

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

COMPARAÇÃO DO DESGASTE DE UM MANCAL DE ROLAMENTOS COM UM
MANCAL DESLIZANTE EM UM MOTOR DO CICLO 2-TEMPOS

por

Matheus Silva Fernandes

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, abril de 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Silva Fernandes, Matheus
COMPARAÇÃO DO DESGASTE DE UM MANCAL DE ROLAMENTOS
UM MANCAL DESLIZANTE EM UM MOTOR DO CICLO 2-TEMPOS /
Matheus Silva Fernandes. -- 2023.

25 f.

Orientador: Matheus Silva Fernandes.

Coorientador: Patric Daniel Neis.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Mancais. 2. Mecanismos de desgaste. 3.
Revestimento DLC. 4. Rugosidade. I. Silva Fernandes,
Matheus, orient. II. Daniel Neis, Patric, coorient.
III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Matheus Silva Fernandes

COMPARAÇÃO DO DESGASTE DE UM MANCAL DE ROLAMENTOS UM
MANCAL DESLIZANTE EM UM MOTOR DO CICLO 2-TEMPOS

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. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Patric Daniel Neis (presidente)

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Liu Yesukai de Barros

Porto Alegre, abril de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo suporte desde cedo para que eu tivesse acesso aos recursos necessários para ser aprovado em uma universidade federal. Especialmente aos meus pais, João (in memoriam) e Angela e aos meus irmãos, Gabriel e João. Obrigado por tudo.

Agradeço em especial à tia Sônia, que tornou possível a minha mudança para Porto Alegre e foi essencial para eu passar por 1 ano de cursinho e dois anos de faculdade.

Agradeço aos alunos e professores do Laboratório de Tribologia da UFRGS (Latrib), por proporcionar a mim um crescimento profissional imensurável, tanto no âmbito acadêmico como fora dele. Em especial, agradeço ao professor Patric Daniel Neis, pela orientação desde a bolsa, passando pelo estágio e, por fim, no trabalho de conclusão.

Agradeço aos colegas de trabalho, principalmente ao Guilherme Pizzato Sieben, pelo apoio, orientação e aprendizado passado ao longo dos últimos anos.

Agradeço aos meus queridos colegas de curso, que foram essenciais durante o período acadêmico, tornando mais leve a convivência e apoiando sempre que necessário.

Fernandes, Matheus Silva. **Comparação do desgaste de um mancal de rolamentos com um mancal deslizante em um motor do ciclo 2-tempos.** 2023. 24 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

Mancais são componentes mecânicos amplamente utilizados na indústria metalmeccânica. Uma das principais falhas nesses componentes ocorre devido ao desgaste sofrido durante sua vida útil, acarretando perdas econômicas e de performance nos mais variados equipamentos. O presente trabalho tem o intuito de comparar o comportamento do desgaste atuante em duas configurações distintas de mancais (mancal de rolamentos e mancal deslizante) em uma aplicação na conexão pino-biela de um motor 2-tempos. Foram realizados testes de durabilidade em motores do ciclo 2-tempos montados com cada configuração de mancal e, após, comparadas as superfícies desgastadas dos componentes. O desgaste foi avaliado por meio de microscopia óptica e confocal, a fim de avaliar os mecanismos de desgaste atuantes e obter um perfil da superfície de desgaste. O mancal de rolamentos apresentou desgaste abrasivo em toda sua superfície assim como fadiga superficial na região de contato com a gaiola de agulhas e adesão com arrancamento de material na região em contato com o pistão. O mancal deslizante, por sua vez, apresentou comportamento uniforme ao longo de toda sua superfície, sendo majoritariamente caracterizado por abrasão e, em menor magnitude, adesão com arrancamento de material.

PALAVRAS-CHAVE: mancal de rolamentos, mancal deslizante, mecanismos de desgaste.

Fernandes, Matheus Silva. **Comparison of the wear of a rolling bearing with a sliding bearing on a 2-stroke cycle engine.** 2023.24 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

Bearings are mechanical components widely used in the metalworking industry. One of the main failures in these components occurs due to the wear suffered during their useful life, causing economic and performance losses in the most varied equipment. The present work aims to compare the behavior of acting wear in two distinct configurations of bearings (rolling bearing and sliding bearing) in an application in the pin-connecting rod of a 2-stroke motor. Durability tests were performed on 2-stroke cycle engines mounted with each bearing configuration and then the worn surfaces of the components were compared. Wear was evaluated by optical and confocal microscopy in order to evaluate the acting wear mechanisms and obtain a profile of the wear surface. The rolling bearing showed abrasive wear on its entire surface as well as surface fatigue in the region of contact with the needle cage and adhesion with material pullout in the region in contact with the piston. The sliding bearing, in turn, presented uniform behavior along its entire surface, being mostly characterized by abrasion and, to a lesser extent, adhesion with material pullout.

KEYWORDS: rolling bearing, sliding bearing, wear mechanisms.

NOMENCLATURA

| Símbolos | Grandeza | Unidade |
|----------|------------------|-------------------|
| Sa | Rugosidade média | [μm] |
| Sq | Rugosidade RMS | [μm] |
| Ssk | Assimetria | [-] |

| | |
|---|-----------|
| SUMÁRIO | |
| NOMENCLATURA | 7 |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OJETIVOS..... | 1 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 2 |
| 3.1. Mancais | 2 |
| 3.1.1. Mancal de rolamentos | 2 |
| 3.1.2. Mancal de deslizamento | 2 |
| 3.2. Revestimento DLC (Diamond-Liked Carbon) | 2 |
| 3.3. Mecanismos de desgaste | 3 |
| 3.3.1. Adesão..... | 3 |
| 3.3.2. Abrasão | 3 |
| 3.3.3. Fadiga superficial | 4 |
| 3.3.4. Mecanismos de desgaste atuantes em DLC | 5 |
| 4. METODOLOGIA | 5 |
| 4.1. Amostras | 5 |
| 4.1.1. Configuração do mancal de rolamentos | 6 |
| 4.1.2. Configuração do mancal deslizante | 6 |
| 4.1.3. Pinos do pistão | 7 |
| 4.1.4. Bielas..... | 7 |
| 4.2. Máquinas para teste | 8 |
| 4.3. Testes | 8 |
| 4.4. Avaliação do desgaste nos mancais | 8 |
| 5. RESULTADOS..... | 9 |
| 5.1. Configuração com mancal de rolamentos..... | 9 |
| 5.1.1. Pino do pistão..... | 9 |
| 5.1.2. Gaiola de agulhas | 11 |
| 5.2. Configuração com mancal deslizante | 12 |
| 5.2.1. Pino do pistão..... | 12 |
| 6. CONCLUSÕES | 15 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 16 |

1. INTRODUÇÃO

O estudo do desgaste e atrito em motores vem cada vez mais ganhando espaço na indústria. Por conta de regulamentações ambientais adotadas recentemente para controle de emissões originados na combustão em motores 2 tempos, há uma redução da quantidade de lubrificante adicionado nos combustíveis, o que contribui para o processo de desgaste (CAVALIERI et al., 2016). Em motores do ciclo 2-tempos, o óleo lubrificante é misturado ao combustível em devidas proporções e o contato dessa mistura com os componentes internos do motor é responsável pela lubrificação das superfícies adjacentes.

Uma das alternativas para contornar a deficiência de lubrificação é o revestimento DLC (“Carbono como diamante”). Em sua estrutura, o revestimento DLC apresenta átomos de carbono ligados tanto na forma sp^2 (grafite) como na forma sp^3 (diamante), com uma quantidade insignificante de átomos sp^1 (NEUVILLE, 2007). Revestimentos de carbono com alto conteúdo de átomos sp^3 são comparativamente muito duros e têm propriedades similares às do diamante, enquanto aqueles com a maioria de átomos de carbono na forma sp^2 possuem maior lubricidade e suas características estão mais inclinadas às do grafite (SULLIVAN, 2001). Devido a essas propriedades, o DLC pode ser aplicado inclusive a componentes de motores de automóveis com o intuito de aumentar a eficiência energética reduzindo o atrito e o desgaste (KOLAWOLE et al, 2020).

Falhas em mancais é algo recorrente na indústria de componentes mecânicos, sendo o desgaste a principal razão por consequência de lubrificação não eficientes e/ou de superfícies não adequadas. Além disso, as perdas resultantes em função do desgaste acarretaram gastos em torno de 1% a 6% do produto interno bruto (PIB) do Brasil no ano de 2004, mostrando que o estudo da tribologia de forma geral é fundamental para aumento da vida útil dos produtos assim como para melhor desempenho quanto ao desgaste. Por conta disso, estudos (Tyagi et al, Jiangi et al, 2019 e Wang et al, 2003) estão sendo feitos com maior frequência em busca de entender melhor o comportamento do desgaste e suas consequências.

Em razão disso, entender os mecanismos e os regimes de desgaste atuantes em componentes é essencial para redução do atrito e do desgaste. O presente trabalho foi desenvolvido em uma empresa privada e visa comparar o desempenho quanto ao desgaste de duas configurações de mancais (de rolamentos e de deslizamento) aplicado na conexão pino-biela de motores 2-tempos. Para isso, foram produzidas amostras de pinos revestidos com DLC para o mancal com contato deslizante, pelo fato de a lubrificação ser mais deficiente nessa configuração, e montadas máquinas para teste de durabilidade em bancada. Ao longo dos testes, foram feitas checagens intermediárias com o intuito de monitorar a evolução do desgaste dos componentes. Após a conclusão dos testes, análises topográficas foram realizadas para quantificar o desgaste assim como microscopia das amostras para verificar os mecanismos de desgaste presentes.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo que este trabalho busca atingir é a comparação dos mecanismos de desgaste entre dois diferentes tipos de mancais (de rolamentos e deslizante) aplicados na conexão pino-biela de um motor 2-tempos. Os objetivos específicos estão listados a seguir:

- Avaliar o revestimento DLC (Diamond-Liked Carbon) nos pinos do mancal deslizante;
- Teste de durabilidade nos motores com os mancais instalados;
- Análise microscópica e topográfica para avaliação e comparação do desgaste nos mancais;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Mancais

Os mancais são elementos mecânicos nos quais há transmissão de carga por meio de superfícies em contato (JUVINALL, 2008). A partir do momento em que há movimento relativo entre as superfícies de um mancal, é importante entender o comportamento do atrito e do desgaste entre os corpos. Nesse estudo, serão estudados dois tipos de mancais: mancal de rolamentos e mancais de deslizamento

3.1.1. Mancal de rolamentos

O mancal de rolamentos é composto por rolos ou esferas ao longo do diâmetro do componente. Conforme Juvinal (2008), entre suas principais vantagens, destaca-se o baixo atrito de partida. Pelo fato de possuírem elementos rolantes em sua composição, os mancais de rolamento reduzem significativamente o contato entre as superfícies quando comparado ao mancal de deslizamento (NORTON, 2004). Há diversos tipos de mancais de rolamento classificados de acordo com sua geometria, tipo de rolamento, alinhamento, etc. O mancal testado nesse estudo é um mancal de rolamentos de agulha (Figura 1).

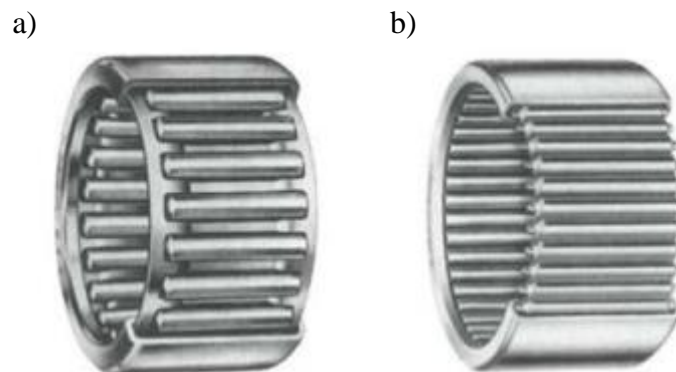


Figura 1: Mancal de rolamentos de agulha do tipo (a) copo externo com separador e (b) copo externo com complemento pleno – Adaptado de Juvinal (2008).

3.1.2. Mancal de deslizamento

O mancal de deslizamento, por sua vez, é mais simples pois requer apenas o contato direto entre as superfícies (JUVINALL, 2008). Logo, a lubrificação tem papel crucial no desempenho desse tipo de mancal, uma vez que o filme lubrificante tem função de separar as asperezas das superfícies de contato e assim evitar o desgaste severo dos componentes. Além disso, nesse tipo de mancal deve-se ter velocidade relativa para formação de filme, o que evita o contato direto entre as asperezas da superfície. Na configuração testada nesse estudo, o mancal de deslizamento é composto pela biela e pelo pino do pistão, pelo fato das superfícies desses dois componentes estarem em contato direto.

3.2. Revestimento DLC (Diamond-Liked Carbon)

O revestimento DLC (do inglês, “Diamond Like-Carbon”) é um revestimento que combina carbono em suas formas de grafite e diamante. Dessa forma, é capaz de combinar propriedades como alta dureza, inércia química, baixo coeficiente de atrito e alta resistência ao desgaste, atraindo bastante atenção recentemente (TRAVA-AIROLDI et al., 2007). A dureza proporcionada pelo diamante em concomitância à lubrificidade proporcionada pelo grafite faz do DLC um revestimento requerido para aplicações onde busca-se reduzir o desgaste. O método de deposição de vapor químico reforçada por plasma (PECVD) é o método mais recente utilizado para desenvolver revestimentos DLC’s.

Em termos de desempenho tribológico, estudos são realizados para entender a resposta do DLC frente aos mecanismos de desgaste. Quanto à resistência ao desgaste, a dureza do revestimento ou da superfície é inversamente proporcional ao coeficiente de desgaste (ZUM GAHR, 1987). A dureza do revestimento DLC é maior quanto mais alta for a concentração de ligações sp^3 de carbono (KOLAWOLE, 2020).

3.3. Mecanismos de desgaste

Um tribossistema é definido como uma estrutura de componentes interagindo em movimento relativo para executar uma função técnica (CZICHOS, 2014) e pode ser influenciado por diversos fatores, tais como: carga de aplicação, velocidade de deslizamento, lubrificação, geometria de contato, etc. (VERBEEK, 1979). Os mecanismos de desgaste abordados nesse estudo são: adesão, abrasão e fadiga superficial.

3.3.1. Adesão

De um ponto de vista estritamente tribológico, a adesão é a força necessária para separar duas superfícies que foram postas em contato (OLOFSSON, 2013). Conforme Zum Gahr (1987), a alta pressão local entre as asperezas de contato resulta em deformação plástica, adesão e, conseqüentemente, a formação de junções locais. O deslizamento relativo entre as superfícies de contato causa a ruptura dessas junções e, frequentemente, a transferência de material de uma superfície para a outra (ZUM GAHR, 1987).

Há dois tipos de adesão possíveis de ocorrer quando há movimento relativo entre as superfícies: adesão com deformação plástica, sem arrancamento de material e adesão com arrancamento de material (MONDIN, 2021). De acordo com Zum Gahr (1987), quando a força adesiva for menor que a resistência dos materiais das superfícies, há a separação das junções locais sem haver a transferência de material, configurando o caso de adesão com deformação plástica. Para haver o arrancamento do material, é necessário que a força adesiva seja maior que a resistência dos materiais, criando uma cratera nas superfícies.

3.3.2. Abrasão

O desgaste abrasivo é o deslocamento do material causado pela presença de partículas duras (ZUM GAHR, 1987). O surgimento de corpos sólidos entre as superfícies de contato pode ser devido ao processo de fabricação dos materiais, ao desprendimento de partículas das superfícies ou a impurezas externas que adentrem o tribossistema.

A abrasão pode ocorrer em um nível baixo ou alto, sendo que o aumento do nível ocorre em um material homogêneo à medida que a dureza da partícula abrasiva iguala ou ultrapassa a dureza da superfície desgastada (ZUM GAHR, 1987). Batchelor (2006) classifica os

mecanismos de abrasão em quatro modos (Figura 2): microcorte, microfratura, fadiga por contato repetitivo e arrancamento dos grãos.

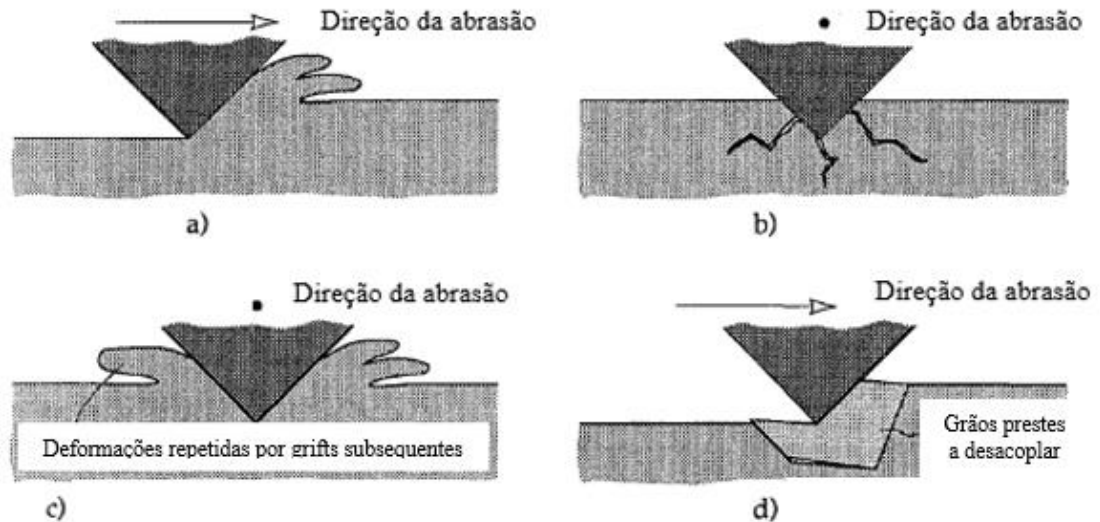


Figura 2: Mecanismos de desgaste abrasivo classificados como (a) microcorte, (b) microfratura, (c) fadiga por contato repetitivo e (d) arrancamento dos grãos. – Adaptado de Batchelor (1993)

Harsha (2003) afirma que a abrasão pode ocorrer a dois corpos ou a três corpos. Abrasão a dois corpos é causada devido à presença de protuberâncias duras em uma superfície que estão sujeitas a se moverem sobre as demais superfícies. A abrasão a três corpos é resultante de partículas presentes entre as superfícies e capazes de se moverem entre os corpos. Mondin (2021) relaciona os mecanismos de desgaste com os parâmetros de rugosidade. De acordo com o autor, o parâmetro S_a (rugosidade média superficial) aumenta conforme cresce o desgaste abrasivo. Esse estudo também mostra que a assimetria, parâmetro que quantifica a distribuição de alturas com respeito a linha média do perfil, aumenta negativamente conforme aumenta a abrasão. Além disso, Hutchings (2017) afirma que o parâmetro S_q (rugosidade RMS) acompanha o crescimento da rugosidade média, porém sempre levemente maior.

3.3.3. Fadiga superficial

O desgaste por fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e descamação do material causada por alternância repetida de carregamento em superfícies sólidas (ZUM GAHR, 1987). Conforme Abdelbary (2014), cada aspereza da superfície de atrito experimenta cargas e descarga repetidas das asperezas da contraface, originando um estresse cíclico tanto em contato rolante como em contato deslizante. Esse tipo de desgaste é predominante em elementos como mancal de rolamentos (DING, 2003), pelo fato de haver vários elementos em contato cíclico sobre uma mesma superfície.

Ding (2003) estabelece que o desgaste por fadiga superficial ocorre em três etapas. Em um primeiro momento, surgem indentações iniciais (Figura 3-a) na superfície que possuem tamanho correspondentes aos diâmetros das partículas sólidas em contato. Posteriormente, o número de indentações cresce devido ao aumento da densidade de indentação superficial (Figura 3-b). Por fim, há a conexão das indentações, resultando em maiores áreas de desgaste (Figura 3-c).

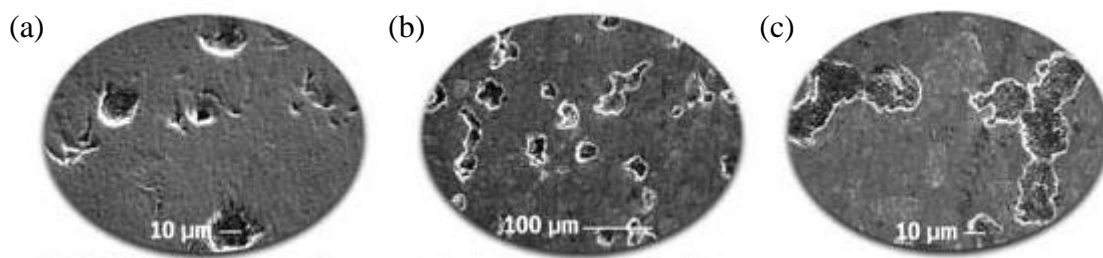


Figura 3: Progressão do desgaste causado por fadiga superficial. – Adaptado de Ding (2003).

3.3.4. Mecanismos de desgaste atuantes em DLC

Esta seção é dedicada a entender os mecanismos de desgaste atuantes em mancais com base em estudos prévios de outros autores.

Tyagi et al (2019) realizaram uma análise crítica do revestimento DLC em substratos de aço em aplicações de resistência ao desgaste. Conforme os autores, há 4 estágios distintos do mecanismo de desgaste atuante sobre revestimentos DLC:

1º estágio: as asperezas do revestimento tentam penetrar a superfície mais macia devido ao carregamento aplicado, resultando em deformação plástica do material ao redor da superfície revestida;

2º estágio: os fragmentos duros de DLC que ficaram soltos na contraparte resulta em desgaste adesivo, devido ao aumento das forças de atrito e da temperatura. Um aumento na difusão do carbono enfraquece o aspecto da superfície revestida.

3º estágio: o aumento da difusão de carbono reduz a resistência da ligação atômica às forças de atrito, o que resulta micro-rachaduras na superfície. Dessa forma, o coeficiente de atrito e a rugosidade da superfície revestida diminui.

4º estágio: após o aumento da lisura e diminuição do coeficiente de atrito devido ao enfraquecimento da película revestida, ocorre uma estabilização do coeficiente de atrito e dos mecanismos de desgaste.

Jiang et al (1998) realizaram testes de esfera sobre discos revestidos com DLC em um tribômetro, variando a rugosidade média (R_a) do substrato (disco). Os autores observaram que com o aumento da rugosidade média do substrato, o mecanismo de desgaste muda de adesão para fadiga superficial com formação de trincas. Considerando as condições em que os testes foram realizados, o valor limítrofe de R_a para que ocorra essa transição foi de $0,93 \mu\text{m}$.

Wang et al (2003) realizaram testes em um tribômetro com esferas de aço M50 postas em contato deslizante lubrificado à óleo contra mancais de rolamentos de diferentes aços. Os resultados mostraram a presença de desgaste adesivo e abrasivo na forma de rachaduras e delaminação, levando a um desgaste plaquetário.

4. METODOLOGIA

4.1. Amostras

A produção das amostras foi realizada na empresa privada e, por questões de confidencialidade, detalhes serão omitidos ao longo do texto.

4.1.1. Configuração do mancal de rolamentos

A configuração da biela montada com mancal de rolamentos é composta por três elementos: pino do pistão, biela e conjunto gaiola e agulhas. A montagem das peças se dá como mostrada na Figura 4, na qual a gaiola de agulha é posicionada entre o pino do pistão e a biela. Os rolamentos da gaiola de agulhas estão livres para rotacionar durante o funcionamento do motor. Portanto, os rolamentos exercem papel fundamental na lubrificação da região de contato da gaiola com o pino do pistão, uma vez que o movimento rotativo dos rolamentos espalha o óleo lubrificante pelas superfícies.

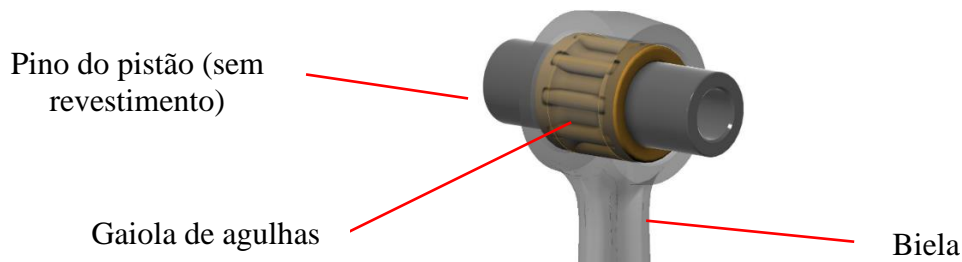


Figura 4: Configuração do mancal de rolamentos adotada no estudo.

A configuração da biela montada com mancal de rolamentos possui um rolamento de agulhas entre as superfícies do pino e da biela composto de aço 25CrMo4 na parte gaiola e de aço 100Cr6 na região dos elementos rolantes (Figura 5). O componente possui diâmetro interno de 10 mm, o diâmetro externo de 14 mm e comprimento de 12,8 mm.

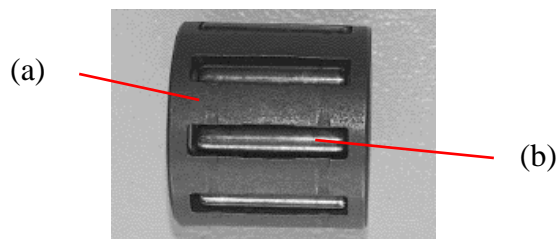


Figura 5: Representação do rolamento de agulhas, composto pela (a) gaiola e pelos (b) componentes rolantes.

4.1.2. Configuração do mancal deslizante

O que distingue a configuração do mancal deslizante e o mancal de rolamentos é a ausência do conjunto gaiola e agulhas. Logo, o contato do pino do pistão com a biela é feito diretamente, conhecido como contato deslizante (Figura 6). Nessa configuração, quem faz o papel da lubrificação é a folga existente entre o pino do pistão e a biela. A mistura do combustível com o óleo lubrificante entra pelas extremidades e o movimento do pino entre as faces internas da biela faz com o que o óleo seja distribuído ao longo da região de contato. É importante ressaltar que a lubrificação é mais eficiente na configuração com o rolamento de agulhas.

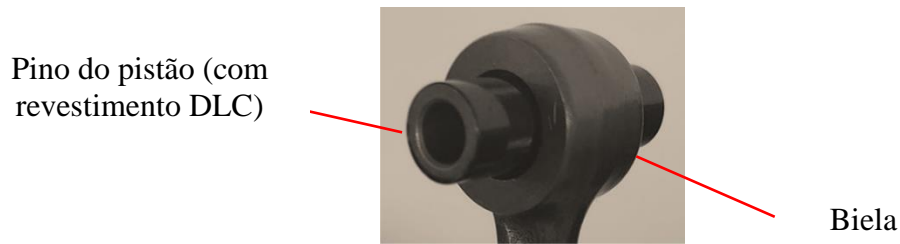


Figura 6: Configuração do mancal deslizante adotada no estudo.

4.1.3. Pinos do pistão

O pino do pistão é o componente que conecta a biela ao pistão. Os pinos do pistão testados em ambos os mancais são do mesmo material (aço 100Cr6), porém os pinos do mancal de deslizamento foram revestidos com DLC (Figura 7-b). O pino revestido com DLC foi usinado de modo a compensar a espessura da camada de revestimento. Ambos os pinos possuem diâmetro externo de 10 mm, diâmetro interno de 6 mm e comprimento de 32 mm.



Figura 7: Representação dos pinos de aço 100Cr6 (a) sem revestimento e (b) com revestimento DLC.

4.1.4. Bielas

As bielas são de aço forjado 17CrNi6-6 em ambos os mancais (Figura 8). As bielas montadas com mancal de rolamentos possuem diâmetro interno de 14 mm. Nas bielas testadas com o mancal de deslizamento, o diâmetro interno do olhal menor foi reduzido para 10 mm de modo a compensar a ausência do rolamento de agulhas e possibilitar o contato direto com a superfície do pino.

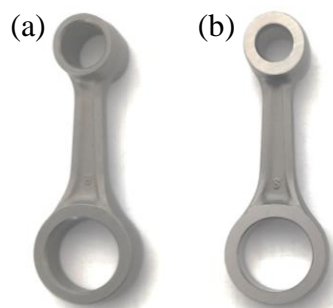


Figura 8: Representação das bielas de aço forjado do (a) mancal de rolamentos e do (b) mancal de deslizamento.

4.2. Máquinas para teste

Para a realização dos testes, foi utilizado um modelo de motor à combustão interna monocilíndrico do ciclo Otto de dois-tempos. A Tabela 4.1 apresenta detalhadamente as especificações do motor.

Tabela 4.1 – Especificações técnicas e de operação do motor utilizado no estudo

| | |
|--------------------------------|--|
| Tipo de ciclo | Otto de dois-tempos |
| Sistema de alimentação | Via carburador |
| Sistema de ignição | Centelha |
| Diâmetro do cilindro | 46 mm |
| Temperatura da vela de ignição | 235 °C |
| Lubrificação | Mistura óleo-combustível na proporção 1:50 |
| Rotação de alta | 7000 rpm |
| Rotação de lenta | 3100 rpm |

4.3. Testes

Para análise do desempenho quanto ao desgaste dos dois tipos de mancais, foram avaliados os resultados de uma máquina montada com cada configuração de mancal em teste de durabilidade em bancada (Figura 9). Primeiramente, o teste consiste em rodar as máquinas em um ciclo de amaciamento de 3 horas, a fim de estabilizar o atrito e assentar os componentes em contato. Após o amaciamento, a máquina operou em ciclos de rotação lenta (5 segundos) e alta (25 segundos), até atingir 500 horas de teste.

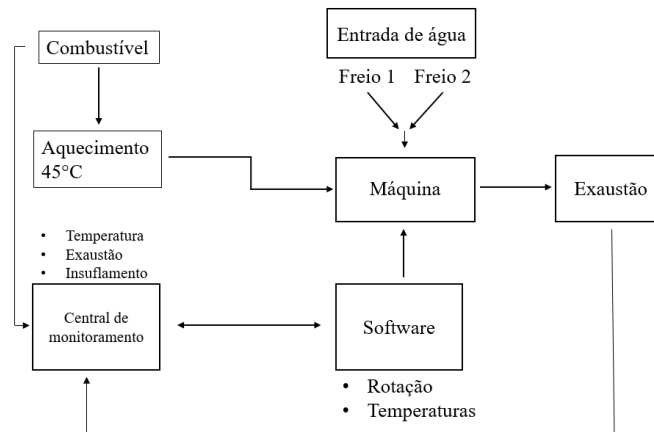


Figura 9: Representação esquemática da cabine de testes.

4.4. Avaliação do desgaste nos mancais

O desgaste após o teste foi avaliado de uma forma qualitativa e por meio dos parâmetros de rugosidade de superfície. Na avaliação qualitativa, foram identificados os mecanismos de desgaste com o auxílio de um microscópio óptico do modelo VHX-970F. Para o caso da configuração com o mancal de rolamentos, foram tiradas fotos da superfície do pino com o aumento de 20× para obtenção de um panorama geral e, posteriormente, com o aumento de 200× para maior detalhamento. Também para essa configuração foram tiradas fotos da gaiola de agulhas com ampliação de 30× e 200×. Na configuração do mancal deslizante não foi

possível obter um panorama geral da superfície com ampliações de lente menores pelo fato do revestimento ser muito escuro, impossibilitando a distinção dos fenômenos. Logo, foram tiradas fotos somente na ampliação de 200×.

Para a obtenção dos parâmetros de rugosidade, foram realizadas interferometrias da superfície dos pinos por meio de um microscópio confocal modelo MarSurf CM Explorer. Dessa forma, obteve-se um perfil tridimensional das superfícies e os valores de rugosidade média de superfície (S_a), rugosidade RMS (S_q) e assimetria (S_{sk}).

5. RESULTADOS

5.1. Configuração com mancal de rolamentos

5.1.1. Pino do pistão

O comportamento do desgaste no pino do pistão apresentou distinções entre as regiões que estavam em contato com o pistão (extremidades) e a região em contato com a gaiola de agulhas (centro). A Figura 10 mostra um panorama da superfície do pino no qual é observado indícios de temperatura elevada nas regiões de contato com o pistão assim como riscos de abrasão. Na região central, por sua vez, há marcas de fadiga superficial em tom avermelhado.

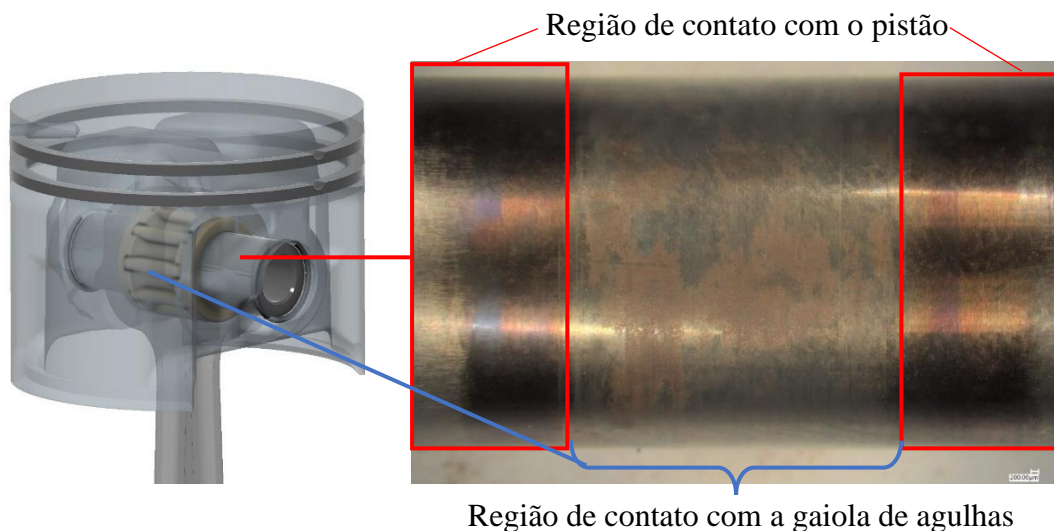


Figura 10: Microscopia óptica do pino do pistão da configuração do mancal de rolamentos com ampliação de 20×.

É possível ver que a região do pino atritada contra o pistão (Figura 11-a) apresenta marcas de adesão na direção de rotação do pino, caracterizadas pela coloração escura, e de abrasão na direção do eixo do pino, identificadas como riscos na superfície. Como o pino está em contato direto com o pistão, sem rolamento entre as superfícies, há apenas o efeito do contato deslizante entre o pino e pistão. Logo, não há desgaste por fadiga superficial nessa região por não haver contato rolante.

A região do pino em contato com o conjunto rolos e gaiola (Figura 11-b) apresenta riscos de abrasão orientados no sentido de rotação do pino, porém mais tênues que na região do pistão. A fadiga superficial mostra-se presente por meio de indentações que unidas formam manchas avermelhadas na superfície. É esperado esse tipo de mecanismo de desgaste pelo fato de haver vários rolos na gaiola de agulhas em contato com o pino e de forma cíclica. Ou seja, a área de

contato pequena dos rolos presos na gaiola cria alta pressão localizada em pontos na superfície, gerando desgaste por fadiga. Além disso, nota-se nessa região manchas devido à mistura combustível e óleo. O desgaste na região de contato com a gaiola de rolos é visivelmente menos severo que na região em contato com o pistão. Isso se dá pelo fato de o óleo lubrificante ser mais bem distribuído ao longo da superfície do pino pelo movimento de rotação dos rolos (agulhas). A lubrificação deficitária na região de contato com o pistão também explica o aumento da temperatura evidenciado pela coloração escura nas bordas do pino, conforme evidenciado na Figura 10.

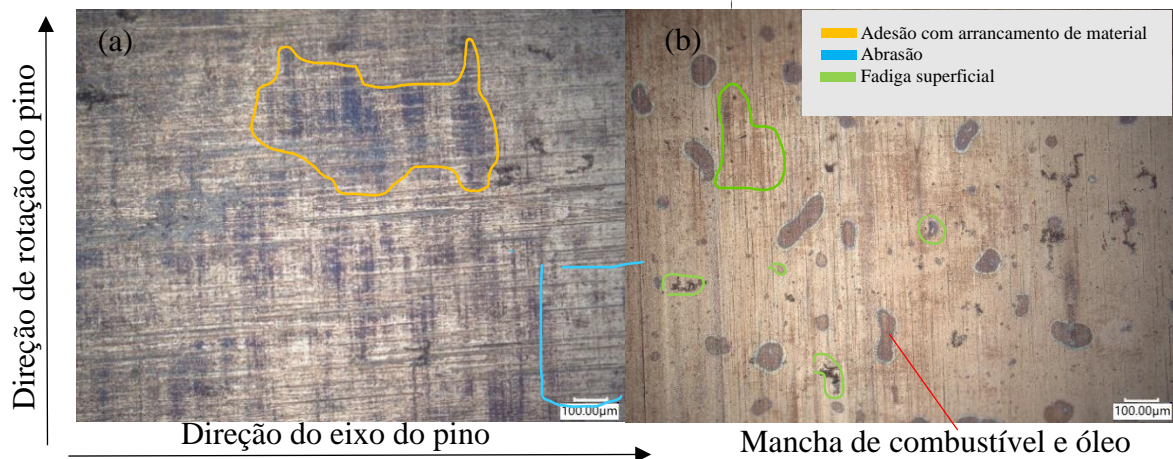


Figura 11: Microscopia óptica do pino do pistão com aumento de $200\times$ na (a) região de contato com o pistão e (b) com a gaiola de agulhas.

A Figura 12 mostra a interferometria realizada com o microscópio confocal. Na região do pino em contato com o pistão (Figura 12-a) é possível enxergar com mais evidência os riscos de abrasão severos na direção do eixo do pino. Também há a presença de crateras na superfície, evidenciando a presença de adesão com arrancamento de material.

A interferometria da região do pino em contato com a gaiola de agulhas (Figura 12-b) mostra que a abrasão foi mais atenuada que na região em contato com o pistão, com os riscos orientados no sentido de rotação do pistão. Há presença de crateras na superfície por conta da fadiga superficial.

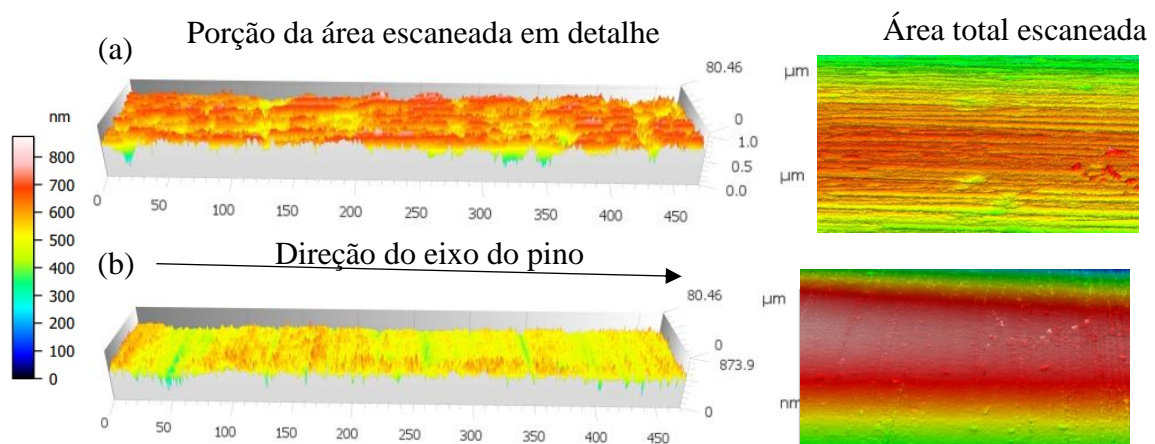


Figura 12: Interferometria do pino do pistão nas regiões de contato com o (a) pistão e com a (b) gaiola de agulhas.

Ao analisar os parâmetros de rugosidade de superfície do pino em ambas as regiões de contato (Figura 13) é observado que o aumento da abrasão está relacionado a um aumento da rugosidade média (S_a), conforme já visto por Mondin (2021). O valor de rugosidade RMS (S_q) acompanha o aumento da rugosidade média, porém com valores levemente maiores, indo ao encontro daquilo que já tinha sido pontuado na literatura (Hutchings, 2017).

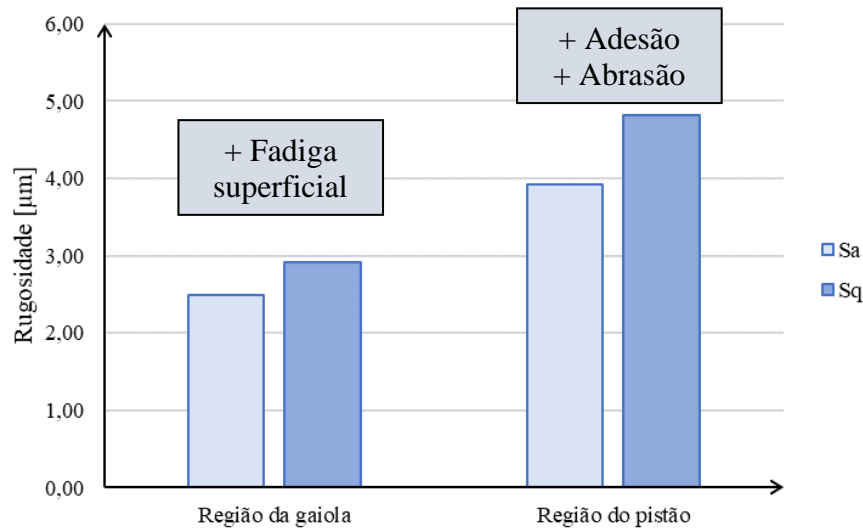


Figura 13: Rugosidade média (S_a) e RMS (S_q) do pino do pistão após o teste.

A Figura 14 mostra a assimetria (S_{sk}) das regiões do pino em contato com a gaiola de agulhas e com o pistão. Ocorre um aumento na assimetria conforme a abrasão torna-se mais severa e aumenta a adesão, indicando que maior quantidade material é removida da superfície do pino e, por consequência, há não só o alargamento dos vales, mas também o aumento da profundidade.

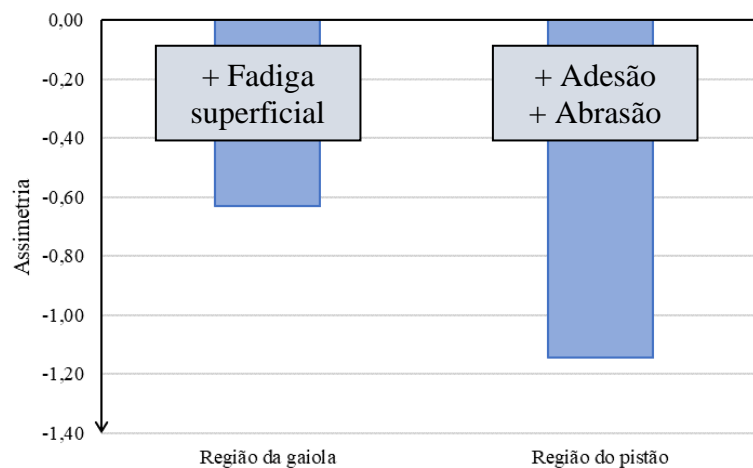


Figura 14: Assimetria (S_{sk}) do pino do pistão após o teste.

5.1.2. Gaiola de agulhas

A gaiola de agulhas apresentou faixas de adesão ao longo da superfície dos rolamentos orientadas na direção de rotação dos mesmos (Figura 15). Na Figura 15-b, nota-se de forma

mais clara a presença de indentações características de fadiga superficial em estágio final conforme a classificação de Ding (2003). Há também o mecanismo de abrasão, porém em menor magnitude que os demais mecanismos de desgaste.

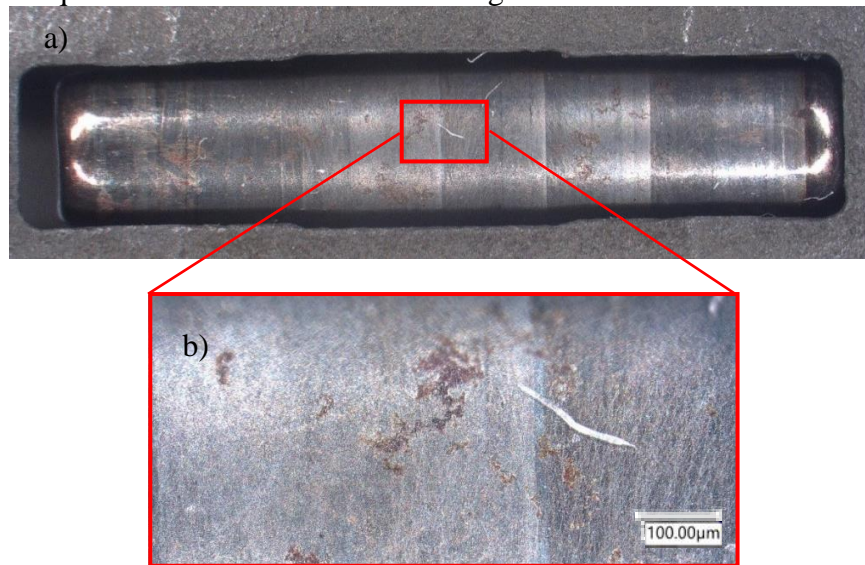


Figura 15: Microscopia do rolamento da gaiola de agulhas após o teste com ampliação de (a) 30× e (b) 200×.

5.2. Configuração com mancal deslizante

5.2.1. Pino do pistão

A Figura 16 mostra a superfície do pino do pistão revestido com DLC na região de contato com o pistão (aumento 200×). A grande quantidade de riscos orientados no sentido de rotação do pino indica de forma clara que a abrasão é o mecanismo de desgaste predominante. Nessa região, há também o fenômeno de adesão com arrancamento de material, indicado por pequenas crateras na superfície. Não há fadiga superficial por só haver contato deslizante.



Figura 16: Microscopia óptica do pino do pistão revestido com DLC na região de contato com o pistão (ampliação de 200×).

A região do pino revestido que esteve em contato com a biela é mostrada na Figura 17. O comportamento do desgaste nessa região foi bastante similar à região do pino em contato com o pistão. Ou seja, há o predomínio do mecanismo de abrasão em relação aos demais e crateras de adesão. É importante observar, entretanto, que a quantidade de riscos de abrasão é menor. A explicação para essa similaridade entre as regiões é que a forma que o contato ocorre nas duas regiões é muito parecida para essa configuração de mancal, no qual há o contato de duas faces paralelas de maior área. Logo, predomina um contato deslizante em detrimento do contato rolante (cíclico) e o carregamento é mais bem distribuído ao longo da superfície do pino. Dessa forma, são reduzidos os pontos concentradores de tensão passíveis de resultar em endentações (pittings). Nota-se um risco mais evidente em diagonal na parte inferior da imagem, que possivelmente ocorreu por conta de um corpo estranho e de alta dureza presente entre as superfícies.

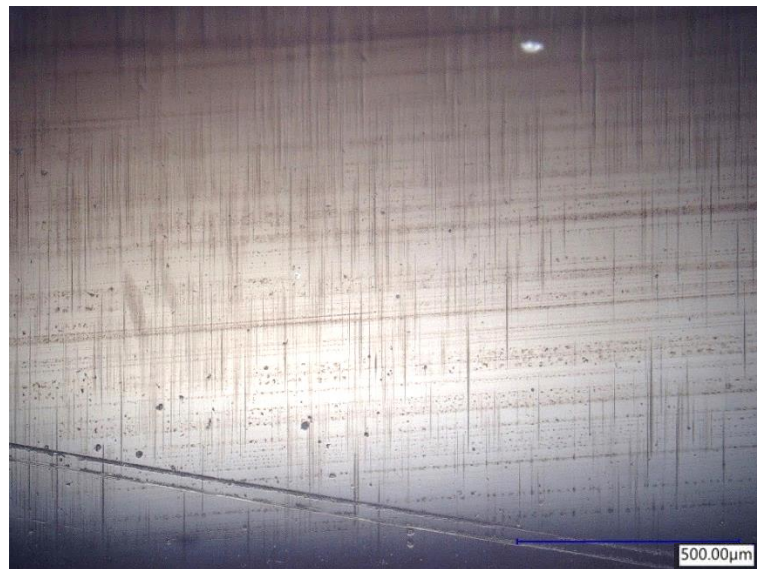


Figura 17: Microscopia óptica do pino do pistão revestido com DLC na região de contato com a biela (ampliação de 200×).

A interferometria mostrada na Figura 18 ilustra a predominância dos riscos de abrasão em ambas as regiões. Na região de contato com a biela (Figura 18-b) a profundidade e a quantidade de riscos são menores, conforme observado na microscopia óptica.

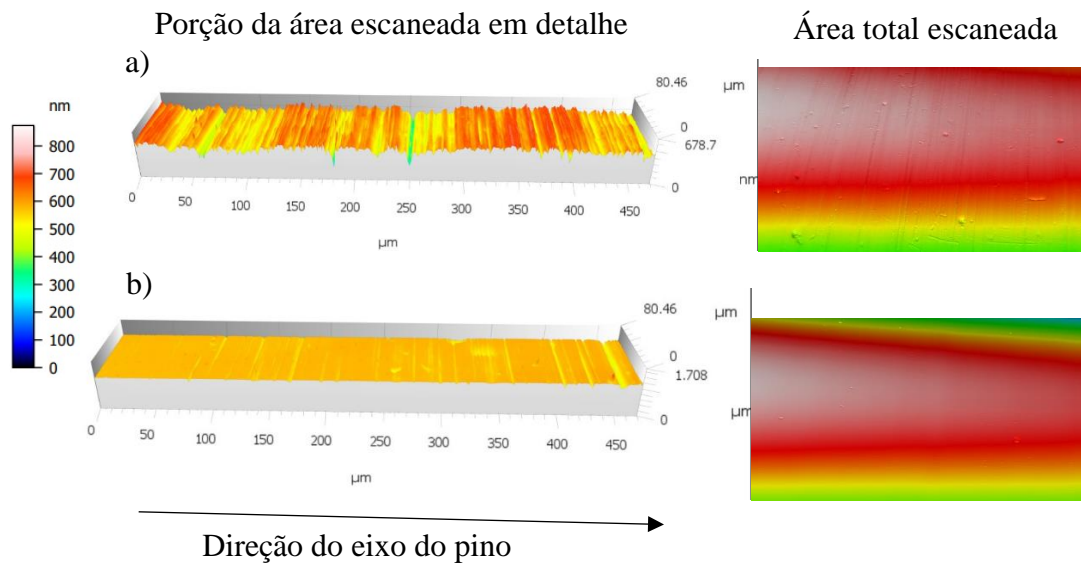


Figura 18: Interferometria do pino do pistão nas regiões de contato com (a) o pistão e com (b) a biela.

A rugosidade média do pino do pistão (Figura 19) não apresentou diferença significativa entre as regiões de contato com o pistão e com a biela, corroborando para o que já tinha sido concluído na análise qualitativa das microscopias. Assim como ocorreu na configuração com mancal de rolamentos, a rugosidade RMS (S_q) é ligeiramente maior que a rugosidade média (S_a), conforme observado por (Hutchings, 2017).

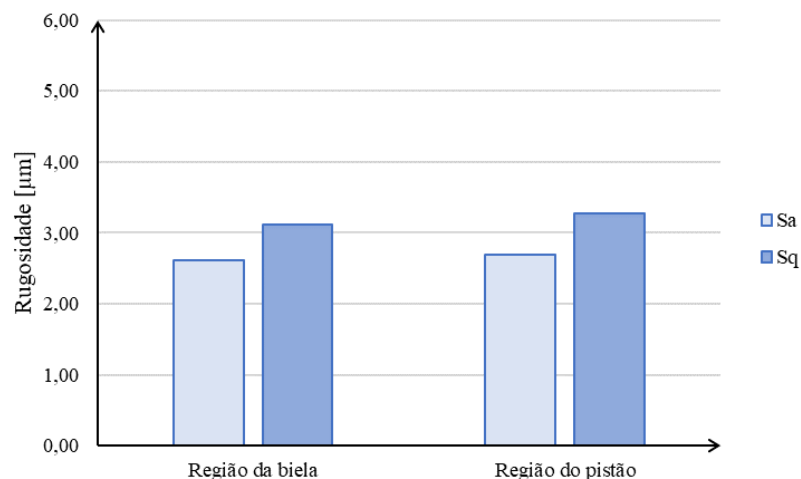


Figura 19: Rugosidade média (S_a) e RMS (S_q) do pino do pistão após o teste.

Nota-se que a interferometria não conseguiu medir as crateras para a área em contato com a biela. Logo, os valores de assimetria são reflexo dos vales decorrentes da abrasão, não havendo contribuição das crateras de adesão. Nota-se na Figura 20 que a assimetria é bastante similar entre as duas regiões, sendo levemente maior na região de contato com o pistão por ali haver mais riscos de abrasão.

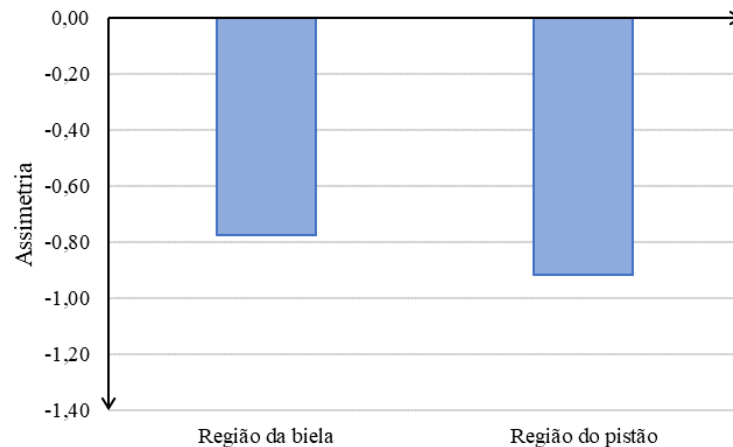


Figura 20: Rugosidade média (S_a) e RMS (S_q) do pino do pistão após o teste

É possível observar que, de forma geral, o desgaste nos pinos com DLC foi mais brando que nos pinos sem o revestimento. Isso indica que o DLC se comporta bem para esta aplicação, compensando com a lubrificidade característica desse revestimento a perda da capacidade de lubrificação que ocorre ao retirar a gaiola de agulhas.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados testes de durabilidade com duas configurações de mancais (de rolamentos e deslizante) em um motor do ciclo 2-tempos. Por meio de microscopia óptica, foram identificados os mecanismos de desgaste atuante em cada caso. Além disso, foram feitas interferometrias dos pinos do pistão para obtenção do perfil superficial e dos parâmetros de rugosidade S_a , S_q e S_{sk} .

Para o caso do mancal de rolamentos, o pino do pistão apresentou desgaste abrasivo elevado na região de contato com o pistão com riscos orientados principalmente no sentido do eixo do pistão. Além disso, houve presença de adesão também nesta região. A porção do pino do pistão em contato com a gaiola de agulhas apresentou abrasão mais moderada e indentações na superfície. Constatou-se que a redução da abrasão se dá pela melhor lubrificação das superfícies devido à rotação dos rolamentos da gaiola e as indentações são consequência da fadiga superficial, tipo de desgaste característico do contato rolante. Foram observadas marcas de elevada temperatura nas bordas que limitam a região de contato do pino do pistão com o pistão e a gaiola de agulhas.

No mancal deslizante, o comportamento do desgaste foi uniforme em toda a superfície, com a predominância de abrasão e, em menor escala, crateras de adesão. Em uma avaliação qualitativa, a magnitude do desgaste foi menor para esta configuração de mancal, indicando a boa performance do DLC para as condições de rotação e temperatura dos testes. Pelo fato de o contato nesse tipo de mancal ser apenas deslizante, não há desgaste por fadiga superficial.

A análise dos parâmetros de rugosidade corroborou para o que tinha sido visto no microscópio. Os parâmetros S_a e S_q acompanham o crescimento da abrasão assim como o parâmetro S_{sk} aumenta com o aumento desse mecanismo de desgaste.

Para estudos futuros, é proposto a instrumentação dos pino do pistão com termopares para medição da temperatura da região. Além disso, aplicar o DLC também aos pinos da configuração do mancal de rolamentos.

REFERÊNCIAS

- Juvinall, R. C. "Fundamentos do projeto de componente de máquinas", 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008;
- Norton, R. L. "Projeto de máquinas: uma abordagem integrada.", 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- Neuville, S., Matthews, A.: "A perspective on the optimization of hard carbon and related coatings for engineering applications.", *Thin Solid Films* 515 (17), 6619-6653 (2007).
- Sullivan, J., Friedmann, T., Hjort, K.: "Diamond and amorphous carbon", *MEMS. MRS Bull.* 26(04), 309–311, 2001.
- F. Olaitan Kolawole, S. Kolade Kolawole, L. Bernardo Varela, A. Felix Owa, M. Antonio Ramirez, and A. Paulo Tschiptschin, "Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings for Automobile Applications", *Engineering Applications of Diamond*. IntechOpen, Aug. 18, 2021.
- Gonçalves, P. "Triboquímica Analítica: Estudo da Dependência dos Parâmetros Tribológicos com a Modificação Superficial em Filmes a Base de Carbono.", Tese (Doutorado em ETE/ Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.
- Zum Gahr, K.; "Microstructure and wear of materials", ed. 1, Amsterdam: Elsevier, 1987
- Czichos, H. "Tribosystems. In: Mang", T. (eds) *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- Verbeek, H.J., "Tribological systems and wear factors", *Wear*, vol. 56, ed. 1, p. 81–92, 1979.
- Ulf Olofsson, Yi Zhu, Saeed Abbasi, Roger Lewis & Stephen Lewis. "Tribology of the wheel-rail contact – aspects of wear, particle emission and adhesion", *Vehicle System Dynamics*, 2013.
- Batchelor, G.W.S. e A.W. "Abrasive, Erosive and Cavitation Wear", *Engineering Tribology*. p. 501–551, 2006.
- Harsha, A. P., Tewari, U. S., "Two-body and three-body abrasive wear behaviour of 16 polyaryletherketone composites". *Polymer Testing*, 22(4), p. 403–418, 2003.
- Abdelbary, A, "Wear of Polymers and Composites", 2015.
- Ding, J. "Determining fatigue wear using wear particle analysis tools.", 42, 44, 46-51, 2013.
- Ankit Tyagi, R.S. Walia, Qasim Murtaza, Shailesh M. Pandey, Pawan K. Tyagi, Bharat Bajaj, "A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, volume 78, pages 107-122, 2019.
- Mondin, V. "Correlação entre parâmetros de rugosidade e mecanismos de desgaste em dois polímeros comerciais", Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2021.
- Hutchings, I., Shipway, P. "Surface topography and surfaces in contact.", *Tribology*, 7–35, cap. 2, 2017.