

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**JULIANO BORGES**

**AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO SOBRE  
LIGA DE ALUMÍNIO FUNDIDA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2**

**GUARAPUAVA**

**2017**

**JULIANO BORGES**

**AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO SOBRE  
LIGA DE ALUMÍNIO FUNDIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
2 apresentado como requisito à obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica, do Departamento de  
Engenharia Mecânica, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sílvia do  
Nascimento Rosa

**GUARAPUAVA**

**2017**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Guarapuava  
Diretoria de Graduação  
Coordenação da Engenharia Mecânica  
Engenharia Mecânica



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO SOBRE LIGA DE ALUMÍNIO FUNDIDA**

por

**JULIANO BORGES**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 29 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Sílvia do Nascimento Rosa  
Prof<sup>a</sup> Orientadora

---

Henrique Ajuz Holzmann  
Membro titular

---

Luan José Franchini Ferreira  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente a Deus por me proporcionar coragem, ânimo, saúde, paz de espírito e sabedoria na tomada de decisões para percorrer todo o caminho de mais esta etapa. Esta caminhada foi marcada por algumas perdas muito difíceis e senti-me agraciado por Deus para suportá-las e superá-las. Agradeço a todos os familiares que contribuíram com suas experiências, conselhos, amparo e incentivo. Em especial minha esposa, Luci Kaveski, que foi paciente e fez grandes e sábias contribuições nesta trajetória.

À professora Sílvia do Nascimento Rosa pela aceitação em me orientar, pela dedicação, empenho e disposição para transmitir seu conhecimento. Pelas proveitosas discussões e auxílio em todas as etapas no desenvolvimento deste trabalho. Pela agilidade com a qual estabeleceu contato com todos os parceiros externos.

Ao professor Everson do Prado Banczek, da Universidade Estadual do Centro Oeste, pelo acolhimento desta proposta, pela dedicação e disponibilização do seu tempo para me guiar nas etapas realizadas nos laboratórios de sua Universidade.

Ao professor Giuseppe Pintaude e à aluna de pós-doutorado Ane Cheila Rovani da UTFPR de Curitiba por ceder seu laboratório para a realização dos testes de tribologia. À Ane por compartilhar parte do seu conhecimento e contribuir em muitos pontos na confecção deste trabalho.

À Adriana do Nascimento e Silva, técnica do laboratório da UTFPR de Guarapuava, pela dedicação, disposição e tempo empregado para me auxiliar na utilização dos equipamentos.

Meus agradecimentos à empresa Frenobrás pela abertura das portas para a realização do estudo.

Minha gratidão ao apoio financeiro cedido pela UTFPR de Guarapuava para realização dos experimentos.

Agradeço a todos que contribuíram diretamente e indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho. Aos professores que proferiram palavras de incentivo, desejando-me força e dando norte a este objeto de estudo.

## RESUMO

BORGES, Juliano. **AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO SOBRE LIGA DE ALUMÍNIO FUNDIDA**. 2017. 44. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2017.

Frequentemente as funções de projeto exigem que os elementos mecânicos trabalhem em condições severas de atrito e temperatura. Com intuito de maximizar a resistência ao desgaste e ampliar sua vida útil uma camada metálica protetora, denominada revestimento, pode ser aplicada sobre as superfícies que atrimam. Existem diversos processos que são utilizados para revestir superfícies com intuito de minimizar o desgaste. A cromagem, por exemplo, é um processo que se destaca pela produção de revestimentos de cromo altamente resistentes ao desgaste. Porém, sob a perspectiva de impactos ambientais e danos à saúde do homem este processo não é plenamente bem avaliado devido à liberação de íons de cromo que são altamente nocivos. Assim, há uma necessidade de buscar revestimentos alternativos com resistência ao desgaste próxima ou similar à superfície cromada e de carácter menos danoso. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo preliminar do revestimento de óxido de alumínio obtido por anodização sobre liga de alumínio fundida (Al-Si) 403.2 e compará-lo ao revestimento de cromo. Amostras anodizadas em dois tempos distintos de submersão, 5 e 10 minutos, foram comparadas à amostras cromadas de acordo com parâmetros industriais quanto à rugosidade, coeficiente de atrito e aderência. Os parâmetros de rugosidade das amostras revestidas com óxido de alumínio foram, em geral, menores que das amostras revestidas com cromo e nos ensaios de desgaste com carga de 2N e frequência de 5Hz o revestimento de cromo rompeu. Com os resultados obtidos foi possível concluir que o revestimento de óxido de alumínio, nas condições ensaiadas, possui baixo coeficiente de atrito e maior resistência ao desgaste.

**Palavras-chave:** Revestimento. Eletrodeposição. Óxido de alumínio. Desgaste. Rugosidade.

## ABSTRACT

BORGES, Juliano. **EVALUATION OF ALUMINUM OXIDE COATING ON FUSED ALUMINUM ALLOY**. 2017. 44. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2017

Often the design functions require the mechanical elements to work under severe conditions of friction and temperature. In order to maximize wear resistance and extend its service life a protective metal layer called coating can be applied to the scoring surfaces. There are several processes that can be used to coat surfaces in order to minimize wear. Chroming, for example, is a process that stands out for the production of highly resistant chrome coatings. However, from the perspective of environmental impacts and damage to human health this process is not fully evaluated due to the release of highly harmful chromium ions. Thus, there is a need to search for alternative coatings with near or similar wear resistance to the less damaging chrome surface. In this sense, the present work aims to conduct a preliminary study of the coating of aluminum oxide on molten aluminum alloy (Al-Si) 403.2 and to compare it to the chromium coating. Anodized samples in two different submersion times, 5 and 10 minutes, were compared to chromium samples according to industrial parameters for roughness, coefficient of friction and adhesion. The roughness parameters of the samples coated with aluminum oxide were generally smaller than those of the chromium-coated samples and in the wear tests with 2N load and frequency of 5Hz the chromium coating ruptured. With the results obtained it was possible to conclude that the aluminum oxide coating, under the tested conditions, has a low coefficient of friction, a higher resistance to wear.

**Key words:** Coating. Electrodeposition. Aluminum oxide. Wear. Roughness

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1- PARÂMETRO DE RUGOSIDADE RA.....	15
FIGURA 2 - PARÂMETROS DE RUGOSIDADE RP, RV E RT .....	15
FIGURA 3 - PARÂMETRO R <sub>KU</sub> .....	16
FIGURA 4 - PARÂMETRO R <sub>SK</sub> .....	17
FIGURA 5 - (A) TRIBÔMETRO PERTENCENTE AO LABORATÓRIO LASC E (B) AMOSTRA INSTALADA NO PORTA AMOSTRAS .....	21
FIGURA 6 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DE VÁRIOS MÉTODOS DE TESTE DE REVESTIMENTO E FRICÇÃO .....	22
FIGURA 7 - AMOSTRA PRONTA PARA ANODIZAÇÃO.....	24
FIGURA 8 - AMOSTRA UTILIZADA PARA MEDIR A ESPESSURA DO REVESTIMENTO.....	24
FIGURA 9 - ANODIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	25
FIGURA 10 - LIGA DE ALUMÍNIO 403.2 .....	26
FIGURA 11 - SUPERFÍCIE REVESTIDA COM CROMO (A) E ÓXIDO DE ALUMÍNIO (B) .....	31
FIGURA 12 - ESPESSURA DO REVESTIMENTO DE CROMO (ESCALA DE 200 µM COM AMPLIAÇÃO DE 2,5X) .....	32
FIGURA 13 - ESPESSURA DO REVESTIMENTO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO.....	33
FIGURA 14 - COEFICIENTE DE ATRITO MÉDIO SOBRE AS AMOSTRAS REVESTIDAS .....	34
FIGURA 15 - TRILHA SOBRE O REVESTIMENTO DE ÓXIDO.....	35
GRÁFICO 1 - PARÂMETRO RA DE RUGOSIDADE .....	27
GRÁFICO 2 - PARÂMETRO R <sub>Z</sub> DE RUGOSIDADE.....	28
GRÁFICO 3 - PARÂMETRO R <sub>T</sub> DE RUGOSIDADE.....	28
GRÁFICO 4 - PARÂMETRO R <sub>P</sub> DE RUGOSIDADE .....	29
GRÁFICO 5 - PARÂMETRO R <sub>V</sub> DE RUGOSIDADE .....	29
GRÁFICO 6 - PARÂMETRO R <sub>SK</sub> DE RUGOSIDADE.....	30
GRÁFICO 7 - PARÂMETRO R <sub>KU</sub> DE RUGOSIDADE .....	31
GRÁFICO 8 - COMPORTAMENTO DO ATRITO DOS REVESTIMENTOS APÓS 120 SEGUNDOS....	36
GRÁFICO 9 - ROMPIMENTO DO REVESTIMENTO DE CROMO.....	36
QUADRO 1 - DESIGNAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO FUNDIDAS .....	18

## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

Al-Si: ligas fundidas de alumínio e contém silício

Ambiotec: Centro de Pesquisas Avançadas Ambientais Bioenergéticas e Biotecnológicas

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

COF: *coefficient of friction*

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

Hz: Hertz

ISO: *International Organization for Standardization*

LASC: Laboratório de Superfícies e Contato

MEV: microscópio eletrônico de varredura

PBB: *Polybrominated biphenyl*

PBDE: *Polybrominated diphenyl ethers*

ppm: partes por milhão

Ra: altura média

Rku: curtose

RMS e Rq: desvio médio quadrático

RoHS: *Restriction of Certain Hazardous Substances*

Rp: altura máxima dos picos

Rsk: fator de assimetria

Rt: altura máxima

Rv: profundidade máxima dos vales

Rz: diferença entre a média dos picos mais altos e vales mais baixos

SENAI: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

$\beta$ : fase solidificada pelo resfriamento composta por Al<sub>5</sub>FeSi

$\mu$ m: micrometro



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
<b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>12</b>
<b>4 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
4.1 ELETRODEPOSIÇÃO.....	13
4.2 RUGOSIDADE.....	14
4.3 LIGAS DE ALUMÍNIO .....	17
4.4 DESGASTE E ADESÃO.....	19
4.5 MÉTODO PINO SOBRE DISCO.....	21
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>26</b>
6.1 COMPOSIÇÃO DA LIGA.....	26
6.2 AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE .....	26
6.3 ESPESSURA DAS CAMADAS ANALISADAS .....	32
6.4 AVALIAÇÃO DO ATRITO.....	33
6.5 AVALIAÇÃO DA TRILHA DO DESGASTE .....	35
<b>7 CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No âmbito industrial é indiscutível a utilização de máquinas e equipamentos para as mais diversas aplicações e propósitos. Sob a demanda de diversas tarefas destaca-se a utilização de motores, dispositivos que permitem transformar calor, geralmente obtido pela queima de combustível, em trabalho mecânico. A obtenção do trabalho decorre de uma sequência de processos realizados que converte uma substância, composta de ar e combustível, em produtos de combustão. A combustão é um processo exotérmico de oxidação de um combustível iniciado por um mecanismo de ignição, geralmente uma centelha ou faísca oriunda dos eletrodos de uma vela (BRUNETTI, 2012).

A energia liberada pela combustão gera uma elevada e variável pressão e temperatura no interior da câmara de combustão. Por isso, há uma solicitação mecânica maior de seus componentes, em especial daqueles que trabalham com intenso contato às superfícies adjacentes (cilindros, anéis e pistão), que podem apresentar um desgaste prematuro. Para resistir estes esforços os materiais utilizados em camisas de cilindro apresentam alta rigidez, alta resistência ao desgaste (REJOWSKI, 2012) e geralmente recebem aplicação de uma camada metálica protetora para minimizar o desgaste (SANTANA, PRASAD e SANTANA, 2003).

O principal objetivo desta camada metálica é proporcionar aumento de durabilidade das peças industriais nos mais variados meios de trabalho. Uma característica favorável que ela pode apresentar é a capacidade de reproduzir a rugosidade do substrato. Isto porque, as irregularidades entre as superfícies em contato podem contribuir para um desgaste precoce e a dissipação de energia causada pelo atrito. Por isso, a qualidade da superfície de trabalho, ou seja, a rugosidade, é fator primordial ao bom desempenho e vida útil dos componentes pistão e anel (REJOWSKI, 2012). Mudanças na superfície de trabalho dos cilindros obtidas por alterações nos parâmetros de rugosidade com a intenção de reduzir os efeitos do atrito também são desejáveis (REJOWSKI, MORDENTE e PILLIS, 2012).

A eletrodeposição é comumente empregada na criação de revestimentos para proteger uma superfície metálica e a camada resultante apresenta características mais eficientes. Um dos processos de eletrodeposição amplamente utilizado é a cromagem, ou cromatização, que proporciona à superfície

características mecânicas extremamente satisfatórias com elevação de sua resistência ao desgaste. Em contrapartida, o cromo traz grandes prejuízos ao meio ambiente e à saúde do homem (TUSSOLINI *et al.*, 2014).

Diante disto, buscam-se alternativas ao uso de revestimentos que não apresentem este carácter danoso, tais que sejam menos poluentes, menos prejudiciais ao homem e ainda apresentem propriedades mecânicas equivalentes ou superiores às do revestimento de cromo (TUSSOLINI *et al.*, 2014). Sob esta perspectiva, este trabalho tem por objetivo revestir com óxido de alumínio amostras de liga de alumínio fundida obtidas de camisas de cilindro de motor de motosserra, produzidas por uma empresa na cidade de Guarapuava, e compará-las com amostras revestidas de cromo fornecidas pela mesma indústria.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar o revestimento de amostras, compostas de liga de alumínio fundida, obtido por anodização e cromatização.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revestir amostras pelo processo de anodização em que serão variados os parâmetros tempo de imersão e diferencial de potencial;
- Medir a espessura da camada dos revestimentos;
- Verificar a adesão dos revestimentos ao substrato;
- Medir a rugosidade dos revestimentos;
- Medir o coeficiente de atrito (COF);
- Comparar os resultados obtidos dos dois revestimentos, cromo duro e óxido de alumínio.

### 3 JUSTIFICATIVA

O revestimento obtido pelo processo de eletrodeposição de cromo é amplamente utilizado, estimulado pelas características mecânicas que apresenta. Durante este processo, concomitante à deposição de metal sobre o substrato, a quantidade de íons de cromo altamente tóxicos que são liberados podem promover grande prejuízo ao meio ambiente e à saúde do homem. Esta particularidade motivou uma crescente preocupação da sociedade – órgãos governamentais, entidades privadas e civis – em relação ao impacto causado. Sob a perspectiva de comércio internacional, também nota-se uma preocupação dos países em fiscalizar o movimento fronteiro de materiais que apresentem este comportamento danoso (TUSSOLINI *et al.*, 2014).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) aborda esta problemática dentro da gestão de resíduos e produtos perigosos. Na resolução 23/1996, ao considerar, entre outros, a periculosidade apresentada pelo processo de eletrodeposição de cromo, fundamenta a necessidade de controlar e até mesmo banir a entrada destes resíduos. Considera que resíduos de cromo fazem parte do quadro de resíduos perigosos classe 1 e, por isso, tem importação proibida (BRASIL, 1997).

Analogamente, a diretiva europeia 2002/95EC vigorada em 2006, que trata das restrições de substâncias perigosas (RoHS), define restrições na utilização de metais perigosos em equipamentos elétricos e eletroeletrônicos. A diretiva leva em consideração quatro metais pesados (chumbo, mercúrio, cádmio, cromo hexavalente) e dois retardadores de chama bromados (PBB e PBDE). Estabelece que o limite de concentração para estas substâncias é de 1000 ppm por peso de material homogêneo, o que representa apenas 0,1% de seu peso. O não cumprimento destes requisitos resulta na remoção dos produtos do fabricante do mercado. Apesar de abordar o cromo sob outra forma de utilização a instrução mostra a mesma preocupação (COUNCIL, 2002).

Evidencia-se desta forma um apelo no sentido de minimizar a utilização de metais nocivos à saúde e ao meio ambiente. Neste rumo, ao se tratar da utilização de filmes finos, atualmente buscam-se revestimentos alternativos, tais que sejam menos poluentes e menos prejudiciais à saúde (TUSSOLINI *et al.*, 2014).

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico abordar-se-ão os principais temas que serão contemplados por este trabalho: eletrodeposição, rugosidade, ligas de alumínio e ensaios de desgastes.

### 4.1 ELETRODEPOSIÇÃO

A eletrodeposição de metais, também chamada de galvanização, consiste em depositar de forma controlada uma fina camada metálica sobre um substrato por meio de eletrólise. A formação do filme ocorre pela transferência de um metal na forma iônica a partir do ânodo (eletrodo positivo) para o cátodo (eletrodo negativo), provocada por uma corrente elétrica (COUTINHO, 2013). Esta corrente elétrica é introduzida a partir de uma fonte externa que a mantém constante durante todo o processo de deposição (MAGALHÃES, 2012).

A utilização deste método é largamente difundida estimulada por características convenientes como baixo custo, baixa temperatura de operação, utiliza equipamentos de custo moderado e atmosfera não controlada. A eletrodeposição é utilizada para diversos fins tais como a fabricação de chips na indústria eletrônica e o tratamento de superfícies com grande área (MAGALHÃES, 2012).

O metal cromo, matéria prima utilizada para produzir aços especiais, atualmente é muito empregado nos revestimentos com objetivo de ampliar a vida útil de peças submetidas a condições severas de trabalho. O cromo é um dos poucos metais que pode ser eletrodepositado a partir de eletrólitos aquosos, além do fato de que o substrato pode ser ferroso ou não. Todas estas características tornam o versátil (COUTINHO, 2013).

A espessura da camada de cromo depositada na superfície de uma liga pode variar de três a trezentos micrometros, o que depende da aplicação desejada (VIEIRA, 2012). Nos casos em que a espessura é superior a cinco micrometros a camada resultante recebe o nome de Cromo Duro (COUTINHO, 2013).

O filme produzido por este metal apresenta características relevantes de resistência ao desgaste, resistência à corrosão, resistência ao risco, dureza

superficial elevada, baixo poder aglutinante e umedecedor (repele água, pintura e óleos), resistência a altas temperaturas, e baixo coeficiente de atrito (reduz a quantidade necessária de lubrificante) (VIEIRA, 2012; COUTINHO, 2013).

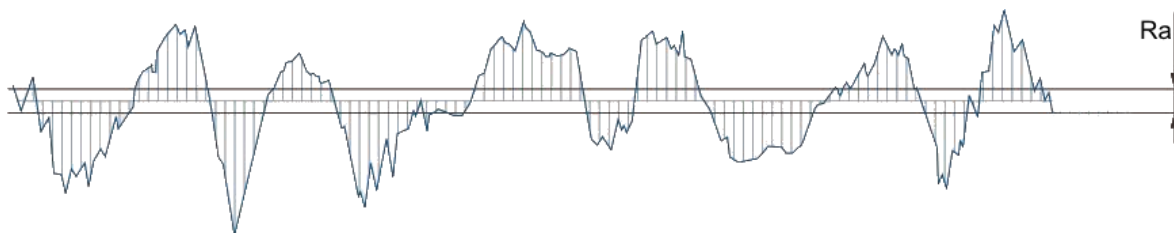
## 4.2 RUGOSIDADE

O acabamento superficial tem participação importante na resistência ao desgaste, à corrosão, à fadiga, no atrito, na transmissão de calor, nas propriedades óticas, no escoamento de fluidos, na lubrificação e no aspecto estético de um elemento (FILHO e FILHO, 1996, p.86; GROOVER, 2014, p. 54). A rugosidade da maioria das superfícies controla o contato mecânico entre os sólidos e o desgaste resultante, além de influenciar as reações químicas que ocorrem com os lubrificantes em contato (GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 134).

Compreender a influência dos parâmetros de rugosidade sobre o atrito e desgaste, causada pela representação complexa das superfícies de um sólido, possibilita uma boa previsão do comportamento tribológico (interação entre as superfícies em movimento relativo) de uma superfície de engenharia associado aos problemas de contato, desgaste e lubrificação (GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 134).

Os parâmetros de amplitude determinados pela altura dos picos, profundidade dos vales ou ambos, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície, têm sido muito utilizados para caracterizar superfícies sujeitas a desgastes, como  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_{ku}$  e  $R_{sk}$ . Em geral, os parâmetros  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_z$  também são utilizados para caracterizar as superfícies (GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 134).

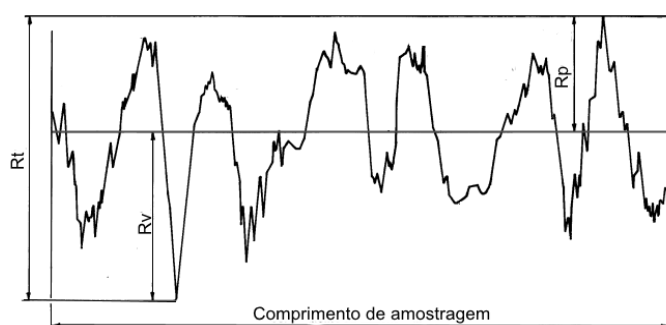
O parâmetro de altura média ( $R_a$ ), ilustrado na Figura 1, é definido como o desvio médio absoluto das irregularidades da rugosidade a partir da linha média sobre um comprimento de amostragem. Sua utilização mais comum está no controle de qualidade devido principalmente a facilidade de medição. No entanto apresenta limitações para descrever o perfil real, isto é, possui sensibilidade insuficiente e pode não descrever adequadamente mudanças no perfil medido (GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 134).



**Figura 1- Parâmetro de Rugosidade Ra**  
**Fonte: Adaptado de (MITUTOYO, 2016)**

O parâmetro denotado por RMS ou  $R_q$  é análogo ao Ra e definido como desvio médio quadrático. O  $R_q$  tem maior sensibilidade que o Ra e descreve melhor a distribuição de alturas da superfície com a possibilidade de descrever a rugosidade da superfície por métodos estatísticos. Em termos de representação gráfica, RMS é a linha que divide o perfil tal que a soma das raízes dos desvios do perfil de altura é igual a zero (GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 134).

O parâmetro de altura máxima, denotado por  $R_t$ , é definido como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais baixo ao longo da avaliação do comprimento do perfil (Figura 2). Possui grande sensibilidade aos picos mais elevados e vales mais profundos (GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 135; ABNT, 2002, p. 9). Já o parâmetro denotado por  $R_z$  é definido pelo sistema internacional (ISO) como a diferença entre a média dos picos mais altos e vales mais baixos sobre a extensão do comprimento de amostragem (GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 134).

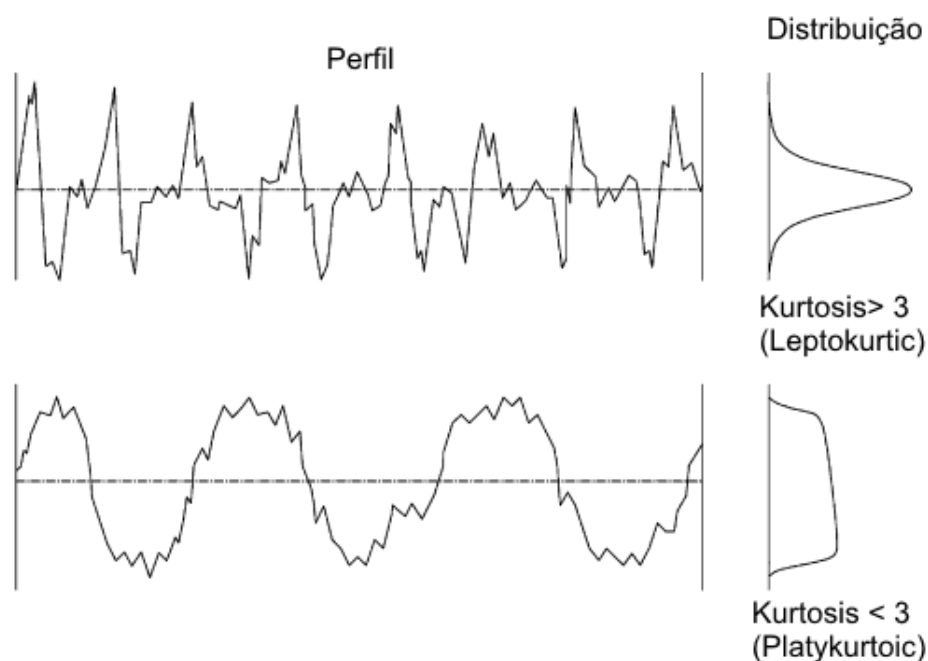


**Figura 2 - Parâmetros de rugosidade Rp, Rv e Rt**  
**Fonte: Adaptado de (ABNT, 2002)**

A altura máxima do pico do perfil, denotada  $R_p$ , é a maior altura dos picos ao longo do comprimento do perfil analisado. A profundidade máxima do vale do perfil, denotado por  $R_v$ , representa a maior distância vertical entre a linha média e o vale mais profundo (ABNT, 2002, p. 7-8; GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 134). Os parâmetros  $R_p$  e  $R_v$  podem ser vistos na Figura 2.

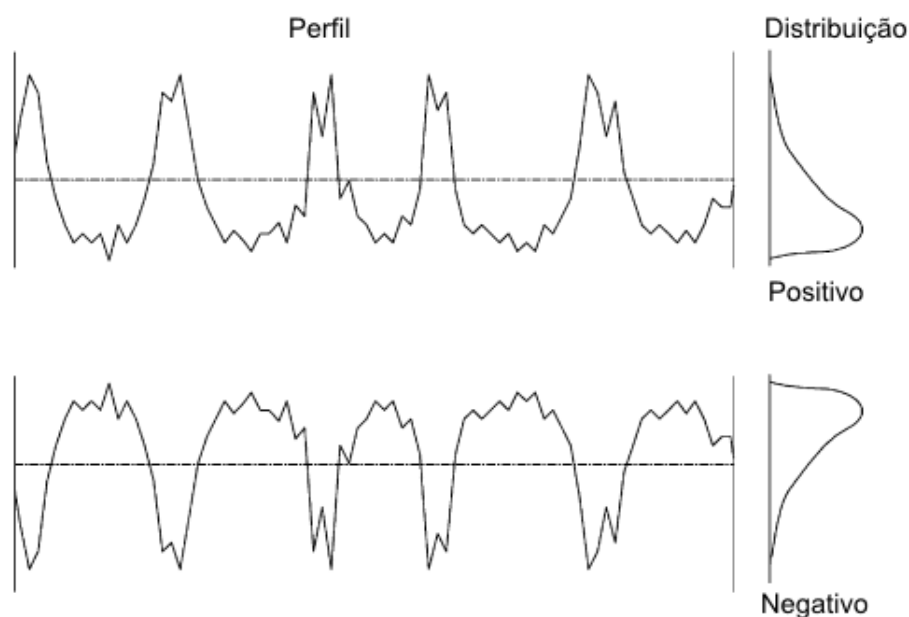


O parâmetro chamado de curtose, denotado por  $Rku$  e ilustrado na Figura 3, descreve o comportamento agudo ou achatado da curva de probabilidade das amplitudes ao longo do comprimento avaliado. Se  $Rku$  for menor que três a curva de distribuição é dita como platykurtic e tem relativamente poucos picos altos e vales baixos. Se  $Rku$  for maior que 3 a curva de distribuição é dita como leptokurtic e indica que as irregularidades superficiais são “pontagudas”, ou seja, mais suscetíveis ao desgaste prematuro do que superfícies não pontagudas, com valores de curtoses mais baixos (geralmente menores que 3). A curtose também é utilizada para diferenciar superfícies que têm  $Ra$  iguais e formas diferentes (GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 137-138).



**Figura 3 - Parâmetro  $Rku$**   
**Fonte: Adaptado de (GADELMAWLA *et al.*, 2002)**

O fator de assimetria,  $Rsk$  (Figura 4), é utilizado para medir a simetria dos perfis sobre a linha média e pode ser aplicado para distinguir dois perfis que têm os mesmos valores de  $Ra$  ou  $Rq$ , mas com formas diferentes. Este parâmetro apresenta sensibilidade a picos altos ou vales profundos. Seu valor pode ser positivo (quando apresenta vales preenchidos ou altos picos) ou negativo (se apresenta vales profundos ou picos removidos) e depende se a maior parte do material da amostra está acima ou abaixo da linha média (ABNT, 2002, p. 10; GADELMAWLA *et al.*, 2002, p. 136-137).



**Figura 4 - Parâmetro Rsk**  
**Fonte: Adaptado de (GADELMAWLA et al., 2002)**

Pela figura 4, percebe-se que superfícies com Rsk negativo são menos suscetíveis ao desgaste. Porém, os dois últimos parâmetros indicados (curtose – Rku e assimetria - Rsk) são complementares e igualmente importantes para a caracterização de superfícies de deslizamento e de mancais (CARPINETTI *et al.*, 2000).

### 4.3 LIGAS DE ALUMÍNIO

No âmbito da fabricação de peças, e de acordo com o tipo de trabalho proposto, pode-se requerer uma minimização de sua massa, fator essencial para muitas aplicações. Sob esta perspectiva, define-se que a resistência específica é a razão da resistência de um componente pelo seu peso específico. O alumínio, por exemplo, destaca-se por possuir resistência específica de  $21,5 \times 10^5$  cm, que o torna excelente em termos de utilização (ASKELAND e WRIGHT, 2014).

Além disto, este elemento químico possui outras características favoráveis tais como a facilidade de ser processado mecanicamente, alta condutividade térmica e elétrica, ser atóxico, ser reciclável e apresentar boa resistência à corrosão e oxidação. Em contrapartida, possui características desfavoráveis tais como ausência

de um limite de resistência à fadiga, desempenho insatisfatório sob altas temperaturas e, principalmente, baixa dureza. A dureza pode ser melhorada por meio de mecanismos de endurecimento que possibilitam aumento de até trinta vezes comparado ao elemento puro (ASKELAND e WRIGHT, 2014).

As ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos principais que são as ligas trabalhadas (ou forjadas) e as ligas para fundição. Cada grupo pode ser dividido em dois subgrupos que são tratadas termicamente e não tratadas termicamente. As ligas trabalhadas são deformadas plasticamente por meio de conformação mecânica resultando em composição e microestrutura distintas. As propriedades destas ligas dependem do encruamento, do endurecimento por solução sólida e do tamanho do grão. Porém, devido à baixa solubilidade dos elementos de liga de alumínio em baixa temperatura, o endurecimento por solução sólida é limitado (ASKELAND e WRIGHT, 2014; LAMET et al, 1990).

As ligas de fundição do sistema Al-Si contém silício suficiente para causar a reação eutética, ou seja, transformação por solidificação tal que a fase líquida resfria até que haja formação de duas fases sólidas. Este incremento resulta em baixo ponto de fusão, boa fluidez e boa fundibilidade. Geralmente as propriedades mecânicas são ampliadas por meio de um controle de formação do grão durante o resfriamento. Assim, para obter grãos refinados o endurecimento da matriz de alumínio, o endurecimento por dispersão da fase  $\beta$  (Al<sub>5</sub>FeSi) e as condições de solidificação são controlados (ASKELAND e WRIGHT, 2014; LAMET et al, 1990).

Quanto à classificação, as ligas de alumínio são designadas por um sistema de numeração composto por quatro dígitos (para ligas trabalhadas) ou três dígitos, um ponto e um dígito (para ligas de fundição), conforme o Quadro 1.

**Quadro 1 - Designação das ligas de alumínio fundidas**

<b>Designação da série</b>	<b>Indicação da composição</b>
1XXX	99,0% mínimo de alumínio
2XXX	cobre
3XXX	silício e cobre e/ou magnésio
4XXX	silício
5XXX	magnésio
6XXX	série não utilizada
7XXX	Zinco
8XXX	Estanho
9XXX	Outros elementos

Fonte: Senai, 2015.

O primeiro número classifica a liga de acordo com o elemento principal. No Quadro 1, o XXX mostra a designação das ligas de alumínio fundidas, tais que o

segundo e o terceiro dígito indicam centésimos da porcentagem mínima de alumínio ou diferentes ligas do grupo. O dígito após o ponto indica a forma de obtenção do produto sendo 0 para peças fundidas, 1 para lingotes e 2 para lingotes feitos de material reciclado fora da especificação em relação aos níveis de impureza (SENAI, 2015).

#### 4.4 DESGASTE E ADESÃO

Desgaste é o dano sofrido por uma superfície, com ou sem perda progressiva de material, causado pelo movimento relativo entre duas ou mais superfícies. Os desgastes adesivo e abrasivo se caracterizam pela perda de material, enquanto os danos à superfície dos corpos em contato estimulam um rearranjo da rugosidade (REJOWSKI, 2012; VIEIRA, 2012). Este fenômeno é um dos problemas industriais que, frequentemente, mais corroboram com a prática de manutenção de equipamentos e, em muitos casos, leva a substituição de componentes. Apesar de não levar a desfechos catastróficos sua presença favorece o aumento de perdas de potência e reduz a eficiência de operação. Os ensaios de desgaste possibilitam conhecer preliminarmente a resistência ao desgaste que um revestimento apresenta diante dos esforços mecânicos aos quais será submetido (RAMOS *et al.*, 2014).

Uma análise da adesão do revestimento no substrato é imprescindível. Além de muito resistente ao desgaste o revestimento precisa ter adesão eficiente com o substrato, caso contrário a superfície falhará antes do previsto e o investimento com o revestimento não será justificado. A adesão é função do par de materiais e das condições de interface, tais como estrutura cristalina, orientação cristalográfica, solubilidade de um material em outro, limpeza da superfície, carga normal, temperatura, duração de contato, etc. A área de contato de duas superfícies que são colocadas juntas é geralmente muito menor do que a área geométrica em função da sua rugosidade. Materiais com maior rugosidade, módulo de elasticidade e/ou dureza e falta de ductilidade exibem área real de contato inferior, o que leva a uma menor adesão (BHUSHAN, 2003).

Os mecanismos de desgaste são influenciados por uma variedade de parâmetros dos quais se destacam o material (composição, tamanho de grão,

módulo de elasticidade, condutividade térmica, dureza, etc), o projeto (forma, carregamento, tipo de movimento, aspereza, vibração, número de ciclos, etc), o meio ambiente (temperatura, contaminação, umidade, atmosfera, etc), a lubrificação (tipo de lubrificante, estabilidade do lubrificante, tipo de fluido, modo de lubrificação, etc) e a presença ou ausência de desgaste interno (VIEIRA, 2012).

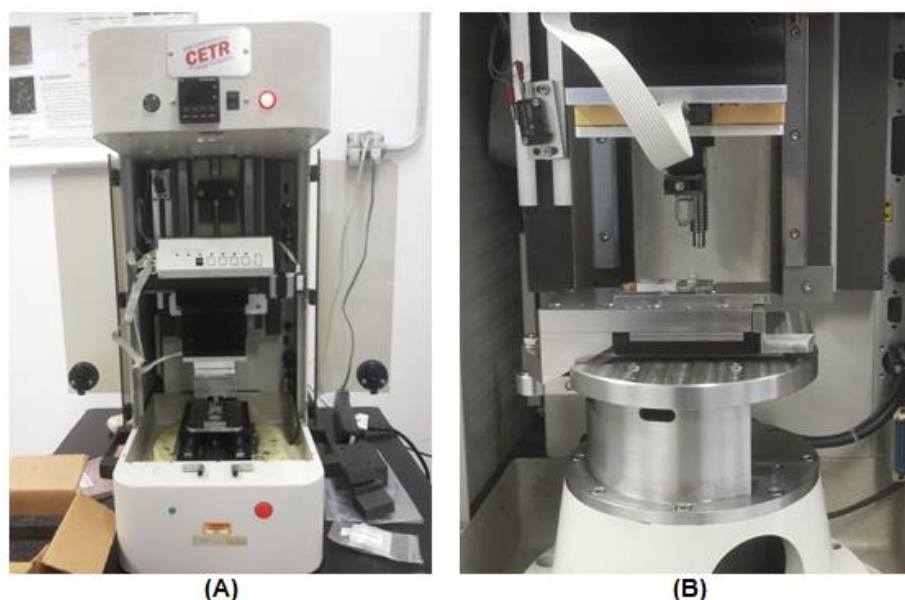
No desgaste adesivo, a pressão elevada localizada na interface de contato decorrente da aspereza de cada superfície provoca deformação plástica, adesão e junções localizadas. Estas junções formar-se-ão por adesão ou coesão. Na coesão ocorre a união das superfícies por meio de soldas, o que causa o desaparecimento da região de contato. A adesão, por sua vez, preserva a interface na junção (REJOWSKI, 2012; VIEIRA, 2012). Durante o deslizamento ocorre a ruptura das junções e conseqüentemente a transferência de material da superfície mais fraca para a mais resistente. A transferência progressiva através das juntas adesivas acontecerá até que a camada formada se desprenda e forme uma partícula. Por isso, este tipo de desgaste é considerado o mais severo, envolve altas taxas de desgaste e elevado coeficiente de atrito (VIEIRA, 2012).

O desgaste abrasivo pode ser classificado como de dois ou três corpos. Configura-se pela retirada de material causada pela presença e deslizamento de partículas de elevada dureza, que podem estar aprisionadas na interface entre as duas superfícies, ou causada pelas protuberâncias relativas à rugosidade de uma das superfícies. A origem desta partícula pode ser do processo de fabricação, um fragmento desgastado ou de eventuais partículas externas ao sistema (sujeidades, por exemplo). O abrasão de dois corpos ocorre porque uma das superfícies tem partículas duras protuberantes e a partícula presa ao corpo de maior dureza move-se arrancando material do corpo de menor dureza. Por conseguinte, no abrasão de três corpos as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre as superfícies e resultando na variação do ângulo de ataque. Conseqüentemente, um desgaste abrasivo de três corpos é mais reduzido (REJOWSKI, 2012; VIEIRA, 2012).

Neste trabalho pretende-se utilizar os ensaios de esfera sobre plano empregados frequentemente para caracterizar superfícies e revestimentos (BEZERRA, 2016; BOUTIN e ROCHA, 2015; MENDES, 2009; ROSA, 2013).

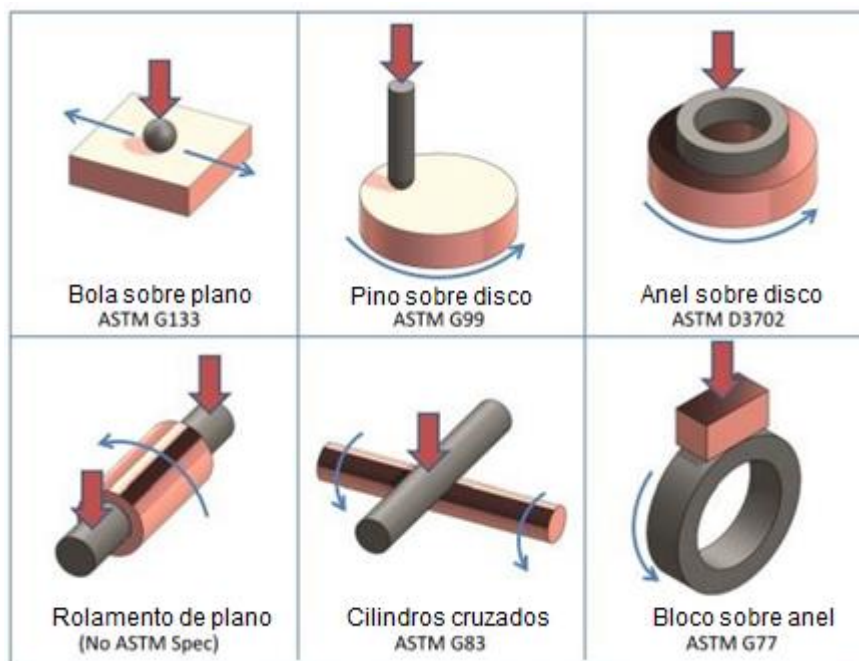
#### 4.5 MÉTODO PINO SOBRE DISCO

O tribômetro (Figura 5) é um equipamento que possibilita explorar o comportamento dos mecanismos de atrito e desgaste dos corpos de prova. O princípio de funcionamento consiste em manter um corpo de prova parado enquanto outro se move. Para que sejam obtidos resultados confiáveis deve-se conhecer as condições reais de trabalho, tais como magnitude dos esforços e estado de lubrificação. Estes dados devem ser configurados no tribômetro para que o teste realizado se assemelhe às condições reais de trabalho (GEDEON, 2015; NEIS, 2008).



**Figura 5 - (A) Tribômetro pertencente ao laboratório LASC e (B) Amostra instalada no porta amostras**  
**Fonte: autoria própria**

A montagem do experimento pode ser realizada de seis formas distintas, de modo que cada configuração é nomeada e normatizada por padrões internacionais. A Figura 6 mostra cada disposição, juntamente com seu nome e norma regente (GEDEON, 2015). Este trabalho utilizará o sistema chamado Bola sobre Plano regido pela norma ASTM G133.



**Figura 6 - Esquema simplificado de vários métodos de teste de revestimento e fricção**  
**Fonte: Adaptado de GEDEON, 2015.**

Os equipamentos de medição são classificados de acordo com o coeficiente de desgaste dos materiais envolvidos no teste. Chama-se simétrico se o valor dos coeficientes de desgaste dos materiais é idêntico ou assimétrico, geralmente mais utilizado, em que corpos de natureza idêntica apresentam taxa de desgaste diferente. Os corpos envolvidos podem ser pino (bloco ou corpo - sobre o qual, normalmente, é medido o coeficiente de desgaste) ou disco (superfície ou anel - chamado de contra corpo) (HUTCHINGS, 1992).

O desgaste é medido a partir da retirada do espécime do equipamento para medição de suas dimensões, de sua massa ou pelo tamanho da impressão de desgaste sobre o corpo. A força de atrito é medida a partir da força tangencial no corpo que é equivalente, em módulo, à força de atrito. O conhecimento deste valor possibilita calcular o coeficiente de atrito e monitorar possíveis desvios causados pela mudança brusca de rugosidade ou falhas do equipamento de ensaio (HUTCHINGS, 1992).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada nesta pesquisa possui carácter exploratório, desenvolvida essencialmente por levantamento bibliográfico e testes experimentais. Sua execução conta com a participação da Metalúrgica Frenobras Ltda, sediada em Guarapuava e representada pelos engenheiros Ricardo Trentin e Fellype Trentin. Conta ainda com a utilização dos equipamentos de dois laboratórios da Universidade Estadual do Centro Oeste (Unicentro – Campus Cedeteg), também sediada em Guarapuava, por intermédio do professor efetivo Everson do Prado Banczek. Além de mediador este professor é colaborador na execução de várias etapas deste trabalho. O trabalho teve ainda o apoio e colaboração do professor Giuseppe Pintaúde e da aluna de pós doutoramento Anne Cheila Rovani, da UTFPR de Curitiba, condutores das atividades desenvolvidas no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC). Por fim, serão utilizados os equipamentos dos laboratórios de Usinagem e Metrologia da UTFPR - Campus Guarapuava.

A Metalúrgica Frenobrás forneceu cilindros de alumínio fundido, alguns revestidos com cromo duro e outros preparados para receber o revestimento. Para a preparação de amostras foram utilizados a serra de fita marca Ramos e modelo SRAMOS 260HG do laboratório de Usinagem e a cortadora metalográfica Teclago CM60 do laboratório de materiais, ambos pertencentes à UTFPR de Guarapuava. As amostras obtidas têm forma retangular.

Para determinar a composição do substrato foi utilizado o espectômetro de fluorescência de raio-X do fabricante Oxford Instruments, modelo X-MET XMDS 2726, do laboratório de Química da Unicentro.

O processo de revestimento de cada amostra foi realizado no laboratório de Química da Unicentro. Para o processo foram utilizados solução de ácido sulfúrico com concentração de 1/6 partes; fonte de alimentação Minipa modelo MPL 3303, pirex de vidro; pinça para aprisionar a amostra; termômetro de mercúrio; cronômetro; e eletrodo negativo de liga de alumínio 3003.

Dois modelos de amostra foram confeccionados, o primeiro modelo para avaliação do desgaste, atrito e rugosidade e o segundo para mensurar a espessura das camadas de óxido de alumínio e de cromo. Com exceção da amostra utilizada



para verificar a espessura do cromo, as demais amostras foram extraídas de camisas de pistão usinadas cedidas pela empresa Frenobrás.

Para confeccionar as amostras do primeiro modelo, denominadas AMOSTRA 1, utilizou-se a fresadora ferramenta Diplomat FVF-2000 para remover as aletas e obter uma superfície plana oposta perpendicularmente à região de interesse, localizada na parte interna com forma de arco circular. Em seguida as camisas foram recortadas convenientemente no sentido longitudinal de modo que preservasse maiores regiões de interesse em cada amostra. O resultado pode ser visto na Figura 7.



**Figura 7 - Amostra pronta para anodização**  
Fonte: autoria própria

As amostras do segundo modelo, denominadas AMOSTRA 2, têm forma de paralelepípedo, com dimensões  $2 \times 1 \times 0,5$  cm, e foram obtidas com a fresadora citada anteriormente, localizada no laboratório de Usinagem. Uma das faces de cada amostra foi lixada com lixas de granulometria 400, 600 e 1200 e polida com pasta diamantada com tamanho de partícula de 9, 6, 3, 1 e  $0,25 \mu\text{m}$ . A amostra final desse processo pode ser visualizada na Figura 8.



**Figura 8 - Amostra utilizada para medir a espessura do revestimento**  
Fonte: autoria própria

A amostra com o processo de cromatização foi adquirida da mesma liga de alumínio fundida utilizada nas camisas, em forma de placa plana e cromatizada segundo parâmetros industriais da empresa parceira.

As AMOSTRA 1 foram revestidas com óxido de alumínio à temperatura ambiente de 23°C em solução de ácido sulfúrico com 1/6 partes de água de concentração e aplicação de um diferencial de potencial de 5,6 volts. Este processo resultou em amostras denominadas Anodizada 5 min, cujo tempo cronometrado de submersão no meio ácido foi de cinco minutos, e Anodizada 10 min, submersas por dez minutos. Esta etapa do processo pode ser vista na Figura 9.



**Figura 9 - Anodização das amostras**  
**Fonte: autoria própria**

Para a medição da espessura do filme formado foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) do laboratório multiusuário do Centro de Pesquisas Avançadas Ambientais Bioenergéticas e Biotecnológicas (Ambiotec) da Unicentro.

A rugosidade das amostras revestidas foi medida no laboratório de Metrologia da UTFPR Campus Guarapuava com utilização do rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-410.

Os testes de pino sobre disco foram realizados no LASC. O comportamento do atrito sobre as amostras foi verificado por um teste denominado riscamento através de um tribômetro. Utilizou-se o módulo Linear Reciprocating devido à possibilidade de gerar movimentos cíclicos lineares, similares ao movimento do anel do pistão sobre a camisa. A célula de carga empenhada no teste possui range de carga de 0N à 10N e a carga efetivamente aplicada sobre as amostras foi de 2N. A ponteira de atrito sobre o revestimento foi uma esfera de carbeto de tungstênio com 4 mm de diâmetro. Utilizou-se um comprimento de pista de 5 mm e uma frequência de 5Hz aplicada por 300 segundos. Sobre cada amostra foram realizados três riscamentos ao longo de seu comprimento para garantir a validade do teste.

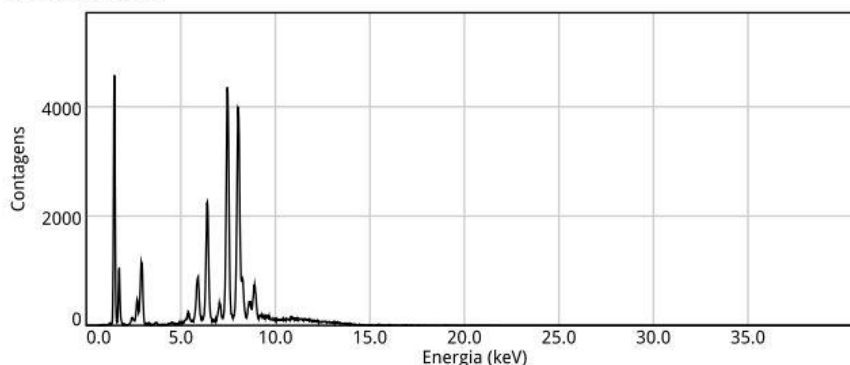
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 COMPOSIÇÃO DA LIGA

A tarefa inicial executada sobre as amostras das camisas de pistão foi verificar a liga constituinte por meio da utilização do equipamento de raios X. Como mostrado na Figura 10, a designação da liga é alumínio 403.2, que corresponde a liga Al-Si com o silício como o principal elemento de liga (12,25%) e identificada como lingote.

Elemento	Mg %	Al %	Si %	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %	Zn %	Pb %
	1,73	82,71	12,25	0,05	0,26	0,57	1,14	1,07	0,08	0,00
±	0,277	0,100	0,191	0,002	0,005	0,008	0,012	0,013	0,002	0,027
Elemento	Ti %	Zr %	Sn %							
	0,02	0,09	0,02							
±	0,002	0,024	0,006							

Graus: AA-4032 (0,42), Al-383 (2,80)  
Referência: AA4032



**Figura 10 - Liga de Alumínio 403.2**

Fonte: autoria própria

A classificação como lingote pode ter ocorrido, pois a empresa retorna ao processo de fundição parte dos resíduos de material fundido. A inserção do ponto na designação se deve, pois se sabe que a liga é fundida e a resposta do sistema de medição não é projetada para tal diferenciação.

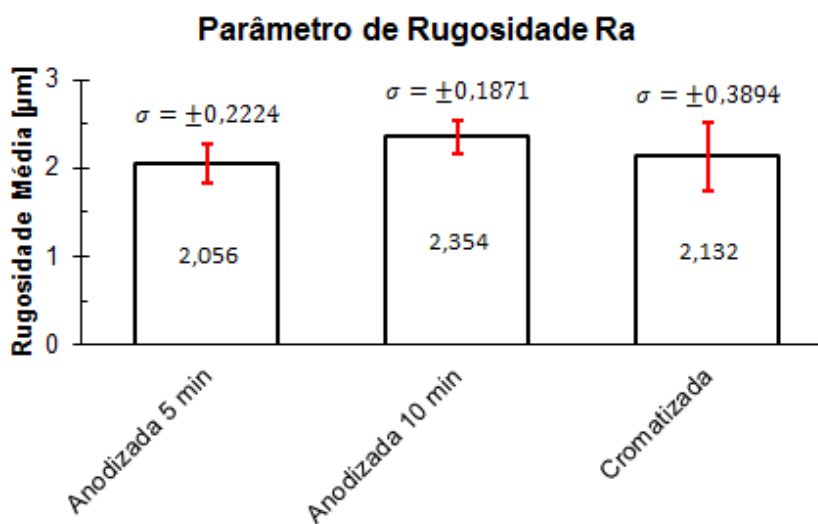
### 6.2 AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE

Para verificar o comportamento da rugosidade das amostras foram considerados os parâmetros Ra, Rz, Rp, Rv, Rsk, Rku e Rt. Para cada um dos parâmetros foram realizadas cinco medições ao longo do comprimento de cada amostra, com trajeto de 2,4 mm para cada medição e uma velocidade de 0,5 mm/s.

A determinação da linha média e a correção do perfil efetivo por parte do rugosímetro foram obtidas pela aplicação do filtro matemático de Gauss.

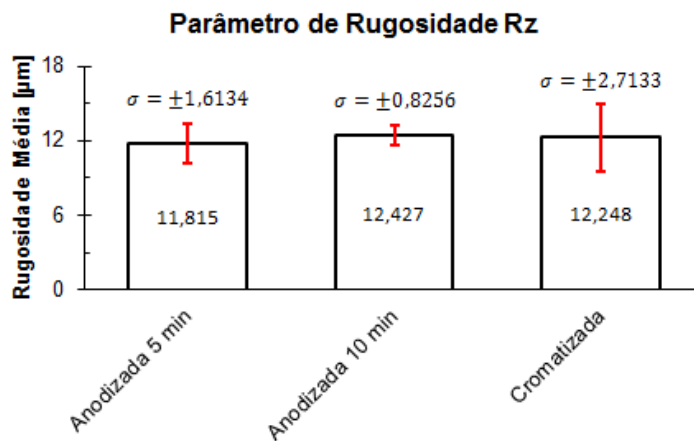
Para uma melhor representatividade os gráficos seguintes foram expressos em função dos valores médios e o desvio padrão dos valores obtidos.

O Gráfico 1 mostra os valores de rugosidade média das três amostras analisadas. Nota-se que as amostras apresentam valores de rugosidade similares, sendo que a amostra anodizada por 5 minutos apresenta a menor média seguida pela amostra cromatizada e por fim a amostra anodizada em 10 minutos. Porém, as amostras que foram submetidas ao processo de anodização apresentam o menor desvio padrão.



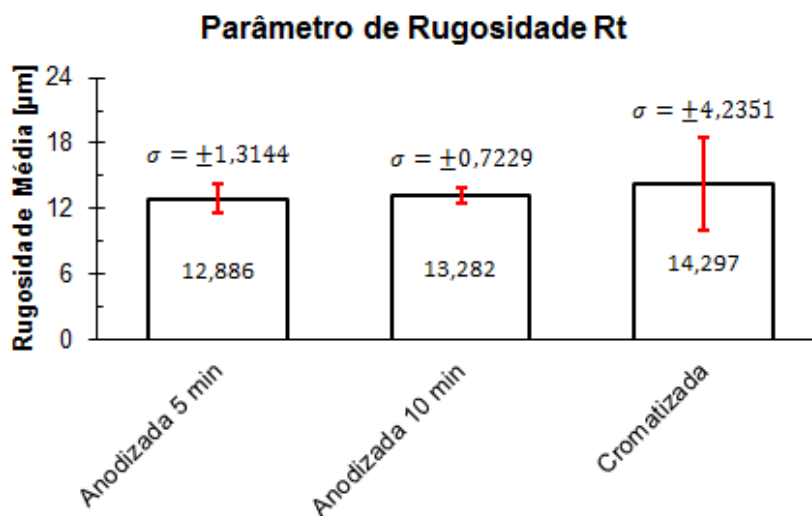
**Gráfico 1 - Parâmetro Ra de Rugosidade**  
Fonte: autoria própria

O parâmetro Rz apresenta a mesma tendência observada no parâmetro Ra e mostra que as alturas dos picos e vales das superfícies no comprimento de amostragem são similares, com maior desvio para a superfície cromatizada, conforme Gráfico 2.

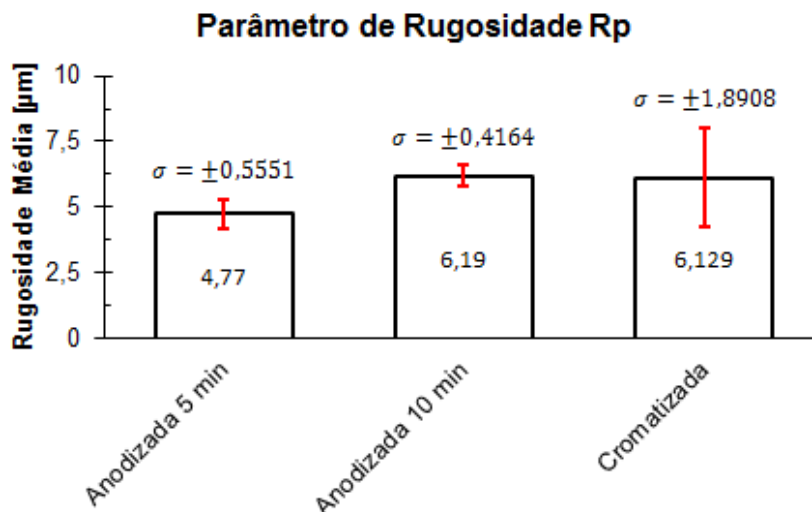


**Gráfico 2 - Parâmetro Rz de Rugosidade**  
Fonte: autoria própria

Já a maior altura entre picos e vales das superfícies ( $R_t$ ) no comprimento avaliado ocorreu na superfície cromatizada, conforme Gráfico 3. Mas em relação somente a altura do pico, como mostra o Gráfico 4, a amostra anodizada com 10 minutos possui a maior altura ( $R_p$ ).

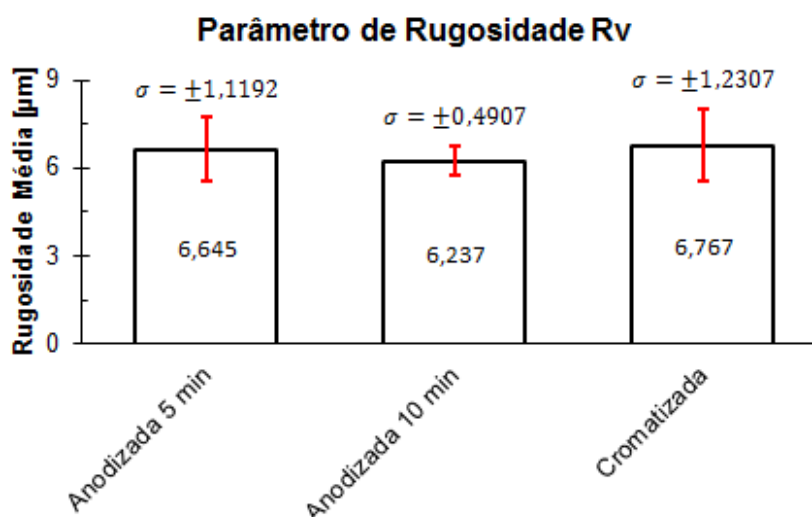


**Gráfico 3 - Parâmetro Rt de Rugosidade**  
Fonte: autoria própria



**Gráfico 4 - Parâmetro Rp de Rugosidade**  
Fonte: autoria própria

Quando a análise se faz quanto à profundidade do vale, as tendências até então esperadas, se alteram (Gráfico 5). A amostra anodizada com 10 minutos revela o menor valor de Rv, seguida pela amostra anodizada com 5 minutos e por fim a amostra cromatizada com a maior média e desvio padrão similar ao da amostra anodizada com 5 minutos. A distribuição uniforme de vales pode propiciar um escoamento mais eficaz de lubrificantes e pode promover a formação de um filme lubrificante sobre a superfície.

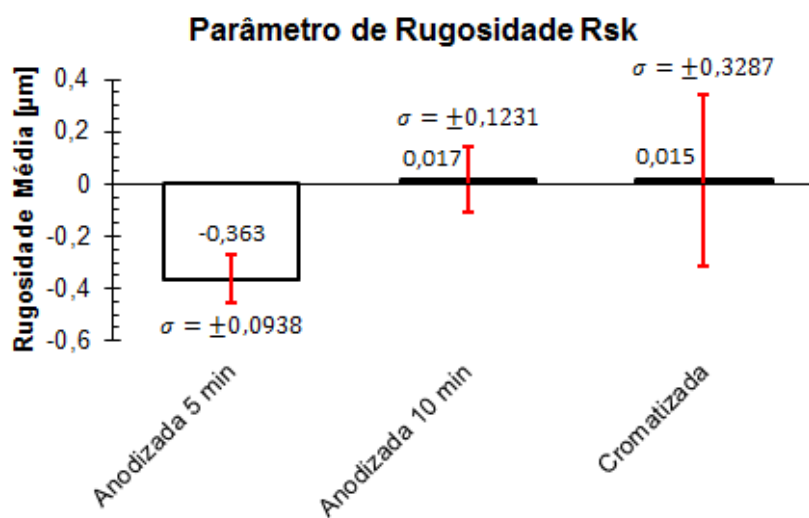


**Gráfico 5 - Parâmetro Rv de Rugosidade**  
Fonte: autoria própria

Com os parâmetros analisados até o momento (Ra, Rz, Rt, Rp e Rv) não se consegue diferenciar as superfícies das amostras, já que os valores em todas as amostras em boa parte variam no mesmo intervalo. Mas pode-se afirmar que,

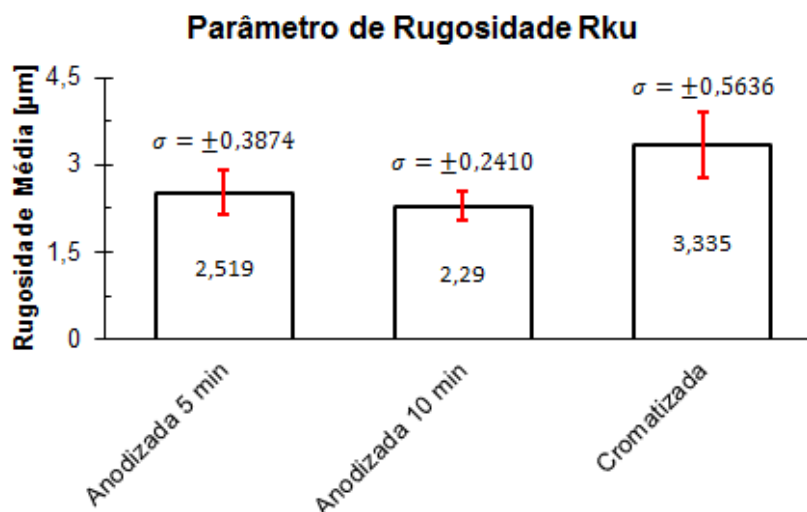
apesar da amostra anodizada com 10 minutos possuir na maior parte as maiores médias, ela apresenta o menor desvio.

Os parâmetros Rsk (que apresenta sensibilidade a picos altos ou vales profundos) e Rku (que indica comportamento de quem predomina) podem dar suporte para diferenciar superfícies similares, como as superfícies que foram obtidas nos processos utilizados. Como mostrado no Gráfico 6, a amostra anodizada com 5 minutos tem valor de Rsk negativo, o que indica que a superfície apresenta vales profundos ou picos removidos. Já as superfícies anodizadas com 10 minutos e a cromatizada, apresentaram valores positivos (o que indicaria vales preenchidos ou altos picos) com grande dispersão, podendo supor que tanto picos altos quanto vales profundos predominam nestas superfícies.



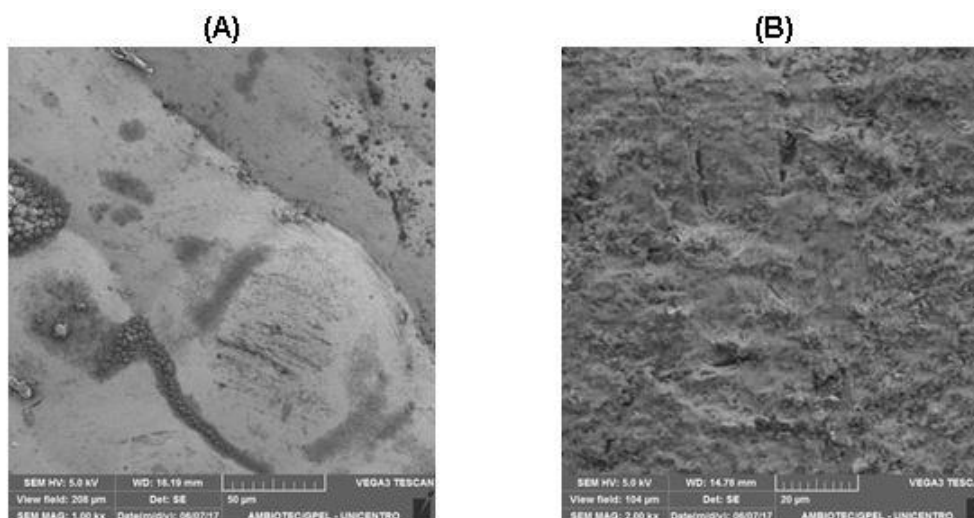
**Gráfico 6 - Parâmetro Rsk de Rugosidade**  
Fonte: autoria própria

O Gráfico 7 mostra os valores de Rku obtidos nas amostras. As amostras anodizadas apresentaram valores médios inferiores a três, o que indica presença de poucos picos altos e vales baixos. Ao analisar os dois parâmetros (Rsk e Rku) pode-se dizer que na amostra anodizada por 5 minutos os vales baixos são predominantes. Na amostra anodizada por 10 minutos, os picos altos e os vales que parecem estar na mesma quantidade, são respectivamente poucos e baixos. Já a amostra cromatizada, o valor de Rku foi maior que três, indicando que as irregularidades (os vales e os picos) são “pontagudas”.



**Gráfico 7 - Parâmetro Rku de Rugosidade**  
Fonte: autoria própria

Nota-se que a rugosidade apresentada pelas amostras revestidas com óxido de alumínio foi, em geral, equivalente àquela obtida sobre o revestimento de cromo duro e em alguns casos apresentou comportamento mais favorável. Com as análises dos parâmetros de rugosidade, pode-se esperar um comportamento superior da amostra anodizada por 5 minutos, seguida da amostra anodizada com 10 minutos e por último da amostra cromatizada. Isto porque o valor médio de Rku obtido sobre o revestimento de Cromo é superior a três o que pode implicar em seu desgaste prematuro. Esta diferença deve-se à distinção das superfícies resultantes entre os processos de eletrodeposição e anodização, como pode ser visto na Figura 11.



**Figura 11 - Superfície revestida com cromo (A) e óxido de alumínio (B)**  
Fonte: autoria própria

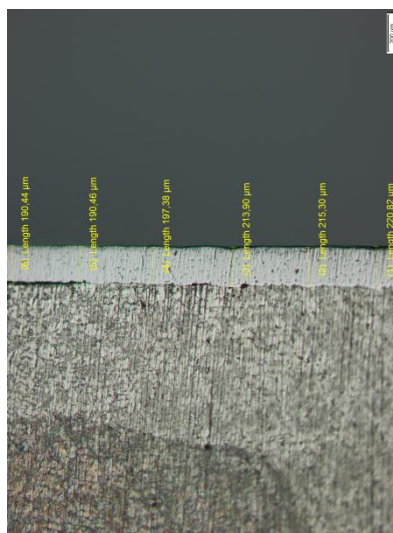


Na anodização não há depósito de material sobre o substrato e a camada resultante origina-se pela transformação do alumínio superficial em óxido de alumínio. Com isto, os picos contidos no substrato desfazem-se e a morfologia resultante apresenta rugosidade favorável.

### 6.3 ESPESSURA DAS CAMADAS ANALISADAS

A medição da espessura dos revestimentos de cromo e óxido de alumínio foi realizada, respectivamente, no microscópio óptico do laboratório de materiais da UTFPR e no microscópio eletrônico de varredura da Universidade Estadual do Centro Oeste.

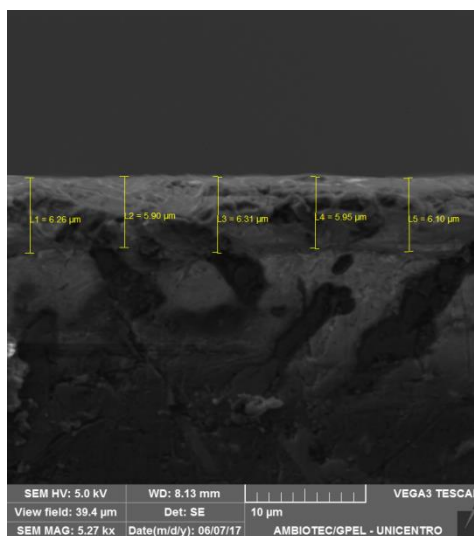
A interface entre o cromo e o substrato pode ser visualizada a olho nu e a utilização da lente de ampliação 5x possibilitou encontrar uma espessura média de 205,64  $\mu\text{m}$ , conforme mostrado na Figura 12. A irregularidade no processo de deposição de cromo resultou na formação de espaços vazios entre o revestimento e o substrato e desigualdade acentuada na espessura da camada. A presença destes vazios pode propiciar pontos de baixa adesão com o substrato e favorecer o destacamento do revestimento.



**Figura 12 - Espessura do revestimento de Cromo (escala de 200  $\mu\text{m}$  com ampliação de 2,5x)  
Fonte: autoria própria**

A espessura do revestimento de óxido de alumínio da amostra anodizada por 10 minutos não foi medida, devido ao pouco tempo disponível do MEV para a medição, sendo possível medir apenas da amostra de 5 minutos. Para este

procedimento a amostra foi embutida em metilmetacrilato, levada para anodização e removida posteriormente do embutimento. Com isto uma de suas faces não recebeu o revestimento. Com a amostra inserida no MEV obteve-se a espessura média de 6,10  $\mu\text{m}$ . A Figura 13 mostra a interface do revestimento de óxido de alumínio com o substrato. Ao contrário do cromo, sua espessura é regular com pouca variação sobre o comprimento avaliado, sem presença de espaços vazios entre o substrato e o revestimento. Estas características podem ser favoráveis à adesão.



**Figura 13 - Espessura do revestimento de Óxido de Alumínio**  
**Fonte: autoria própria**

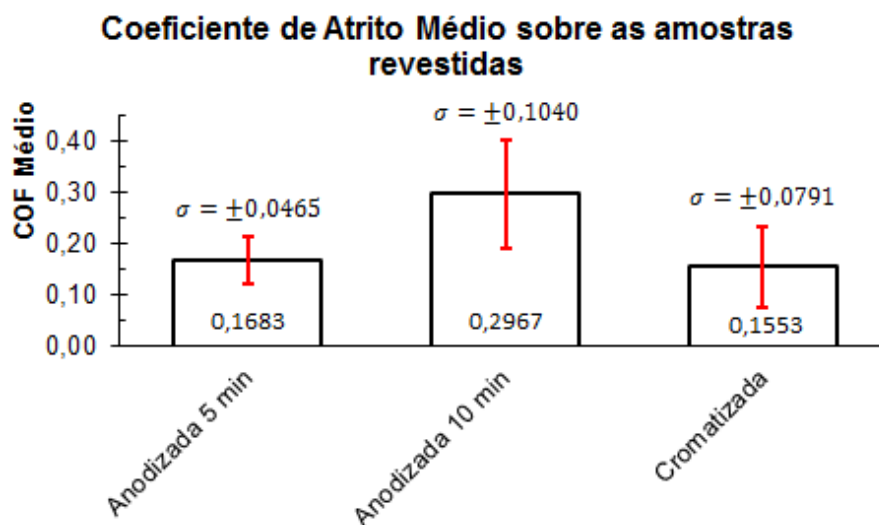
Como os resultados indicam há uma diferença apreciável entre as espessuras analisadas, tal que a camada de óxido de alumínio representa em média 3% da espessura do revestimento de cromo duro.

#### 6.4 AVALIAÇÃO DO ATRITO

Os testes de atrito foram realizados a seco, sem adição de algum tipo de lubrificante e não foi possível avaliar o comportamento de um filme lubrificante sobre as superfícies. Para avaliar o comportamento do atrito considerou-se a média dos valores obtidos das três trilhas de riscamento das amostras e adotou-se o desvio padrão médio como erro de medida.

Nestes testes a amostra anodizada por dez minutos mostrou-se menos favorável e o valor médio do coeficiente de atrito e desvio padrão médio obtido são superiores aos respectivos valores reportados pelas demais, conforme Figura 14.

Estes valores elevados indicariam que esta amostra dissiparia mais energia que as demais em função do atrito.



**Figura 14 - Coeficiente de atrito médio sobre as amostras revestidas**  
**Fonte: autoria própria**

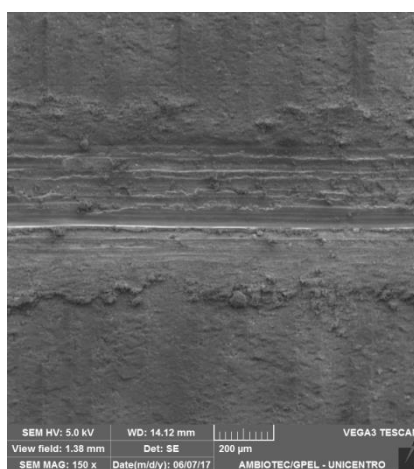
Conforme a mesma figura os coeficientes de atrito médio entre as amostras anodizadas por cinco minutos e a cromatizada se mostram similares. De acordo com o exposto no Gráfico 4 a superfície cromatizada possui maior altura de pico e a área inicial de contato com a esfera é reduzida. Esta área aumenta gradativamente com o amaciamento dos picos causado pelo movimento linear cíclico e o coeficiente de atrito tende a aumentar até que estabilize. Este comportamento não acontece na amostra anodizada por cinco minutos e a variação do coeficiente de atrito médio apresentada entre o início e o fim de cada riscamento é muito pequena. Já a amostra anodizada por 10 minutos apresenta a menor altura de vale (Gráfico 5) e os picos altos são poucos (menor que a amostra anodizada por 5 minutos, conforme Gráfico 7). Isto pode explicar o maior valor médio e desvio do COF (coeficiente de atrito). De acordo com (PARISE, 2015) a elevação de fricção é devida a maior interação entre as asperezas das superfícies, pois a remoção de partículas durante o teste promove uma redução de coeficiente de atrito, que aumenta novamente quando as partículas são formadas e injetadas na interface de contato. A área de contato com a esfera é maior e a acomodação dos debrís (material arrancado dos picos) nos vales é menor, e estes debrís podem rolar ou se acomodar na interface de contato provocando as variações observadas na amostra citada. A variação do COF da amostra anodizada por cinco minutos, também pode ser explicada pela mesma hipótese, porém o valor da altura do vale é menor, tendo uma maior

acomodação dos debrís. O Gráfico 8 mostra que o óxido apresenta um comportamento do COF mais favorável, com menor variação comparado ao cromo.

Portanto, pode-se dizer que a amostra anodizada a 5 minutos possui um comportamento mais favorável, por apresentar desvio padrão médio menor e os maiores valores do COF alcançados com acréscimo do desvio são inferiores comparados à amostra cromatizada nas mesmas condições.

## 6.5 AVALIAÇÃO DA TRILHA DO DESGASTE

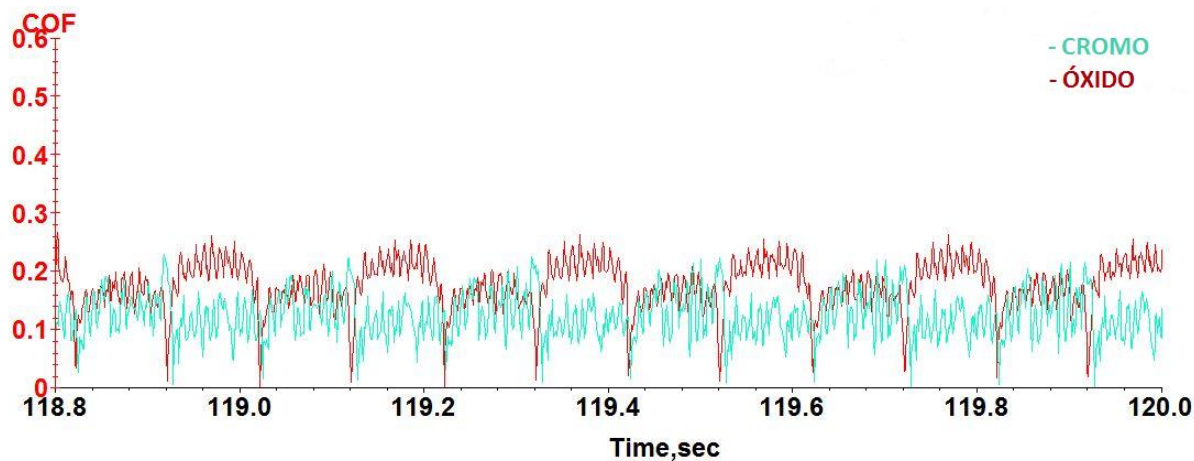
Este resultado foi coletado sob as mesmas configurações utilizadas para analisar o coeficiente de atrito. A partir do resultado do COF e pelo pouco tempo disponível para se utilizar o MEV, optou-se por visualizar a trilha da amostra anodizada por cinco minutos, como pode ser vista na Figura 15. Percebe-se que os danos causados pelo atrito da esfera com o revestimento foram superficiais.



**Figura 15 - Trilha sobre o revestimento de óxido**  
**Fonte: autoria própria**

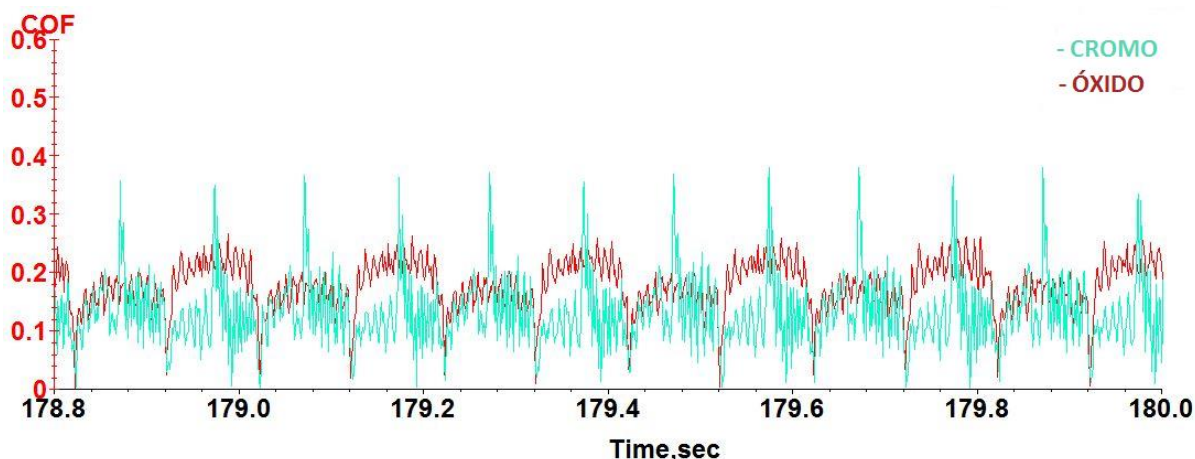
O rompimento da camada de revestimento é caracterizado pela variação abrupta do comportamento das forças de atrito, evidenciado pelo gráfico gerado pelo *software Viewer* de monitoramento das atividades do equipamento, e pela emissão de um ruído diferenciado. Nestas circunstâncias as amostras revestidas com óxido de alumínio não apresentaram rompimento, pois nenhum ruído foi ouvido. Já na amostra cromatizada ocorreu emissão de ruído e pelo gráfico de atrito percebia-se uma alteração no comportamento dos valores do coeficiente de atrito.

O Gráfico 8 mostra o comportamento do atrito no terceiro riscamento das amostras anodizada por 5 minutos e a cromatizada. Nota-se que após a execução do teste por 120 segundos ainda não há rompimento dos revestimentos, embora a variação do COF do cromo possa indicar a proximidade de seu rompimento ou destacamento.



**Gráfico 8 - Comportamento do atrito dos revestimentos após 120 segundos**  
Fonte: autoria própria

O rompimento do cromo ocorre antes de 180 segundos de execução do teste, conforme o Gráfico 9 (confeccionado sobre o mesmo riscamento e amostras anteriores). Verifica-se uma variação abrupta do COF e neste momento se iniciou a emissão de um ruído diferenciado, causado pela fricção da esfera com o substrato.



**Gráfico 9 - Rompimento do revestimento de cromo**  
Fonte: autoria própria

As elevações pontuais do atrito resultam do acúmulo de material removido do revestimento sobre a esfera. A quantidade de material que se acumula à superfície da esfera cresce gradativamente durante o movimento relativo das partes

até se desprender e cair na interface de deslizamento provocando variações apreciáveis nos valores do coeficiente de atrito.

Neste trabalho também não se conseguiu analisar o mecanismo de desgaste ocorrido na trilha. Esta análise seria importante, pois as flutuações do coeficiente de atrito não estão associadas apenas à remoção de debris, mas também a fatores como desgaste, quebra de óxidos, à variação da carga, velocidade e as vibrações transmitidas das partes dos componentes móveis do equipamento ou do ambiente, etc (PANTELÉÓN, TANAKA e BERNARDES, 2012).

## 7 CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nas avaliações realizadas sobre os resultados obtidos nas condições consideradas pode-se concluir que a utilização de revestimentos de óxido de alumínio é equiparada ao cromo duro.

Com relação aos tempos de submersão adotados as amostras anodizadas por cinco minutos mostraram-se mais eficazes e, em geral, os resultados obtidos foram satisfatórios comparados ao revestimento de cromo. O processo de anodização utilizado oferece menor risco que a cromatização, pois não libera substâncias nocivas à atmosfera.

A rugosidade apresentada pelas amostras revestidas com óxido de alumínio foi, em geral, equivalente àquela obtida sobre o revestimento de cromo duro e em alguns casos apresentou comportamento mais favorável. A rugosidade final das amostras revestidas por cinco minutos possui valores de picos e vales convenientes.

O coeficiente de atrito apresentado pela amostra anodizada por cinco minutos mostrou-se equiparável ao cromo com a vantagem de apresentar menor desvio padrão. A amostra anodizada mostrou-se mais favorável com relação à variação COF do início até o fim de cada riscamento. No cromo esta variação é considerável, o valor inicial do COF é baixo e eleva-se até que o amaciamento da superfície termine. No processo de amaciamento os picos mais altos são achatados ou quebrados, resultando em partículas soltas sobre a região de atrito e a variação do COF.

A adesão do óxido de alumínio ao substrato mostrou-se maior que do cromo, pois não houve rupturas no revestimento das amostras anodizadas. Apesar de sua espessura ser consideravelmente inferior à de cromo conseguiu resistir o atrito causado pela esfera do tribômetro.

Em continuidade ao estudo proposto algumas sugestões de trabalhos futuros serão propostas:

- Avaliar o mecanismo de desgaste das trilhas das amostras anodizadas.
- Medir a espessura das amostras anodizadas e revestir amostras com outros tempos de imersão, para verificar se a espessura do filme tem influência no desgaste.

- Medir a quantidade de material retirado na trilha de desgaste.
- Avaliar o desgaste em condições de altas temperaturas.
- Verificar o comportamento de um lubrificante (o mesmo ou similar ao combustível utilizado no motor da motosserra) sobre o revestimento.



## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas (GPS) Rugosidade: método do perfil: termos, definições e parâmetros de rugosidade. Rio de Janeiro: , 2002.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

BEZERRA, B. F. A. **Análise da Taxa de Desgaste de um revestimento nanométrico WC-CO-CR/Ni-Cr depositado por HVOF**. 2016. 70f. Trabalho de conclusão de curso (Engenheiro de Materiais - Materiais) - Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2016.

BHUSHAN, B. Adhesion and stiction: Mechanisms, measurement techniques and methods for reduction. **Journal of Vacuum Science & Technology B**, Columbus, v. 21, November 2003.

BOUTIN, F. F.; ROCHA, L. P. C. **Avaliação do comportamento tribológico do politetrafluoretileno contra aço inoxidável sem lubrificação em ensaio pino sobre disco**. 2015. 90f. Monografia (Engenheiro Industrial Mecânica - Engenharia Mecânica) - Departamento acadêmico de mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Curitiba. Curitiba. 2015.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 23**: de 12 de dezembro de 1996. Publicado no DOU em 20 de janeiro de 1997. : ,.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, v. 1, 2012.

CARPINETTI, L. C. R. et al. **Rugosidade Superficial**: Conceitos e princípios de medição. São Carlos: Serviço Gráfico USP, 2000.

COUNCIL, T. E. P. A. O. T. **DIRECTIVE 2002/95EC**: of 27 January 2003. On the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. : , 2002.

COUTINHO, L. D. **Avaliação tecnoeconômica da substituição do processo de cromo duro por oxinitrocarbonetação em comando de válvulas elétricas**. 2013.

74f. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.

FILHO, F. M.; FILHO, J. S. C. Apostila de metrologia. **Cadernos Didáticos UFRJ**, Rio de Janeiro, v. , n. 29, p. 54, 1996.

GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 123, p. 133-145, abril 2002.

GEDEON, M. Friction Calculations. **Materion Performance Alloys Technical Tidbits**, Mayfield Heights, February 2015.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 1ª. ed. Oxford: elsevier, 1992.

LAMET et al. **ASM HANDBOOK: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. [S.l.]: [s.n.], v. 2, 1990.

MAGALHÃES, R. A. **Eletrodeposição de filmes finos de CdTe sobre substrato de Pt para uso em sistemas fotovoltaicos**. 2012. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2012.

MENDES, M. A. R. S. **Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimento de filmes finos utilizadas em operações de conformação a frio**. 2009. 73f. Dissertação (Mestre em Engenharia - Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

MITUTOYO. **QUICK GUIDE TO SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT: Reference guide for laboratory and workshop**. USA: , 2016.

NEIS, P. D. **Projeto e construção de um tribômetro para estudos relacionados a materiais de fricção veiculares**. 2008. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.

PANTELEÓN, E. M.; TANAKA, D. K.; BERNARDES, F. G. Análise das variações do coeficiente de atrito e as correlações com os mecanismos de desgaste. **HOLOS**, v. 1, n. 28, p. 72, 2012.

PARISE, K. **Estudo do comportamento tribológico de líquidos iônicos como fluidos lubrificantes em processos de estampagem**. 2015. 52f. TCC (Engenheiro - Departamento de Metalurgia) - Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 63. 2015.

RAMOS, D. T. L. et al. Projeto de um banco de ensaio de desgaste do tipo “pin-on-disc”. **Cerâmica**, São Paulo, v. 60, n. 355, p. 443-448, Julho/Setembro 2014.

REJOWSKI, E. D. **Caracterização e desempenho de um filme de carbono amorfo hidrogenado tipo diamante dopado com silício, aplicado em camisa de cilindro de motor à combustão interna**. 2012. 166f. Dissertação (Mestre em Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2012.

REJOWSKI, E. D.; MORDENTE, P. J. D. R.; PILLIS, M. F. Camisa de cilindro revestida com filme de carbono amorfo na forma de diamante. **Associação Brasileira de Engenharia Automotiva**, São Paulo, Disponível em:< [http://www.aea.org.br/premio/trabalhos2012/academica\\_mencao\\_honrosa1.pdf](http://www.aea.org.br/premio/trabalhos2012/academica_mencao_honrosa1.pdf) >. Acesso em: 19 set 2016 2012.

ROSA, S. D. N. **Avaliação da superfície modificada de brocas de metal duro revestidas pelo processo de deposição física de vapor**. 2013. 175f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2013.

SANTANA, R. A. C.; PRASAD, S.; SANTANA, F. S. M. Revestimento eletrolítico com uma liga amorfa de Ni-W-B, resistente à corrosão e ao desgaste. **Eclética Química**, São Paulo, v. 28, 2003.

SENAI. Coleção Metal mecânica Metalurgia. **Metalurgia Geral**, São Paulo, p. 344, 2015.

TUSSOLINI, M. et al. Planejamento experimental no estudo eletroquímico de camadas de óxido de nióbio em liga de alumínio 3003. **Cerâmica**, São Paulo, v. 60, n. 355, p. 417-424, Julho/Setembro 2014.

VIEIRA, L. F. D. S. **Comportamento mecânico do aço AISI 4340 revestido com WC-CrC-Ni; WC-10Ni; Ni-20Cr; Ni-Cr-B-Si-Fe; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr pelo processo HVOF.** 116 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista Câmpus de Guaratinguetá. Guaratinguetá. 2012.