

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE SUPERFÍCIES REVESTIDAS COM CROMO DURO

por

Felipe de Andrade

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

de Andrade, Felipe
Avaliação Tribológica de Superfícies Revestidas com
Cromo Duro / Felipe de Andrade. -- 2019.
25 f.
Orientador: Ney Francisco Ferreira.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Cromo duro. 2. Desgaste. 3. Filme lubrificante.
4. Coeficiente de atrito. I. Ferreira, Ney Francisco,
orient. II. Título.

Felipe de Andrade

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE SUPERFÍCIES REVESTIDAS COM CROMO DURO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Prof^a. Dr^a. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Porto Alegre, dezembro de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todos os anos de suporte e compreensão durante a graduação.

Ao professor Ney Francisco Ferreira, pela orientação neste trabalho, pelos ensinamentos, conselhos e disponibilidade.

À equipe do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS, por todo o apoio durante a realização deste trabalho e pelas amizades formadas.

À STIHL Ferramentas Motorizadas Ltda., pela proposta do presente estudo, pela fabricação dos corpos de prova utilizados e pela confiança depositada em mim e toda a equipe do LATRIB.

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE SUPERFÍCIES REVESTIDAS COM CROMO DURO

de Andrade, Felipe

felipe.de.andrade@hotmail.com/deandrade.felipe@gmail.com

Este trabalho tem como objetivo realizar a análise tribológica de amostras de alumínio revestidas com cromo duro com diferentes temperaturas de banho de deposição, sendo elas 60 °C e 74 °C. A análise é feita a partir da realização de ensaios pino-sobre-disco no tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS. Os discos foram ensaiados contra pinos de ferro fundido, em meio lubrificado e variando a velocidade de deslizamento. Foi analisado o desgaste e o comportamento do coeficiente de atrito dos ensaios realizados. Foi verificada uma relação entre o coeficiente de atrito e o desgaste, sendo as amostras com maior desgaste as que apresentaram maior coeficiente de atrito médio. Foram encontrados diferentes níveis de desgaste nas amostras, sendo que as mais desgastadas provavelmente ocorreram devido à falha na formação de filme lubrificante, sendo encontrado inclusive desgaste por adesão. Neste caso de elevado desgaste, as amostras depositadas a 74 °C apresentaram um desgaste superior ao encontrado nas amostras depositadas a 60 °C.

Palavras-chave: *cromo duro, filme lubrificante, desgaste, coeficiente de atrito.*

This study aims to perform a tribological analysis of hard chrome coated aluminum samples coated with two different plating bath temperatures: 60 °C and 74 °C. The analysis is made by performing pin-on-disk tests on the tribometer of the Tribology Laboratory of UFRGS. The discs were tested against cast iron pins, with lubrication and varying the sliding speed. Wear and coefficient of friction of the tests were analyzed. It was found a correlation between coefficient of friction and wear, being the samples with the highest wear level the same ones that showed the highest average coefficient of friction. Different wear levels were observed at the samples, and the most worn ones were probably due to failure in obtaining lubricating film, with even adhesive wear being found. In this case of high wear level, the samples coated at 74 °C produced higher wear level than the samples coated at 60 °C.

Keywords: *hard chrome, lubricant film, wear, coefficient of friction.*

1. INTRODUÇÃO

O motor de combustão interna é uma máquina térmica que possui um ou mais êmbolos que se movem dentro de seus respectivos cilindros. No êmbolo estão acoplados anéis de vedação que sofrem contato direto com o cilindro, sendo atritados por meio de um movimento oscilatório. O movimento relativo deste par tribológico exige lubrificação visando a redução de atrito e desgaste. Porém, para que ocorra a formação de filme de óleo lubrificante e este seja efetivo, é exigida uma velocidade relativa mínima, o que resulta em baixa eficiência da lubrificação nas regiões do cilindro chamadas de ponto morto superior e inferior.

Devido a isso, para fornecer uma elevada vida útil aos anéis do êmbolo e para o cilindro, além da lubrificação, são aplicados revestimentos na superfície de um ou outro. O cromo duro é o revestimento eletrodepositado mais utilizado na indústria aeroespacial e automotiva, devido suas propriedades atrativas como elevada dureza e resistência ao desgaste, como descrevem Srivastava et al. (2013). Atualmente, diversos estudos buscam encontrar revestimentos inovadores que sejam capazes de substituir o cromo duro devido ao seu elevado impacto ambiental, como por exemplo Wang et al. (2019), que estudaram diferentes revestimentos à base de carbeto de tungstênio e de cromo. No entanto, como é ressaltado por Podgornik et al. (2018), um substituto para o cromo duro ainda não foi encontrado para todas as aplicações, e provavelmente não será, o que significa que revestimentos de cromo duro ainda serão necessários por um longo tempo.

Tendo em vista a relevância do revestimento de cromo duro e da sua aplicação em anéis de êmbolo ou cilindros, diversos autores têm estudado aspectos diferentes desse par tribológico. Um ponto importante é o estudo da morfologia do revestimento, como na pesquisa realizada por Podgornik et al. (2018), que estudou três superfícies resultantes de revestimentos de cromo duro combinadas com processo de acabamento superficial posterior. Outro ponto relevante é o estudo das variáveis tribológicas envolvidas nesta aplicação, como no estudo de Biberger e Fűber (2016), que avaliaram a influência isolada de fatores como velocidade de escorregamento, força normal, temperatura e duração do teste, frente à resistência ao desgaste de um dado revestimento de cromo duro.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a resistência ao desgaste de dois revestimentos de cromo duro com morfologias distintas obtidas a partir da variação da temperatura do banho de deposição. Esta pesquisa realizará também a análise da influência da variação de velocidade no comportamento tribológico destes dois revestimentos. Para tal serão realizados ensaios pino-sobre-disco com lubrificação em um tribômetro rotativo. A partir dos resultados obtidos é esperado obter um entendimento melhor sobre o comportamento tribológico destas superfícies, avaliando quais características superficiais são mais satisfatórias para a aplicação em cilindros de motores de combustão interna.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência da temperatura do banho de deposição de cromo duro sobre peças de alumínio, verificando seu comportamento tribológico em um ensaio pino-sobre-disco lubrificado.

2.2. Objetivos Específicos

- Elaborar os corpos de prova (discos de alumínio revestidos com cromo duro com duas temperaturas de banho de deposição diferentes e pinos de ferro fundido cinzento FC300).
- Realizar ensaios tribológicos do tipo pino-sobre-disco em um tribômetro.
- Analisar os mecanismos de desgaste através de microscopia ótica.

- Medir o desgaste dos discos ensaiados através da técnica de interferometria.
- Avaliar o comportamento do coeficiente de atrito durante os ensaios.
- Avaliar as correlações entre as variáveis tribológicas e a temperatura do banho de deposição.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Revestimento de Cromo Duro

Os revestimentos de cromo aplicados por meio de eletrodeposição são divididos em dois tipos, segundo suas características e utilização. Existe o cromo decorativo, utilizado apenas para questões estéticas, e o cromo duro, que é o revestimento para aplicações industriais. Roberge (2012), cita que a principal diferença entre o cromo decorativo e o duro é a espessura da camada. O cromo duro é tipicamente centena de vezes mais espesso que o decorativo. Neste trabalho será focado apenas no estudo do cromo duro (industrial).

O processo de eletrodeposição do cromo é realizado por meio de uma série de banhos de imersão da peça a ser revestida. Como preparação da superfície, são realizados banhos para desengraxe, limpeza, ativação da superfície (a qual normalmente se dá pela aplicação de uma camada de níquel), e por fim, a aplicação do revestimento. Na eletrodeposição, como explica Gentil (2011), o material a ser protegido é colocado como cátodo de uma cuba eletrolítica, onde o eletrólito contém sal do metal a ser usado no revestimento, podendo o ânodo também ser do metal a ser depositado. No caso específico do cromo, como citado por Lowenheim (1974), este não atua satisfatoriamente como próprio ânodo devido à sua alta solubilidade. Por isso, geralmente é usado chumbo como ânodo.

Segundo Lowenheim (1974), o cromo não pode ser depositado a partir de uma solução contendo apenas ácido crômico (CrO_3) e água. Deve estar presente no banho um ou mais radicais ácidos que agem como catalizadores, sendo os mais utilizados os sulfatos e fluoretos. Como explica Gentil (2011), estes ativadores aceleram o ataque do metal na reação química e, com isso, o cromo se deposita sobre a superfície.

A partir da variação de parâmetros do banho de deposição, a eletrodeposição do cromo duro pode gerar revestimentos com diferentes características superficiais. Os parâmetros normalmente variados na indústria são a corrente elétrica, a temperatura, os constituintes e o tempo de imersão. Segundo Podgornik et al. (2018), diferentes propriedades podem ser obtidas para revestimentos de cromo duro, incluindo espessura, dureza, nível de tensão residual, entre outros. Os autores também citam que a sua performance é dependente das trincas superficiais e do nível de tensão residual desenvolvidas no processo de deposição.

Mesmo com pequenas variações no processo, os revestimentos de cromo duro sempre irão oferecer, como citam Podgornik et al. (2018), alta dureza e excelente resistência ao desgaste, baixa fricção e boa proteção à corrosão em meios agressivos. Os valores de dureza estão no máximo em torno de 65 a 68 HRC, como citado pelos mesmos autores.

A resistência ao desgaste é difícil de ser mensurada, no entanto, Lowenheim (1974), cita que depósitos de média dureza, entre 62 e 64 HRC, apresentam melhor resistência ao desgaste. Cita ainda que o baixo coeficiente de atrito do revestimento de cromo contra outros metais é um importante fator no uso em eixos, anéis de pistão, cilindros de motor de combustão interna e aplicações similares.

3.2. Microestrutura da Superfície do Revestimento de Cromo Duro

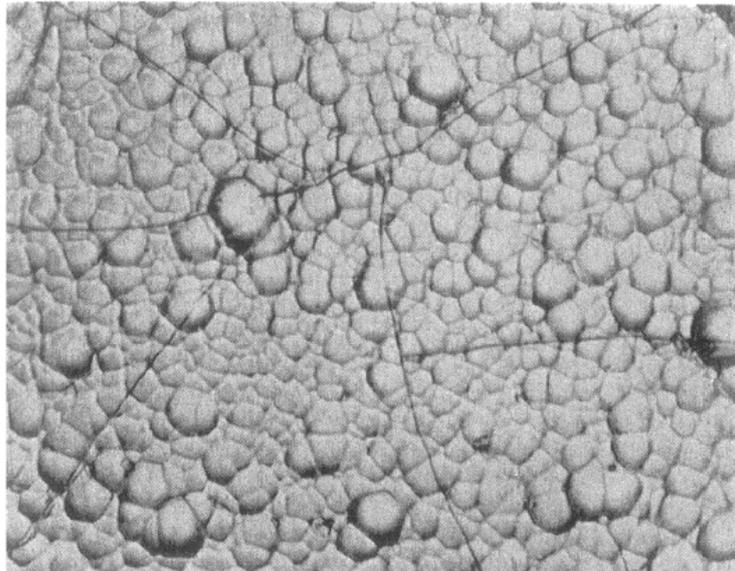
A superfície de um revestimento de cromo duro é geralmente lisa e brilhante, possuindo um aspecto espelhado quando observada à olho nu, como cita Lowenheim (1974). O mesmo autor também menciona que esta superfície, quando é observada a partir de um microscópio, apresenta

inúmeras projeções em forma de domo, além de suas características trincas. A Figura 1 mostra uma superfície típica de um revestimento de cromo duro.

A formação de trincas, também segundo Lowenheim (1974), acredita-se estar relacionada à formação de hidretos de cromo instáveis de composição variada durante o processo de deposição. Hidretos podem ser eletrodepositados na forma de cristais hexagonais ou cúbica de face centrada. Estes se decompõem espontaneamente em cristais de cromo cúbico de corpo centrado e um hidrogênio livre. Durante o processo de eletrodeposição, alguns hidrogênios escapam e outros permanecem ocluídos na camada. Esta decomposição do cromo pode envolver uma redução de até 15% no volume. Como o revestimento é conectado ao metal base, esta redução causa a formação de trincas.

Outra causa da formação de trincas na camada de cromo também aceita, e que atua em paralelo com a teoria da formação e decomposição do hidreto de cromo, é citada por Lowenheim (1974), e Biberger e Fűber (2016), que é o surgimento de trincas devido a elevadas tensões internas resultantes do processo de deposição que excedem a força coesiva do metal.

Figura 1 – Cromo duro semi-brilhoso, 1000x [Lowenheim (1974)].



3.3. Utilização do Cromo Duro em Aplicações com Lubrificação

As trincas características do revestimento de cromo duro podem reduzir a resistência ao desgaste e à corrosão do material, porém, como citam Podgornik et al. (2018), em situações com lubrificação, as trincas incrementam a molhabilidade da superfície e estendem a fração de área coberta por filme lubrificante, possuindo papel muito importante em suas aplicações.

Placa de cromo porosa, de acordo com Lowenheim (1974), é o nome dado aos depósitos de cromo modificados com propriedades retentoras de óleo, usados em cilindros de motores de combustão interna e anéis de pistão. Há diferentes maneiras de obter um revestimento poroso, sendo um deles o tipo “mecânico”, que é produzido preparando a superfície do metal base por meio de jateamento. Em uma segunda etapa é realizada a deposição da camada de cromo com espessura em torno de 100 e 125 μm e, em seguida, realizado o acabamento superficial, como retificação ou polimento. Estes acabamentos superficiais, que devem retirar em torno de 25 μm de espessura, deixam canais com densos platôs ou superfícies entre eles.

Podgornik et al. (2018), citam que estas trincas, arranhões ou cavidades, podem agir como reservatórios de lubrificante capazes de fornecer lubrificante diretamente na superfície de contato.

3.4. Lubrificação

Segundo descrito por Menezes et al. (2013), lubrificante é uma substância introduzida entre duas superfícies em movimento relativo para reduzir atrito e desgaste, distribuir calor, remover contaminantes e aumentar a eficiência. Uma forma muito utilizada de lubrificação é através de óleos lubrificantes. Para Hamrock et al. (2004), esta forma de lubrificação ocorre quando duas faces opostas são completamente separadas por um filme de lubrificante. Para formar o filme, Straffelini (2015), cita que o lubrificante entre as superfícies deve estar sob pressão, hidrostática ou hidrodinâmica, capaz de exercer uma força de sustentação que mantenha a separação completa entre elas.

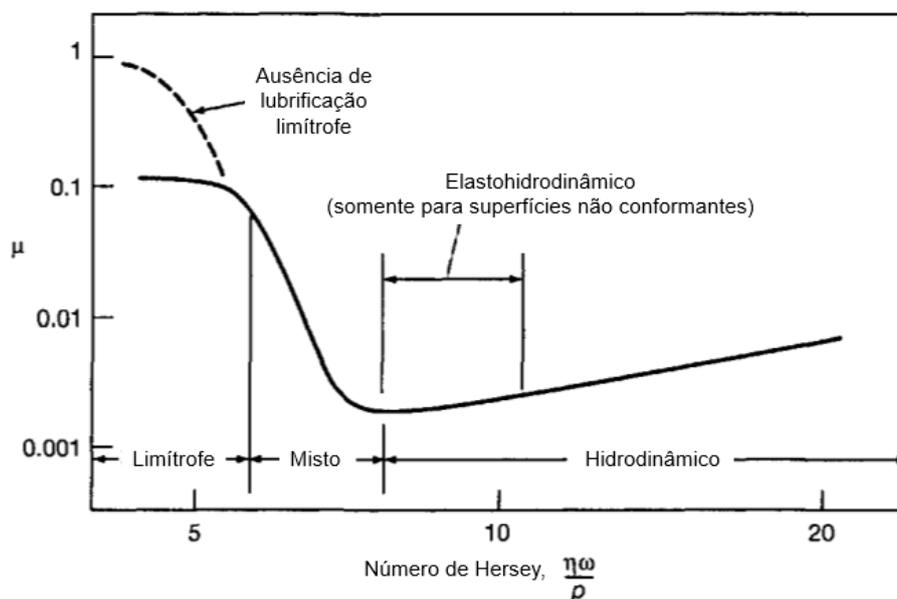
Existem diferentes regimes de lubrificação para lubrificantes líquidos classificados na literatura. Hamrock et al. (2004), classificam os regimes como hidrodinâmico, elastohidrodinâmico, limítrofe e misto.

Hidrodinâmico descreve o regime que ocorre entre superfícies conformantes (que possuem raio de curvatura muito próximos), quando o filme formado é espesso o suficiente para separar completamente as superfícies e as pressões de contato desenvolvidas são de baixa magnitude (normalmente menores que 5 MPa), sendo insuficientes para causar deformação elástica significativa das superfícies. Como as superfícies não estão em contato, o atrito é exclusivamente viscoso, proveniente da resistência ao cisalhamento do lubrificante.

Já o regime elastohidrodinâmico é descrito como um caso especial do hidrodinâmico, onde as superfícies lubrificadas são não conformantes e a deformação elástica das superfícies é significativa devido às elevadas pressões envolvidas (normalmente entre 0,5 e 3 GPa). O filme formado é muito fino e, por isso, o atrito viscoso é baixo.

A Curva de Stribeck, apresentada na Figura 2, ilustra o comportamento do coeficiente de atrito μ , com relação ao Número de Hersey ($\eta\omega/\rho$), onde η é a viscosidade dinâmica do lubrificante (Pa.s), ω é a velocidade angular (rps) e ρ é a pressão de contato (Pa). Em uma condição específica, com rugosidade e viscosidade definidas, o aumento da velocidade (e conseqüentemente aumento do Número de Hersey) é determinante para formação de filme e redução do coeficiente de atrito. O menor coeficiente de atrito ocorre na menor espessura de filme sem contato entre as asperezas das superfícies. Em velocidades superiores, o filme continua sendo completo, mas o coeficiente de atrito aumenta devido ao efeito viscoso do lubrificante.

Figura 2 – Curva de Stribeck [Adaptado: Hamrock et al. (2004)].



Explicitada no início da Curva de Stribeck como uma região de maior coeficiente de atrito, tem-se o regime de lubrificação limítrofe, descrito por Hamrock et al. (2004), como uma situação em que as superfícies não estão separadas pelo lubrificante, sendo desprezíveis os efeitos de filme, pois ocorre contato entre as asperezas das superfícies e há a dispersão do lubrificantes entre estas. Neste caso as propriedades físicas do lubrificante, como a viscosidade, são praticamente desprezíveis. Este regime é determinado pelas propriedades químicas do lubrificante adsorvido e dos sólidos envolvidos.

Por fim, há o regime de lubrificação misto, citado pelo mesmo autor, que é a combinação entre o regime limítrofe e o regime hidrodinâmico, quando as superfícies transitam entre um e outro, havendo contato entre as asperezas das superfícies, com uma porção destas estando suportadas por um filme hidrodinâmico. A espessura do filme formado é da ordem da rugosidade da superfície. Neste regime se nota um decréscimo no coeficiente de atrito devido ao início da formação de filme.

3.5. Desgaste

A Norma ASTM G40-17 define desgaste como “a alteração de uma superfície sólida pela perda ou deslocamento progressivo de material devido ao movimento relativo entre esta superfície e uma ou mais substâncias em contato”.

O desgaste pode ocorrer através de diferentes mecanismos. Zum Gahr (1987), cita a classificação segundo a Norma DIN 50320, que classifica o desgaste em quatro mecanismos básicos, sendo estes o Desgaste Adesivo (formação e quebra de ligações adesivas interfaciais), o Abrasivo (remoção de material devido ao contato de partículas sólidas), a Fadiga Superficial (fadiga e formação de trincas devido a ciclos de tensões de contato que resultam na geração e propagação de trincas) e o Triboquímico (formação de produtos de reação a partir de interações químicas originadas no sistema tribológico).

3.6. Estudos Relacionados

Recentemente, Podgornik et al. (2018), realizaram ensaios tribológicos do tipo alternativo linear em placas de aço AISI 52100 revestidas com cromo duro. As placas revestidas foram ensaiadas contra esferas de aço AISI 52100. Os ensaios foram realizados com lubrificação em regime de lubrificação mista, sendo esta dada a partir da aplicação de apenas uma gota (0,1 ml) de lubrificante no início do ensaio. As placas possuíam três diferentes densidades e tamanhos de trincas do revestimento, obtidas a partir de variações no banho de deposição. Foram utilizadas amostras com e sem acabamento superficial de polimento. Neste estudo, foi possível reafirmar que o acabamento superficial é capaz de incrementar as propriedades tribológicas dos revestimentos de cromo duro em aplicações com lubrificação, reduzindo substancialmente o atrito e o desgaste, especialmente o abrasivo. Entre as diferentes características superficiais dos revestimentos estudados, foi observado o menor desgaste nas amostras com larguras de trincas em torno de 0,286 μm e densidades de trincas de 2,6%, verificando que um aumento ou decréscimo nestes parâmetros tiveram efeitos negativos nas propriedades tribológicas. Em sua melhor amostra o coeficiente de atrito do ensaio foi 0,05.

Alterando o foco para outro campo de análise, Biberger e Fűber (2016), analisaram a influência de parâmetros isolados como a temperatura, a força normal, a duração do teste e a velocidade de deslizamento sobre o comportamento do atrito e do desgaste em um anel de êmbolo revestido com cromo duro frente a um cilindro de ferro fundido. Para tal, utilizaram um tribômetro cilíndrico rotacional especialmente desenvolvido para estudos do par tribológico citado. Mantendo o foco apenas no parâmetro isolado velocidade de deslizamento, que é de interesse neste trabalho, os autores encontraram resultados que mostram que o coeficiente de atrito é reduzido com o

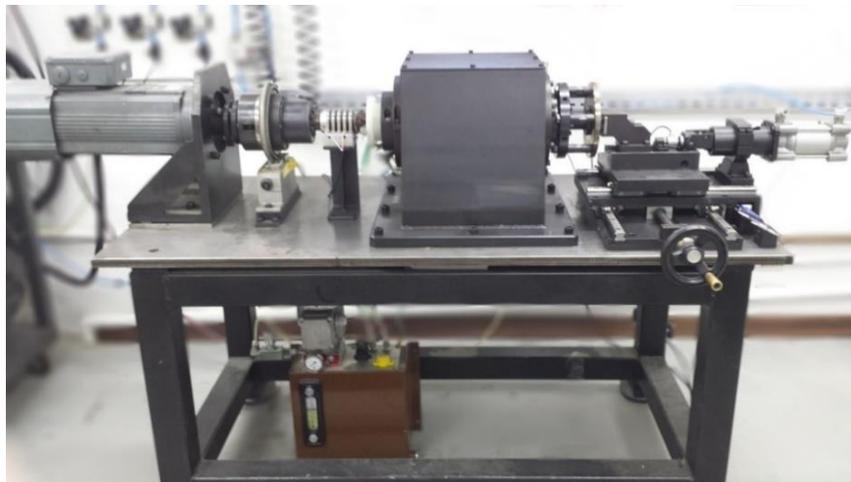
aumento da velocidade de deslizamento. Para baixas velocidades, em torno de 0,0625 m/s, o coeficiente de atrito encontrado foi 0,15. Para maiores velocidades, de 4 até 10 m/s, o valor do coeficiente reduziu para 0,09 em alta carga e para 0,01 em baixa carga. Em termos de desgaste, os testes com maiores velocidades apresentaram menor desgaste. Conforme explicado pelos autores, isto ocorre devido ao alcance do regime de lubrificação hidrodinâmico.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Tribômetro

Para realização dos ensaios abordados neste trabalho, foi utilizado o tribômetro existente no Laboratório de Tribologia (LATRIB) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Tribômetro do LATRIB - UFRGS [Adaptado: Pavlak et al. (2017)].



Este é um tribômetro rotativo que realiza ensaios do tipo pino-sobre-disco, no qual um disco gira com rotação determinada enquanto é atritado contra uma contraparte fixa, onde é aplicada a força de contato por meio de um atuador pneumático. Os ensaios pino-sobre-disco são normatizados através da norma ASTM G99 (*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*).

4.2. Lubrificação

Com o objetivo de fornecer a lubrificação necessária para realização dos ensaios, foi utilizado um Dispositivo de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), modelo MiQuel, da marca DropsA. Este é um sistema que é capaz de manter a vazão de óleo constante ao longo do ensaio. Para óleos com viscosidade cinemática de 100 cSt, o MQL utilizado é capaz de fornecer vazões entre 0,1 e 36 ml/h.

O óleo utilizado como lubrificante nos ensaios foi o Óleo de Motor Castrol 8017H (99,64 cSt a 40°C), o mesmo utilizado comercialmente para motores de dois tempos, sendo este misturado ao combustível. Todavia, no ensaio do presente estudo foi utilizado apenas o óleo, sem combustível.

Nos ensaios realizados a vazão de óleo foi mantida constante em $8 \pm 0,1$ ml/h. Para garantir a situação de lubrificação desejada desde o início do teste, o sistema de lubrificação foi ligado e mantido lubrificando a amostra com a vazão citada durante cinco minutos antes do início deste.

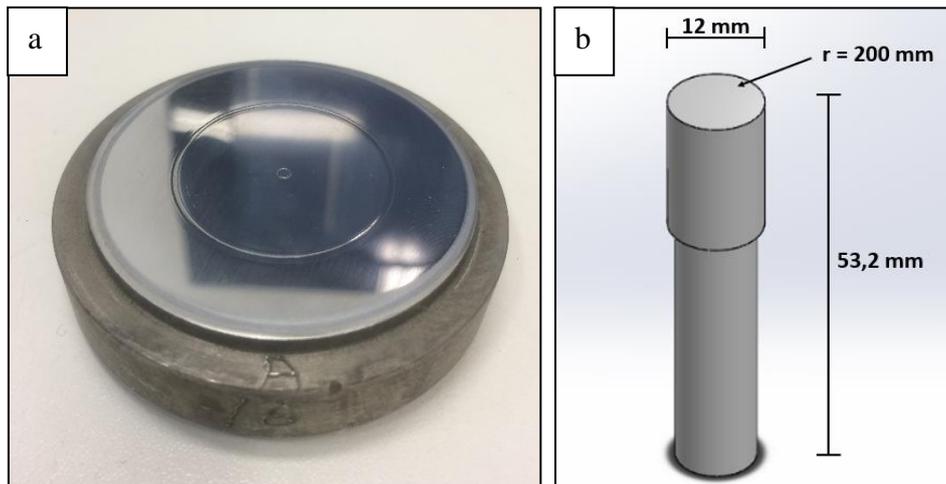
4.3. Materiais

Para realização deste trabalho foram utilizados quatro corpos de prova de alumínio, fabricados por meio de fundição sob pressão, que foram revestidos com cromo duro e finalizados com acabamento superficial de retificação e lixamento, seguido de polimento. Estes processos de acabamento superficial visam produzir a superfície mais próxima possível da superfície encontrada nos cilindros de motores. Os corpos de prova são discos de 90 mm de diâmetro. Destes discos, dois foram cromados com banho de deposição a temperatura de 60 °C e outros dois com 74 °C.

A espessura média da camada de cromo duro depositada nas amostras é de 95 µm. Após o acabamento superficial realizado, a espessura média das camadas encontrada foi de 70 µm. Um disco padrão é apresentado na Figura 4(a).

Como contraparte para realização dos ensaios do tipo pino-sobre-disco, foram utilizados pinos de ferro fundido cinzento FC300, com 200 mm de raio de curvatura na superfície de contato. Este material é o mesmo utilizado para a fabricação do anel do êmbolo. O desenho dos pinos é mostrado na Figura 4(b).

Figura 4 – Materiais utilizados nos ensaios: (a) Disco, (b) Pino.



Na Tabela 1 são apresentadas as trilhas ensaiadas, seus raios e a temperatura do banho de deposição para cada uma delas.

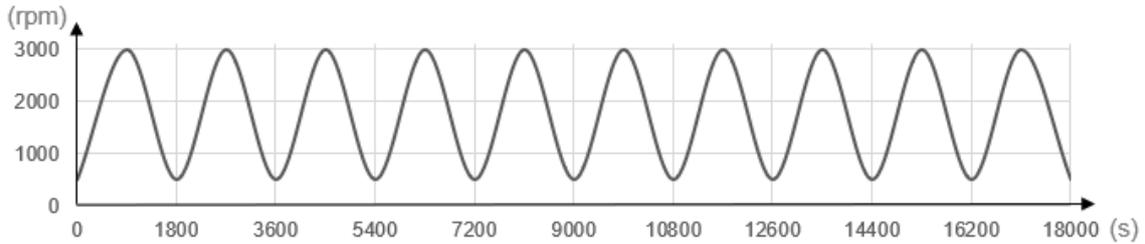
Tabela 1 – Dados dos corpos de prova utilizados.

Trilha	60-1	60-2	60-3	74-1	74-2
Temperatura do Banho de Deposição (°C)	60			74	
Raio da Trilha (mm)	13	14,5	13	13	14,5

4.4. Parâmetros de Ensaio

Para a realização dos ensaios abordados neste trabalho foi aplicada uma força normal de 600 N. Quanto à rotação, foi aplicada rotação variável de acordo com um ciclo senoidal determinado, tendo um valor médio de 1750 rpm com amplitude de 1250 rpm. A duração dos testes foi de 18000 segundos, sendo um período completado a cada 1800 segundos. O perfil de rotação dos testes está explicitado no Figura 5.

Figura 5 – Perfil de rotação aplicado nos testes.



Os parâmetros de teste são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de teste.

Força (N)	Rotação Mínima (rpm)	Rotação Máxima (rpm)	Duração (s)	Raio (mm)	Velocidade Mínima (m/s)	Velocidade Máxima (m/s)
600	500	3000	18000	13 14,5	0,68 0,76	4,08 4,55

4.5. Análise Visual do Desgaste

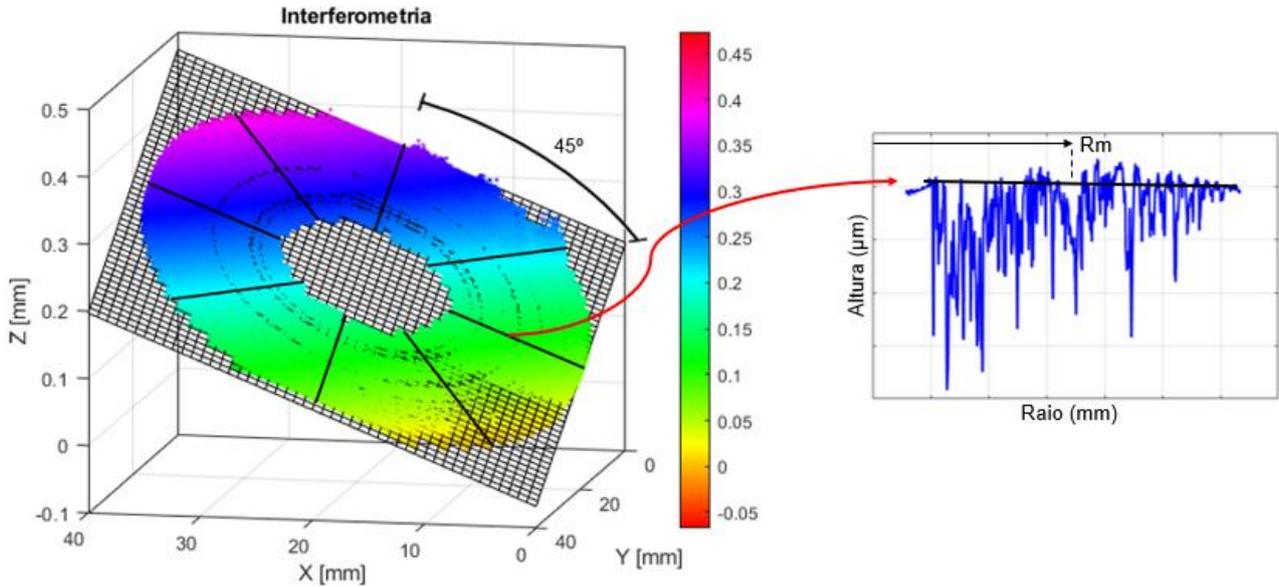
Após ensaiados, os discos tiveram suas superfícies de desgaste analisadas visualmente em um microscópio de bancada da marca Zeiss, modelo Axio Lab. 1, que possui uma câmera acoplada a um computador com software de aquisição de imagens (AxioVision SE64). Os pinos de contraparte utilizados também foram analisados visualmente, porém devido à sua geometria, foi necessária utilização de um estereoscópio de bancada Stemi 508, que possui a mesma câmera acoplada e software de imagens utilizados no microscópio citado. Ambos equipamentos se encontram no LATRIB-UFRGS. A análise visual tem como objetivo identificar diferenças nos mecanismos e magnitudes de desgaste das amostras.

4.6. Desgaste Volumétrico

O desgaste volumétrico dos discos foi obtido por meio de interferometria, que é uma técnica de medição capaz de fornecer valores correspondentes à topografia da trilha de desgaste. A Figura 6 mostra uma imagem obtida por meio de interferometria.

A partir da topografia medida, para calcular o volume são traçados oito perfis frontais da trilha espaçados em 45° entre eles, como mostrado na Figura 6. Para cada perfil é traçada uma linha que estima a altura da peça antes de realizar o ensaio. Cada ponto abaixo desta linha é considerado como ponto de desgaste. Utilizando o raio médio da trilha é calculado, por meio de uma revolução completa, o volume para cada perfil individualmente e, após, é calculada a média entre os volumes encontrados. Este valor médio é o valor do desgaste volumétrico considerado neste trabalho. Para realizar a interferometria foi utilizado um interferômetro Bruker, modelo Contour GT-K, e para a realização do cálculo do desgaste volumétrico foram utilizados os softwares Vision64 e MATLAB.

Figura 6 – Imagem obtida por interferometria e o padrão de seus perfis analisados.



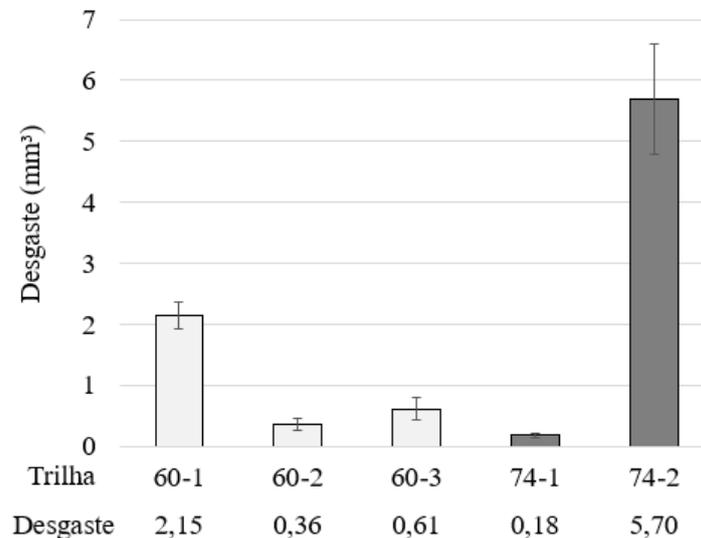
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Desgaste Volumétrico

A Figura 7 apresenta o desgaste volumétrico das trilhas. Ao observá-la, é possível perceber que as trilhas apresentam níveis de desgaste destoantes entre si, visto que a trilha com maior desgaste (74-2) apresentou desgaste 31,6 vezes maior do que a menos desgastada (74-1). Vale destacar que este nível destoante ocorreu entre amostras revestidas a partir da mesma temperatura de deposição (74 °C).

Também se observa que as duas trilhas com maior desgaste são originadas a partir de temperaturas de deposição diferentes, sendo as trilhas 60-1 e 74-2. Tais trilhas possuem diferença de apenas 2,6 vezes no desgaste volumétrico entre si. Ao comparar estas duas trilhas com as demais, se percebe um desgaste muito mais severo visualmente, como será abordado na seção 5.2.

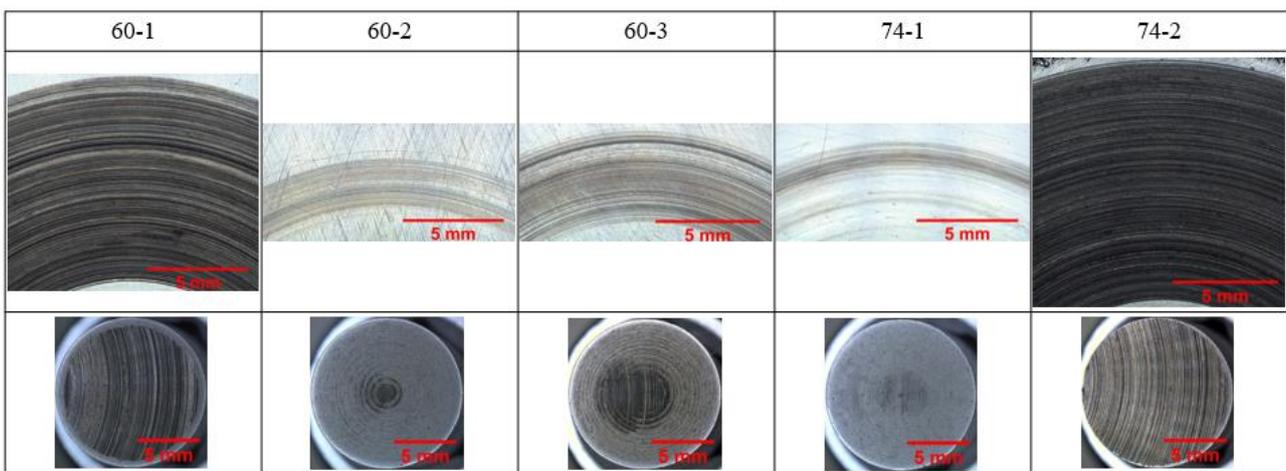
Figura 7 – Desgaste volumétrico das trilhas.



5.2. Mecanismos de Desgaste

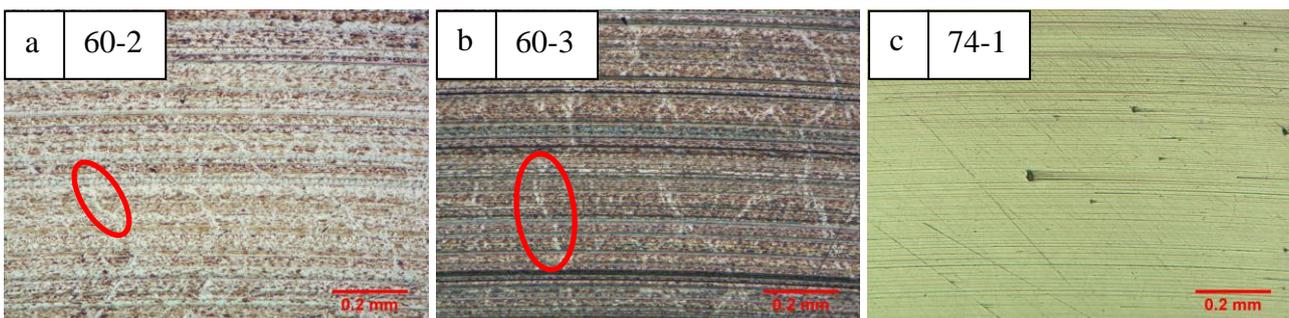
Na Figura 8 são mostradas imagens de todas as trilhas de desgaste dos discos, com aumento de 25x, juntamente com seus pinos, obtidas a partir de estereoscópio com aumento de 6,3x. A partir dos dados de desgaste volumétrico e da análise visual das trilhas, podemos classificar os regimes de desgaste das trilhas 60-1 e 74-2 como de desgaste severo, com largas trilhas produzidas nos discos e grandes marcas nos pinos correspondentes. Nestes casos, o desgaste volumétrico foi de, respectivamente, 2,15 e 5,70 mm³. Por outro lado, as demais trilhas apresentaram desgastes menores, na ordem de no máximo 0,61 mm³, que podemos classificar como regime de desgaste moderado.

Figura 8 – Micrografia das trilhas com aumento de 25x e dos pinos com 6,3x.



Com relação aos mecanismos de desgaste, nas trilhas com desgaste moderado (60-2, 60-3 e 74-1), são encontrados os mecanismos de abrasão e tribo-oxidação. O mecanismo abrasivo é perceptível pelas marcas longitudinais no sentido do movimento, determinadas pelo mecanismo de corte conhecido como microsulcamento, conforme descrito por Zum Gahr (1987). O mecanismo de tribo-oxidação é evidenciado pela coloração escura nas trilhas, com aspecto de oxidação. Este mecanismo é encontrado em maior escala nas amostras 60-2 e 60-3. Detalhes dessas trilhas são apresentados na Figura 9. Também nesta figura, está indicada a presença de trincas (circuladas na figura) que poderiam indicar a ocorrência de fadiga de contato. Porém, não se percebe um desgaste proveniente desse mecanismo, que resultaria em falhas conhecidas por *pitting*, conforme Zum Gahr (1987). Além disso, é importante ressaltar que parte ou totalidade das trincas visualizadas podem ser provenientes do próprio processo de eletrodeposição do cromo duro.

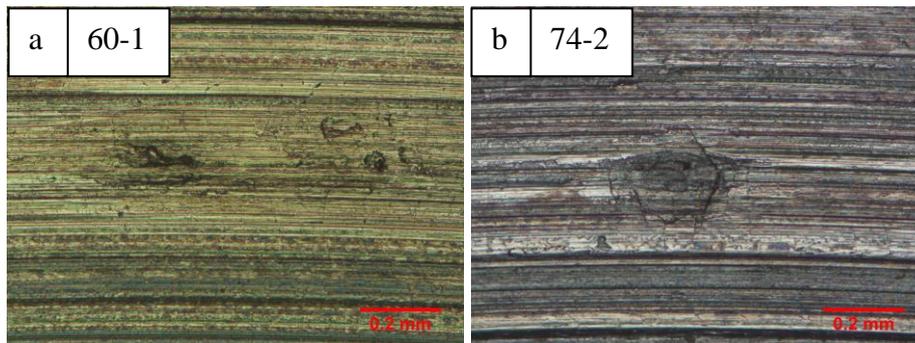
Figura 9 – Micrografia das trilhas com aumento de 100x: (a) 60-2, (b) 60-3, (c) 74-1.



Na análise das trilhas com regime de desgaste severo (60-1 e 74-2) é indicada a presença dos mecanismos de abrasão, tribo-oxidação e adesão. O mecanismo de adesão nos ensaios realizados causou a remoção de material do revestimento devido a adesão deste ao material do pino. Os mecanismos citados podem ser visualizados na Figura 10.

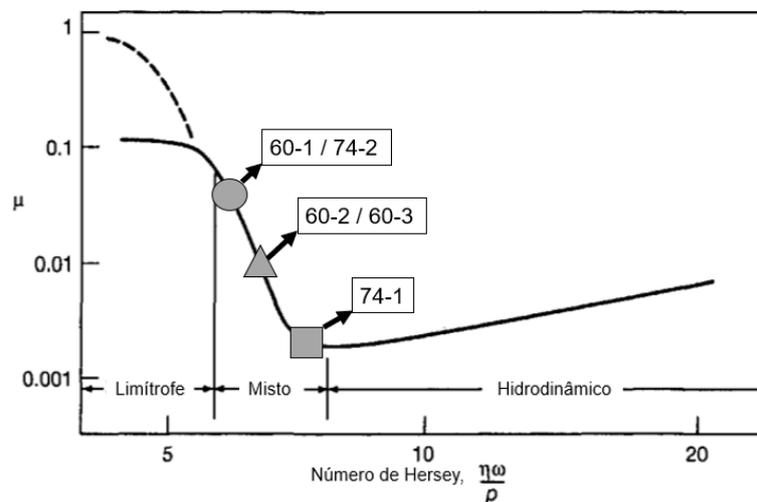
Devido a característica visual destas trilhas e ao elevado desgaste medido, foi realizada a análise de EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva) nas amostras com desgaste severo, para verificar se a camada do revestimento foi desgastada ao ponto de expor o substrato de alumínio dos discos. Foi verificado que o substrato não foi exposto, sendo todo o desgaste ocorrido no revestimento de cromo duro. O relatório desta análise está presente no Apêndice A.

Figura 10 – Micrografia das trilhas com aumento de 100x: (a) 60-1, (b) 74-2.



Através da verificação do desgaste volumétrico e dos mecanismos de desgaste nas amostras, se pode relacionar o desgaste encontrado com a condição de lubrificação ao longo de cada ensaio realizado. Esta relação pode ser estimada por meio da Curva de Stribeck, que descreve o coeficiente de atrito esperado conforme a condição de lubrificação no sistema tribológico, como explicado na seção 3.4. Para os ensaios realizados, é esperado que conforme menos eficiente seja a condição de lubrificação em relação à formação de filme lubrificante, maior coeficiente de atrito seja encontrado e maior desgaste esteja presente. A Curva de Stribeck indicando a condição de lubrificação estimada para cada ensaio é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Curva de Stribeck indicando o regime de lubrificação estimado para os ensaios realizados [Adaptado: Hamrock et al. (2004)].



Para as amostras com desgaste moderado, é possível estimar que no ensaio do disco 74-1, o regime de lubrificação presente variou entre hidrodinâmico e misto, com sua provável posição na

curva de Stribeck da Figura 11 indicado pelo marcador quadrado. Para os ensaios dos discos 60-2 e 60-3, visto o desgaste levemente maior, é possível estimar que o regime de lubrificação novamente variou entre hidrodinâmico e misto, porém nestes ensaios, estando presente por um maior período de tempo o regime misto. Esta condição eleva seus coeficientes de atrito médio em relação ao ensaio 74-1, sendo suas prováveis posições na curva de Stribeck da Figura 11 indicadas pelo marcador triangular.

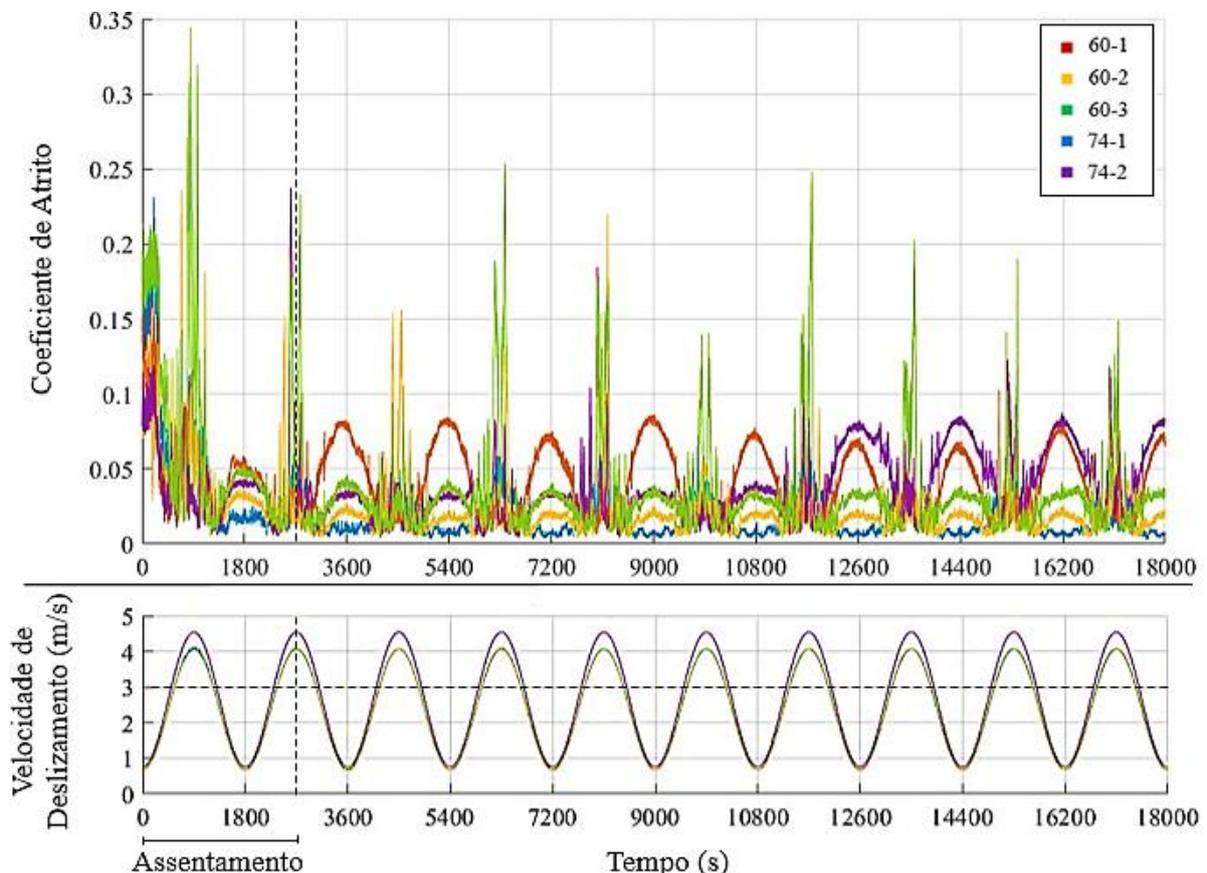
No caso das amostras com desgaste severo (60-1 e 74-2), é possível estimar que a condição de lubrificação foi alterada em relação aos demais ensaios, estando o regime de lubrificação destes variando entre regime de lubrificação misto e limítrofe, condição onde é menos provável a formação de filme lubrificante completo e com isso ocorrendo maior contato entre as asperezas das superfícies ensaiadas. Suas prováveis posições na curva de Stribeck da Figura 11 são indicadas pelo marcador redondo. Tal condição provoca maior desgaste nos ensaios, no entanto é difícil abordar hipóteses sobre o que tenha provocado tal comportamento, porém é provável que tenha ocorrido devido a algum defeito superficial, em especial na superfície dos pinos.

As condições abordadas na Figura 11 podem ser verificadas por meio da análise do coeficiente de atrito medido nos ensaios, assunto que será abordado na seção 5.3, visando obter a comprovação e o melhor entendimento sobre os motivos causadores do desgaste em cada ensaio.

5.3. Coeficiente de Atrito

O coeficiente de atrito e a velocidade de deslizamento ao longo do tempo de duração dos ensaios são apresentados na Figura 12. Através de uma análise visual, é possível verificar que o coeficiente de atrito varia de acordo com o ciclo de velocidades aplicado.

Figura 12 – Comportamento do coeficiente de atrito em função do tempo de duração e velocidade de deslizamento dos ensaios.

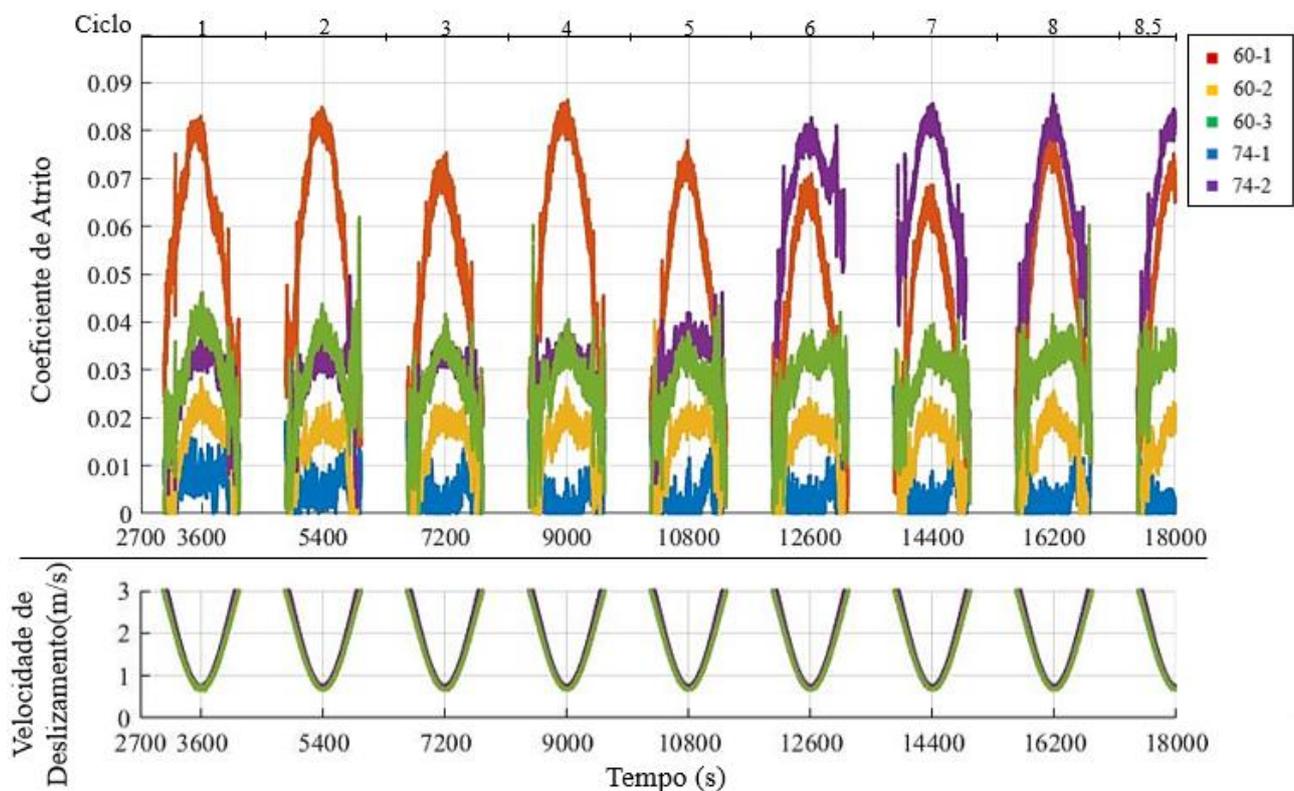


Através dos gráficos mostrados na Figura 12, é possível observar que os ensaios apresentam um comportamento relativamente estável do coeficiente de atrito quando em baixas velocidades de deslizamento. Para altas velocidades ocorrem picos instáveis de atrito que não apresentam relação direta com o desgaste presente nas trilhas. Este fenômeno está relacionado a frequências ressonantes do eixo do tribômetro que são excitadas nas rotações mais elevadas. Devido a isso, as regiões de altas velocidades de deslizamento (consideradas neste trabalho como acima de 3 m/s), não serão consideradas na análise. Outra consideração necessária, é que os dados anteriores a 2700 segundos de duração também não serão tratados na análise. Esta é uma região de assentamento, onde os dados não são conclusivos, pois a força aplicada foi aumentada gradualmente até 600 N visando reduzir o risco de fratura do revestimento de cromo duro.

Por conta das considerações citadas acima, a curva que descreve o coeficiente de atrito na região de interesse nesta análise é mostrada na Figura 13. Nesta figura, podemos dividir o coeficiente de atrito médio em forma de ciclos, existindo, portanto, 8,5 ciclos de variação de velocidade, conforme mostrado na legenda superior do gráfico.

Percebe-se, ainda no gráfico citado, que o coeficiente de atrito tende a se elevar com a redução da velocidade de deslizamento, comportamento que é esperado devido a menor capacidade de formação de filme lubrificante em baixas velocidades de deslizamento. Este comportamento está de acordo com a teoria da lubrificação, descrita através da Curva de Stribeck.

Figura 13 – Comportamento do coeficiente de atrito na região de análise, em função do tempo de duração e velocidade de deslizamento dos ensaios.



Ao analisar o gráfico acima são encontrados valores de coeficiente de atrito variando entre 0,005 e 0,09. Tais valores apresentam a mesma ordem de grandeza e estão de acordo com o estudo realizado por Biberger e Fűber (2016), que relatam valores entre 0,01 e 0,15.

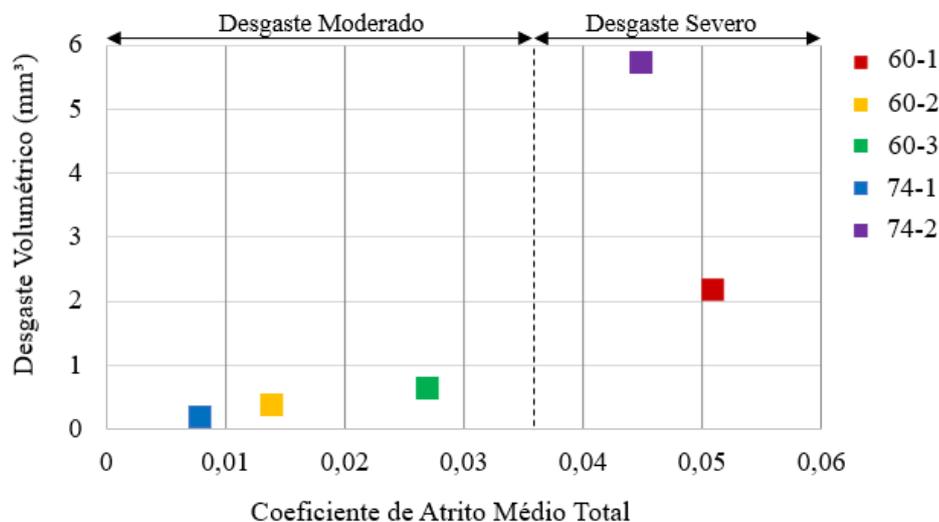
Verificando o desgaste ocorrido nos testes, se pode perceber que este está relacionado sempre com o coeficiente de atrito médio encontrado em cada ciclo. Os testes que apresentaram regime de desgaste severo (60-1 e 74-2), são os que apresentaram os maiores coeficientes de atrito

médio por ciclo, mesmo que no caso do teste 74-2 este comportamento esteve presente apenas a partir do sexto ciclo, como se pode observar na Figura 13.

Na Figura 14 é apresentado o gráfico de desgaste volumétrico por coeficiente de atrito médio total dos testes. Nele podemos observar claramente a diferença entre a região onde estão presentes as amostras com baixo coeficiente de atrito e moderado desgaste (60-2, 60-3 e 74-1), e onde se encontram as amostras com mais elevado coeficiente de atrito e desgaste severo (60-1 e 74-2).

Esta relação entre coeficiente de atrito e desgaste é esperada, visto que a presença de mais elevado coeficiente de atrito indica uma ocorrência de lubrificação mista ou limítrofe, o que pode resultar em desgaste severo. Tal fato está de acordo com a hipótese abordada através da Figura 11.

Figura 14 – Desgaste volumétrico por coeficiente de atrito médio total dos testes.

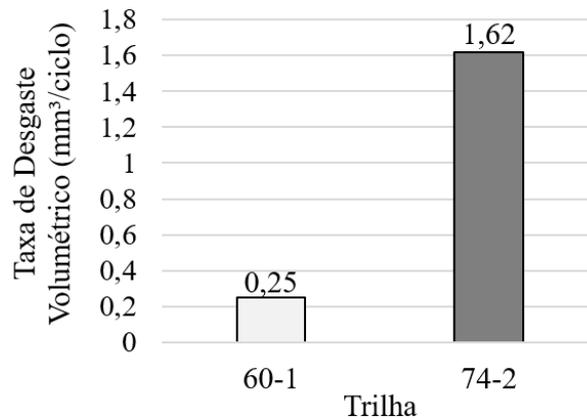


Mantendo o foco da análise apenas nas trilhas dos discos onde o desgaste foi severo (60-1 e 74-2), é importante ressaltar outro fator além do mais elevado coeficiente de atrito médio durante o teste. O fator a ser ressaltado é que o teste 60-1 apresentou comportamento do coeficiente de atrito semelhante durante todos os 8,5 ciclos do teste. Já o teste 74-2 apresentou uma elevação considerável no coeficiente de atrito a partir do sexto ciclo. Tais comportamentos são demonstrados na Figura 13.

Vale destacar também que a trilha 74-2, mesmo com o comportamento citado no parágrafo anterior, foi a que apresentou o maior desgaste volumétrico (5,7 mm³). Esta mesma trilha, antes do sexto ciclo, apresentava patamar de coeficiente de atrito médio por ciclo similar às amostras que não apresentaram desgaste elevado. O desgaste foi acompanhado também visualmente durante o teste e apenas após o sexto ciclo foi possível observar desgaste severo nesta trilha. A partir disso, é possível considerar que praticamente todo o desgaste desta trilha ocorreu a partir deste ciclo, visto que o desgaste anterior provavelmente apresentava valores de baixa ordem de grandeza, sendo possível desprezá-lo.

Considerando que todo o desgaste da trilha 74-2 ocorreu a partir do sexto ciclo, é possível comparar a evolução do desgaste criando o parâmetro da taxa de desgaste volumétrico por ciclo, que é dada pela divisão do desgaste volumétrico total pela quantidade de ciclos que o mais elevado coeficiente de atrito médio esteve presente no teste. Para os cálculos, foi considerada a quantidade de 8,5 ciclos para a trilha 60-1, e de 3,5 ciclos para a trilha 74-2. A Figura 15 mostra a taxa de desgaste volumétrico por ciclo das trilhas citadas.

Figura 15 – Taxa de desgaste volumétrico por ciclo para as trilhas com desgaste severo.



A partir destes dados foi possível verificar que a trilha 74-2 apresentou evolução do desgaste muito mais crítica em situação de mais elevado coeficiente de atrito. Com isso, é possível estimar que as amostras depositadas a 74 °C apresentam um maior desgaste caso mais elevado coeficiente de atrito médio ocorra, o que provavelmente ocorre devido à maior falha na formação de filme lubrificante, tornando o regime de lubrificação misto ou limítrofe, com maior contato ocorrendo entre as asperezas das superfícies. Este comportamento não é verificado nas amostras depositadas a 60 °C, visto que esta sofreu um desgaste 84,5% menor por ciclo. Através disso, é possível estimar que as amostras depositadas a 60 °C apresentam maior resistência mecânica caso ocorra contato entre as asperezas das superfícies.

Vale ressaltar também que, mesmo se fossem considerados todos os 8,5 ciclos para o cálculo da taxa de desgaste da amostra 74-2, seu valor ainda seria consideravelmente superior ao encontrado na amostra 60-1. Tal fato reforça ainda mais o comportamento descrito no parágrafo acima.

6. CONCLUSÃO

No estudo realizado ocorreram diferentes níveis de desgaste entre as amostras e a causa mais provável para isso é a falha mais severa na formação de filme lubrificante para as amostras com desgaste severo. Amostras com nível de desgaste moderado apresentaram mecanismos de desgaste abrasivo e triboquímico. Amostras com nível de desgaste severo apresentaram mecanismos de desgaste abrasivo bastante elevado, triboquímico e adesivo.

O coeficiente de atrito presente nos testes variou de acordo com o ciclo de velocidades de deslizamento aplicado. Este tende a se elevar conforme diminui a velocidade de deslizamento, o que é esperado devido à maior dificuldade de formar filme lubrificante. As amostras com coeficiente de atrito médio mais elevado foram também as que apresentaram desgaste mais severo.

A taxa de desgaste das amostras depositadas a 74 °C, em situação de atrito elevado, é 548% maior do que a taxa das amostras depositadas a 60 °C. Isto é um indício de que amostras depositadas a 74 °C apresentam desgaste mais elevado se ocorrer falha na formação de filme lubrificante, indicando um regime de lubrificação misto ou limítrofe. Logo, é possível estimar que as amostras depositadas a 60 °C apresentam maior resistência mecânica caso ocorra contato entre as asperezas das superfícies.

Para trabalhos futuros indica-se realizar novos testes concentrando a aplicação apenas de baixas velocidades de deslizamento, menores que 3 m/s, onde os testes apresentaram comportamento estável. É recomendado também controlar a rugosidade superficial dos pinos utilizados nos ensaios. Além disso, também é indicado realizar maior quantidade de testes, visando obter comprovações estatísticas para as hipóteses apresentadas neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G40–17: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2017.
Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/G0040-17>>
- BIBERGER, J.; FÜßER, H. J. **Development of a test method for a realistic, single parameter-dependent analysis of piston ring versus cylinder liner contacts with a rotational tribometer**. Tribology International, v. 113, p. 111–124, 2017.
Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.10.043>>
- DROPSA. **MiQueL: User Operating and Maintenance Manual**. Itália: DropsA, 2017.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6ª Edição. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC, 2011.
- HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R.; JACOBSON, B. O. **Fundamentals of Fluid Film Lubrication**. 2ª Edição. New York: Marcel Dekker, 2004.
- LOWENHEIM, F. A. The Electrochemical Society Series. **Modern electroplating**. 3ª Edição. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1974.
- MENEZES, P. L.; NOSONOVSKY, M.; LOVELL, M. R. **Tribology for Scientists and Engineers**. New York, NY, USA: Springer, 2013.
- PAVLAK, R. P.; NEIS, P. D.; POLETTO, J. C.; DE BARROS, L. Y.; FERREIRA, N. F. **Wear, Friction and NVH Characterization Using a Laboratory-Scale Tribometer**. SAE Technical Papers Series (2017-36-0003), 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.4271/2017-36-0003>>
- PODGORNIK, B.; MASSLER, O.; KAFEXHIU, F.; SEDLACEK, M. (2018). **Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings**. Tribology International, v. 121, p. 333–340, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.055>>
- ROBERGE, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering**. 2ª Edição. New York, NY, USA: Mc Graw Hill, 2012.
- SRIVASTAVA, M.; ANANDAN, C.; GRIPS, V. K. W. **Ni-Mo-Co ternary alloy as a replacement for hard chrome**. Applied Surface Science, v. 285, parte B, p. 167–174, 2013.
Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.08.025>>
- STRAFFELINI, G. **Friction and Wear: Methodologies for Design and Control**. Switzerland: Springer, 2015.
- WANG, Q.; LUO, S.; WANG, S.; WANG, H.; RAMACHANDRAN, C. S. **Wear, erosion and corrosion resistance of HVOF-sprayed WC and Cr 3 C 2 based coatings for electrolytic hard chrome replacement**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 81, p. 242–252, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.03.010>>
- ZUM GAHR, K.H. Tribology Series, Vol. 10, **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1987.

NOMENCLATURA

μ	Coefficiente de Atrito	
$\eta\omega/\rho$	Número de Hersey	
η	Viscosidade Dinâmica	[Pa.s]
ω	Velocidade Angular	[rps]
ρ	Pressão de Contato	[Pa]
AISI	American Iron and Steel Institute	
ASTM	American Society for Testing and Materials	
DIN	Deutsches Institut für Normung	

EDS

HRC

LATRIB

UFRGS

Espectroscopia por Energia
Dispersiva

Dureza Rockwell C

Laboratório de Tribologia

Universidade Federal do Rio

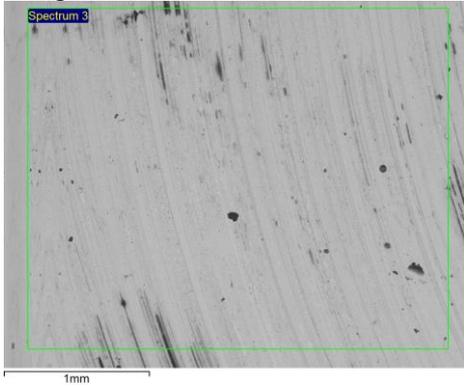
Grande do Sul

APÊNDICE A - Relatório de EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva)

EDS Teste 60-1.

Electron Image

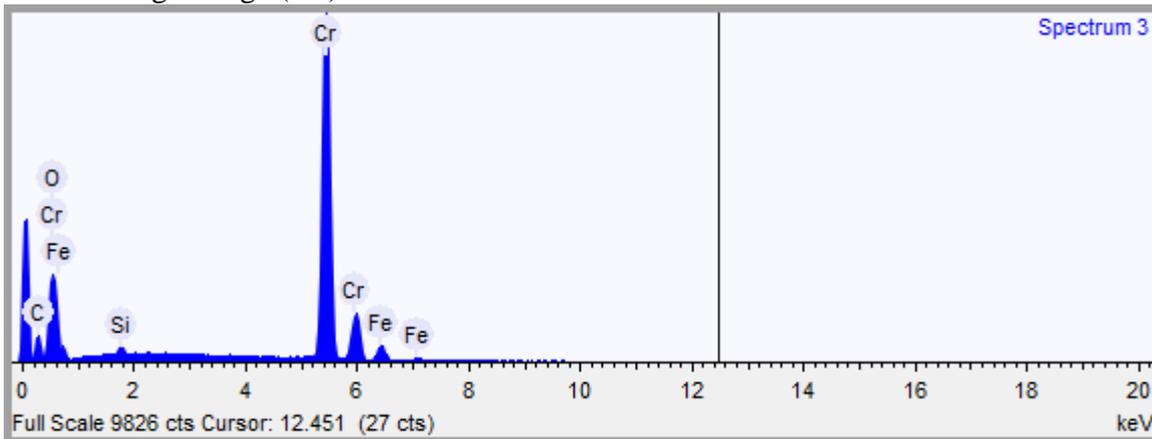
Image Width: 3.176 mm



Acquisition conditions

Acquisition time (s) 60.3 Process time 4

Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Coating element None

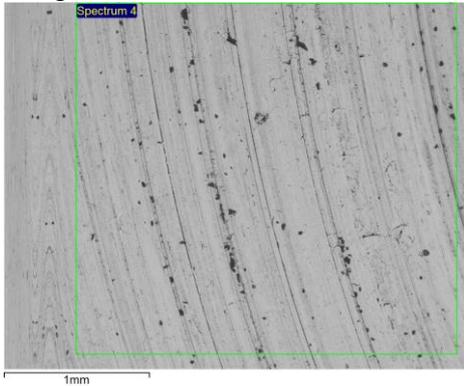
Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %
Carbon	10.050	0.267	30.122
Oxygen	4.880	0.235	10.980
Silicon	0.448	0.041	0.574
Chromium	79.065	0.334	54.742
Iron	5.558	0.147	3.583

EDS Teste 74-2.

Electron Image

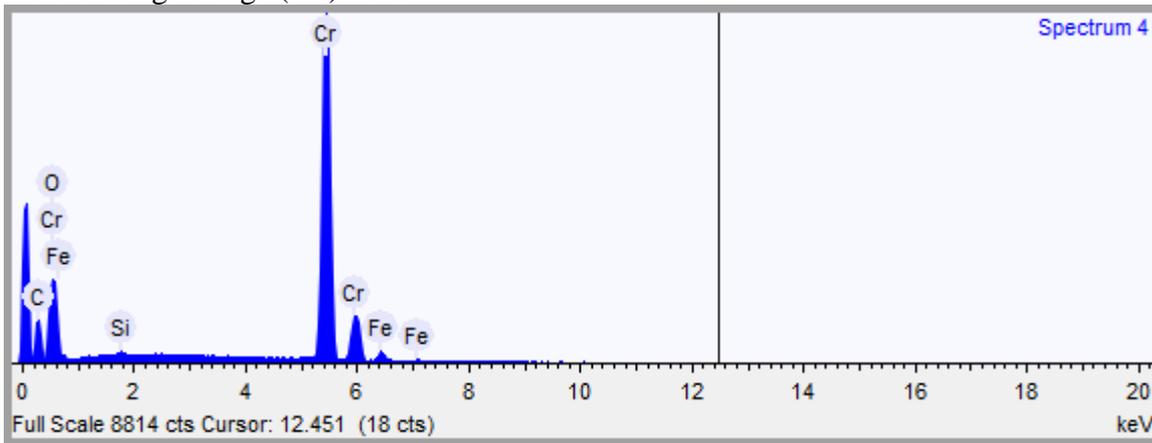
Image Width: 3.176 mm



Acquisition conditions

Acquisition time (s) 60.2 Process time 4

Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Coating element None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %
Carbon	14.698	0.298	39.764
Oxygen	4.952	0.249	10.058
Silicon	0.191	0.038	0.221
Chromium	76.961	0.356	48.097
Iron	3.198	0.134	1.861