (1990) e Briscoe e Sinha (2002). Citando como exemplo a indústria automotiva, é comum a utilização de rolamentos e buchas para deslizamento confeccionadas em material polimérico devido às suas características de auto lubrificação, o que faz com que o uso de lubrificantes adicionais não seja necessário e seja reduzida a penetração e retenção de impurezas na interface. A Figura 19 mostra um exemplo de esquema de um eixo cardã automotivo e a Figura 20 mostra um corte parcial do cardã com a posição mais usual da interface polimérica no sistema deslizante.

Figura 19 - Modelo genérico de eixo cardã



Fonte: O autor, 2015.

Figura 20 - Corte parcial do eixo cardã



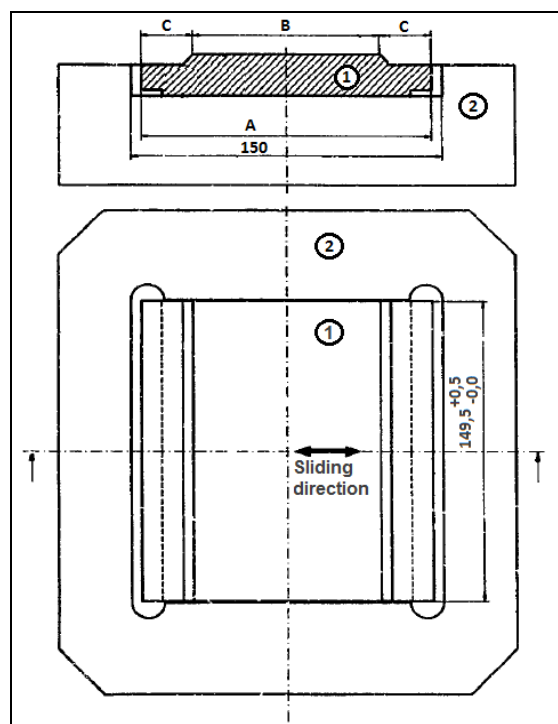
Nota: Setas indicam o sentido de movimento para abertura do sistema e posição da interface polimérica.

Fonte: O autor, 2015.

Segundo Hooke et. al. (1996), Lawrence e Stolarski (1989) e Yamaguchi (1990), o coeficiente de atrito, numa interface com polímero, pode ser reduzido e a resistência ao desgaste aumentada, proporcionando um melhor deslizamento em aços. Brentnall e Lancaster (1989), Clerico (1969) e Santner e Czichos (1989) observaram que o coeficiente de atrito de polímeros deslizando contra metais diminui com o aumento da pressão de contato ou diminuição da área de contato.

No trabalho de Van de Velde e de Baets (1996), a proposta dos testes foi investigar a possibilidade do uso da poliamida 6 como material de rolamento e posicionamento em grandes equipamentos ou construções. O foco foi o uso em sistemas em aço submetidos a grandes pressões de contato, velocidades e distâncias de deslizamento muito pequenas, onde é muito difícil ou impossível a lubrificação. Os ensaios tribológicos foram realizados num equipamento de atrito placa com placa (DE BAETS, 1994 e DEKOUINCK; DE BOERS; VAN DE VELDE, 1995) e a metodologia empregada para o deslizamento está ilustrada na Figura 21.

Figura 21 - Esquema da localização das amostras no tribômetro



Fonte: Adaptado de VAN DE VELDE; DE BAETS, 1996.

As forças de atrito, redução de espessura das amostras de poliamida 6 e a temperatura das amostras no deslizamento foram monitoradas online durante os ensaios e a sensibilidade ao “*stick-slip*” foi avaliada. As amostras de poliamida foram concebidas em dois grupos, com dimensões referenciadas com os índices A, B e C da Figura 1.23, com grupo de amostras do Tipo 1, de dimensões A = 140±0,5 mm, B = 100±0,25 mm e C = 20 mm e amostras do tipo 2, de dimensões A = 149,5±0,5 mm, B = 100±0,25 mm e C = 24,75 mm. As contra placas foram confeccionadas em aço laminado à frio (GERMAN STANDARD Nº. 1.0037) nas dimensões 420x180x20 mm acabamento superficial, conforme a Tabela 3. Os ensaios foram conduzidos com cargas normais de 300, 825 e 1440 kN sobre a interface, com velocidade de 5 mm/s à temperatura ambiente. A Tabela 4 mostra os gradientes de pressão obtidos a partir do carregamento dos ensaios na área de superfície de contato das amostras de poliamida.

Tabela 3 - Rugosidade das superfícies de acoplamento

Carga Normal [kN]	Rugosidade das superfícies de acoplamento (Ra) [ $\mu\text{m}$ ]	
	Placa de topo	Placa de fundo
300	5,3	4,6
825	4,6	5,8
1440	4,6	5,8

Fonte: Adaptado de VAN DE VELDE; DE BAETS, 1996.

Tabela 4 - Pressão de contato nas superfícies de desgaste da poliamida

Carga Normal [kN]	Pressão de contato aparente [MPa]	
	Placa de acoplamento plástica	Suporte plástico
300	20	15,5
825	55	43
1440	96	74

Fonte: Adaptado de VAN DE VELDE; DE BAETS, 1996.

Os autores verificaram que os mecanismos de desgaste predominantes nos ensaios foram os mecanismos de desgaste adesivo e desgaste por deformação plástica. O componente de atrito devido à adesão é igual ao produto da área de contato da amostra e da resistência ao cisalhamento da poliamida. Devido a esse



componente, a temperatura na interface é incrementada com o tempo para gradientes iguais ou maiores que a temperatura de transição vítrea da poliamida (40 – 60°C). Isso ocasiona redução no módulo de elasticidade do polímero e a consequente estabilização no coeficiente de atrito devido à deformação plástica da amostra.

Como resultado, foi verificado que a poliamida 6 resiste a altas pressões de contato com deslizamento lento sem danificar a superfície da contrapeça de aço. O desgaste da poliamida (perda de material) é proporcional à carga normal aplicada na interface e a velocidade de deslizamento na aplicação da interface deve ser suficientemente baixa para que a temperatura da poliamida não ultrapasse a temperatura de transição vítrea do material e, por conseguinte, não haja redução significativa no seu módulo de elasticidade. Essa condição evita que os coeficientes de atrito sejam incrementados pelo decréscimo na resistência do plástico.

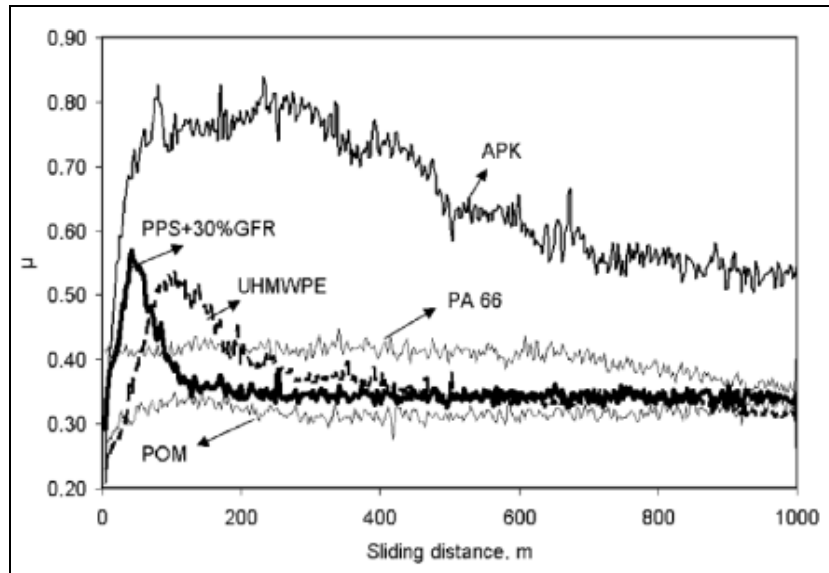
Já no trabalho de H.Unal, Sen e Mimaroglu ( 2004), a influência da velocidade de ensaio e dos valores de pressão aplicados na interface sobre o comportamento do coeficiente de atrito e do desgaste foram investigadas para os seguintes polímeros: poliamida 66 (PA 66), polioximetileno (POM), polietileno de ultra-altopeso molecular (UHMWPE), polifenileno sulfureto reforçado com 30% de fibra de vidro (PPS 30% da TFG) e policetona alifática (APK). Os ensaios tribológicos foram realizados à seco num equipamento do tipo pino-no-disco, com pinos com 6 mm de diâmetro e 50mm de comprimento, confeccionados com os materiais poliméricos citados, e discos de aço AISI D2.

Os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente, os valores de pressão aplicada na interface foram 0,35, 0,70 e 1,05 MPa e as velocidades de teste foram 0,5, 1,0 e 2,0 m/s. Os coeficientes de atrito foram medidos a partir do início do deslizamento e depois de percorridos 1000 m de distância, a perda de massa de cada amostra foi medida. Para todas as velocidades ensaiadas foi constatado que os testes foram finalizados na região de regime estacionário. As taxas de desgaste foram calculadas a partir da perda de massa medida nas amostras poliméricas.

A Figura 22 mostra a variação do coeficiente de atrito por pressão em função da distância percorrida no ensaio. Unal considerou que os picos iniciais nas curvas, antes do regime estacionário, foram resultado da formação de cristas durante a rolagem, que caracteriza desgaste adesivo, e a diminuição nos valores de

coeficiente de atrito no regime estacionário se dão pelo desgaste desses picos e deposição do material na trilha, gerando efeito de lubrificação.

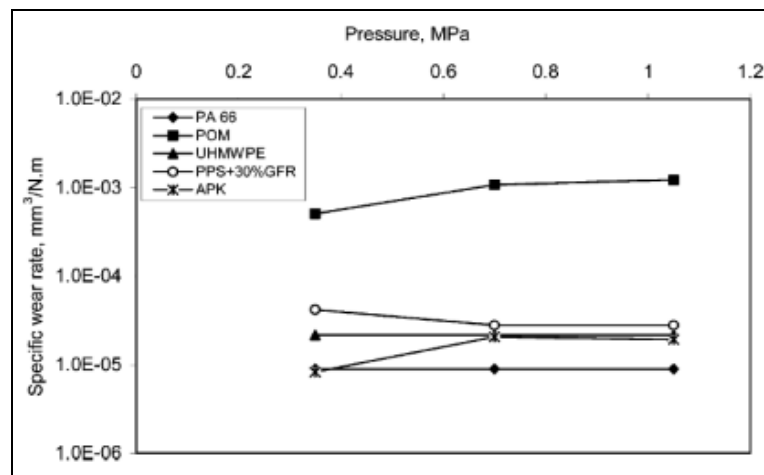
Figura 22 - Variação do coeficiente de atrito por pressão em função da distância percorrida no ensaio



Nota: Velocidade de 1,0m/s.  
Fonte: UNAL; SEN; MIMAROGLU, 2004.

Foi verificado que as taxas de desgaste calculadas são proporcionais à perda de massa das amostras. A Figura 23 mostra exemplo da variação das taxas de desgaste em função da pressão de teste para as amostras ensaiadas.

Figura 23 - Variação da taxa de desgaste específica em função da pressão aplicada para velocidade de deslizamento de 1,0 m/s



Fonte: UNAL; SEN; MIMAROGLU, 2004.

Os resultados dos ensaios de Unal mostraram que, para todos os polímeros utilizados nos testes, o coeficiente de atrito diminui linearmente com o aumento da pressão aplicada. Além disso, a taxa de desgaste não sofre alteração significativa quando variadas as pressões e velocidades dos ensaios.

Atualmente, estudos tribológicos envolvendo polímeros têm sido divulgados com bastante frequência. Considerando o uso, ou não, de lubrificantes adicionais, essas interfaces são caracterizadas pelo alto desempenho em solicitações para cisalhamento. Os mais diversos materiais poliméricos são alvo de estudos de desgaste. Ferreira, Medeiros e Silva (2009) estudaram o comportamento tribológico do PTFE contra o aço AISI 4140, em ensaios à seco com variação na vibração do sistema. Já Pogačnik e Kalin (2012), estudaram os parâmetros que influenciam a rodagem e o comportamento tribológico de longo prazo da poliamida 6 (PA6) contra o poliacetal (POM) e contra o aço inoxidável X105CrMo17.

Ainda sim, mesmo com diversificada gama de publicações sobre o assunto, trabalhos envolvendo o uso da poliamida 11 em ensaios tribológicos não são tão numerosos e acessíveis.

O presente trabalho trata da avaliação de desgaste na interface aço carbono SAE 1020 com poliamida 11, usada como revestimento de peças mecânicas (mancais, rolamentos, eixos de transmissão de torque, engrenagens etc.) que trabalham sob atrito. Ao contrário do trabalho de Van De Velde e de Baets (1996), os carregamentos utilizados nos ensaios foram consideravelmente menores, mas, em contra partida, as áreas de contato das amostras de poliamida foram pequenas o suficiente para manter um alto gradiente de pressão sobre a interface.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão descritos nesse item os materiais e soluções utilizados para formação das interfaces e do ambiente de ensaio, bem como as metodologias do ensaio de tribocorrosão e avaliação do desgaste das amostras ensaiadas no Laboratório de Corrosão (LabCor) do Instituto Politécnico, Campus da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

### 2.1 Materiais

Utilizada em larga escala na indústria automotiva, a interface formada por poliamidas e aços é consagrada em sistemas deslizantes onde se requer baixos índices de força para deslizamento (baixos coeficientes de atrito) sob a ação de cargas controladas. As interfaces ensaiadas neste trabalho foram montadas com discos aço carbono SAE1020, e pinos paralelos ISO 8734, revestidos com poliamida 11, imersos em soluções de cloreto de sódio, areia e água destilada.

#### 2.1.1 Aço SAE 1020

O uso dos aços SAE1008, SAE1010 e SAE1020 é muito comum na indústria automotiva para fabricação de cardãs e outros sistemas de transmissão de torque, exemplo: colunas e barras de direção, caixas de transmissão etc. Considerando a utilização em sistemas deslizantes, caso dos cardãs, a interface aço-polímero dos componentes mais atuais do mercado atua na redução do desgaste gerado pelo atrito na movimentação do conjunto.

No presente trabalho, as amostras para desgaste foram confeccionadas com aço carbono SAE1020, modelo catalogado 1020L da Arcelor Mittal (composição

descrita na Tabela 5), na forma de discos de  $60,0 \pm 0,2$  mm de diâmetro por  $7,0 \pm 0,1$  mm de espessura.

Tabela 5 - Composição química catalogada do aço carbono SAE1020 ensaiado

<i>Aços Fixadores de Baixo Carbono</i>				
Aço	Nomenclatura	%C	%Mn	%Si
...	...	...	...	...
1020L	SAE 1020	0,180 – 0,230	0,300 – 0,600	$\leq 0,100$
...	...	...	...	...
Aço	Nomenclatura	%Cr	%Mo	%Ni
...	...	...	...	...
1020L	SAE 1020	---	---	---
...	...	...	...	...

Fonte: ARCELOR MITTAL, 2015.

Os discos de aço carbono SAE 1020 foram preparados com rugosidade da área de teste escalonada em conjuntos de amostras com nível de rugosidade média  $< 1,0 \mu\text{m}$  e  $\geq 1,0 \mu\text{m}$ ; e testados sem revestimento ou tratamento químico superficial.

### 2.1.2 Poliamida 11

A Poliamida 11 é bastante utilizada na indústria automotiva em sistemas de rolamento ou deslizamento axial para redução dos coeficientes de atrito durante sua movimentação. Por apresentar flexibilidade, leveza, boa resistência mecânica e custo relativamente baixo de produção, ponto de fusão por volta de  $184 \text{ }^\circ\text{C}$  e temperatura de trabalho na faixa de  $-40$  a  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  (MARK, 1999), a poliamida tem sido testada para substituição de componentes de máquinas e rolamentos (VAN DE VELDE; DE BAETS, 1996).

Os contra corpos dos ensaios tribológicos do presente trabalho foram confeccionados com pinos paralelos ISO 8734, 8 mm de diâmetro por 30 mm de altura, revestidos com poliamida 11 em aproximadamente metade da área do seu corpo.

## 2.2 Preparação das amostras

### 2.2.1 Discos de aço SAE 1020

Os discos de aço carbono SAE 1020 foram usinados nos diâmetro e espessura para encaixe no equipamento de teste, dimensão 60 x 7 mm citada anteriormente, lavados com o desengraxante alcalino Quaker Clean 2600, da Quaker Chemical Corporation, concentração de 125 g/kg de água à temperatura de aproximadamente 86°C por 5 min. Foram preparadas amostras com superfícies de teste com níveis de rugosidade média menores que 1,0  $\mu\text{m}$ , obtidas a partir do lixamento das amostras com lixa seca de óxido de alumínio P150, e amostras com superfícies de teste com nível de rugosidade média maiores ou iguais a 1,0  $\mu\text{m}$ , obtidas a partir do lixamento das amostras com lixa seca de óxido de alumínio P50. Após o lixamento, foi realizada a limpeza da superfície de contato de cada disco com álcool etílico de pureza analítica, a fim de eliminar eventuais resíduos de gordura ou impurezas adquiridas durante o manuseio.

Em momento imediatamente anterior a cada ensaio, os discos de aço foram pesados em balança analítica e o perfil de rugosidade da área de contato para o ensaio tribológico foi adquirido, com o uso de um rugosímetro MITUTOYO SJ-210.

### 2.2.2 Pinos Revestidos de Poliamida 11

As contra peças do ensaio tribológico, pinos paralelos padrão ISO 8734 com dimensões  $\varnothing 8 \times 30$  mm revestidos com a poliamida 11, foram preparadas a partir da fusão do pó ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ) da poliamida com adesão sem auxílio de adesivo. Assim como nos discos, as peças foram lavadas com desengraxante alcalino conforme descrito anteriormente. Para a aplicação do revestimento, os pinos foram aquecidos no processo de indução magnética, em máquina com bobina refrigerada à água, por 3 segundos a uma potência de 10 KW. Imediatamente após o aquecimento, foram banhados intermitentemente num tanque com o pó da poliamida, fluidizado com ar comprimido. Depois da aplicação do revestimento, os pinos foram resfriados à

temperatura ambiente sem ventilação forçada e repousaram em estufa com temperatura de 60 °C para secagem por 3 dias. Foi realizada a limpeza da superfície de contato de cada pino com álcool etílico de pureza analítica após a secagem. Em momento imediatamente anterior a cada ensaio, assim como para os discos de aço, os pinos revestidos de poliamida 11 foram pesados em balança analítica para posterior avaliação da perda de massa do polímero.

## 2.3 Soluções

A fim de simular as condições mais críticas de rodagem dos veículos onde a interface aço carbono com polímero em sistemas de deslizamento é corriqueiramente utilizada, foram realizados ensaios em água destilada, solução salina de cloreto de sódio (NaCl), com concentração de 5% em massa de cloreto de sódio para 95% em peso de água e pH entre 6,5 e 7,2 (conforme ASTM B117:2011), e solução hipersaturada de areia, com concentração de 184,21g de areia para 1 litro de água (conforme norma VW PV1210:2010-02). Em cada teste tribológico, foram utilizados aproximadamente 20 ml de solução.

### 2.3.1 Solução de Areia: determinação da distribuição do tamanho de partícula

A solução de areia foi concebida com areia de praia, natural, não processada, sem peneiramento ou secagem, na forma bruta, com distribuição granulométrica estimada em torno de 3 vezes maior que a distribuição granulométrica da areia padronizada SAE “*air cleaner dust fine*” (VW PV1210:2010-02), areia natural obtida em forma bruta no Estado do Arizona (U.S.A.). A distribuição de tamanho de partículas da areia foi mensurada, dispersa em água, em concentração de 0,3652% do volume.

A utilização dessa areia natural foi acolhida na intenção de minimizar o custo do ensaio e propiciar marcas de desgaste mais profundas nas amostras. A condição

de tamanho de partícula desta areia utilizada tem maior similaridade com os detritos mais comuns em vias de rodagem.

## 2.4 Equipamentos

Na preparação das amostras revestidas com a poliamida 11, os pinos padrão ISO 8734 foram aquecidos por processo de indução magnética numa máquina de indução magnética com bobina resfriada à água FLEXITUNE<sup>®</sup>, da Inductotherm, com potência de trabalho de 10 kW máximo. O programa de trabalho para esse aquecimento teve como parâmetros a potência de 10 kW e tempo de aquecimento de 3s. A Figura 24 mostra a disposição do equipamento na bancada de trabalho.

Figura 24 - Máquina de indução magnética FLEXITUNE<sup>®</sup>, da Inductotherm



Fonte: O autor, 2015.

A distribuição de tamanho de partículas da areia foi mensurada num equipamento MASTERSIZER 2000, da MALVERN Instruments, dispersa em água, em concentração de 0,3652% do volume. A metodologia de medição contemplou a sequência de 4 leituras de distribuição granulométrica da solução com posterior submissão à ultrassom por 1 min; 3 novas leituras de distribuição granulométrica da solução, nova submissão posterior à ultrassom por 1 min e novas 2 leituras finais,



estas utilizadas como referência para distribuição granulométrica do material. A Figura 25 mostra o equipamento.

Figura 25 - Equipamento para medição distribuição de tamanho de partículas

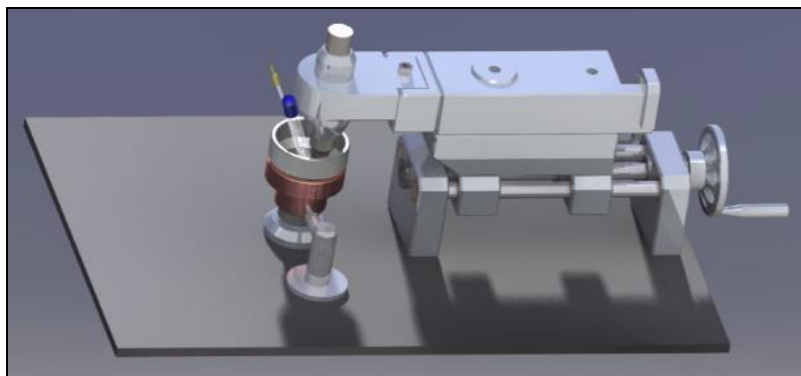


Nota: MASTERSIZER 2000, da Malvern Instruments.  
Fonte: O autor, 2015.

Os perfis de rugosidade das superfícies das amostras de aço carbono SAE 1020 foram obtidos antes e após os ensaios tribológicos com o uso de um rugosímetro MITUTOYO SJ-210.

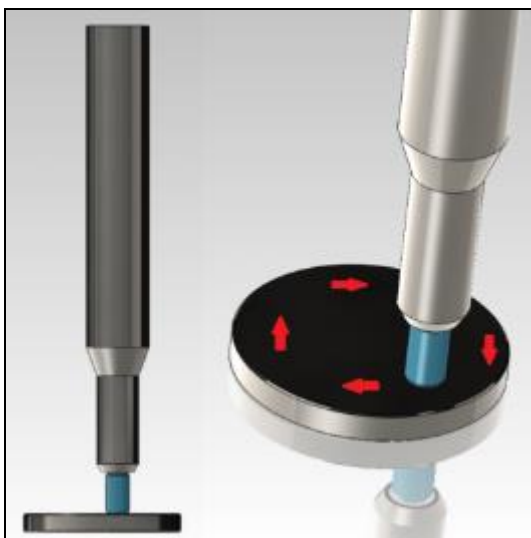
O tribômetro utilizado nos ensaios foi desenvolvido no Instituto Politécnico, da UERJ (SILVA, 2010). O equipamento é do tipo pino-no-disco com controle automatizado da velocidade de rotação do disco e controle manual da posição para atrito ( $\emptyset$  da trilha de desgaste – distância percorrida no teste). As figuras 26 e 27 mostram o esquema geral do equipamento e a configuração do ensaio pino-no-disco.

Figura 26 - Tribômetro do tipo pino no disco utilizado nos ensaios



Fonte: SILVA, 2010.

Figura 27 - Esquema de ensaio pino no disco rotativo



Fonte: O autor, 2015.

Foram utilizados dois níveis de frequência de rotação nos ensaios, 1,5 Hz e 3,0 Hz, com distância constante de 10.000 ciclos de rotação e carregamento controlado de 1805,83g somados a massa do pino revestido de poliamida 11, também em gramas. As frequências de teste foram definidas a partir da análise visual da formação de vórtice na superfície das soluções, considerando a ausência de deste vórtice, fator suficiente para evitar a concentração da parcela não solubilizada (nas soluções salina e de areia) nas bordas do tanque do equipamento, ou seja, fora da área de atrito. Em proporção, são aproximadamente 6,67 e 3,33 vezes menores, respectivamente, que a frequência de teste requerida pelas normas VW PV1210:2010-02 e VW PV2982:2013-07. Já o carregamento, para fins de comparação, é de aproximadamente 0,9% do carregamento mínimo especificado ao qual o sistema deslizante deve resistir quando submetido a ensaio de cisalhamento conforme a mesma VW PV1210:2010-02. A aquisição das micrografias foi realizada com o uso de um microscópio digital ISM-PM200SA, da INSIZE, com ampliação de 200 vezes máxima.

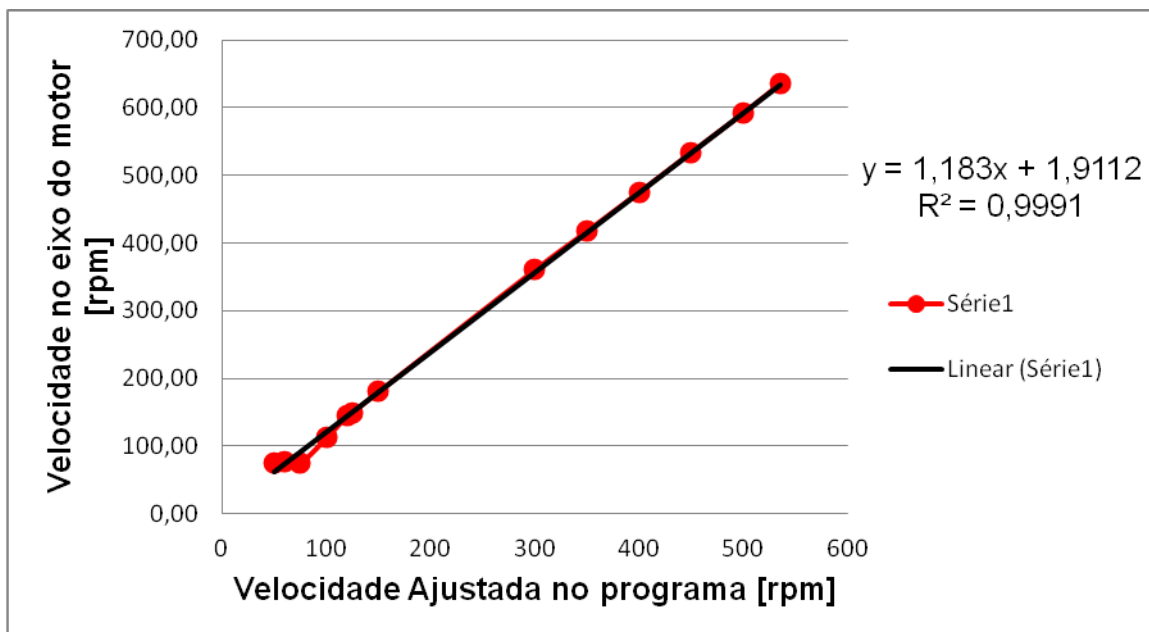
### 2.4.1 Calibração da velocidade de rotação do tribômetro

Para o ajuste adequado da frequência de teste nos ensaios de tribocorrosão, foi necessário criar uma curva de calibração relacionando a velocidade de rotação no eixo do motor com a velocidade de rotação selecionada no programa de controle do tribômetro. A aquisição dos dados de velocidade de rotação do eixo do motor foi realizada utilizando um tacômetro Grumel & Bauer, modelo TAKO TD-10.

A regressão linear da curva obtida do gráfico “Velocidade ajustada no programa” vs. “Velocidade no eixo do motor”, ilustrado na Figura 28, mostrou um comportamento em acordo com a função  $F(x)=1,183x+1,9112$ , sendo  $F(x)=y$ , com índice de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) igual a 0,9991.

Esse comportamento remete à valores de velocidade de rotação no eixo do motor em média 16,48% maiores que a velocidade ajustada no programa de controle do tribômetro.

Figura 28 - Curva de calibração da velocidade no equipamento



Fonte: O autor, 2015.

## 2.5 Metodologia dos Ensaio

Os Ensaio foram realizados em acordo com um roteiro de delineamento de experimento (DOE); considerando como variáveis o nível de rugosidade das amostras, a frequência de rotação do ensaio e a solução na qual a interface do aço carbono SAE 1020 com a poliamida 11 está inserida.

### 2.5.1 Delineamento do experimento (DOE)

O delineamento do experimento fatorial completo foi concebido utilizando o software estatístico MINITAB® 17, considerando como variáveis 2 atributos referentes à rugosidade das amostras de aço carbono SAE 1020 (rugosidade média  $\geq 1,0 \mu\text{m}$  e rugosidade  $<1,0 \mu\text{m}$ ), 2 atributos referentes à frequência de rotação nos ensaios (1,5 Hz e 3,0 Hz) e 3 atributos referentes à qualidade da solução (água destilada, solução de cloreto de sódio e solução de areia); com carregamento normal à superfície com variação somente da massa dos pinos revestidos de poliamida 11 em todos os ensaios (1805,83 g + massa do pino revestido [g]) e distância percorrida constante de 10.000 ciclos de rotação. A tabela 6 ilustra o mapa de ensaios, conforme o planejamento dos experimentos.

Tabela 6 - Mapa de Experimentos (continua)

Amostra (# disco)	Solução	Rugosidade Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Frequência [Hz]
1	Areia	$\geq 1,0$	3
2	Areia	$\geq 1,0$	1,5
3	Areia	$\geq 1,0$	3
4	H <sub>2</sub> O	$<1,0$	1,5
5	NaCl	$\geq 1,0$	1,5
6	H <sub>2</sub> O	$<1,0$	3
7	NaCl	$\geq 1,0$	3
8	NaCl	$<1,0$	3
9	H <sub>2</sub> O	$\geq 1,0$	1,5
10	H <sub>2</sub> O	$\geq 1,0$	3
11	H <sub>2</sub> O	$\geq 1,0$	3
12	Areia	$<1,0$	1,5
13	NaCl	$<1,0$	1,5
14	Areia	$<1,0$	3
15	Areia	$<1,0$	1,5

Tabela 6 - Mapa de Experimentos (conclusão)

Amostra (# disco)	Solução	Rugosidade Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Frequência [Hz]
16	NaCl	$\geq 1,0$	3
17	Areia	$< 1,0$	3
18	H <sub>2</sub> O	$\geq 1,0$	1,5
19	H <sub>2</sub> O	$< 1,0$	3
20	H <sub>2</sub> O	$< 1,0$	1,5
21	Areia	$\geq 1,0$	1,5
22	NaCl	$< 1,0$	3
23	NaCl	$\geq 1,0$	1,5
24	NaCl	$< 1,0$	1,5

Fonte: O autor, 2015.

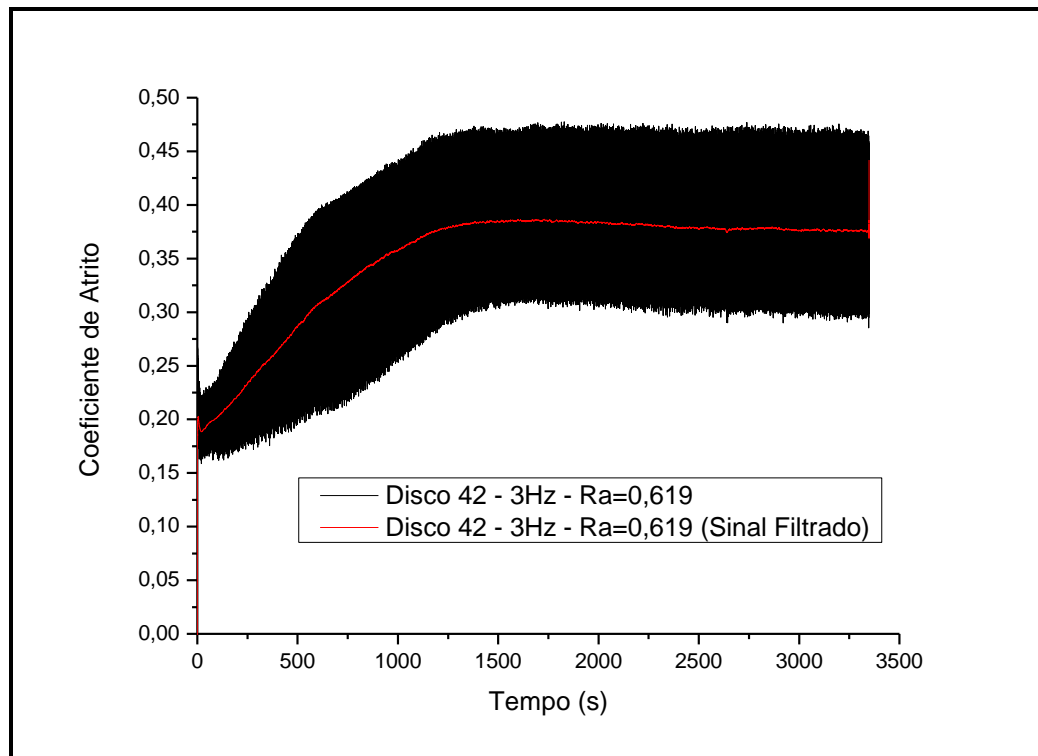
Foram registradas as massas iniciais, pré-teste, e massas finais, pós-teste; tanto das amostras de aço quanto das amostras revestidas com poliamida 11 para avaliação posterior dos índices de perda de massa em todas as amostras.

### 2.5.2 Filtro de suavização de sinal

O tribômetro utilizado nos ensaios, equipamento do tipo pino-no-disco, como citado anteriormente, tem acoplado ao seu eixo de rotação do disco um motor elétrico de corrente alternada controlado por um inversor de frequência. Essa configuração de atuador elétrico é bastante utilizada na fabricação de tribômetros. A perturbação gerada pela variação no controle de frequência do motor no sistema de aquisição de dados de carga do equipamento torna a saída desse sistema, sinal correspondente à leitura da célula de carga, muito ruidosa. O nível de ruído na leitura dificulta e, por vezes, induz a análises controversas dos resultados dos ensaios. Assim, faz-se necessário o tratamento do sinal de saída ruidoso do teste com um filtro de suavização de sinal. Como a frequência de aquisição de dados do ensaio, 10 aquisições por segundo, gerou quantidade de dados em cada teste da ordem de  $10^4$ , foi adotada para análise dos resultados a aplicação de um filtro de suavização de corte (corriqueiramente chamado de *smoothing*) por porcentagem (RABINER; SAMBUR; SCHMIDT, 1975). Também nomeado como filtro de mediana, o filtro gera uma mediana do intervalo de amostragem em toda a extensão do sinal original do teste (ARIAS-CASTRO; DONOHO, 2009). A janela de amostragem utilizada no filtro aplicado foi de 100 pontos, com proporção de 50%. A Figura 29

mostra um exemplo de sinal de teste tribológico, realizado no presente trabalho, com sinal suavizado com o filtro de mediana.

Figura 29 - Exemplo do sinal tratado de um ensaio no tribômetro



Fonte: O autor, 2015.

### 2.5.3 Avaliação do desgaste

Processos de desgaste e corrosão em materiais envolvem interações entre diversos mecanismos que descrevem fenômenos de natureza mecânica e eletroquímica (BATCHELOR; STACHOWIAK, 1988). A interação entre esses fenômenos tem influência direta na taxa de perda de material da amostra submetida ao desgaste, sendo ainda mais preponderante quando a amostra é ensaiada em meio aquoso (WATSON; et al., 1995). Essa interação produz efeito de sinergia e quando há decréscimo nas influências dos fenômenos de natureza somente mecânica ou somente eletroquímica há, como consequência, decréscimo na taxa de perda de material da amostra (LANDOLT, 2006).

O componente do efeito de sinergia  $S$ , resultante da interação entre os fenômenos mecânicos e eletroquímicos, é parte complementar da relação que quantifica a perda total de material  $T$  da amostra, em conjunto com o componente que quantifica a taxa de desgaste  $W_0$ , sem considerar as influências eletroquímicas, e com o componente que quantifica a taxa de corrosão  $C_0$  no material, sem considerar as influências mecânicas (ASTM G119-09).

$$T = W_0 + C_0 + S \quad (1)$$

O efeito de sinergia  $S$ , interação desgaste/ corrosão, pode ser mais bem descrito como uma relação complementar entre a variação na taxa de desgaste quando a amostra passa a sofrer efeito de corrosão ( $W_C$ ) e a variação na taxa de corrosão enquanto a amostra sofre com efeitos de desgaste no ensaio ( $C_W$ ).

$$T = W_0 + C_0 + \Delta W_C + \Delta C_W \quad (2)$$

Considerando o interesse no desgaste das amostras tanto sob efeito das influências mecânicas quanto sob efeito das influências eletroquímicas, a perda total de material  $T$  da amostra, segundo Watson et al. (1995), pode ser descrita em função da perda de massa da amostra ( $\Delta m$ ), da área da superfície exposta ( $A$ ) e do tempo de duração do ensaio ( $\Delta t$ ); como segue:

$$T = \frac{\Delta m}{A \times \rho \times \Delta t} \quad (3)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da amostra em unidades de massa por unidades de volume.

Daí pode-se reescrever a equação da perda total de material  $T$  da amostra de forma a destacar a parcela referente ao volume desgastado na área exposta às soluções utilizadas ( $\Delta m / \rho$ ) para, a partir da metodologia adotada por Bello, Wood e Wharton (2007), quantificar a taxa específica de desgaste da amostra ( $k$ ) obtida a partir da relação do volume degradado com a carga normal aplicada no teste  $N$  e

com a distância total percorrida com deslizamento durante o teste  $L$ , descrita na equação (4) a seguir:

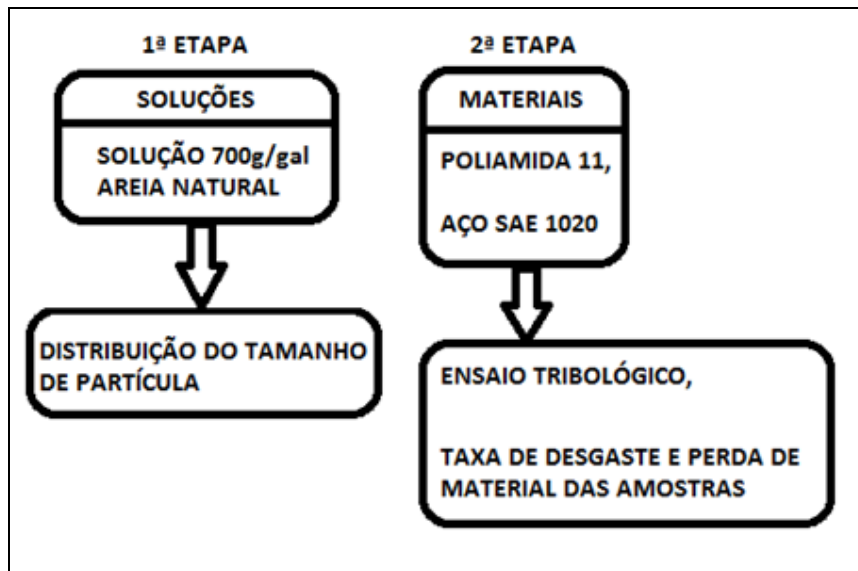
$$V = k \times L \times N \quad (4)$$



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item, serão comentadas passagens acerca das condições pré-testes das amostras assim como discutidos os resultados dos ensaios realizados. As considerações serão conduzidas por identificação de material nas formas descritas na Figura 30 a seguir:

Figura 30 - Fluxograma de descrição das etapas de discussão dos resultados



Fonte: O autor, 2015.

#### 3.1 Medição da distribuição de tamanho de partícula

A interface poliamida 11 com aço liga SAE 1020 foi proposta para uso, devido a sua grande aplicação industrial, principalmente na indústria automotiva. Ela é usada em sistemas de deslizamento que compõe conjuntos de transmissão de torque, onde um baixo coeficiente de atrito é necessário para que não haja sensação de desconforto ao dirigir um veículo. Essa característica garante que os sistemas de colapso, que protegem o motorista em caso de colisão, não se tornem inoperantes. A deposição de produtos de corrosão dos componentes no sistema e impurezas

penetrantes decorrentes da sujidade das estradas de rodagem pode ocasionar o travamento do conjunto, aumentando consideravelmente o risco de acidentes. A norma de ensaio VW PV1210:2010-02 indica, para teste tribológico em componentes deslizantes, a areia padronizada SAE “*air cleaner dust fine*” como referência de sujidade. Entretanto, no presente trabalho, foi procurada uma condição de material ainda mais severa, a fim de compensar a redução de frequência necessária à execução do ensaio adaptado ao tribômetro usado. A partir daí, o uso de areia natural – composta de sais, cristais de quartzo e matéria orgânica – foi considerada depois de evidenciada uma relação da distribuição do tamanho de partícula do aglomerado com a distribuição do tamanho de partícula da areia padronizada 004-D “*air cleaner dust fine*”. As Tabelas 7 e 8, a seguir, evidenciam distribuição de tamanho de partícula maior que a da areia padronizada.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica da areia padronizada 004-D “*air cleaner dust fine*”

<i>Faixa de distribuição</i>	<i>Unidade</i>	<i>SAE Air Cleaner Dust Fine</i>
0 – 5	µm	39%
5 – 10	µm	18%
10 – 20	µm	16%
20 – 40	µm	18%
40 - 80	µm	9%

Fonte: Adaptado de AIR FILTER TESTING LABORATORIES INC, 2015.

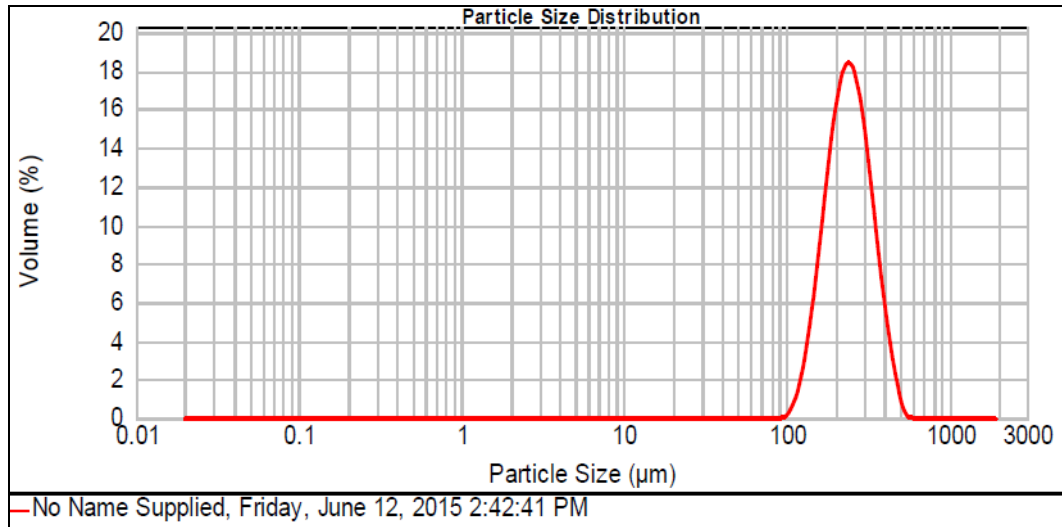
Tabela 8 - Distribuição granulométrica da areia natural ensaiada

<i>Faixa de distribuição</i>	<i>Unidade</i>	<i>Areia Natural</i>
104 – 138	µm	3,89%
138 - 158	µm	6,14%
158 - 182	µm	10,17%
182 - 209	µm	14,02%
209 - 240	µm	16,32%
240 - 275	µm	16,28%
275 - 316	µm	13,91%
316 - 363	µm	10,03%
363 - 417	µm	5,94%
417 - 550	µm	3,3%

Fonte: O autor, 2015.

A Figura 31, a seguir, mostra a distribuição média de tamanho de partícula medida no equipamento MASTERSIZER 2000, da MALVERN Instruments, dispersa em água em concentração de 0,3652% do volume.

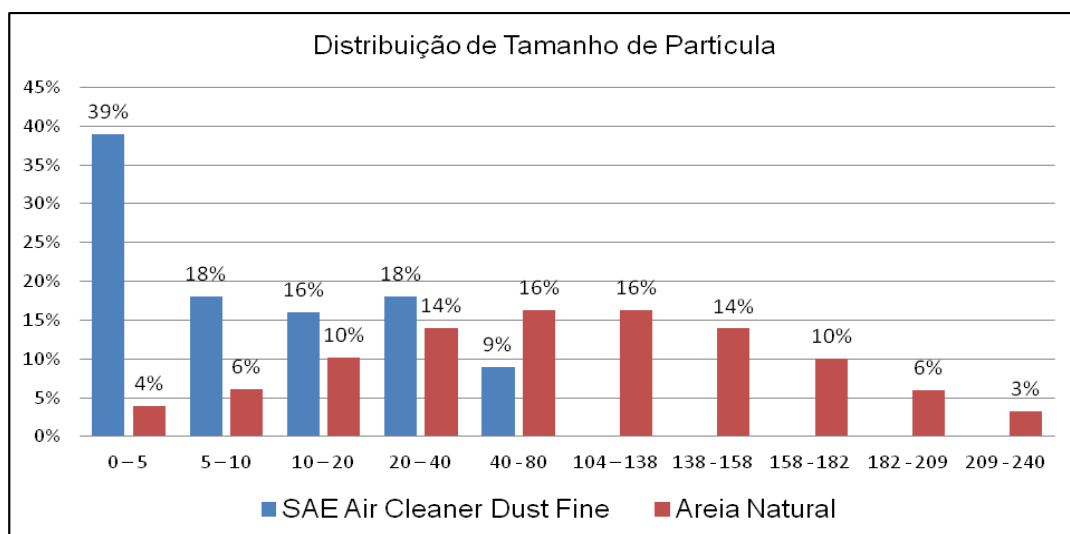
Figura 31 - Distribuição média do tamanho de partícula da areia natural ensaiada



Fonte: O autor, 2015.

Para fins de comparação, a Figura 32 correlaciona as distribuições médias de tamanho de partícula da areia normatizada e da areia natural utilizada nos ensaios. Pode-se perceber que a areia natural usada nos ensaios tem tamanho de partícula em torno de 3 vezes maior que a areia SAE de referência. O uso da areia composta de partículas maiores deve promover maior desgaste, maior perda de material e maiores coeficientes de atrito no deslizamento, nas superfícies de contato da interface.

Figura 32 - Comparação da distribuição média do tamanho de partícula das areias 004-D e da areia natural ensaiada



Fonte: O autor, 2015.

### 3.2 Ensaio Tribológico

Os ensaios tribológicos foram realizados considerando a categorização dos parâmetros de rugosidade média em acordo com os parâmetros obtidos a partir da medição dos perfis de rugosidade média das amostras preparadas para os testes – menor que  $1,0\mu\text{m}$  e maior ou igual a  $1,0\mu\text{m}$ . As frequências de teste, 1,5 Hz e 3,0 Hz –aproximadamente 6,67 e 3,33 vezes menores, respectivamente, que a frequência de teste requerida pelas normas VW PV1210:2010-02 e VW PV2982:2013-07 – e a quantidade de ciclos foi fixada em 10.000 ciclos de rotação. As frequências de ensaio foram definidas nessa proporção, devido ao espalhamento das soluções por conta das forças tangenciais na rotação do sistema. Foi verificado que velocidades maiores que 120 rpm geram vórtice no reservatório do equipamento, não mais mantendo as amostras submersas no eletrólito. O carregamento normal aplicado em cada amostra da interface foi diferenciado por conta da variação de massa nos pinos revestidos de poliamida 11, devido ao processo de aplicação da camada de polímero. Foi necessária a realização de uma nova repetição dos ensaios, como contra prova dos resultados. A Tabela 9 relaciona as amostras ensaiadas com os demais parâmetros iniciais dos ensaios.

Tabela 9 - Parâmetros Pré-teste do ensaio tribológico (continua)

<i>Teste</i>	<i># do disco</i>	<i>Massa do disco [g]</i>	<i>Massa do pino [g]</i>	<i>Frequência [Hz]</i>	<i>Solução</i>	<i>Rugosidade (Ra) [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	<i>Carga total [g]</i>
8	8	153,195	11,806	1,5	água	0,340	1817,636
9	9	151,452	11,909	3,0	NaCl	0,517	1817,739
11	11	152,754	11,780	1,5	NaCl	1,487	1817,610
12	12	155,518	11,921	1,5	NaCl	3,065	1817,751
13	13	152,292	11,819	3,0	NaCl	0,330	1817,649
15	15	154,509	11,804	3,0	NaCl	2,177	1817,634
16	16	152,995	11,815	1,5	NaCl	0,484	1817,645
17	17	154,917	11,874	3,0	NaCl	1,291	1817,704
18	18	154,350	11,932	3,0	água	1,495	1817,762
20	20	150,273	11,804	3,0	água	0,485	1817,634
21	21	152,490	11,750	3,0	água	1,602	1817,580
22	22	154,345	11,819	3,0	água	0,404	1817,649
23	23	153,323	11,969	1,5	NaCl	0,268	1817,799
24	24	155,456	11,752	1,5	água	2,225	1817,582
26	26	152,341	11,912	1,5	água	0,135	1817,742

Tabela 9 - Parâmetros Pré-teste do ensaio tribológico (conclusão)

Teste	# do disco	Massa do disco [g]	Massa do pino [g]	Frequência [Hz]	Solução	Rugosidade (Ra) [ $\mu\text{m}$ ]	Carga total [g]
27	27	155,412	12,173	1,5	água	1,363	1818,003
28	28	151,179	11,909	3,0	areia	0,368	1817,739
29	29	154,168	12,192	1,5	areia	1,911	1818,022
30	30	152,511	12,090	3,0	areia	0,463	1817,920
32	32	153,505	11,956	1,5	areia	1,950	1817,786
33	33	150,884	12,099	3,0	areia	1,543	1817,929
34	34	154,222	11,178	3,0	areia	2,012	1817,008
35	35	151,556	9,516	1,5	areia	0,430	1815,346
36	36	152,949	9,361	1,5	areia	0,362	1815,191
37	37	148,125	9,517	3,0	água	0,644	1815,347
38	38	155,067	9,206	3,0	água	1,432	1815,036
39	39	156,369	9,185	1,5	água	1,411	1815,015
40	40	152,524	9,245	1,5	água	0,365	1815,075
41	41	154,299	11,471	3,0	NaCl	1,972	1817,301
42	42	149,471	9,257	3,0	NaCl	0,619	1815,087
43	43	153,827	9,281	1,5	NaCl	1,255	1815,111
44	44	152,799	9,514	1,5	NaCl	0,391	1815,344
45	45	154,423	11,846	3,0	areia	1,400	1817,676
46	46	151,199	9,164	1,5	areia	0,154	1814,994
47	47	154,817	11,061	1,5	areia	1,178	1816,891
48	48	151,285	9,189	3,0	areia	0,235	1815,019

Fonte: O autor, 2015.

A abertura do tribômetro, distância de referência para os ensaios tribológicos, foi definida em  $17,0 \pm 0,1$  mm, o que determinou trilhas de desgaste nas amostras de aço com diâmetro médio de  $9,7 \pm 0,1$  mm. Portanto, as distâncias percorridas nos ensaios, relacionadas com a quantidade de ciclos, foram fixadas em aproximadamente 304,75 m.

### 3.2.1 Taxa de desgaste

Nos ensaios tribológicos realizados, as curvas de coeficiente de atrito mostraram as interações mecânicas atuantes na interface das amostras. Já as curvas de monitoramento em circuito aberto mostraram as interações eletroquímicas ocorridas entre a superfície metálica e o eletrodo em toda a superfície exposta.

Segundo o conceito de sinergia elucidado pela equação (1) (ASTM G119-09), as contribuições mecânicas e eletroquímicas analisadas no presente trabalho não podem ser ditas como totalmente independentes. As interações eletroquímicas contribuíram nos resultados das avaliações das interações mecânicas e o mesmo aconteceu para o inverso. Daí, a partir da metodologia utilizada por Watson et al. (1995) e Bello, Wood e Wharton (2007), onde foram estudados fenômenos de sinergismo em ensaios de Tribocorrosão, foi possível calcular a taxa de desgaste das amostras nos ensaios tribológicos. Foi notado que as taxas de desgaste são maiores nas amostras ensaiadas em solução de cloreto de sódio. Este resultado não está em acordo com o critério adotado para a escolha da areia natural como material para solução nos ensaios. Era esperado que a seleção de um material com particulado maior que a areia padronizada 004-D “*air cleaner dust fine*” fosse causar maior perda de material às amostras nos teste, o que não ocorreu. Já nos ensaios em água destilada, as taxas de desgastes foram menores. As considerações a respeito do dano causado às amostras nos ensaios tribológicos e sua relação com as taxas de desgaste serão mais discutidas nos itens 3.2.2, para a poliamida 11, e 3.2.3, para as amostras de aço. A Tabela 10, a seguir, mostra os valores calculados para a taxa de desgaste das amostras ensaiadas.

Tabela 10 - Enumeração da taxa de desgaste nos ensaios tribológicos (continua)

<i>Teste</i>	<i>Frequência [Hz]</i>	<i>Solução</i>	<i>Rugosidade (Ra) [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	<i>Taxa de desgaste disco [<math>10^{17} \text{ m}^2/\text{N}</math>]</i>
23	1,5	NaCl	0,268	37,451
44	1,5	NaCl	0,391	6,383
16	1,5	NaCl	0,484	15,141
43	1,5	NaCl	1,255	12,768
11	1,5	NaCl	1,487	14,039
12	1,5	NaCl	3,065	40,640
13	3	NaCl	0,33	9,563
9	3	NaCl	0,517	19,922
42	3	NaCl	0,619	5,586
17	3	NaCl	1,291	21,516
41	3	NaCl	1,972	11,956
15	3	NaCl	2,177	19,126
26	1,5	água	0,135	0,797
8	1,5	água	0,340	14,344

Tabela 10 - Enumeração da taxa de desgaste nos ensaios tribológicos (conclusão)

<i>Teste</i>	<i>Frequência [Hz]</i>	<i>Solução</i>	<i>Rugosidade (Ra) [<math>\mu\text{m}</math>]</i>	<i>Taxa de desgaste disco [<math>10^{17} \text{ m}^2/\text{N}</math>]</i>
40	1,5	água	0,365	6,384
27	1,5	água	1,363	11,154
39	1,5	água	1,411	7,183
24	1,5	água	2,225	10,360
37	3	água	0,644	5,585
22	3	água	0,404	11,157
20	3	água	0,485	15,938
18	3	água	1,495	19,124
21	3	água	1,602	17,532
38	3	água	1,432	12,769
46	1,5	areia	0,154	6,385
36	1,5	areia	0,362	7,980
35	1,5	areia	0,430	4,787
47	1,5	areia	1,178	11,161
29	1,5	areia	1,911	10,358
32	1,5	areia	1,95	24,702
48	3	areia	0,235	8,779
28	3	areia	0,368	11,156
30	3	areia	0,463	11,155
45	3	areia	1,400	11,156
33	3	areia	1,543	19,123
34	3	areia	2,012	8,769

Nota: carga total de 1814 a 1818g.

Fonte: O autor, 2015.

### 3.2.2 Avaliação Tribológica da Poliamida 11

Após os ensaios tribológicos, as ponteiros revestidas com poliamida 11 foram secas com auxílio de soprador térmico e imediatamente pesadas em balança analítica para averiguação da perda de massa. Foi verificado, que a maior perda de massa nessas amostras foi de 0,0085% da massa inicial e, por conta disso, foi considerado que não houve perda significativa de massa nos revestimentos de poliamida. Não houve presença de material metálico aderido à superfície de contato da poliamida. Portanto, o desgaste encontrado na superfície de contato dos pinos foi avaliado morfológicamente. As amostras foram categorizadas em função das

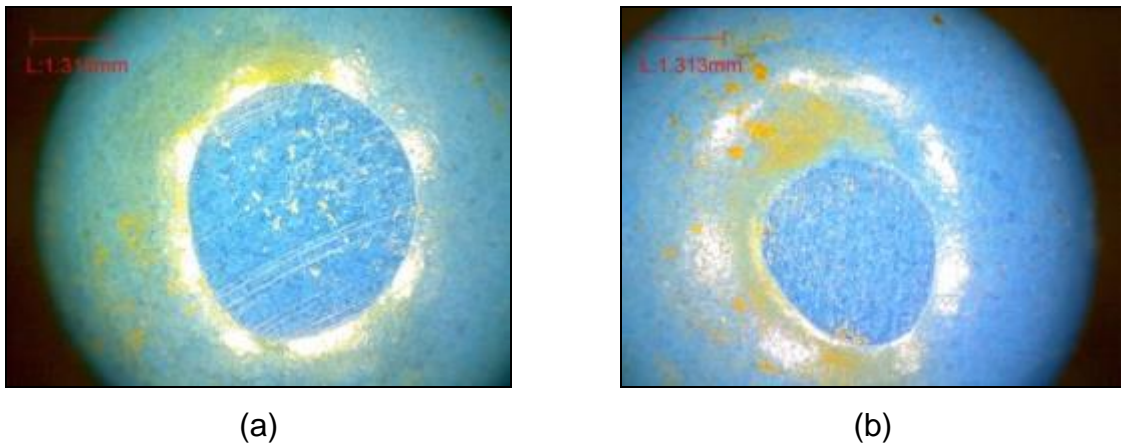
soluções eletrólito utilizadas nos ensaios e das frequências de teste, conforme mostra a Tabela 11. A Figura 33 mostra os pinos revestidos com poliamida e ensaiados com frequência de 3,0 Hz em água destilada.

Tabela 11 - Sequência das análises morfológicas da poliamida

<i>Solução</i>	<i>Frequência</i>
Água Destilada	3Hz
	1,5Hz
Cloreto de Sódio	3Hz
	1,5Hz
Areia Natural	3Hz
	1,5Hz

Fonte: O autor, 2015.

Figura 33 - Poliamida 11 ensaiada em água destilada e 3,0 Hz



Legenda: (a) - Rugosidade (Ra) do disco de aço = 1,602  $\mu\text{m}$ ; (b) - 0,404  $\mu\text{m}$ .

Fonte: O autor, 2015.

Pode-se visualizar, na Figura 33 que a área desgastada na poliamida é maior na amostra ensaiada como contra corpo do disco com a superfície mais rugosa. (Figura 33 (a)). Considerando os estudos de Hutchings (1992), Lancaster (1990) e Briscoe e Sinha (2002), citados anteriormente, e o trabalho de Van De Velde e de Baets (1996); onde podemos atribuir ao atrito entre interfaces com polímeros, há predominância dos mecanismos de desgaste por deformação e adesão. Podem ser identificados, na Figura 33, que a presença de riscos e ranhuras na superfície desgastada faz crer na predominância do mecanismo de desgaste abrasivo, mas

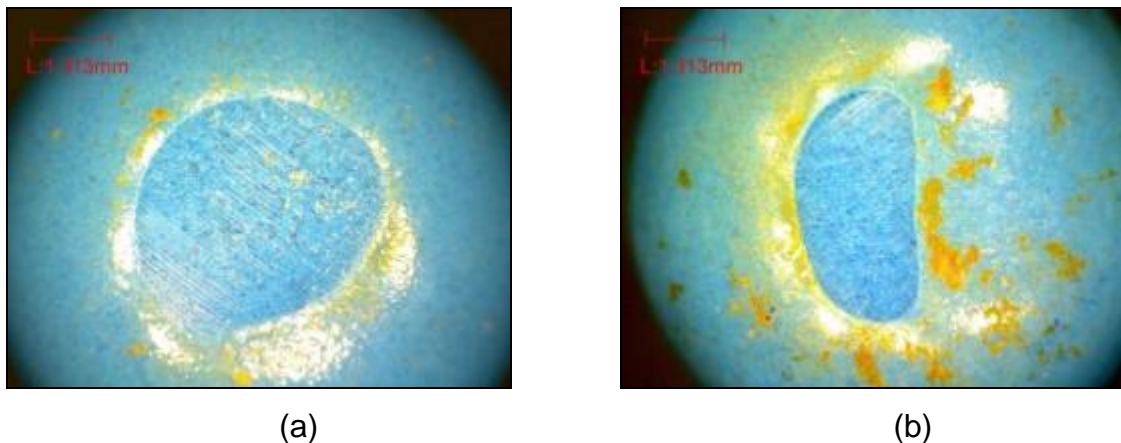


como não houve perda de massa perceptível nas amostras considera-se que no mecanismo abrasivo houve somente deformação plástica nas superfícies durante o ensaio (KATO; ADACHI, 2000).

Portanto, as ranhuras formadas podem ser atribuídas à formação de produtos de corrosão da superfície exposta da amostra de aço e a formação dessas ranhuras pode ser efeito da passagem ou rolagem das partículas duras, formadas na reação entre o aço e o eletrólito, pela interface durante o deslizamento.

Já na Figura 34, onde podem ser vistos os pinos revestidos com poliamida ensaiados com frequência de 1,5 Hz em água destilada, a área desgastada na poliamida também é maior na amostra ensaiada como contra corpo do disco com a superfície mais rugosa. A presença de borras amareladas, resultado da deposição dos produtos de corrosão do disco metálico, não foi suficientemente grande para haver alteração perceptível na massa da amostra de poliamida.

Figura 34 - Poliamida 11 ensaiada em água destilada e 1,5 Hz



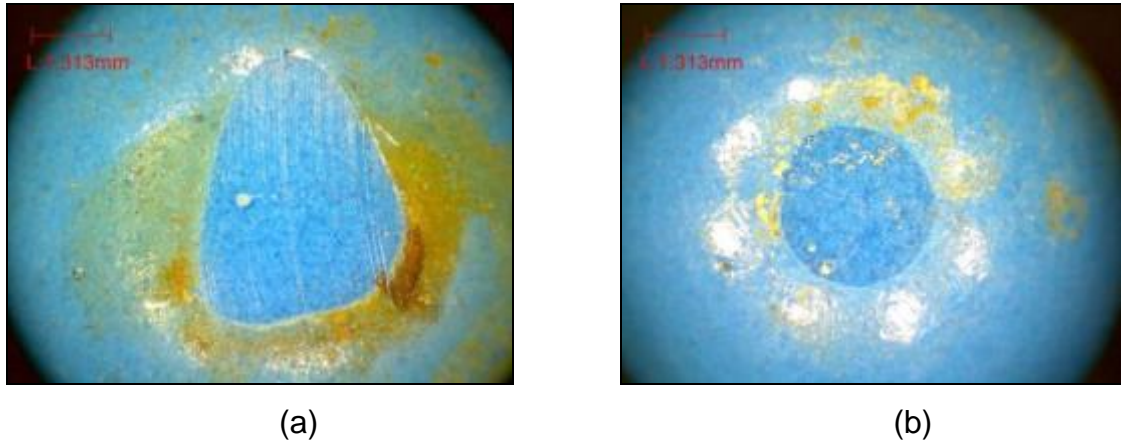
Legenda: Rugosidade (Ra) do disco de aço: (a) - 2,225  $\mu\text{m}$ ; (b) - 0,340  $\mu\text{m}$ .

Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 35 podem ser visualizados os pinos revestidos com poliamida ensaiados com frequência de 3,0 Hz em solução de 5% em massa de cloreto de sódio. Assim como nas amostras ensaiadas em água destilada, as amostras ensaiadas em solução de cloreto de sódio apresentaram maior área desgastada nas interfaces com discos de superfícies mais rugosas. A presença de riscos e ranhuras na superfície desgastada dessas amostras pode ser considerada de natureza similar às encontradas nas ensaiadas em água destilada, como também não houve perda

de massa perceptível nas amostras considera-se que houve somente deformação plástica nas superfícies durante o ensaio.

Figura 35 - Poliamida 11 ensaiada em solução aquosa a 5% em massa de NaCl e 3,0 Hz



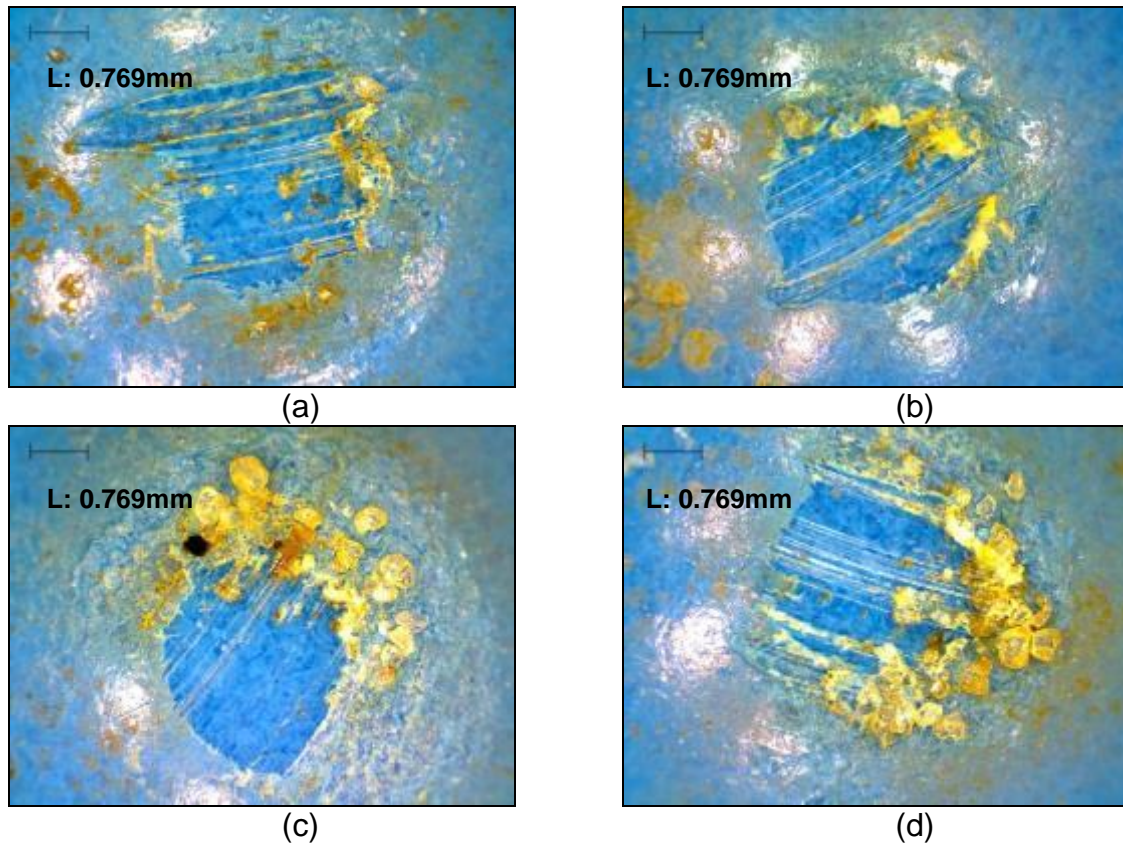
Nota: Rugosidade (Ra) do disco de aço: (a) - 2,177  $\mu\text{m}$ ; (b) - 0,517  $\mu\text{m}$ .  
Fonte: O autor, 2015.

O mesmo efeito de desgaste ocorre nas amostras ensaiadas com frequência de 1,5Hz em solução de 5% em massa de cloreto de sódio, onde a área desgastada também é maior nas interfaces com discos de superfícies mais rugosas, com a presença de ranhuras e riscos leves na superfície de contato e deposição de produtos de corrosão do aço no entorno das áreas atritadas nos ensaios.

As amostras de poliamida ensaiadas com frequência de 3,0 Hz em solução de areia com concentração de 184,21g por litro de água destilada podem ser visualizadas na Figura 36. Assim como nas demais amostras de poliamida, não houve perda de massa significativa nas amostras ensaiadas com areia, mas, diferente do comportamento verificado nos ensaios em água destilada e em cloreto de sódio, em ambas as frequências de teste, a área de poliamida desgastada nos ensaios com frequência de 3,0 Hz foi praticamente igual. Independente da rugosidade dos discos que compuseram a interface, não houve grande diferença na aproximação, para um diâmetro perfeito, da área desgastada no pino. Apesar de as ranhuras encontradas na área de contato terem profundidade maior que as dos ensaios anteriores, devido a hipersaturação da solução e ao tamanho da partícula do precipitado, a ausência de perda massa perceptível no ensaio permitiu considerar

a ocorrência de mecanismo de desgaste abrasivo com conformação plástica do polímero.

Figura 36 - Poliamida 11 ensaiada em solução aquosa com areia



Legenda: Rugosidade (Ra) do disco de aço a 3,0 Hz: (a) - 1,400  $\mu\text{m}$ ; (b) - 0,235  $\mu\text{m}$ .

Rugosidade (Ra) do disco de aço a 1,5 Hz: (c) - 1,178  $\mu\text{m}$ ; (d) - 0,154  $\mu\text{m}$ .

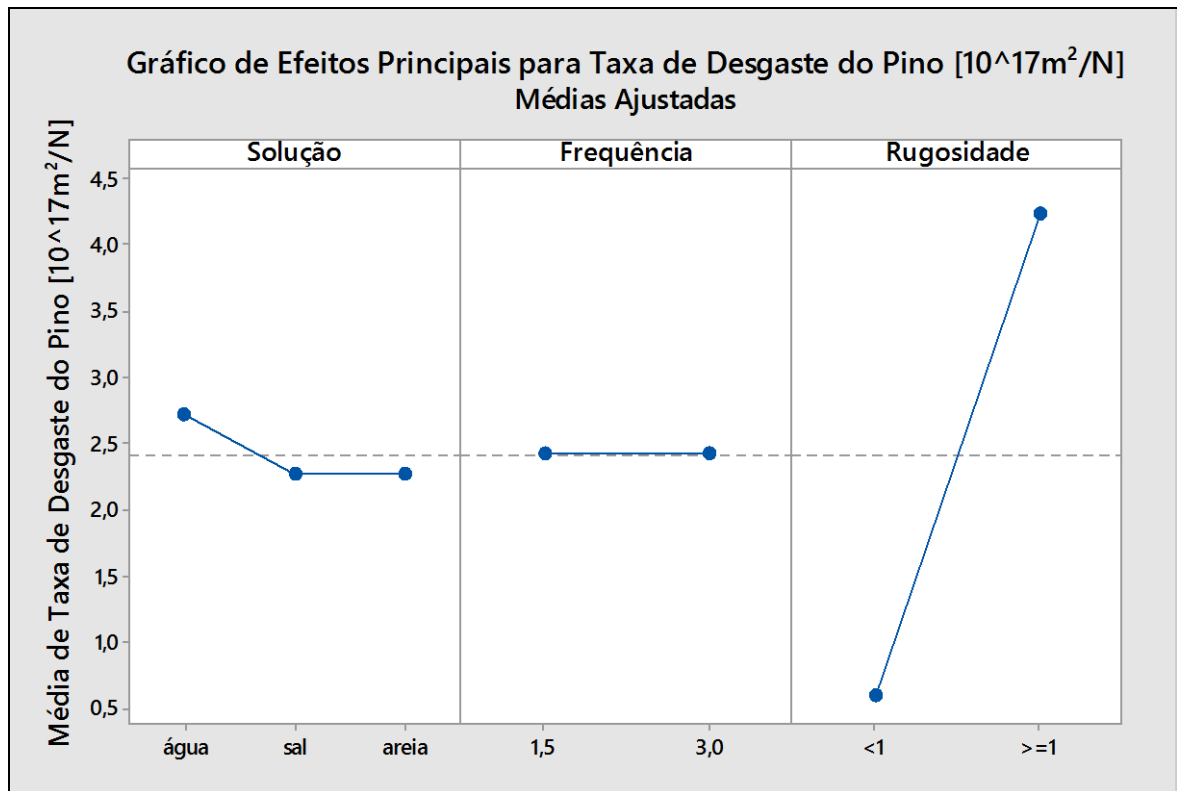
Fonte: O autor, 2015.

De forma análoga à dos ensaios em 3,0 Hz, amostras de poliamida ensaiadas com frequência de 1,5Hz em solução de areia com concentração de 700g por galão de água destilada, a área de desgastada nos ensaios foi praticamente igual tanto para as amostras com rugosidade média maior ou igual a 1,0  $\mu\text{m}$  quanto para as amostras com rugosidade média menor que 1,0  $\mu\text{m}$ . Então, como nas amostras citadas, pode ser considerada a predominância de mecanismo de desgaste abrasivo com conformação plástica da poliamida. As ranhuras e borras presentes na área de contato das amostras testadas em areia com frequência de 1,5 Hz podem ser visualizadas na Figura 36 (c) e (d).

A Figura 37 mostra o efeito dos parâmetros de entrada listados no DOE na taxa de desgaste dos pinos revestidos de poliamida, calculada a partir dos resultados dos obtidos nos ensaios (FERNANDES, 2010). Observando-a, é

comprovada a pouca influência da frequência de rotação dos ensaios na taxa de desgaste da poliamida, como verificado nas análises morfológicas. O fator predominante para variação da taxa de desgaste, nesse caso é a rugosidade média das superfícies de contato dos discos de aço.

Figura 37 - Gráfico de efeitos dos parâmetros do tipo da solução utilizada



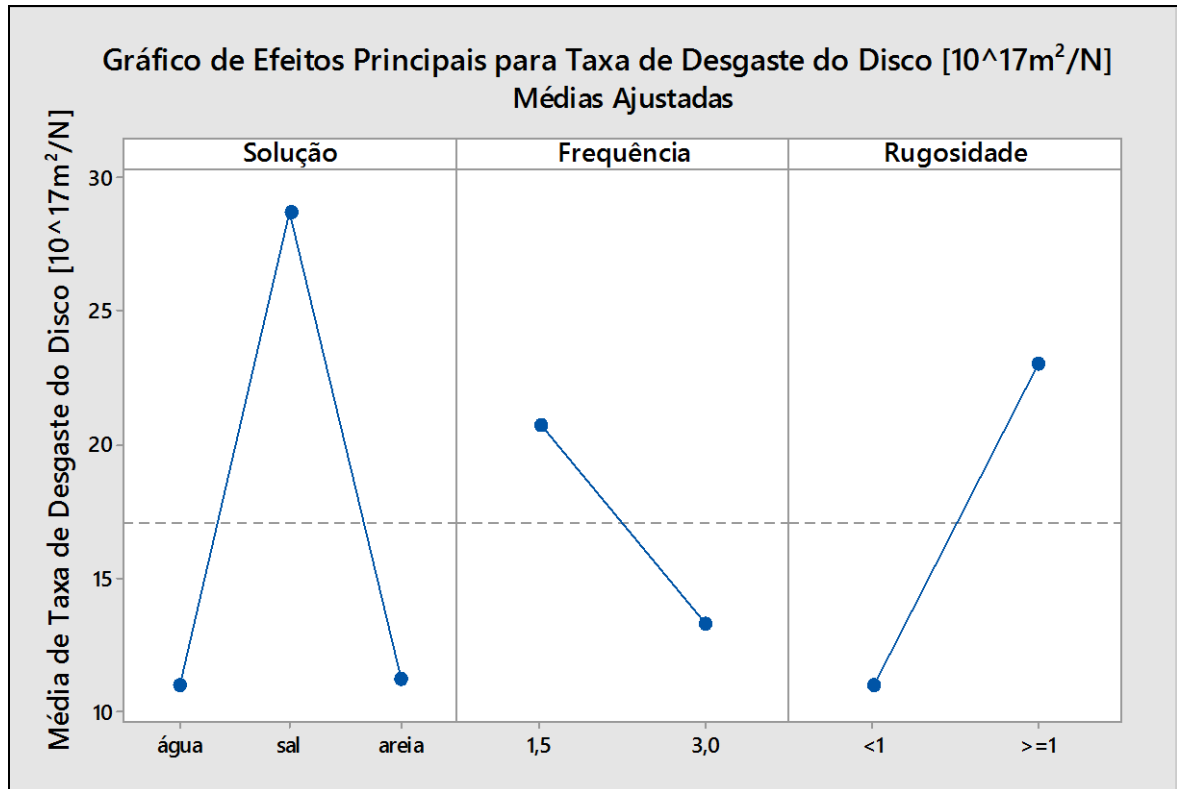
Fonte: O autor, 2015.

### 3.2.3 Avaliação Tribológica do aço SAE1020

Finalizados os ensaios tribológicos, as superfícies de contato dos discos de aço SAE 1020 foram limpas com álcool etílico de pureza analítica e foi realizada a microscopia ótica para análise morfológica do desgaste. Após a microscopia, foi feita nova limpeza das superfícies expostas às soluções de ensaio para retirada dos produtos de corrosão gerados na interface metal e solução eletrólito e a pesagem das amostras para obtenção dos valores de perda de massa durante o ensaio tribológico. A partir daí, utilizando os dados da na Tabela 10, é possível visualizar as

taxas de desgaste calculadas para os discos de aço e, na Figura 38, assim como relacionado para a poliamida, pode-se verificar aos principais efeitos dos parâmetros de entrada definidos no delineamento dos experimentos.

Figura 38 - Gráfico de efeitos dos parâmetros de tipo de solução utilizada



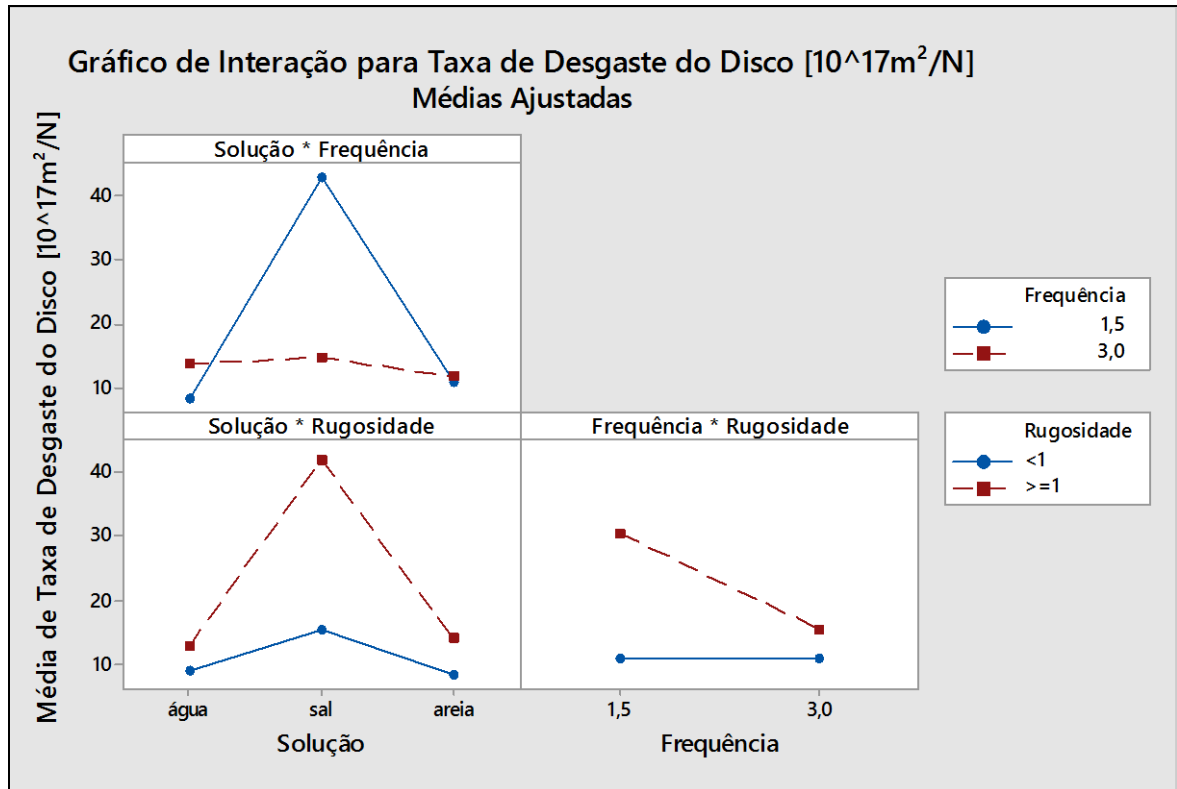
Fonte: O autor, 2015.

O Gráfico de efeitos principais para a taxa de desgaste do aço considerando a influência das soluções, da frequência e do nível de rugosidade, ilustrado na Figura 38, permite verificar que, ao contrário do que ocorreu nos contra corpos de poliamida, a solução eletrólito e a frequência de rotação do ensaio têm grande influência na taxa de desgaste.

Os gráficos de interação entre parâmetros (soluções, frequência e nível de rugosidade) para a taxa de desgaste do aço (FERNANDES, 2010), ilustrados na Figura 39, permitem avaliar que nos ensaios em solução de cloreto de sódio, a frequência de rotação mais lenta (1,5 Hz) tem mais influência nos resultados da taxa de desgaste que a mais veloz (3,0 Hz). Nos ensaios em água destilada, a frequência maior influencia um pouco mais na taxa de desgaste que a mais lenta. Já na solução de areia, pode-se considerar influência mínima da variação de frequência na taxa de

desgaste do aço. Considerando a variação do parâmetro de rugosidade, as maiores influências se dão nas condições de ensaio onde há utilização de solução de cloreto de sódio à frequência de rotação de 1,5 Hz.

Figura 39 - Gráfico de efeitos dos parâmetros de tipo de solução utilizada



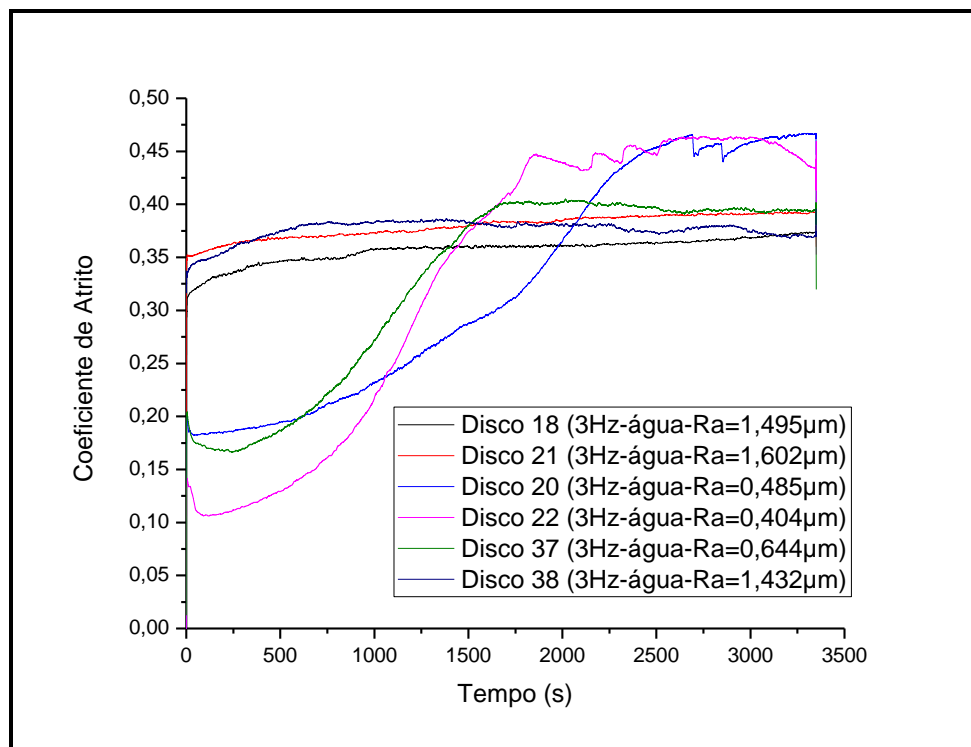
Fonte: O autor, 2015.

Os estudos estatísticos apresentados permitem, e são pontos de partida, para uma análise morfológica mais abrangente dos resultados de desgaste das amostras de aço SAE 1020 obtidos nos ensaios tribológicos. A partir daí, as considerações sobre o desgaste do aço foram categorizadas por tipo de solução eletrólito e frequência de ensaio, a mesma utilizada nas considerações para a poliamida.

### 3.2.3.1 Aço SAE1020 em Água Destilada

Como descrito na Tabela 10, os ensaios realizados com a interface submersa em água destilada foram categorizados com as amostras 8, 24, 26, 27, 39 e 40 em frequência de ensaio de 1,5 Hz e com as amostras 18, 20, 21, 22, 37 e 38 em frequência de 3,0 Hz. As amostras ensaiadas em água destilada com frequência de 3,0 Hz podem ser avaliadas na Figura 40.

Figura 40 - Curvas do ensaio tribológico em água destilada com frequência de 3,0 Hz



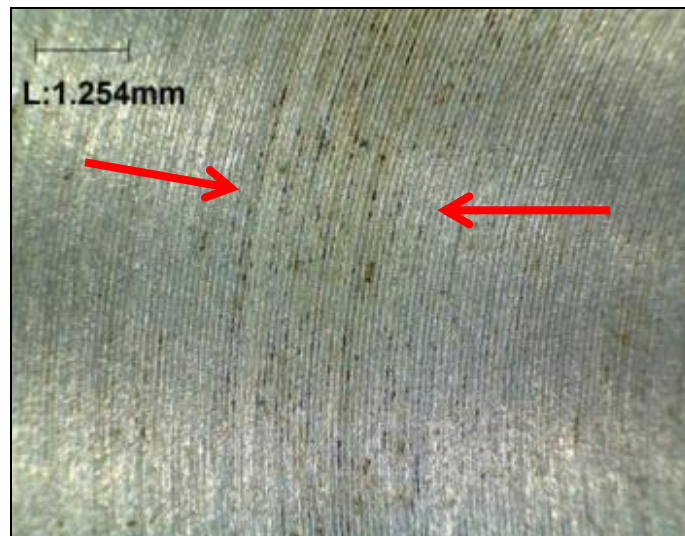
Fonte: O autor, 2015.

Nota-se, na Figura 40, que nas amostras com rugosidade média maior que 1,0 µm, as curvas que mostram o comportamento do coeficiente de atrito têm progressão com tendência aproximadamente constante. Essa condição sugere uma taxa de perda de volume de material com tendência linear e estabilizada. Já nas curvas das amostras com rugosidade média menor que 1,0 µm, a inclinação da rampa de crescimento do coeficiente de atrito sugere maiores perdas de volume de material na primeira metade dos ensaios. As diferenças na rugosidade da superfície

de contato e na carga aplicada na interface determinaram as inclinações das rampas das curvas de atrito de forma diferente das metodologias de ensaio utilizadas por Landolt (2006) e Wu (1993), onde a variação da solução eletrólito foi fator de efeito na taxa de desgaste estudada.

Indicadas na Figura 41, por microscopia ótica, foram evidenciadas ocorrências de deposição localizada de óxidos, produtos da corrosão do aço, na superfície das amostras com rugosidade média maior que  $1,0 \mu\text{m}$ . A deposição se deu na trilha de desgaste onde foram aplicados o carregamento normal e o carregamento de cisalhamento (deslizamento). Essa condição evidencia aumento na taxa de corrosão da superfície metálica e configura a predominância do desgaste corrosivo (KATO; ADACHI, 2001), causando perda de material na superfície. Após a retirada da porção de oxidação, foi verificada a perda de massa nas amostras e calculada a taxa de desgaste.

Figura 41 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 18

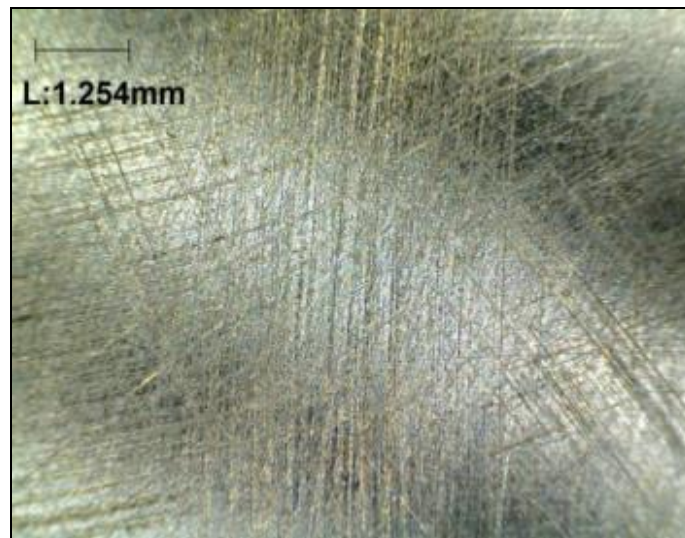


Nota: Setas indicam a deposição de óxidos, produtos da corrosão da amostra de aço.  $R_a=1,495 \mu\text{m}$ .  
Fonte: O autor, 2015.



Já nas amostras com rugosidade média menor que  $1,0 \mu\text{m}$ , com exemplo na Figura 42, a formação e o atrito dos produtos de corrosão na interface incrementou os valores de coeficiente de atrito. No início do teste, o coeficiente de atrito na interface é baixo por conta da superfície polida do aço e à medida que as interações eletroquímicas ocorrem, as partículas desses produtos penetram na interface, incitando aumento no desgaste. As considerações abordadas então em acordo com as designações da norma DIN50320 1979-12 e experimento com metodologia similar foi utilizada por Stemp, Mischler e Landolt (2001).

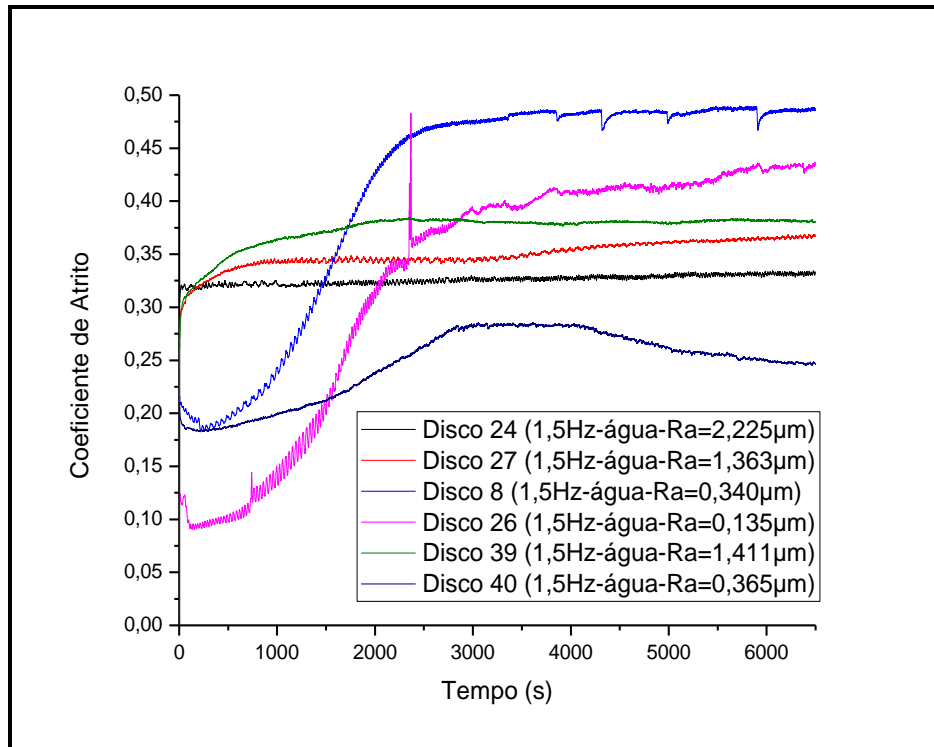
Figura 42 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 20



Nota:  $R_a=0,485 \mu\text{m}$ .  
Fonte: O autor, 2015.

Tento em vista as referências usadas na tratativa anterior, às amostras ensaiadas em água destilada com frequência de  $1,5 \text{ Hz}$ , podem ser avaliadas na Figura 43.

Figura 43 - Curvas do ensaio tribológico em água destilada

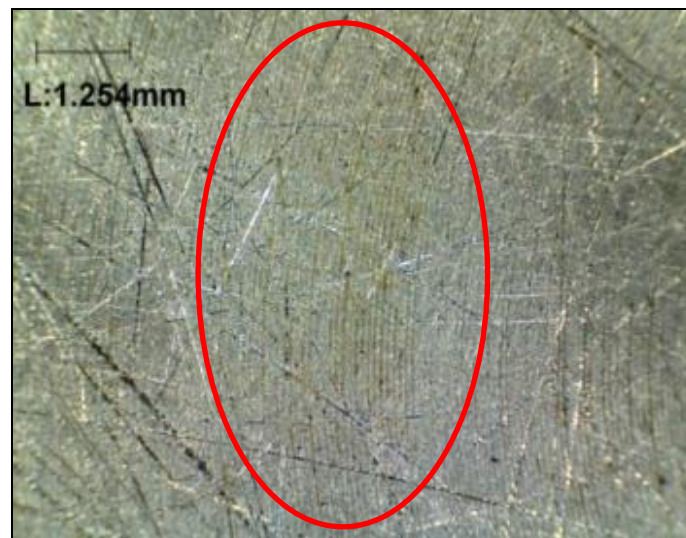


Nota: com frequência de 1,5 Hz.

Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 43, é possível visualizar que as curvas de coeficiente de atrito das amostras com rugosidades médias menores que  $1,0 \mu\text{m}$ , quando em regime permanente, têm valores de atrito maiores que as curvas de rugosidade média maiores que  $1,0 \mu\text{m}$ . Gonçalves Junior e Mello (2012) constataram em seus estudos tribológicos de metais com diferentes tratamentos superficiais que a texturização, para aumento da rugosidade da superfície, gera aumento no desgaste da amostra ensaiada. Assim como nas amostras ensaiadas em 3,0 Hz, não houve formação de trilha de desgaste visível nos discos com rugosidade maior que  $1,0 \mu\text{m}$ . Ao contrário da condição vista nas amostras com rugosidade média maior que  $1,0 \mu\text{m}$  e frequência 3,0 Hz, não houve formação perceptível de *pitch*s de corrosão na superfície metálica, mas há presença de borra amarelada, formada pelos produtos de corrosão do aço, nas ranhuras da superfície de contato da interface (Figura 44). Já nas amostras com rugosidade média menor que  $1,0 \mu\text{m}$  (Figura 45), a trilha formada pela deposição dos produtos da corrosão do aço pode ser visualizada e verificada a predominância de mecanismo de corrosão (KATO; ADACHI, 2001).

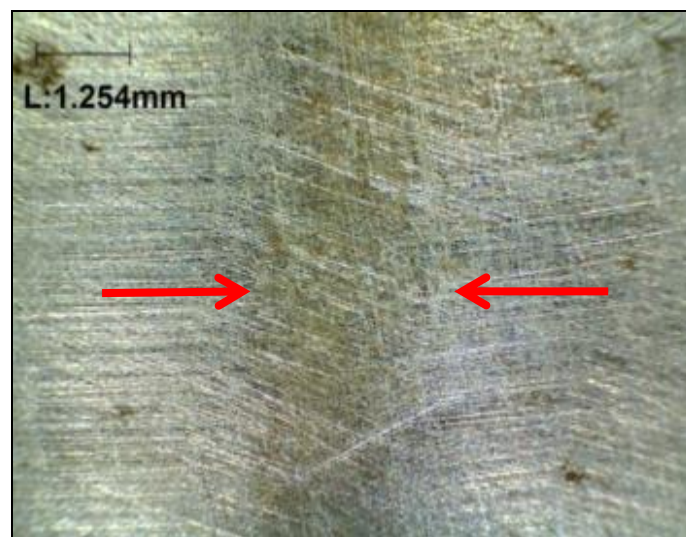
Figura 44 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 27



Nota: Área demarcada corresponde à com presença de produtos de corrosão do aço.  $R_a=1,363 \mu\text{m}$

Fonte: O autor, 2015.

Figura 45 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 8



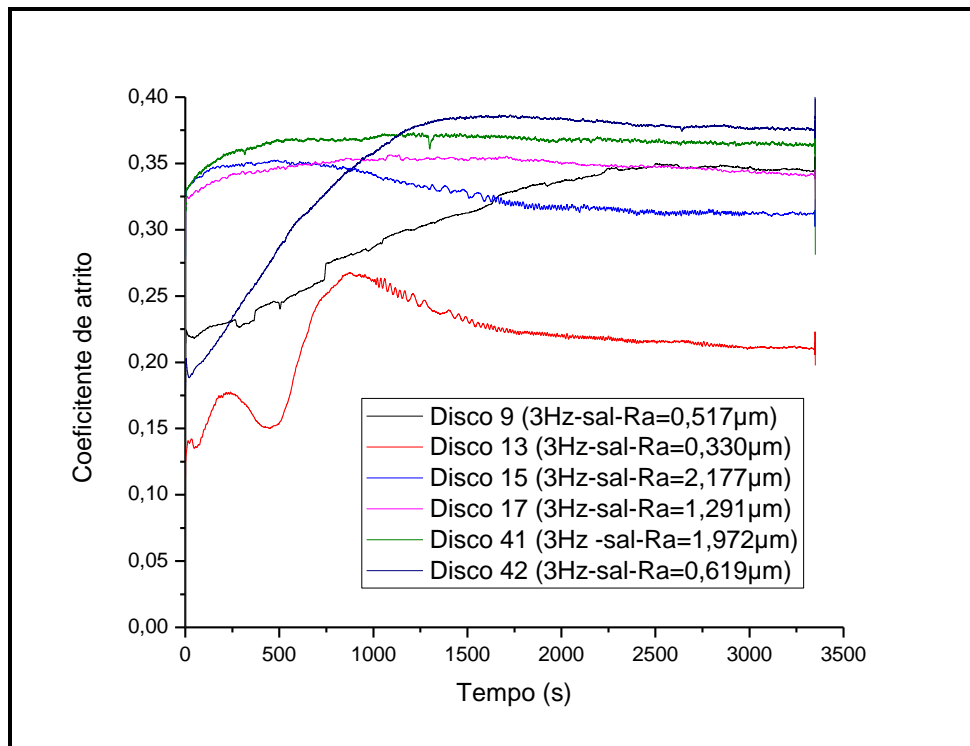
Nota: Área demarcada corresponde à com presença de produtos de corrosão do aço.  $R_a=0,340 \mu\text{m}$

Fonte: O autor, 2015.

### 3.2.3.2 Aço SAE1020 em solução 5% de cloreto de sódio

Simulando o ambiente corrosivo descrito nas normas técnicas automotivas VW PV1210:2010-02 e VW PV2982:2013-07, a solução de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 5% foi utilizada como eletrólito nos ensaios tribológicos a fim de simular efeitos de desgaste de interfaces deslizantes em ambientes de maresia e umidade. A Tabela 10 mostra os ensaios realizados com a interface submersa em solução com 5% em peso de cloreto de sódio, categorizados com as amostras 11, 12, 16, 23, 43 e 44 em frequência de ensaio de 1,5 Hz e com as amostras 9, 13, 15, 17, 41 e 42 em frequência de 3,0 Hz. As amostras ensaiadas em solução de cloreto de sódio com frequência de 3,0 Hz podem ser avaliadas na Figura 46.

Figura 46 - Curvas do ensaio tribológico em solução 5% em massa de cloreto de sódio com frequência de 3,0 Hz

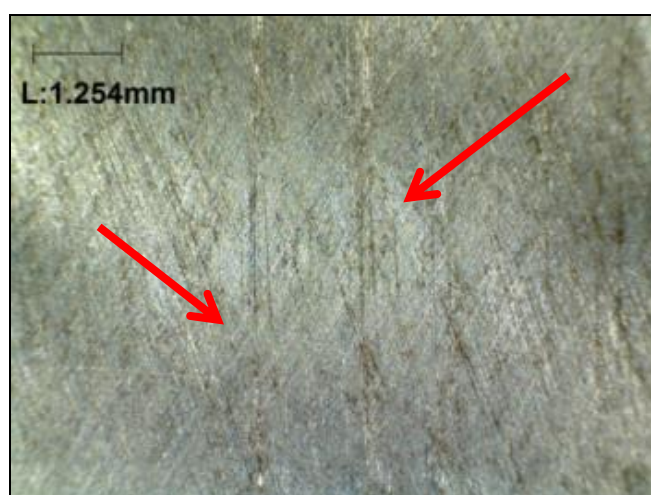


Fonte: O autor, 2015.

O comportamento da curva de coeficiente de atrito das amostras com média do perfil de rugosidade média menor que 1,0 µm mostra uma crescente com estabilização e entrada em regime permanente de atrito num tempo em torno de

1000 segundos após iniciados os ensaios. As diferenças de nível dos valores de coeficiente de atrito da porção estabilizada das curvas podem ser explicadas pela diferença nos valores de rugosidade média das superfícies das amostras de aço. A curva da amostra 9 (amostra com rugosidade média igual a  $0,517 \mu\text{m}$ ) mostra uma crescente no coeficiente de atrito até aproximadamente 2500 segundos do ensaio até a estabilização da curva com coeficiente de atrito em torno de 0,35. A curva da amostra 13 (amostra com média do perfil de rugosidade igual a  $0,330 \mu\text{m}$ ) mostra um comportamento oscilatório do coeficiente de atrito, até a estabilização em aproximadamente 0,20, por aproximadamente 1500 segundos. As variações nos valores de coeficientes de atrito das curvas estabilizadas em função da rugosidade mostradas na Figura 3.17, em conjunto com as análises de Wu (1993), que avaliou o coeficiente de atrito em função das concentrações das soluções de cloreto de sódio, e de Mischler et al. (2001), que avaliou o potencial aplicado, comprovam a eficácia da análise estatística de efeitos adotada para os ensaios tribológicos. A formação de riscos e ranhuras na área da trilha determina que houve atuação do mecanismo de desgaste abrasivo na amostra de aço e, apesar de não ter gerado influência visível na superfície polimérica, houve degradação na superfície metálica, como indicado na Figura 47.

Figura 47 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 9

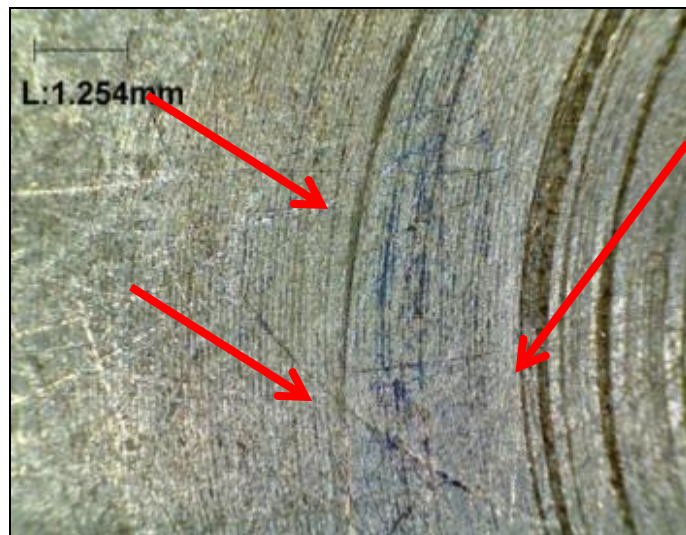


Nota: Área demarcada corresponde à com marcas de desgaste aparente.  $R_a=0,517 \mu\text{m}$ .

Fonte: O autor, 2015.

A trilha de desgaste formada nos ensaios dessas amostras mostrou a ocorrência de riscos e ranhuras e, diferente dos outros ensaios, notou-se a presença de manchas azuladas características de fenômenos de curto-circuito. A microscopia das superfícies metálicas não apresentou presença de resíduos poliméricos aderidos ao metal. Sendo assim, a formação das manchas de curto-circuito pode ser atribuída às variações na intensidade das reações eletroquímicas entre a superfície metálica e o eletrólito (LANDOLT, 2006). A Figura 48 mostra as marcas da trilha de desgaste e as manchas azuladas na superfície da amostra de aço de número 15.

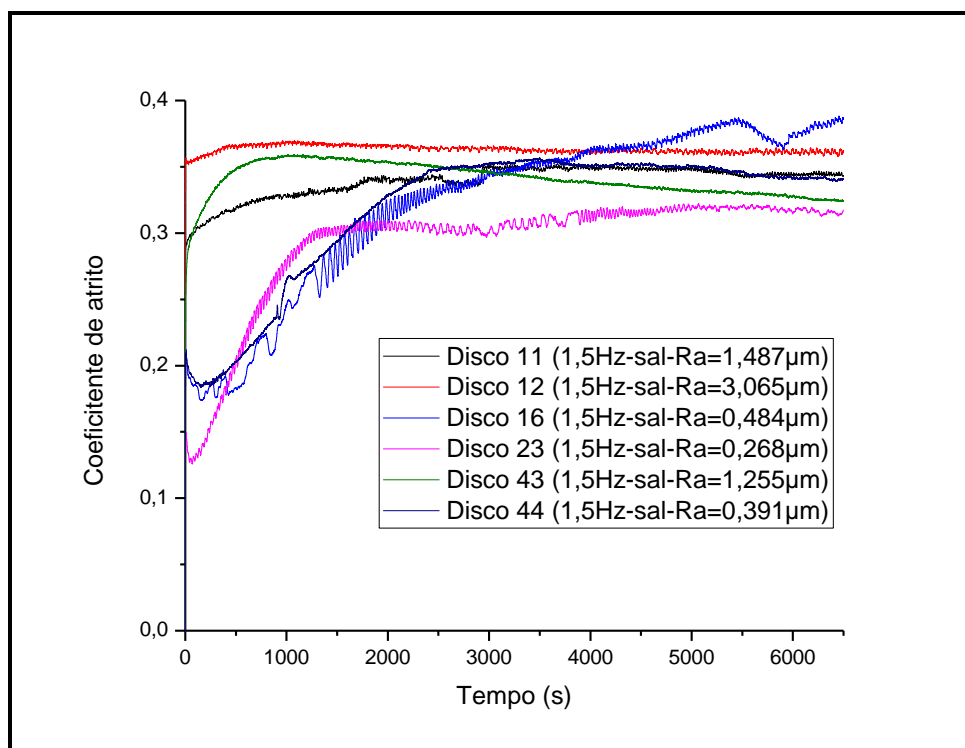
Figura 48 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 15



Nota: Área demarcada corresponde à com marcas de desgaste aparente.  $R_a=2,177 \mu\text{m}$

Fonte: O autor, 2015.

Figura 49 - Curvas do ensaio tribológico em solução 5% em massa de cloreto de sódio com frequência de 1,5Hz



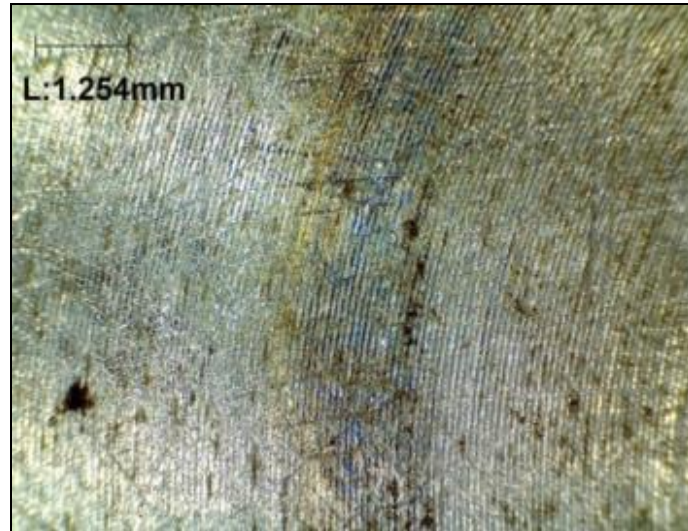
Fonte: O autor, 2015.

O comportamento das curvas de coeficiente de atrito das amostras ensaiadas em eletrólito 5% em massa de cloreto de sódio e frequência 1,5 Hz (Figura 49), considerada a proporção de tempo, se deu de forma similar as amostras ensaiadas em 3,0 Hz. Nas amostras 11 e 12, os níveis de rugosidade impossibilitam a identificação precisa do intervalo de tempo onde há a formação da trilha de desgaste, pois estes níveis, 1,487 Ra e 3,065 Ra respectivamente, propiciam um início de ensaio tribológico com coeficientes de atrito com valores próximos aos valores máximos adquiridos nas curvas. Essa condição faz com que as curvas de coeficiente de atrito dessas amostras mostrem taxas de desgaste aproximadamente constantes.

Foi identificada na superfície da amostra de aço de número 12 a presença de trilha de desgaste visível, com presença, também, de deposição de produtos de corrosão do aço (manchas amareladas), manchas azuladas representativas de fenômenos de curto-circuito e formação de pontos de corrosão. Não foram encontrados resíduos de poliamida aderidos à superfície do disco de aço nem resíduos de metal aderidos à superfície dos pinos revestidos de poliamida 11 usados

nos ensaios. É possível visualizar esses fenômenos na microscopia ótica da amostra 12, mostrada na Figura 50.

Figura 50 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 12



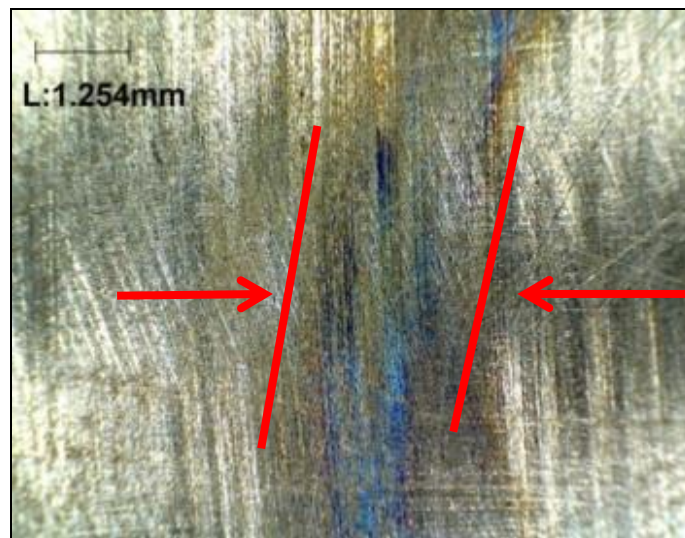
Nota:  $R_a=3,065\mu\text{m}$

Fonte: O autor, 2015.

As trilhas de desgaste formadas nos ensaios tribológicos das amostras com rugosidade média menor que  $1,0\ \mu\text{m}$  tiveram presença acintosa de manchas azuladas representativas de fenômenos de curto-circuito e deposição de produtos de corrosão do aço na superfície metálica. Os rios e ranhuras, pouco profundos, na superfície metálica, tiveram profundidade suficiente para ressaltar a abrangência das manchas em quase toda a extensão da seção da trilha. A Figura 51 mostra a trilha de desgaste do ensaio tribológico na amostra 16, com indicação aproximada da zona onde a ocorrência das manchas azuladas pode ser visualizada.



Figura 51 - Superfície pós-ensaio tribológico da amostra 16



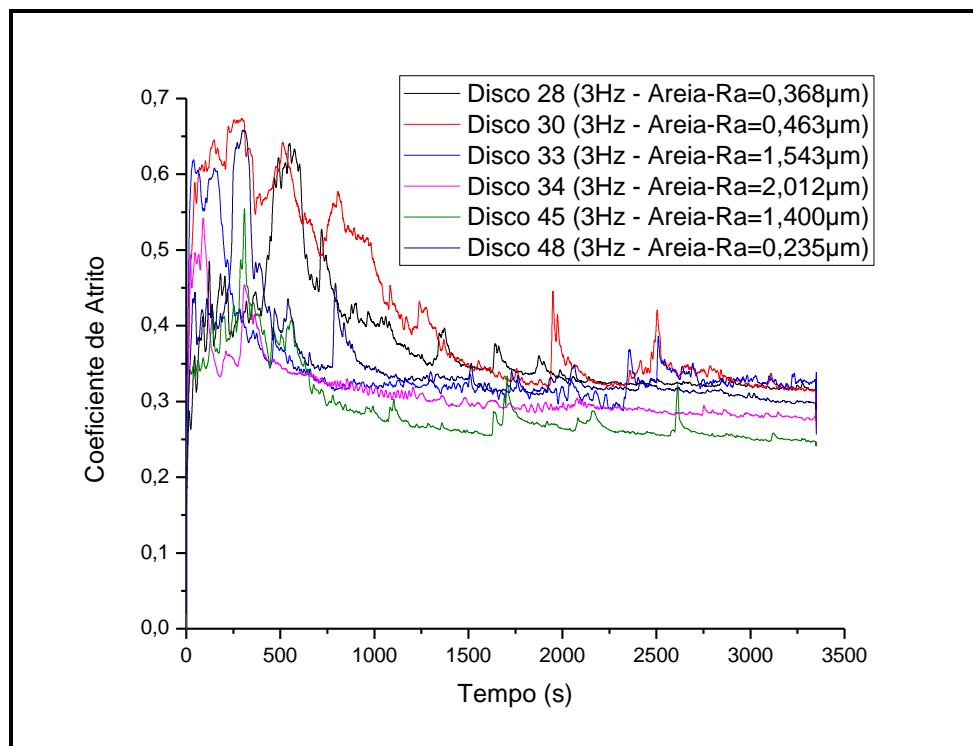
Nota: Área demarcada corresponde à com presença de produtos de corrosão do aço.  $R_a=0,484\mu\text{m}$

Fonte: O autor, 2015.

### 3.2.3.3 Aço SAE1020 em solução 184,21 g/l. de areia natural

A fim de simular um ambiente corrosivo mais severo que o descrito na norma técnica automotiva VW PV1210:2010-02, foi selecionada uma areia natural, com distribuição granulométrica em torno de três vezes maior que a areia padronizada SAE "air cleaner dust fine" (VW PV1210:2010-02) obtida em forma bruta no Estado do Arizona (U.S.A.), para preparo da solução de teste com concentração de 700 gramas de areia para cada galão de água destilada. Esta solução foi utilizada como eletrólito nos ensaios tribológicos a fim de simular efeitos de desgaste de interfaces deslizantes em ambientes de rodagem "off-road" (estradas de terra, arenosas, trilhas etc.). A Figura 52 mostra o comportamento das curvas de coeficiente de atrito dos ensaios tribológicos nessa solução de areia, em frequência de 3,0 Hz.

Figura 52 - Curvas do ensaio tribológico em solução 184,21 g/l de areia com frequência de 3,0 Hz



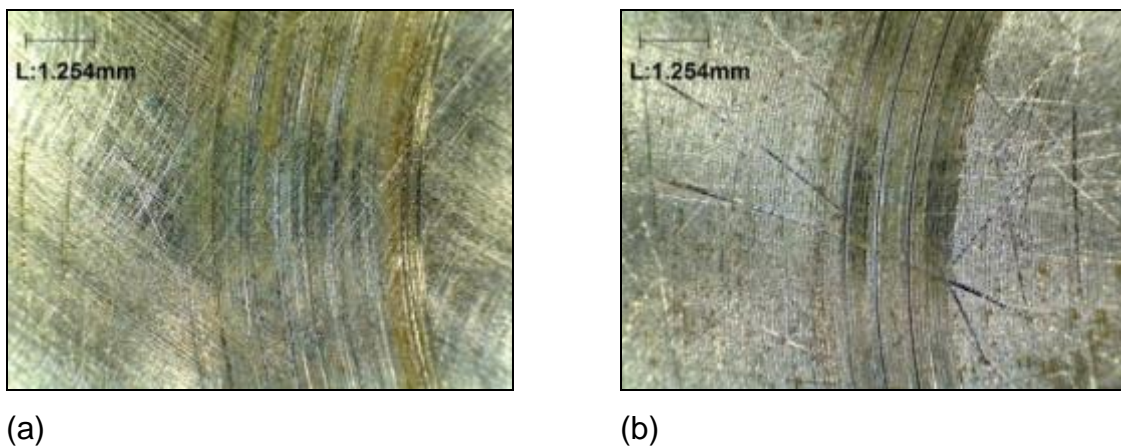
Fonte: O autor, 2015.

A solução de areia usada nos ensaios tribológicos (areia + água destilada – concentração 184,21 g/l) é uma solução com concentração supersaturada. Portanto, o precipitado rola, sob pressão, nas interfaces de teste durante o deslizamento. À medida que o precipitado atrita com as superfícies de contato da interface, há formação de ranhuras de desgaste em ambas as superfícies. Por conta dessas condições, as curvas de coeficiente de atrito dos ensaios tribológicos em solução de areia têm ápice nos primeiros minutos de teste e à medida que se desenvolve o período, as partículas de precipitado rolam para fora da interface por conta das forças tangenciais que atuam na suspensão devido à geometria e à rotação no ensaio.

As trilhas de desgaste das amostras ensaiadas na solução de areia podem ser visualizadas com bastante facilidade por conta das ranhuras profundas formadas pelo rolamento do precipitado na interface (DIN50320 1979-12). Essa configuração evidencia que além da influência do mecanismo de desgaste corrosivo, o mecanismo de desgaste abrasivo de 3 corpos (KATO; ADACHI, 2000) é dominante na interface. Nos ensaios realizados com frequência de 3,0 Hz, Figura 52, a

rugosidade média das amostras influenciou no tempo no qual a interface permaneceu sujeita ao rolamento das partículas de precipitado. As curvas de coeficiente de atrito mostram que as amostras com rugosidade média menor que  $1,0 \mu\text{m}$  estão sujeitas à maiores coeficientes de atrito, o que permite afirmar, nesse caso, que o desgaste é maior nessas amostras que nas com rugosidade média maior que  $1,0 \mu\text{m}$ . A Figura 53 mostra as trilhas de desgaste das superfícies das amostras 28, rugosidade média  $0,368 \mu\text{m}$ , e 34, rugosidade média  $2,012 \mu\text{m}$ .

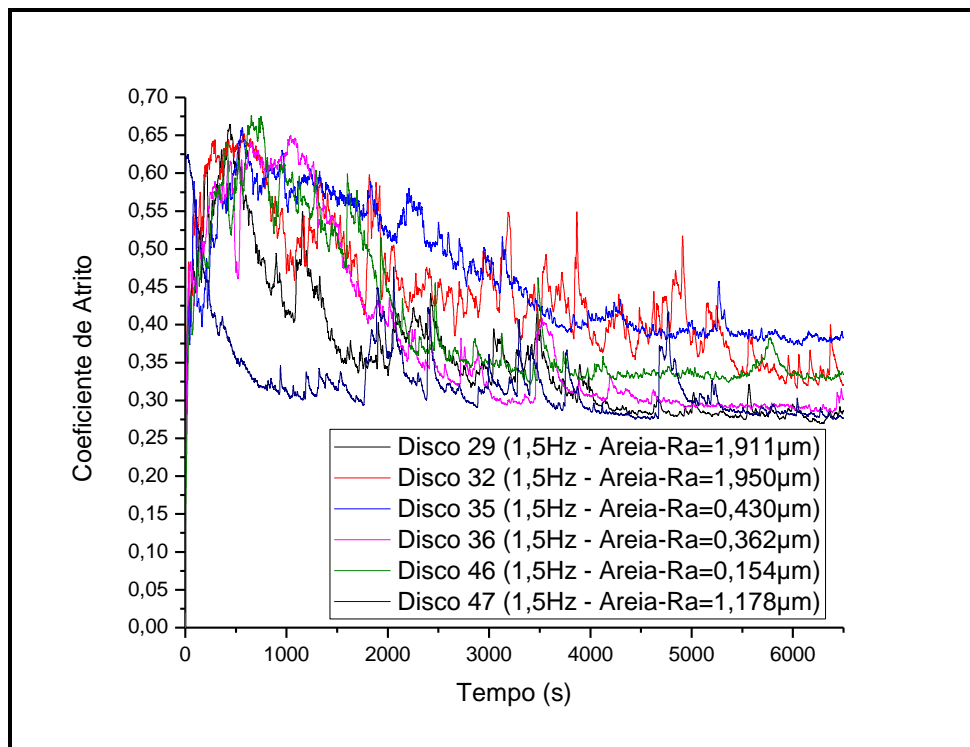
Figura 53 - Superfície pós-ensaio tribológico em solução de areia a  $3,0 \text{ Hz}$



Legenda: (a) - amostra 28  $R_a=0,368 \mu\text{m}$ ; (b) - amostra 34  $R_a=2,012 \mu\text{m}$ .  
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 54 mostra o comportamento das curvas de coeficiente de atrito dos ensaios tribológicos na solução de areia com concentração de  $184,21 \text{ g/l}$  e frequência de  $1,5 \text{ Hz}$ .

Figura 54 - Curvas do ensaio tribológico em solução 184,21 g/l de areia com frequência de 1,5 Hz

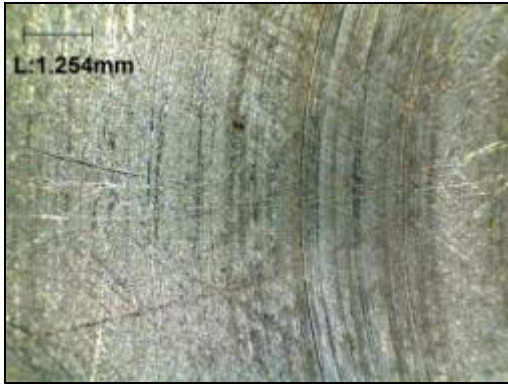


Fonte: O autor, 2015.

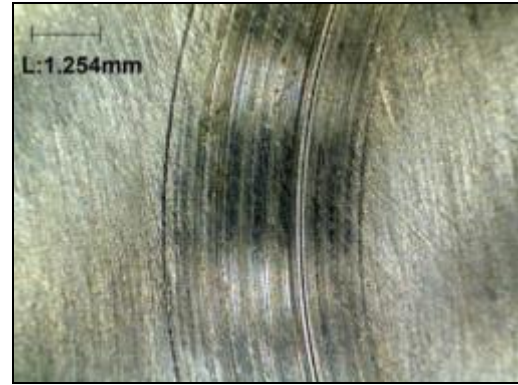
Os picos nas curvas de coeficiente de atrito dos ensaios tribológicos em frequência de 1,5 Hz mostram efeito da rolagem das partículas de precipitado em todo o período de teste nas amostras com rugosidade média maior ou igual a 1,0 µm.

Foi possível visualizar as trilhas de desgaste tanto nas amostras com rugosidade média menor a 1,0 µm quanto nas amostras com rugosidade média maior ou igual a 1,0 µm, sendo que as ranhuras encontradas na trilha de desgaste das amostras com rugosidade média maior ou igual a 1,0 µm tiveram aparência mais branda, enquanto que as ranhuras visualizadas nas trilhas das amostras com rugosidade média menor a 1,0 µm aparentaram ser mais profundas. Não foi possível visualizar a presença de produtos de corrosão do aço depositados nas áreas das trilhas e nos ensaios tribológicos realizados. Independente da frequência ensaiada, também não foi possível visualizar manchas atribuídas às interações eletroquímicas. A Figura 55 mostra as trilhas de desgaste formadas nos ensaios tribológicos das amostras 29 e 35, respectivamente.

Figura 55 - Superfície pós-ensaio tribológico em solução de areia e 1,5 Hz



(a)



(b)

Legenda: (a) - amostra 29 Ra=1,911  $\mu\text{m}$ ; (b) - amostra 35 Ra=0,430  $\mu\text{m}$   
Fonte: O autor, 2015.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho, foram analisados os diferentes mecanismos de desgaste e os desgastes, propriamente ditos, das interfaces controladas formadas por aço SAE 1020 e Poliamida 11 em ensaios tribológicos com equipamento do tipo pino-no-disco. As amostras de aço ensaiadas foram subdivididas em dois níveis de rugosidade para a superfície de contato, rugosidade média menor que  $1,0 \mu\text{m}$  e maior ou igual a  $1,0 \mu\text{m}$ . Estas foram ensaiadas em eletrólitos de água destilada, solução 5% em massa de cloreto de sódio e solução de areia com concentração de 700 gramas por galão de água destilada; em frequências de 3,0 Hz e 1,5 Hz por 10.000 ciclos de rotação.

O uso das ferramentas estatísticas da metodologia de Delineamento de Experimentos mostrou ser bastante confiável como ponto de partida para identificação dos principais efeitos dos testes para a análise morfológica das amostras de aço SAE 1020 e de poliamida 11.

O mecanismo de desgaste predominante nas amostras de poliamida foi o abrasivo sem delaminação. Por não ter havido perda de massa significativa nessas amostras poliméricas depois de realizados os ensaios tribológicos, a abrasão propiciou somente a deformação plástica da superfície de contato do plástico.

Não houve deposição de poliamida na superfície desgastada das amostras de aço, nem deposição de material metálico na superfície de contato da poliamida. Por essa consideração, é possível afirmar que não houve influência significativa do mecanismo de desgaste adesivo nos ensaios realizados.

Em todos os ensaios realizados, tanto nas amostras de aço quanto nas de poliamida, o mecanismo de desgaste predominante foi o abrasivo. Houve atuação, também, do mecanismo de desgaste corrosivo, no aço, que gerou deposição de material (produtos de corrosão) nas superfícies de ambos os tipos de amostras.

Ainda considerando a ausência de perda de massa nas amostras de poliamida, a área desgastada na superfície de contato dessas amostras foi maior onde a rugosidade média dos discos de aço foi maior que  $1,0 \mu\text{m}$ .

O fator “frequência” não influenciou significativamente o desgaste da poliamida nos ensaios em água destilada e na solução de cloreto de sódio.

As taxas de desgaste e as perdas de material das amostras de aço foram maiores nas amostras ensaiadas em solução 5% em massa de cloreto de sódio. O uso da areia natural em detrimento da areia padronizada SAE “*air cleaner dust fine*” (VW PV1210:2010-02) gerou resultado inconclusivo, uma vez que era esperada uma condição de ensaio mais severa, devido à presença de partículas duras de precipitado da solução hipersaturada (184,21 g de areia para 1 litro de água destilada). As ranhuras e riscos encontrados nas superfícies ensaiadas na solução de areia foram maiores e mais visíveis que nas amostras ensaiadas em cloreto de sódio. Neste caso, como as perdas de massa nos aços ensaiados em cloreto de sódio foram maiores, faz-se necessária a análise de outros tipos de areias para a obtenção de condições de uso mais severas para a interface.

As taxas de desgaste nas amostras ensaiadas na solução de areia foram maiores que nas amostras ensaiadas em água destilada.

Considerando o uso na indústria automotiva, principalmente em sistemas deslizantes que atuam com o movimento da suspensão dos veículos, nas proporções de teste utilizadas, a interface, quando sujeita à intempéries com particulado arenoso ou com granulometria tal que seja plenamente visível a olho nu, tende a apresentar nível de desgaste exclusivamente mecânico acentuado. Já quando sujeita à maresia e ou outras intempéries ricas em soluções salinas de cloreto de sódio, o desgaste corrosivo tem maior efeito degradante que o desgaste puramente mecânico. A complementação entre os efeitos de desgaste corrosivos e mecânicos sob a ação do cloreto gera maior taxa de desgaste específica na interface. Este desgaste, afeta as funções de conforto na movimentação dos sistemas e gera insatisfação direta do usuário final do veículo, por conta do nível de ruído proporcionado pelo componente desgastado, além de comprometer a atuação dos sistemas de colapso desses sistemas, o que pode aumentar o risco de morte numa colisão.

## REFERÊNCIAS

- ARCELOR MITTAL. Aços longos, Guia do Aço. Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2015.
- AIR FILTER TESTING LABORATORIES INC. Performance Testing Labor. Test Dusts & Supplies Capabilities List – January 2007. Disponível em: <[http://www.aftl.net/test\\_supplies.pdf](http://www.aftl.net/test_supplies.pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion. Designation: G119-09. West Conshohocken, United States, 2009. 7 f.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. Designation: B117-11. West Conshohocken, United States, 2010. 12 f.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. Designation: G40-05. West Conshohocken, United States, 2005. vol. 03.02, 9 f.
- ARIAS-CASTRO, Ery; DONOHO, David L. Does median filtering truly preserve edges better than linear filtering? *The Annals of statistics*, v. 37, n. 3, p. 1172 – 1206, 2009.
- BATCHELOR, A. W.; STACHOWIAK, G. W. Predicting synergism between corrosion and abrasive wear. *Wear*, v. 123, p. 281-291, 1988.
- BELLO, J. O.; WOOD, R. J. K.; WHARTON, J. A. Synergistic effects of micro-abrasion-corrosion of UNS S30403, S31603 and S32760 stainless steels. *Wear*, v. 263, p. 149-159, 2007.
- BOGARD, D. G.; SCHMIDT, D. L.; TABBITA, M. Characterization and laboratory simulation of turbine airfoil surface roughness and associated heat transfer. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Designation: 96-GT-386. [s.l.]: ASME, 1996. 7 f.
- BRISCOE, B. J. Materials aspects of polymer wear. Scripta Metalurgica at Material, v. 24, p. 839-844, 1990.
- BRENTNALL, A. B.; LANCASTER, J. K. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Proceedings of the wear of materials Congress. [s.l.]: ASME, 1989. p. 596-603, 1989.
- CLERICO, M. A study of the friction and wear of nylon against metal. *Wear*, v. 13, p. 183-97, 1969.



DE BAETS, P. Wear simulation of a sliding system by means of large scale specimen testing. Wear, v.173, p. 65-74, 1994.

DEKOUINK, C. P. DE BOERS, P.; VAN DE VELDE, F. A highlight on tribological research: friction and wear devices. European Journal of Mechanical Engineering, v. 40, p. 154-156, 1995.

DIN. Wear - Terms - Systems Analysis Of Wear Processes - Classification Of The Field Of Wear. Designation: 50320 (1979-12). Germany, 1997. 8f.

FERNANDES, C. dos S. Efeito da Temperatura, da Concentração de Fluido e da Água na Corrosão do Aço Carbono. 2010. 40f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Politécnico, Universidade do estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2010.

FERREIRA, M. S. C.; MEDEIROS, J. T. N.; DA SILVA, R. C. L. Estudo do comportamento do PTFE contra aço AISI4140 em ensaios de deslizamento à seco variando-se a vibração do sistema. PublCaV, p. 60 – 68, 2009.

FRIEDRICH, K. Friction and wear of polymer composites. Amsterdam: Elsevier, 1986.

GENTIL, Vicente. Corrosão. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345 p.

GONÇALVES JUNIOR, J. L.; MELLO, J. D. B. Avaliação Tribológica do Cromo Duro e Texturização Aplicadas em Aços para a Fabricação de Cilindros de Laminação à Frio. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 9, n. 4, p. 336-344, out/dez. 2012.

HENRY, P.; TAKADOUM J.; BERÇOT, P. Tribocorrosion of 316L stainless steel and TA6V4 alloy in H2SO4 media. Corrosion Science, v. 51, p. 1308-1314, 2009.

HOOKE, C.J. et al. The friction and wear of polymers in non-conformal contacts. Wear, v. 200, p. 83-94, 1996.

HUTCHINGS, I. M. Tribology: friction and wear of engineering materials. London: Edward Arnold, 1992. p. 51.

JOST, H. P. Lubrication (tribology) education and research. London: Department of Education and Science/HMSO, 1966. 4 f.

JOST, H. P. Tribology-origin and future. Wear, v.136, p.1-17, 1990.

KATO, Koji; ADACHI, Koshi. Modern Tribology Handbook. [s.l.]: CRC, 2000. v. 2, chapter 7: Wear Mechanisms.

LANCASTER, J. K. Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance. Tribology Int., 1973.

LANCASTER, J. K. Material-specific wear mechanisms: relevance to wear modelling. Wear, v. 141, p. 159-183, 1990.

LANDOLT, D. Electrochemical and materials aspects of tribocorrosion systems. Journal Of Physics D: Applied Physics, v. 39, p. 3121-3127, July 2006.

LAWRENCE, C. C.; STOLARSKI, T. A. Rolling contact wear of polymers: a preliminary study. Wear, v. 132, p. 83-91, 1989.

LAYARD, A. G. Discoveries in the Ruins of Nineveh and Babylon, I and II. 1853. London. In: BHUSHAN, B. Introduction Measurement Techniques and Applications. Handbook of Micro / Nano tribology. Boca Raton: CRC, 1999. Chap. 1.

MARK, J. E. Polymer Data Handbook. Oxford, UK: Oxford University Press, 1999.

MISCHLER, S. et al. Influence of passivity on the tribocorrosion of carbon steel in aqueous solutions. Wear, v.251, p.1295-1307, 2001.

NUNES, R. A. X. Abrasão, desgaste e atrito sob deslizamento de recobrimentos preparados por aspersão térmica a partir de PET pós-consumo. 2008. 219f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2008.

POGAČNIK, A.; KALIN, M. Parameters influencing the running-in and long-term tribological behavior of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel. Wear, v. 290-291, p. 140-148, 2012.

PONTHIAUX, P. et al. Electrochemical techniques for studying tribocorrosion processes. Wear, v. 256, p. 459-468, 2004.

RABINER, L. R.; SAMBUR, M. R.; SCHMIDT, C. E. Applications of a Nonlinear Smoothing Algorithm to Speech Processing. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, v. 23, n. 6, p. 522–557, Dec. 1975.

RADI, Polyana A. et al. Tribologia, Conceitos e Aplicações. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA, 13., 2007, São José dos Campos. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA/2007. São José dos Campos – SP, 2007. 13 f.

ROSA, Avital G. A. Compósito de Poliamida 6,6 como elemento de atrito. 2012. 78 f. Monografia (Graduação em Tecnólogo em Polímero) – Faculdade Estadual de Sorocaba, Sorocaba – SP, 2012.

SALMORIA, G. V.; MARTINS, F. M.; FÚCIO, D. M. Tratamento da superfície de cateteres de poliamida 11 por plasma de oxigênio. Polímeros, v. 23, n. 4, p. 565-569, 2013.

SANTNER, E.; CZICHOS, H. Tribology of Polymers. Tribology International., v. 122, n. 2, p. 103-109, 1989.

SILVA, D. P. Comportamento tribocorrosivo do aço inoxidável e de ligas de titânio em meio salino. 2014. 166f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014.

SILVA, R. C. Tribocorrosão do aço UNS S32750 em meio cloretado: instrumentação e resultados experimentais. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2010.

STEMP, M.; MISCHLER, S.; LANDOLT, D. Electrochemical Aspects of Tribocorrosion. In: \_\_\_\_\_. Tribology research: From Model Experiment to Industrial Problem. [s.l.]: Elsevier, 2001. p. 539–547.

SUSKI, C. A. Estudo do Efeito de Tratamentos e Revestimentos Superficiais na Vida de Ferramentas de Conformação Mecânica à Frio, 2004. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2004.

UNAL, H.; SEM, U.; MIMAROGLU, A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counter face. Tribology International, v. 37, p. 727-732, 2004.

VAN DE VELDE, F.; DE BAETS, P. The friction and wear behavior of polyamide 6 sliding against steel at low velocity under very high contact. Wear, v. 209, p. 106-114, 1996.

VIÁFARA, C. C.; SINATORA, A. Influence of hardness of the harder body on wear regime transition in a sliding pair of steels. Wear, v. 267, p. 425-432, 2009.

VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT. Body and Add-On Parts – Corrosion Tests. Designation: PV1210:2010-02. Germany, 2010. 5 f.

VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT. Steering Column Assembly strength and Functional Requirements. Designation: PV2982BR:2013-07. MAN, Brasil, 2013. 12 f.

WATSON, S.W. et al. Methods of measuring wear-corrosion synergism. Wear, v. 181-183, p. 476-484, 1995.

WU, Chung-Wen. Corrosion-wear Study of 304 stainless steel in various NaCl solutions. Wear, v. 162-164, p. 950-953, 1993.

YAMAGUCHI, Y.. Tribology of plastic materials: their characteristics and applications to sliding components. Amsterdam: Elsevier, 1990.

ZUM GAHR, Karl-Heinz. Microstructure and Wear of Materials. [s.l.]: Elsevier, 1987. p. 1-6.