

DANILO BATISTA MELO

EFEITO DA ADIÇÃO DE ÓXIDOS DE FERRO (FE_2O_3 E
 FE_3O_4) COMO ADITIVOS NO DESGASTE POR
DESLIZAMENTO LUBRIFICADO DE UM PAR AÇO-
AÇO.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018.

DANILO BATISTA MELO

**EFEITO DA ADIÇÃO DE ÓXIDOS DE FERRO (FE_2O_3 E
 FE_3O_4) COMO ADITIVOS NO DESGASTE POR
DESLIZAMENTO LUBRIFICADO DE UM PAR AÇO-AÇO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Uberlândia

2018

Folha de aprovação

Dedico este trabalho a minha família e amigos, que sempre me apoiaram e foram cruciais para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, em especial a meu pai Alirio, à minha mãe Maria de Fátima e minha irmã Izabel, pelo total apoio, ajuda e compreensão, durante toda essa caminhada, vocês foram e sempre serão os pilares principais da minha formação.

Agradeço a minha orientadora Regina, por ter aceito esse desafio, pela paciência e orientação que levaram a realização deste trabalho.

Ao amigo Mario, por todos os incentivos e ajuda não só deste trabalho, mas também da formação acadêmica.

A toda equipe do Laboratório de Tribologia e Materiais, pessoas com quem pude desfrutar muitos momentos de descontração e conhecimento.

Resumo

A literatura é controversa quanto a influência de debris no comportamento tribológico. Alguns trabalhos mostram que o atrito e desgaste são influenciados pelo tamanho da partícula. Já outros trabalhos, mostraram que a concentração de partículas pode levar a um aumento do atrito. Este trabalho tem como objetivo o estudo do efeito da adição de óxido de ferro no desgaste por deslizamento lubrificado de um par aço-aço. Para esse estudo, foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento lubrificado alternado com adição de óxidos Fe_2O_3 e Fe_3O_4 , onde foi variada a concentração dos óxidos em 1% e 10% em peso. Os ensaios com a adição de Fe_2O_3 (partículas menores e mais duras) apresentaram um aumento de aproximadamente 10% no atrito e de 291% na taxa de desgaste, da concentração de 1% para a de 10%. A adição de partículas de Fe_3O_4 (partículas maiores e menos duras) contribuiu para uma queda na taxa de desgaste de aproximadamente 80% e 35% para as concentrações de 1% e 10%, respectivamente. Sugerindo que a dureza relativa em relação aos corpos em contato foi o fator determinante para esses resultados.

Palavras-chaves: Óxidos de ferro, Desgaste, Atrito, Dureza Relativa, Tribologia.

Abstract

The literature is controversial about the influence of debris on tribological behavior. Some studies show that friction and wear are influenced by particle size. Already other studies have shown that the concentration of particles can lead to increased friction. This work aims to study the effect of the addition of iron oxide on wear by lubricated slip of a steel-steel pair. For this study, wear tests were carried out by alternating lubricated slip with addition of oxides Fe_2O_3 and Fe_3O_4 , where the concentration of the oxides was varied by 1% and 10% by weight. The tests with the addition of Fe_2O_3 (smaller and harder particles) presented a variation of approximately 10% in the friction and of 291% in the rate of wear, of the concentration of 1% to that of 10%. Addition of Fe_3O_4 particles (larger and less hard particles) contributed to a drop in the wear rate of approximately 80% and 35% at concentrations of 1% and 10%, respectively. Suggesting that the relative hardness in relation to the bodies in contact was the determining factor for these results.

Keywords: Iron oxides, Wear, Friction, Relative Hardness, Tribology.

LISTA DE FIGURAS

Figura. 2.1: Ilustração do movimento de (a) rolamento e (b) deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

Figura 2.2 Mecanismos microscópicos relacionados ao fenômeno do atrito para superfícies metálicas: (a) adesão, (b) deformação plástica e (c) presença de terceiro corpo na interface de contato. Adaptado de (ASM, 1992).

Figura 2.3: Geometrias empregadas em testes de desgaste por deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

Figura 2.4: Representação de contatos (a) conformes e (b) não-conformes (HUTCHINGS, 1992).

Figura 2.5: Representação desgaste abrasivo de dois corpos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Figura 2.6: Representação desgaste abrasivo de três corpos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Figura 2.7: Curva de Stribeck teórica. Onde: n = Viscosidade do fluido; U = Velocidade de deslizamento e N = Carga Normal (HUTCHINGS, 1992).

Figura 2.8: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo (YUAN et al., 2005).

Figura 2.9: superfície de desgaste com óleo lubrificante N32 puro em sistema pino-disco (YUAN et al., 2005)

Figura 2.10: superfície de desgaste com óleo lubrificante N32 com adição de pó de ferro em sistema pino-disco (YUAN et al., 2005).

Figura 3.1: Distribuição granulométrica. (a) Fe_2O_3 , (b) Fe_3O_4 . Adaptado de (DA SILVA; BINDER; DE MELLO, 2005).

Figura 3.2: Modelo esquemático da montagem do LVDT ao sistema de testes (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018).

Figura 3.3: Imagem triboscópica 3D (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018)

Figura 3.4: Modelo esquemático de uma calota esférica. Onde: “ h ” é a altura da calota esférica; “ a ” é o raio da calota esférica e “ r ” é o raio da esfera (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018)

Figura 3.5: Fluxograma dos ensaios realizados

Figura 3.6: Taxa de desgaste contra corpo pré-testes.

Figura 4.1: Comparativo coeficiente de atrito médio por ciclo para o Fe_2O_3 .

Figura 4.2: Evolução do coeficiente de atrito Fe_2O_3 . (a) Referência, (b) 1%, (c) 10%.

Figura 4.3: Coeficiente de atrito médio no regime permanente para o Fe_2O_3

Figura 4.4: Evolução do coeficiente de atrito Fe_3O_4 . (a) Referência, (b) 1%, (c) 10%.

Figura 4.5: Comparativo coeficiente de atrito médio por ciclo para o Fe_3O_4

Figura 4.6: Coeficiente de atrito médio no regime permanente para o Fe_3O_4

Figura 4.7: Evolução do potencial de contato Fe_2O_3 . (a) Referência, (b) 1%, (c) 10%.

Figura 4.8: Evolução do potencial de contato Fe_3O_4 . (a) Referência, (b) 1%, (c) 10%.

Figura 4.9: Imagem de MEV das amostras com adição de Fe_2O_3 (a) 1%, (b) 10%.

Figura 4.10: Imagem de MEV das amostras com adição de Fe_3O_4 (a) 1%, (b) 10%.

Figura 4.11: Taxa de desgaste do contra corpo

Figura 4.12: Imagem microscópio óptico das marcas de desgaste contra corpo.

Figura 4.13: Imagem microscópio óptico das marcas de desgaste contra corpo.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição química do aço AISI 52100 (porcentagem em peso).

Tabela 3.2: Parâmetros de concentração de óxido dos ensaios.

Sumário

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	12
Capítulo2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. ATRITO	14
2.1.1. Adesão	16
2.1.2. Deformação	16
2.1.3. Presença de Terceiro Corpo	17
2.2. DESGASTE	17
2.2.1. Desgaste por Deslizamento	17
2.2.2. Desgaste Abrasivo	18
2.3. LUBRIFICAÇÃO	20
2.4. ADITIVOS EM LUBRIFICANTES	22
Capítulo3. METODOLOGIA	25
3.1. MATERIAIS	25
3.2. MÉTODOS	26
Capítulo4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
Capítulo5. CONCLUSÃO	42
Capítulo6. TRABALHOS FUTUROS	43
Capítulo7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	44

CAPÍTULO I

Introdução

A palavra tribologia é derivada das palavras grega “TRIBO” que significa “esfregar, atritar, roçar” e LOGOS que significa “estudo”, de forma que uma tradução literal significa 'Estudo do Atrito', ou a ciência que estuda o atrito.

Tribologia também pode ser definida como: "Ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas e assuntos associados" (JOST, 1990). A palavra tribologia, foi utilizada pela primeira vez na Inglaterra, em 1966, em um relatório do Departamento de Educação e Ciência.

Há a necessidade de estudos com problemas tribológicos de atrito e desgaste, pois esses fenômenos afetam quase todos os aspectos da vida do homem. A tribologia está presente em seu dia-a-dia em praticamente todas as atividades, quando o homem pisca, ele abre e fecha os olhos, onde eles se auto-lubrificam, num movimento relativo entre superfícies, quando anda, acontece a movimentação entre as superfícies das suas articulações.

Durante o processo de movimentação as superfícies modificam suas características básicas. Elas podem se tornar mais lisas ou mais rugosas, terem propriedades físicas alteradas, tais como dureza, e podem ainda perder material através do processo de desgaste. Essas mudanças nas superfícies podem ser benéficas, como acontece em situações de amaciamento, para produzir condições de operação próximas a ideal, ou desastrosas, quando ocorre a falha da superfície (perda da função técnica), necessitando da substituição da peça (HALLING, 1978). A tribologia está muito presente no dia a dia do homem, por isso tem tamanha importância.

O desgaste é o dano progressivo, envolvendo perda de material, que ocorre na superfície de um componente como resultado do seu movimento em relação a superfície adjacente de peças de trabalho; é um companheiro quase inevitável do atrito. A maioria dos

pares tribológicos são projetados com um lubrificante tanto para evitar o desgaste excessivo e danos que estariam presentes se as duas superfícies secas fossem esfregadas juntas, bem como reduzir sua resistência de atrito ao movimento (WILLIAMS, 2005).

Um sistema tribológico consiste nas superfícies de dois componentes que se encontram em contato móvel um com o outro e com a área adjacente. O tipo, evolução e extensão do desgaste são determinados pelos materiais e acabamentos dos componentes, eventuais materiais intermediários, influências do meio e condições de operação.

Pelo ponto de vista da engenharia, a tribologia é fundamental, pois o desgaste das peças de toda e qualquer máquina, bem como sua lubrificação e as forças de atrito que aparecem, são de extrema importância para o funcionamento delas. A tribologia tem um campo de pesquisa amplo e multidisciplinar, onde essa pesquisa visa: reduzir desgaste, aumentar vida útil e confiabilidade de sistemas mecânicos e mecatrônicos.

Pesquisas relacionadas a lubrificantes sólidos têm sido desenvolvidas de diferentes formas com o intuito de resolver os problemas de lubrificação de diversos sistemas mecânicos.

O objetivo de desenvolver novos aditivos de óleos lubrificantes tem impulsionado pesquisadores na busca de aditivos que sejam resistentes à oxidação, possuam volatilidade controlada, propriedades redutoras de atrito, anti-desgaste e que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente e a saúde do homem quando comparados aos lubrificantes atualmente comercializados (RAPOPORT et al., 2003).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da presença de micropartículas de ferro (Fe_2O_3 e Fe_3O_4), juntamente com óleo mineral no desgaste por deslizamento de um par aço-aço.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

2.1. Atrito

A força definida como atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo em movimento em relação a outro. Esta definição engloba duas importantes classes de movimento relativo: deslizamento e rolamento. A distinção entre rolamento e deslizamento é útil, mas as duas não são exclusivas, e mesmo em uma condição de rolamento “aparentemente” puro quase sempre envolve algum deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

Tanto no rolamento ideal como no deslizamento, conforme mostrado na Fig. 2.1 uma força tangencial \mathbf{F} é necessária para mover o corpo superior sobre a contraface estacionária. A relação entre esta força e a carga normal \mathbf{W} é conhecida como coeficiente de atrito, μ , dada pela expressão mostrada na Eq. 2.1:

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (2.1)$$

A magnitude da força de atrito é convenientemente descrita pelo valor do coeficiente de atrito, que pode variar em um amplo intervalo: de cerca de 0,001 em um rolamento levemente carregado, a valores maiores de 10 para metais deslizando contra si mesmos no vácuo. (HUTCHINGS, 1992).

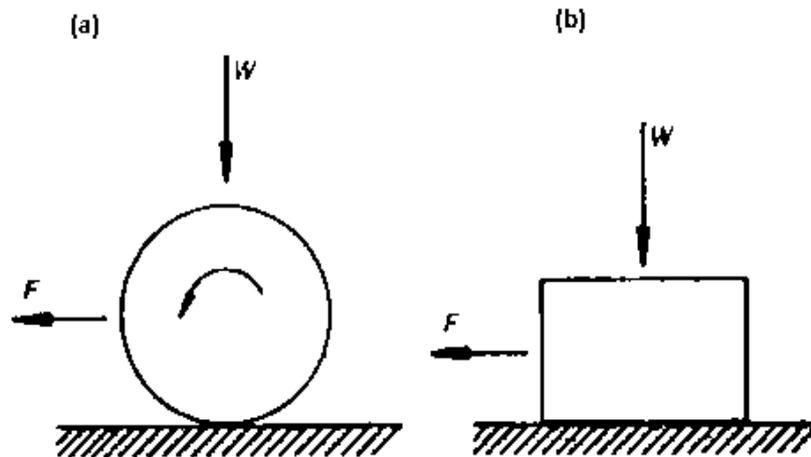


Figura. 2.1: Ilustração do movimento de (a) rolamento e (b) deslizamento (HUTCHINGS, 1992)

No entanto, para a maioria dos materiais comuns que deslizam no ar, o valor de μ , situa-se na gama mais estreita de cerca de 0,1 a 1 (HUTCHINGS, 1992).

Quatro leis empíricas básicas de atrito são conhecidas há séculos desde o trabalho de da Vinci e Amonton (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005):

- 1) a força de atrito tangencial é proporcional à força normal no deslizamento;
- 2) força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.
- 3) força de atrito é independente da área de contato aparente;
- 4) Existe uma proporcionalidade entre a força tangencial máxima antes do deslizamento e a força normal quando um corpo estático é submetido a carga tangencial crescente;

As duas primeiras leis descrevem o atrito essencialmente como um contato elástico. Da Vinci (1452-1519) e o físico francês Amontons (1699) são os responsáveis pelas duas primeiras. Coulomb (1781) diferenciou o atrito estático do atrito dinâmico, observando que a força necessária para iniciar o movimento de um corpo era maior que a força necessária para mantê-lo em movimento. (HUTCHINGS, 1992).

Para superfícies metálicas, o atrito pode ocorrer devido aos seguintes mecanismos microscópicos (ASM, 1992): adesão, deformação plástica, e presença de terceiro corpo na interface de contato Fig. 2.2.

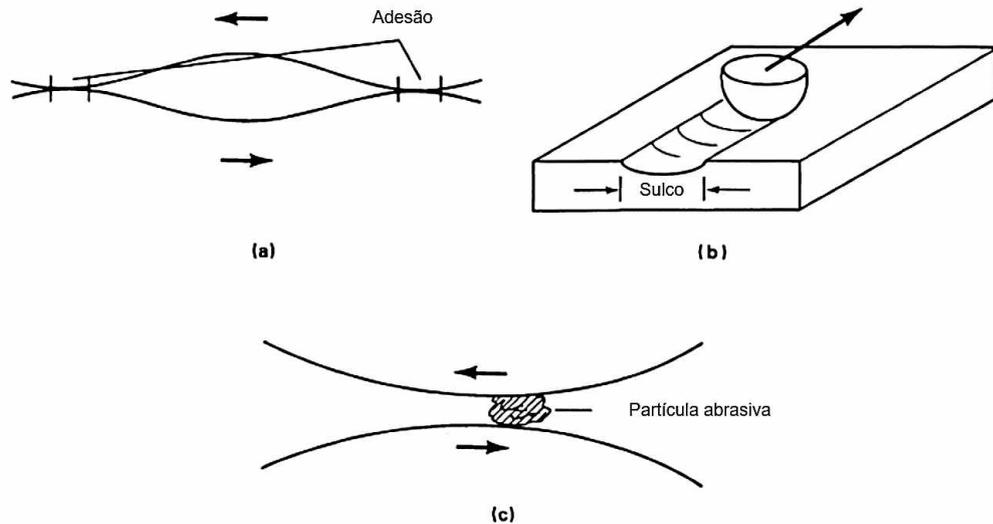


Figura 2.2: Mecanismos microscópicos relacionados ao fenômeno do atrito para superfícies metálicas: (a) adesão, (b) deformação plástica e (c) presença de terceiro corpo na interface de contato. Adaptado de (ASM, 1992).

2.1.1. Adesão

A adesão é um mecanismo que ocorre na interface de contato das asperezas que compõem a topografia, devido às forças interatômicas de atração geradas pelos átomos presentes nessa região, conforme ilustrado na Fig. 2.2–a (LANDMAN et al., 1990). As forças interfaciais causadas pela adesão são dominantes no fenômeno do atrito seco quando as superfícies estão limpas e livres de camadas de óxidos. Sob essas condições, as forças interatômicas de atração entre os átomos são capazes de promover a adesão no contato das asperezas, podendo essa força variar de acordo com a proximidade entre as superfícies, carregamento e acabamento superficial. Por serem inertes, os óxidos formados nas superfícies metálicas quando na presença de oxigênio dificultam a ocorrência desse fenômeno, o que em termos de aplicações de engenharia se torna uma vantagem, já que a maioria das aplicações está em ambientes com oxigênio, tornando o estudo desse mecanismo muito importante em aplicações de alto vácuo (PROFITO, 2010; WILLIAMS, 2005).

2.1.2. Deformação

As asperezas das superfícies quando em contato, podem sofrer deformações elásticas e plásticas, para acomodar a tensão aplicada sobre as mesmas, conforme proposto por Bowden e Tabor (1950). A deformação plástica pode ser vista como uma forma de dissipação de

energia, sendo essa, resultado da interação de asperezas. Caso as superfícies envolvidas apresentem durezas diferentes, as asperezas provenientes da face com maior dureza serão capazes de formar sulcos visíveis (*plowing*) na superfície com menor dureza, de forma semelhante ao ilustrado na Fig. 2.2-b (WILLIAMS, 2005).

2.1.3. Presença de terceiro corpo

A presença de um terceiro corpo na interface de contato pode ser responsável por aumentar o coeficiente de atrito do sistema, já que haverá um aumento de deformações plásticas resultantes das interações destes corpos na interface de contato, conforme ilustrado na Fig. 2.2-c, podendo essas partículas serem provenientes do desgaste do próprio sistema (OKTAY; SUH, 1992; SUH, 1986).

2.2. Desgaste

O desgaste é o dano progressivo envolvendo perda de material, que ocorre na superfície de um componente como resultado de seu movimento em relação às partes de trabalho adjacentes (WILLIAMS, 2005).

2.2.1. Desgaste por deslizamento

Em geral, o dano superficial é causado por adesão, reação triboquímica, fadiga superficial e abrasão. O que são características de um desgaste por deslizamento (ZUM GAHR, 1987).

O desgaste por deslizamento ocorre quando duas superfícies sólidas deslizam uma contra a outra, as geometrias mais comuns de testes de deslizamento são disco sobre disco, onde o contato pode ocorrer ao longo de sua linha lateral Fig. 2.3-a ou contato face-face Fig. 2.3-b, pino sobre disco, onde o contato pode ocorrer sobre a face do disco Fig. 2.3-c ou ao longo de sua linha lateral Fig. 2.3-d, bloco sobre disco, onde o bloco desliza ao longo de sua linha lateral Fig. 2.3-e e pino sobre plano, onde o pino desliza ao longo de um plano. Nos testes o contato entre as superfícies pode ocorrer de forma conforme ou não conforme Fig. 2.4. Na maioria das aplicações práticas as superfícies deslizantes são lubrificadas de alguma forma, e o desgaste que ocorre é então denominado desgaste por deslizamento lubrificado. Em algumas aplicações de engenharia, porém, e em laboratórios, as superfícies deslizam ao ar

sem um lubrificante. Este tipo de desgaste é, então, muitas vezes chamado de desgaste por deslizamento seco, embora normalmente ocorra no ar ambiente de umidade apreciável. As palavras *scuffing*, *scoring* e *galling* são frequentemente associadas com desgaste por deslizamento severo (HUTCHINGS, 1992).

- Scuffing: Usualmente usado no Reino Unido, significa dano superficial localizado associado com soldagem no estado sólido e indica em geral o ponto de falha da lubrificação (altas velocidades);
- Scoring: Usualmente usado nos EUA, é sinônimo de *scuffing*. Ambos também podem ser usados para indicar desgaste abrasivo;
- Galling: representa uma forma mais severa de *scuffing*, em geral resultado do desgaste a seco (baixas velocidades), ocasiona grande aumento de rugosidade superficial, formação de grandes fragmentos de desgaste;

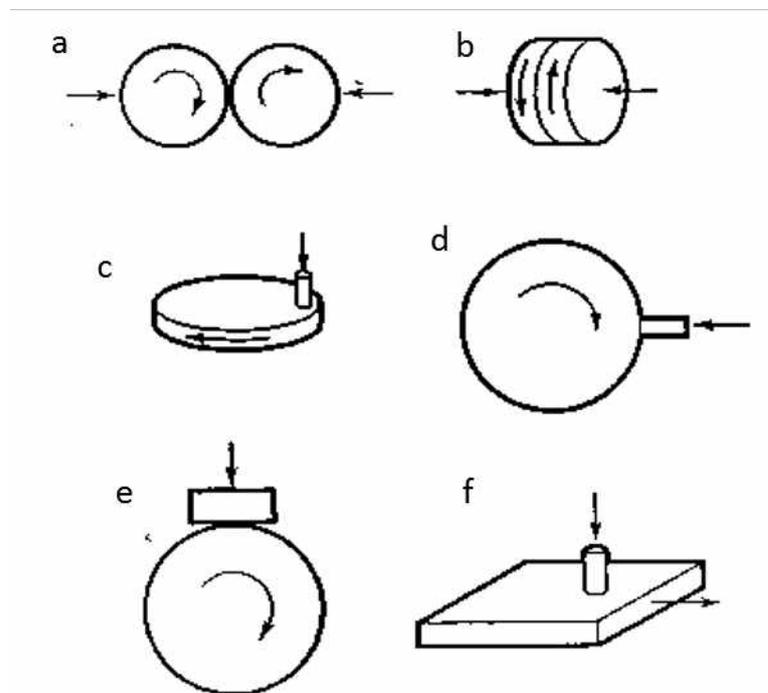


Figura 2.3: Geometrias empregadas em testes de desgaste por deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

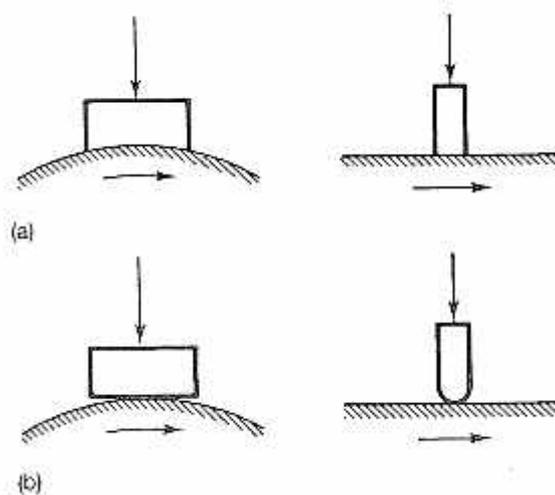


Figura 2.4: Representação de contatos (a) conformes e (b) não conformes (HUTCHINGS, 1992).

2.2.2. Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre quando um corpo e contra corpo deslizam um sobre o outro com presença de partículas no contato. Esse desgaste pode ser denominado desgaste de dois corpos Fig. 2.5 e desgaste de três corpos Fig. 2.6.

Uma "partícula dura" pode ser o produto de processamento de um mineral tal como sílica, alumina ou outros minerais, ou fragmentos de desgaste endurecido no trabalho, ou resultam da entrada de partículas duras, tais como sujeira de fora do tribossistema. Protuberâncias tais como asperidades em superfícies, podem atuar como "partículas duras" se a superfície for mais dura do que a superfície contrária (ZUM GAHR, 1987).

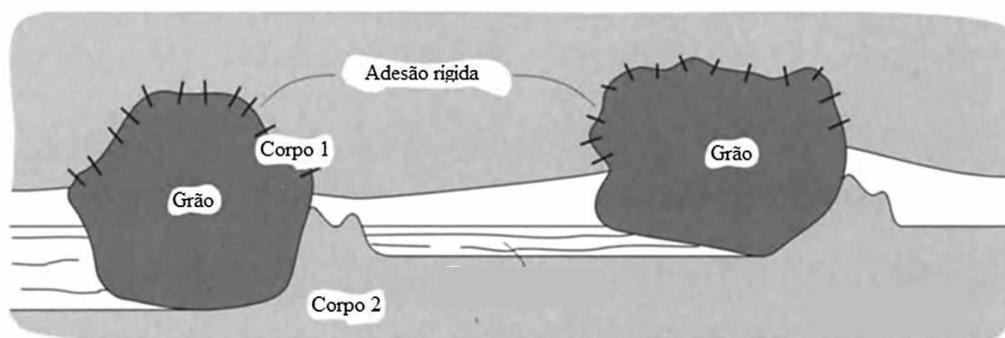


Figura 2.5: Representação desgaste abrasivo de dois corpos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

O desgaste abrasivo é o deslocamento de material causado pela presença de partículas duras, essas partículas duras podem estar entre, em uma ou em ambas as superfícies em movimento relativo (ZUM GAHR, 1987).

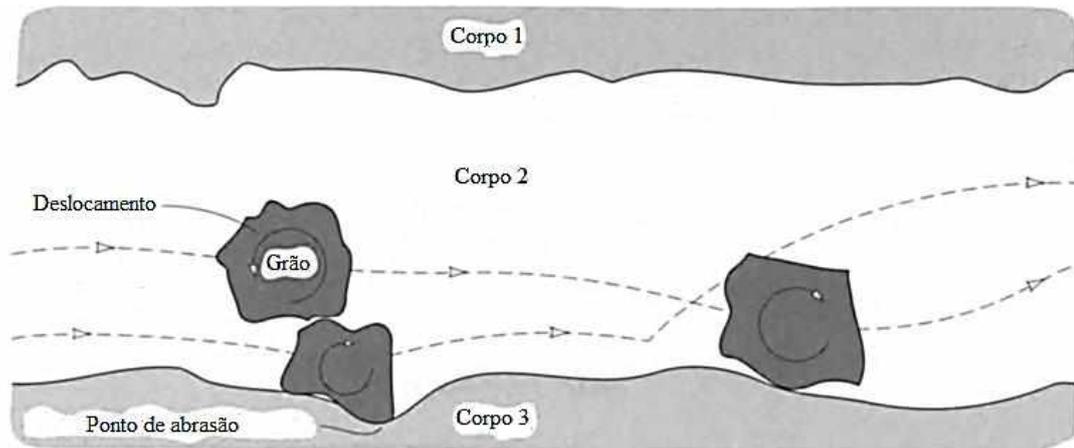


Figura 2.6: Representação desgaste abrasivo de três corpos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

2.3. Lubrificação

Um lubrificante funciona introduzindo entre as superfícies deslizantes uma camada de material com uma menor resistência ao cisalhamento do que as próprias superfícies. Em alguns sistemas lubrificadas, o lubrificante pode não impedir completamente o contato da aspereza, embora reduza-o e reduza também os pontos fortes das junções formadas. Em outros casos, o lubrificante separa completamente as superfícies e nenhuma junção das asperezas são dadas. Assim, o uso de um lubrificante irá sempre reduzir a taxa de desgaste deslizante (HUTCHINGS, 1992).

Há uma variedade de materiais, gases, líquidos e sólidos que podem ser usados como lubrificante.

A lubrificação líquida pode trabalhar em três regimes Fig. 2.7.

- Hidrodinâmica: as superfícies são separadas por um filme fluido. Em função da espessura, a pressão hidrostática no filme causa pequenas distorções nas superfícies, que podem ser tratadas como rígidas;

- Mista: descreve o caso em que as pressões locais são tão elevadas e o filme lubrificante é tão fino que a deformação elástica das superfícies não pode mais ser desconsiderada;
- Limite ou limítrofe: na lubrificação limite, as superfícies são separadas por filmes moleculares adsorvidos, normalmente depositados a partir de um óleo ou graxa contendo um lubrificante de limite adequado. Há o contato entre as asperezas e a formação de junções;

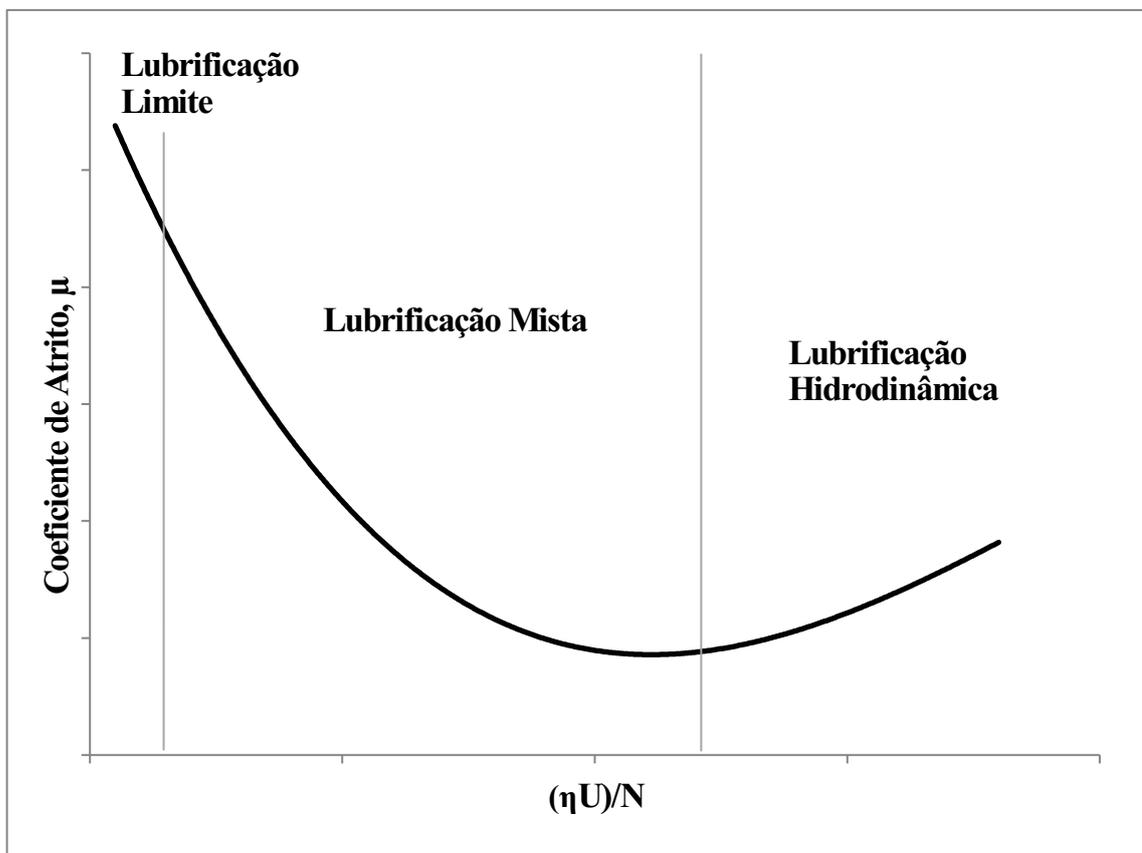


Figura 2.7: Curva de Stribeck teórica. Onde: η = Viscosidade do fluido; U = Velocidade de deslizamento e N = Carga Normal. Adaptado de (HUTCHINGS, 1992).

Na maioria das aplicações tribológicas, lubrificantes líquidos ou graxas são utilizados para combater o atrito e o desgaste, mas quando as condições tornam-se muito severas (ou seja, temperaturas muito elevadas ou muito baixas, ambiente em vácuo, radiação, pressões de contato extremas, limpeza e higiene, alimentos e farmacêutico, etc.), os lubrificantes sólidos podem ser a única opção para controlar o atrito e o desgaste (BHUSHAN, 2001).

Os lubrificantes sólidos funcionam fornecendo uma película interfacial sólida de baixa resistência ao cisalhamento (HUTCHINGS, 1992).

Os lubrificantes sólidos, também conhecidos como lubrificantes a seco, não usam um meio líquido, mas são capazes de proporcionar lubrificação, permanecendo em estado sólido, tem como vantagens resistir a altas temperaturas e pressões. Exemplos de lubrificantes sólidos são: grafite, molibdênio, talco e mica.

2.4. Aditivos em lubrificantes

Muitas pesquisas têm sido feitas com o objetivo de avaliar o efeito causado pelo tamanho de uma partícula em um desgaste abrasivo

Em um sistema abrasivo de dois corpos, a taxa de desgaste aumenta com o aumento do tamanho da partícula até um tamanho crítico (cerca de 100 μm) e acima deste valor, o efeito do tamanho da partícula nas taxas de desgaste torna-se quase insignificante (MISRA; FINNIE, 1981). Isso ocorre, pois, a força normal sobre as partículas que entram no contato pino e amostra é suficiente para fragmentá-las em partículas menores reduzindo o seu tamanho e conseqüentemente o desgaste.

Concluiu-se que para um sistema de desgaste abrasivo de três corpos, a taxa de desgaste aumenta com um tamanho médio de partícula, até um tamanho crítico, e acima deste valor, a taxa de desgaste aumenta a uma taxa menor (CHANDRASEKARAN, 1992).

Autores (ODI-OWEI; ROYLANCE, 1986) relataram que o atrito aumenta com o aumento da concentração de partículas ou tamanho da partícula. Outros autores (TOMIMOTO; MIZUHARA; YAMAMOTO, 2002), também realizaram estudos sobre o efeito da concentração de partículas, bem como a quantidade de partículas. Mas, diferente dos resultados de Odi-Owei e Roylance, relataram que o aumento no atrito não é proporcional à concentração, mas proporcional à quantidade de partículas interferentes reais. Sua pesquisa também revelou que a magnitude de um aumento no atrito diminui com o aumento das velocidades de deslizamento.

Segundo Yuan et al., (2005), avaliando um disco de aço AISI 5140, contra um pino de aço AISI 52100 na presença de óleo lubrificante N32 com aditivos de pó de ferro, em um sistema pino disco. Para a realização dos testes o autor utilizou uma mistura de óleo lubrificante N32 e pó de ferro NC100, em uma concentração de 1,0 g de pó de ferro para 60 ml de lubrificante N32. Onde em seus resultados pode ser observado que houve uma redução

no coeficiente de atrito, que também se manteve mais estável com a adição do pó de ferro Fig. 2.8.

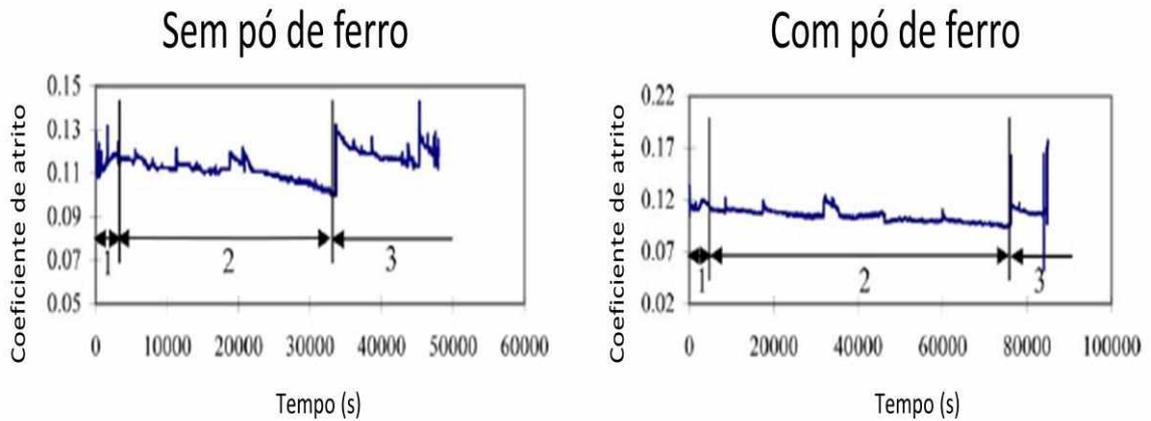


Figura 2.8: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo (YUAN et al., 2005).

No trabalho do referido autor pode ser observada também uma redução no desgaste. Em seus resultados a superfície do material ensaiado com óleo lubrificante N32 puro, apresentou uma grande quantidade de riscos e sulcos, caracterizando um desgaste abrasivo Fig. 2.9.

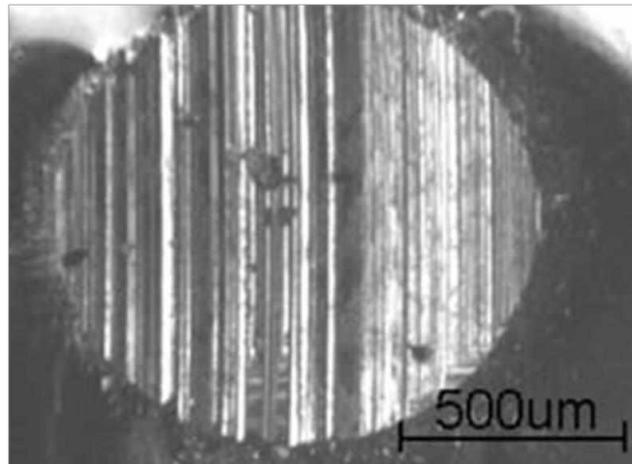


Figura 2.9: Superfície de desgaste com óleo lubrificante N32 puro em sistema pino-disco (YUAN et al., 2005).

Com a adição de pó de ferro ao lubrificante N32, Fig. 2.10 os resultados apresentados pelo autor mostraram que a superfície desgastada apresentou uma calota menor e com riscos e sulcos mais suaves, mostrando que o pó de ferro poderia estar contribuindo para a formação

de uma tribocamada auxiliando o lubrificante no regime de lubrificação limítrofe reduzindo assim o desgaste.

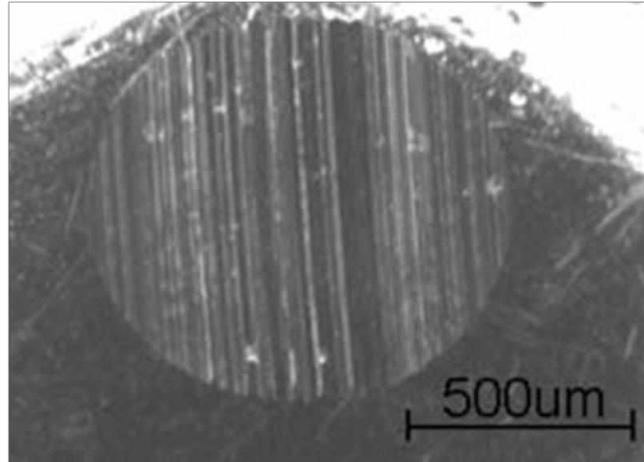


Figura 2.10: superfície de desgaste com óleo lubrificante N32 com adição de pó de ferro em sistema pino-disco (YUAN et al., 2005).

Como comentado anteriormente e mostrado neste capítulo, a literatura mostra que a taxa de desgaste e o atrito aumentam com o aumento do tamanho da partícula e com o aumento da concentração de partículas.

Partículas de Fe_2O_3 e Fe_3O_4 também foram estudadas por (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018), avaliando uma amostra de aço ferramenta contra uma esfera de aço AISI 52100 com partículas em meio seco. Mostraram uma redução do desgaste em aproximadamente 85% quando adicionado partículas de Fe_2O_3 e em aproximadamente 95% quando adicionado Fe_3O_4 .

Com isso este trabalho tem como objetivo a continuidade deste estudo avaliando a influência da presença de micropartículas de ferro (Fe_2O_3 e Fe_3O_4), juntamente com óleo mineral no desgaste por deslizamento de um par aço-aço.

CAPÍTULO III

Metodologia

Este capítulo visa mostrar detalhadamente, todos os materiais e métodos utilizados durante a pesquisa.

3.1. Materiais

Para realização dos ensaios deste trabalho, foram utilizados como contra corpos esferas de 10 mm de diâmetro de aço AISI 52100, com dureza de 772 kgf/mm². Sua composição química nominal é mostrada na Tab. 3.1.

Tabela 3.1: Composição química do aço AISI 52100 (porcentagem em peso).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr
Percentual (%)	0,994	0,27	0,32	0,013	0,005	1,49

Os ensaios foram realizados com amostras de aço ferramenta, retificadas, com dureza de 611 kgf/mm², para a execução dos testes de referência, imersos em óleo mineral puro.

Adicionalmente, foram efetuados ensaios em solução de óleo mineral com partículas de Fe₂O₃ e Fe₃O₄.

As partículas utilizadas neste trabalho foram as mesmas utilizadas por (DA SILVA; BINDER; DE MELLO, 2005). A distribuição granulométrica apresentada mostra que para o Fe₂O₃ (Fig. 3.1-a) a maior frequência de ocorrência do diâmetro se encontra entre 0,7 µm e 1,4 µm, com diâmetro médio de 0,92 µm. Já para o Fe₃O₄ (Fig. 3.1-b) a maior quantidade se encontra na faixa de diâmetros entre 4 µm e 14 µm, apresentando um diâmetro médio de 5,99 µm. Segundo a literatura o valor da dureza Vickers para Fe₂O₃ é 1308 Kgf/mm²

(STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005). Já para Fe_3O_4 , os valores de dureza Vickers variam entre 370-600 Kgf/mm^2 (HUTCHINGS, 1992; WILLIAMS, 1994).

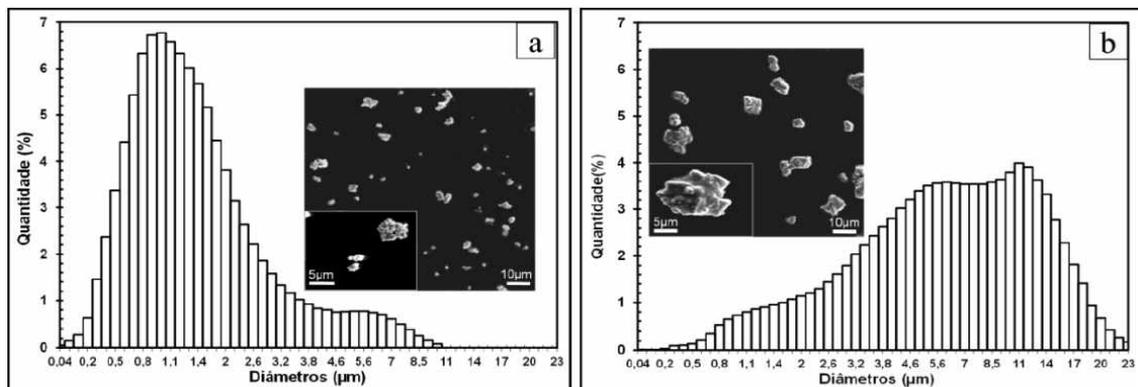


Figura 3.1: Distribuição granulométrica. (a) Fe_2O_3 , (b) Fe_3O_4 . Adaptado de (DA SILVA; BINDER; DE MELLO, 2005)

3.2. Métodos

Os ensaios tribológicos foram efetuados em um Tribômetro Universal Plint (modelo TE 67 Plint and Partners LDT) no modo alternado, com frequência de oscilação de 2 Hz e amplitude de movimento de 10 mm.

Junto ao tribômetro foi incorporado um sensor LVDT (modelo RS 646-511), para medição da posição do corpo em relação ao contra corpo em cada ciclo do movimento alternado durante o ensaio Fig.3.2. A aquisição de dados foi realizada por uma placa de aquisição modelo NI BNC-2110 ligada um microcomputador com o software LabView, onde foi elaborado um programa de aquisição dos dados. Para a análise dos dados utilizou-se uma técnica chamada triboscopia, essa técnica consiste na produção de imagens numéricas dos sinais adquiridos durante o ensaio conforme Fig. 3.3.

Para calcular o coeficiente de atrito médio dos ensaios foi escolhido o instante após o running-in (período em que o ensaio apresenta um comportamento não-linear) onde as variações do coeficiente de atrito são menores o que caracteriza um regime permanente. A partir deste instante realizou-se uma média do vetor de pontos do coeficiente de atrito.

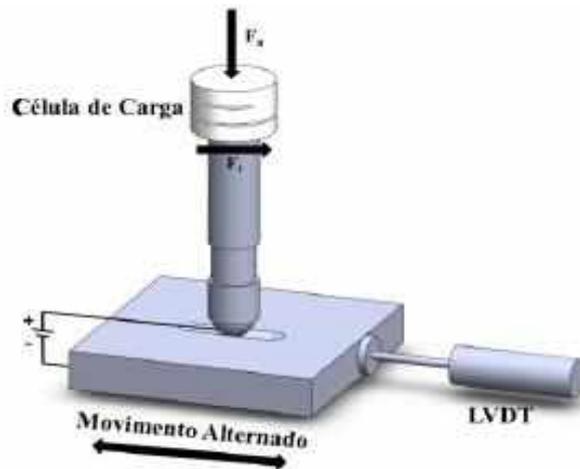


Figura 3.2: Modelo esquemático da montagem do LVDT ao sistema de testes (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018)

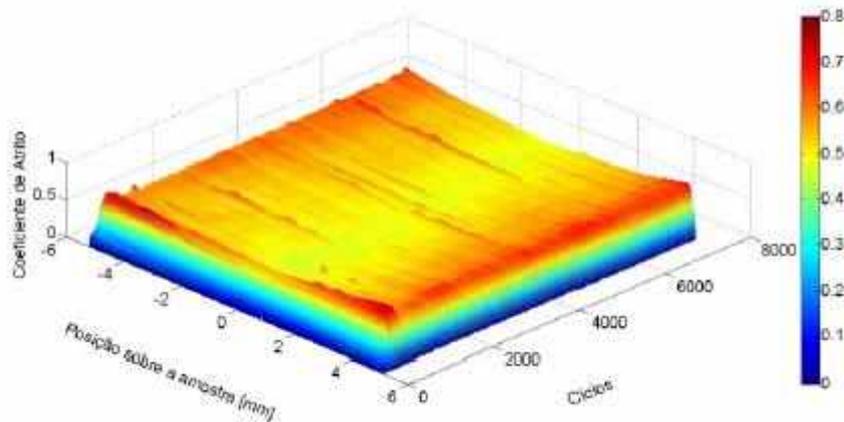


Figura 3.3: Imagem triboscópica 3D (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018)

Para a medição do desgaste do contra corpo, utilizou-se um microscópio óptico Olympus BX51M. Após a aquisição das imagens foi utilizado o software Stream Essentials do próprio microscópio para a medição do diâmetro médio da calota esférica. Com o diâmetro da calota, pode-se calcular seu volume (V_{calota}), utilizando as Eq. 3.1 e 3.2, Fig. 3.4. Assim, a partir do volume da calota é obtido o volume desgastado do contra corpo.

$$h = r - \sqrt{r^2 - a^2} \quad (3.1)$$

$$V_{calota} = \frac{1}{3}\pi h^2(3r - h) \quad (3.2)$$

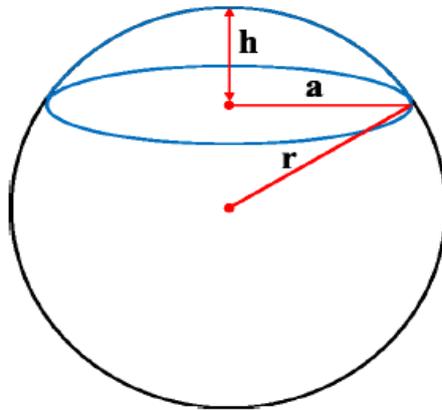


Figura 3.4: Modelo esquemático de uma calota esférica. Onde: “h” é a altura da calota esférica; “a” é o raio da calota esférica e “r” é o raio da esfera (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018)

Os ensaios do trabalho foram realizados em duas etapas, primeiramente foram realizados pré-testes para determinação da carga aplicada, tempo, concentração de óxidos e realização dos testes de referência, na segunda etapa foram realizados os ensaios finais com os parâmetros determinados. A Fig. 3.5 mostra um fluxograma dos ensaios realizados durante o trabalho.

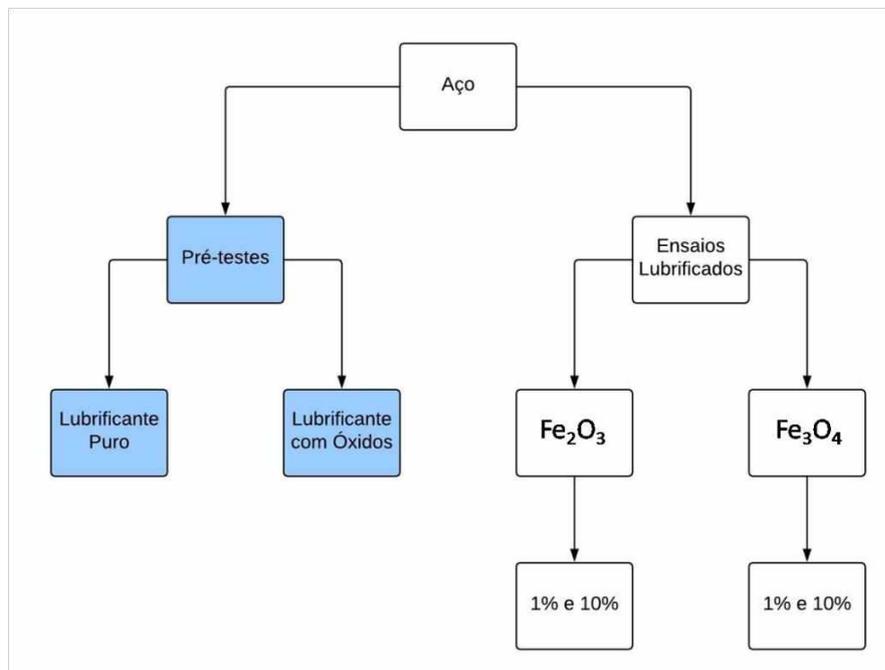


Figura 3.5: Fluxograma dos ensaios realizados

Para os pré-testes foi realizado um ensaio para as cargas de 2,2 kg e 5,6 kg, a fim de se observar o comportamento do sistema, onde se optou pela carga de 2,2 kg por apresentar

resultados mais interessantes, apresentando um desgaste maior quando utilizado o Fe_2O_3 e um menor desgaste quando utilizado o Fe_3O_4 , conforme observados na Fig. 3.6. Os testes de referência foram realizados em uma cuba com as amostras imersas em óleo mineral puro, os testes foram realizados com uma carga constante de 22 N e tempo de 1h.

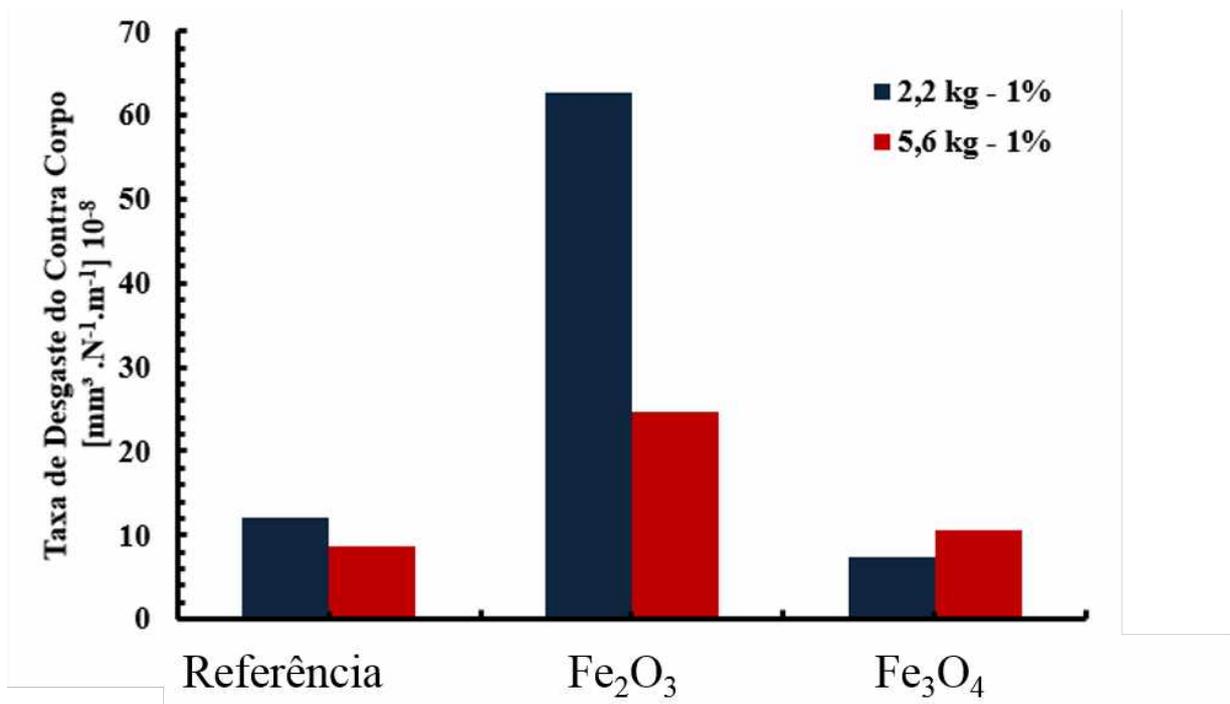


Figura 3.6: Taxa de desgaste contra corpo pré-testes.

Para os ensaios com adição de partícula foram usadas soluções com adição de partículas de Fe_2O_3 e Fe_3O_4 , pesadas em uma balança de precisão Marte (modelo AS 1000) e preparadas em um agitador magnético Fisatom (modelo 752 série 1498660) ambas as soluções tinham concentrações de 1% e 10% em peso de óxido em óleo.

Foram realizados ensaios com carga constante de 22 N e tempo de 1h com 3 repetições para cada tipo de óxido e concentração, conforme Tab. 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros de concentração de óxido dos ensaios.

Óxido	Concentração/peso	Carga
Referência	0%	22 N
Fe_2O_3	1 %	22 N
	10 %	
Fe_3O_4	1 %	22 N
	10 %	

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussões

Após a análise dos resultados observa-se um pequeno aumento no coeficiente de atrito para a concentração de 10% (apresentado na Fig. 4.1) quando utilizado partículas de Fe_2O_3 . Nos mapas triboscópicos 3D mostrados na Fig. 4.2, pode ser observado que os ensaios realizados com o Fe_2O_3 em comparação com o ensaio de referência (óleo mineral puro), para todas as condições houve um processo transiente inicial seguido de uma estabilização durante todo o restante do ensaio. Nota-se um pequeno aumento próximo das extremidades e no centro das imagens, podendo ser em decorrência de óxidos que se acumularam nesses pontos indicados pelas setas brancas.

Sherington e Hayhurst (SHERRINGTON; HAYHURST, 2001), estudaram o efeito da densidade de debris no coeficiente de atrito, onde eles constataram que quando há uma quantidade maior de debris no contato, ou um acúmulo destes, estes contribuiriam para o aumento do coeficiente de atrito. Como evidenciado nos testes com óxido Fe_2O_3 .

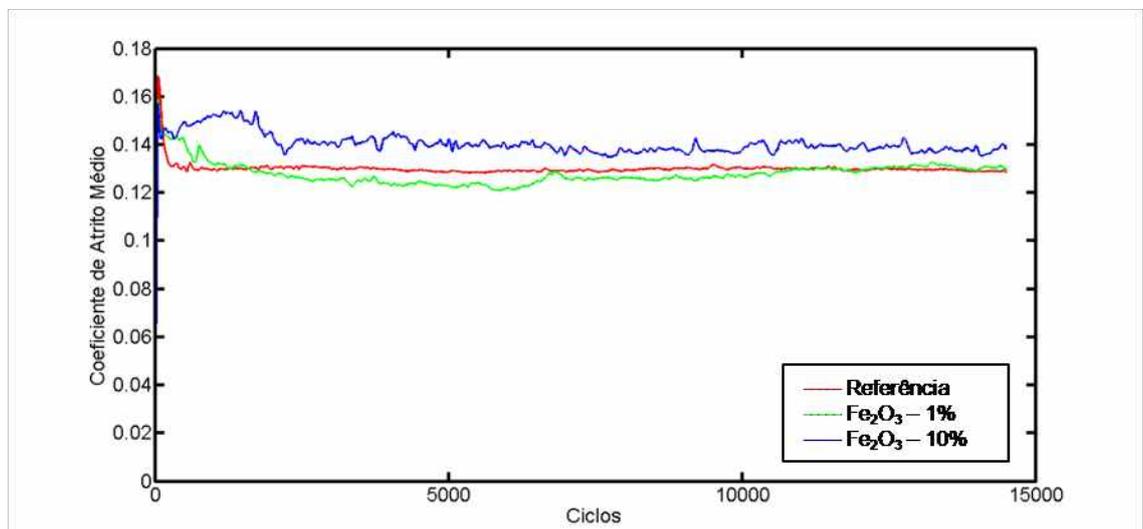


Figura 4.1: Comparativo coeficiente de atrito médio por ciclo para o Fe_2O_3 .

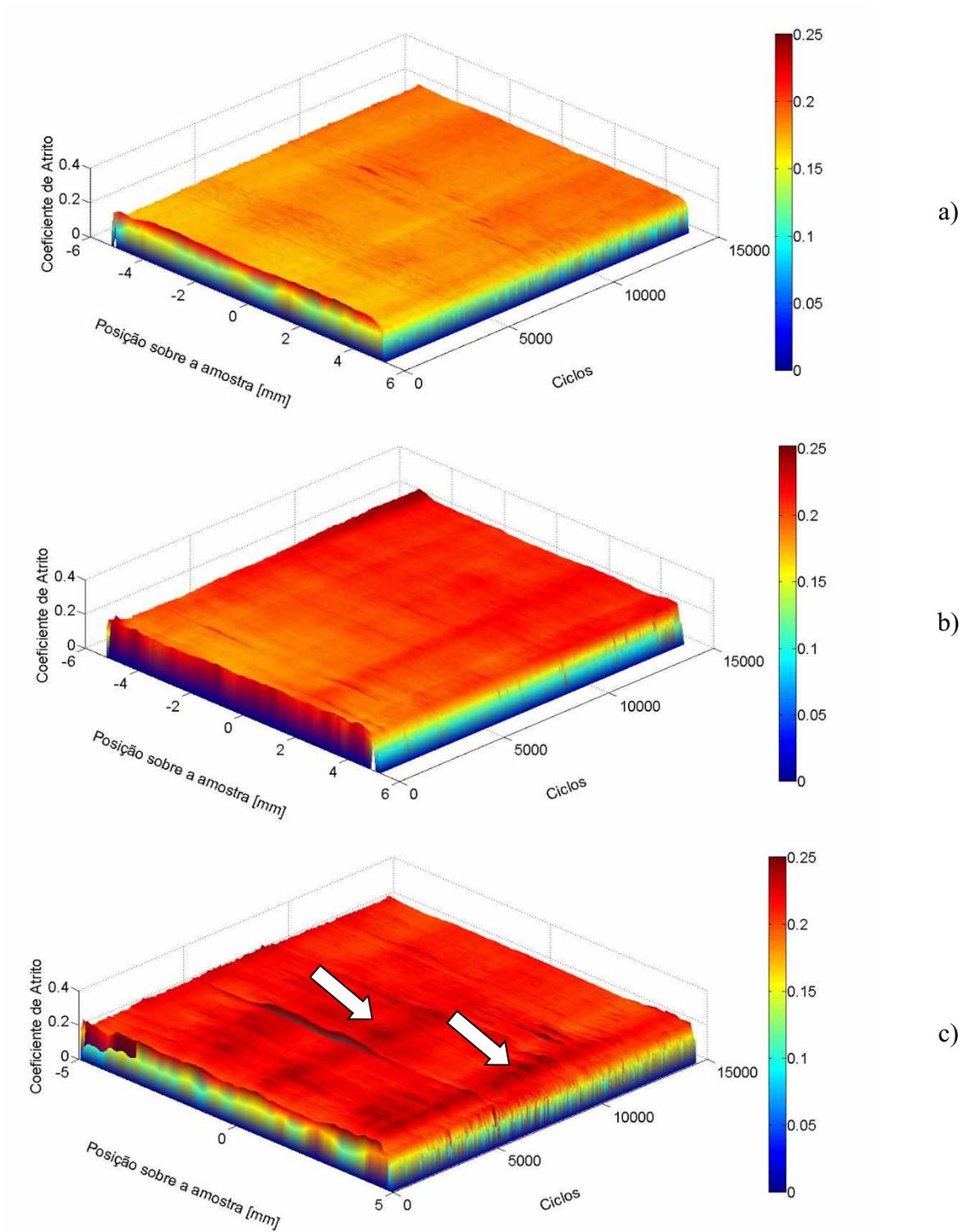


Figura 4.2: Evolução do coeficiente de atrito Fe_2O_3 , (a) Referência, (b) 1%, (c) 10%.

A Fig 4.3 exibe o coeficiente de atrito médio do Fe_2O_3 para o regime permanente. Análises via ANOVA usando o software Statistica evidenciaram que não há diferença significativa entre os valores médios dos coeficientes de atrito e entre os ensaios de referência para a concentração de 1% com uma confiabilidade de 95%. No entanto, para os ensaios com concentração de 10% os valores do coeficiente de atrito apresentaram um aumento de atrito de aproximadamente 8%.

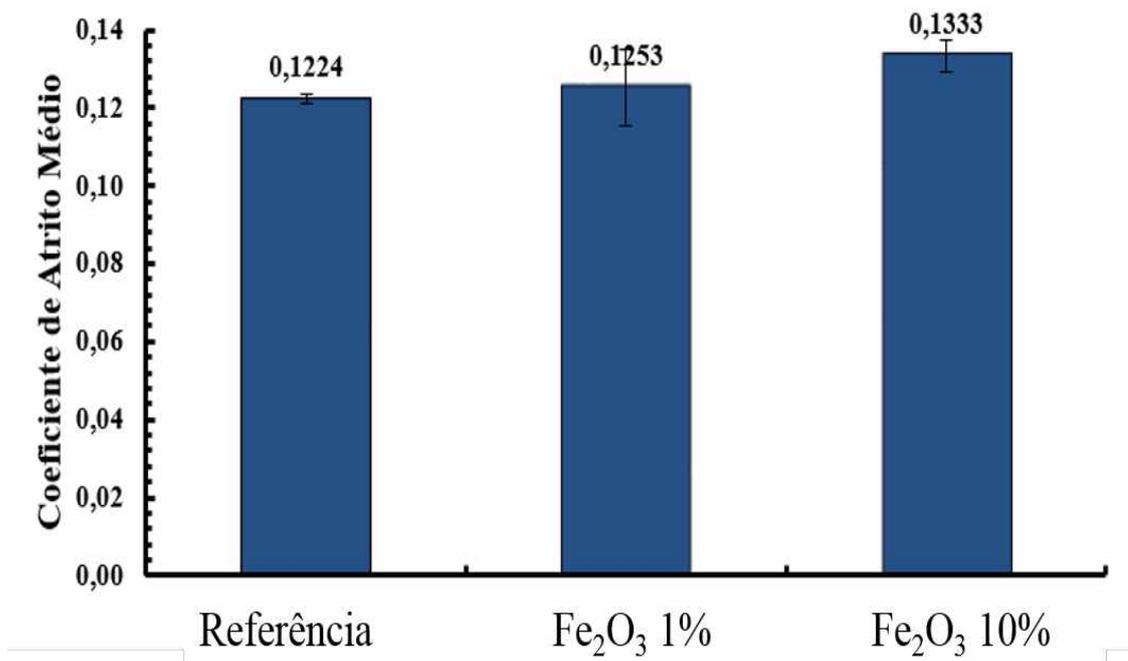


Figura 4.3: Coeficiente de atrito médio no regime permanente para o Fe_2O_3 .

Nos mapas triboscópicos 3D podem ser observados os resultados obtidos com o Fe_3O_4 em comparação com o ensaio de referência Fig. 4.4., onde, assim como para o Fe_2O_3 , para todas as condições ocorreu inicialmente um processo transiente seguido de um regime estável durante o resto do ensaio. Nota-se que o coeficiente de atrito teve valores bem próximos para as 3 condições, sem grandes variações Fig. 4.5.

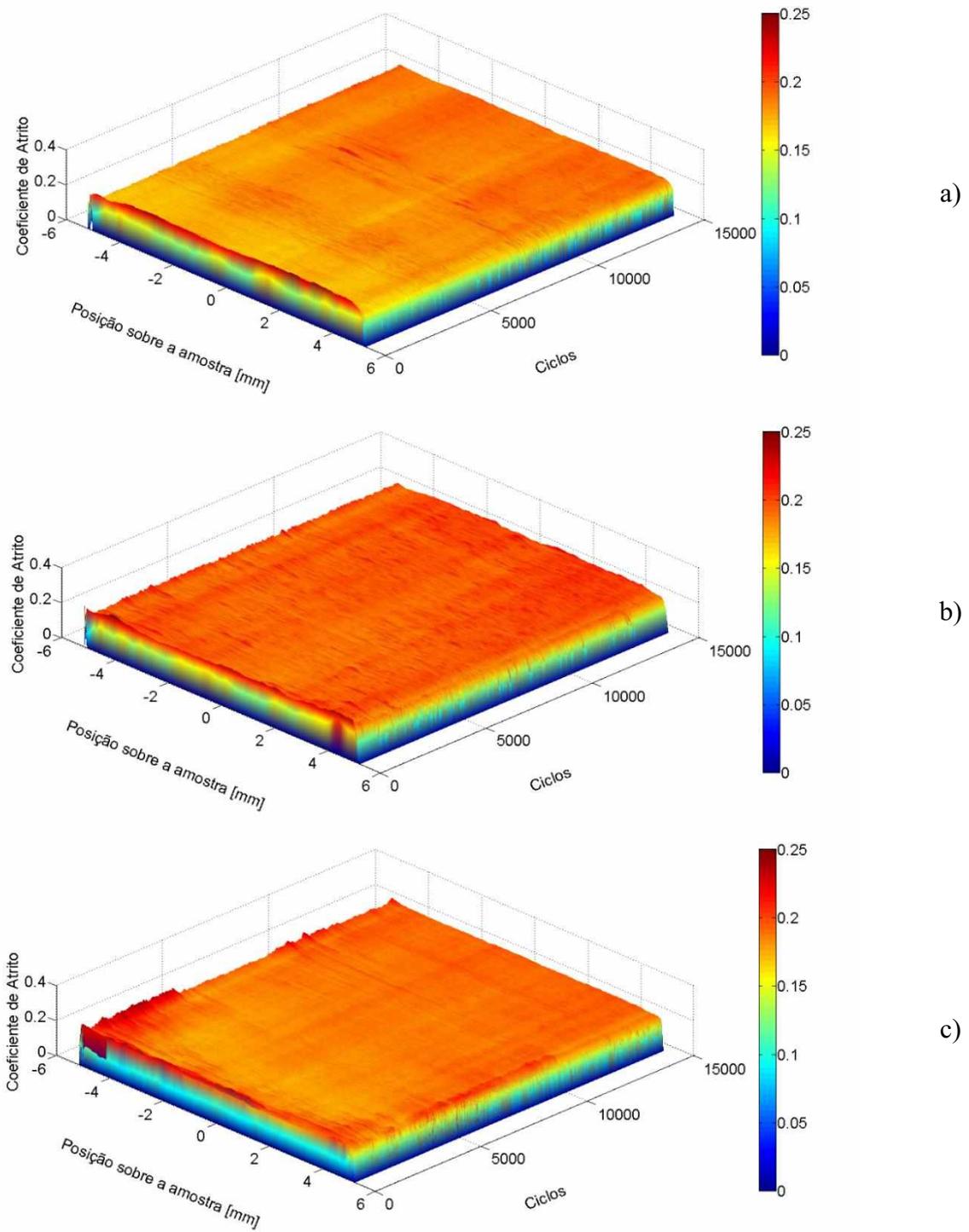


Figura 4.4: Evolução do coeficiente de atrito Fe₃O₄, (a) Referência, (b) 1%, (c) 10%.

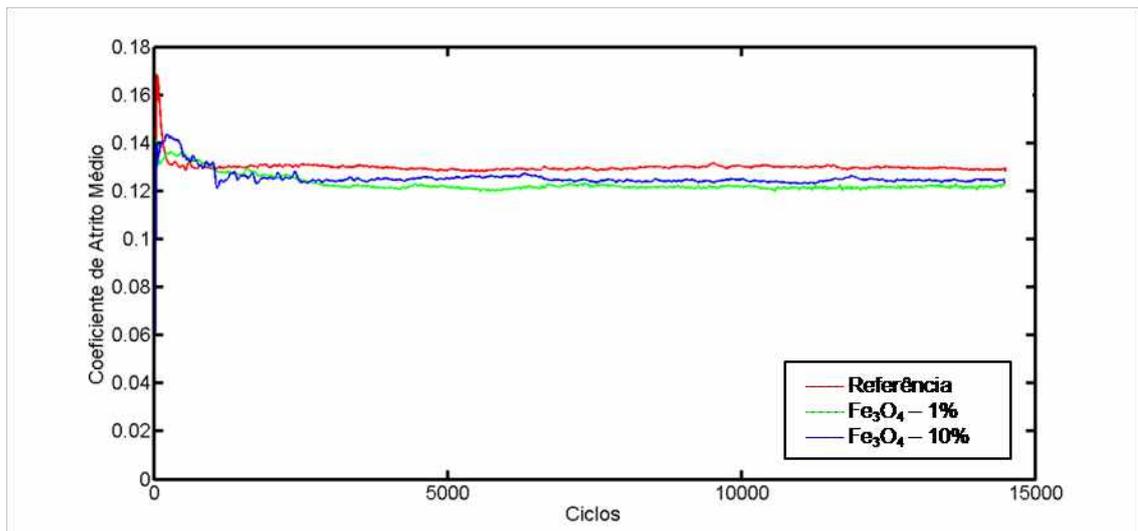


Figura 4.5: Comparativo coeficiente de atrito médio por ciclo para o Fe₃O₄.

A Fig. 4.6 exibe o coeficiente de atrito médio do Fe₃O₄ para o regime permanente. Análises via ANOVA usando o software Statistica evidenciaram que não há diferença entre os valores médios dos coeficientes de atrito entre os ensaios de referência em ambas às concentrações com uma confiabilidade de 95%.

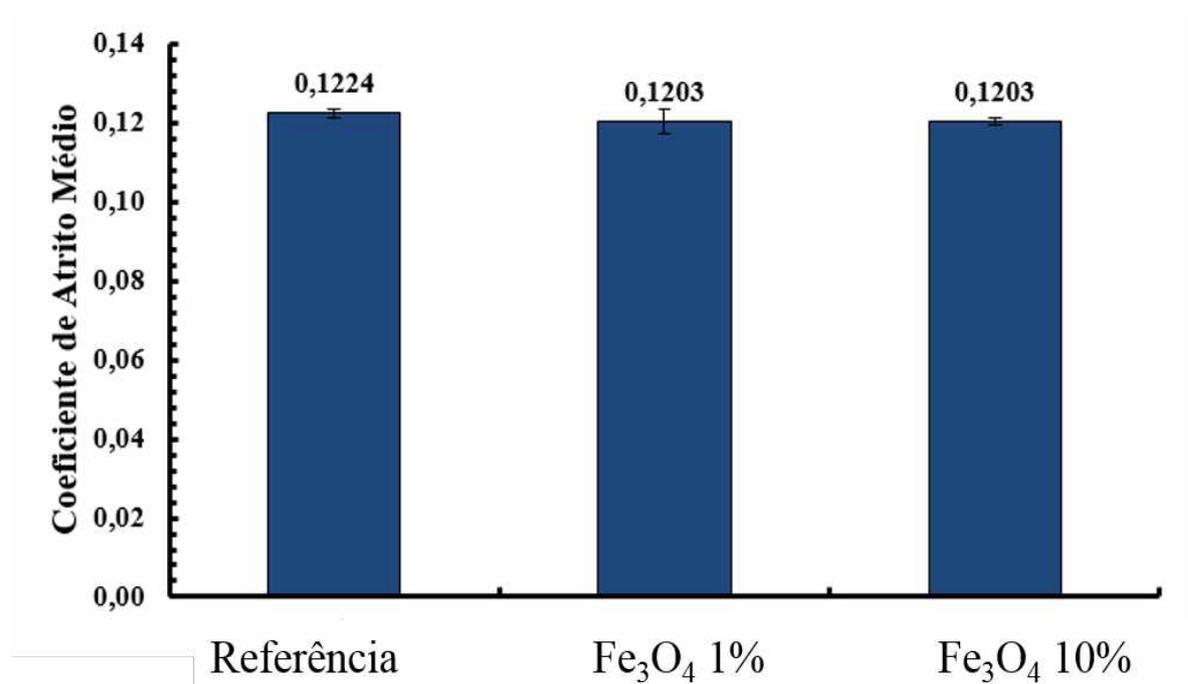


Figura 4.6: Coeficiente de atrito médio no regime permanente para o Fe₃O₄.

A Fig. 4.7 apresenta os potenciais de contato típicos para os ensaios com adição de Fe_2O_3 e também o de referência. Observa-se que para as três condições o potencial de contato permaneceu estável, com valores muito baixos durante todo o ensaio, apresentando apenas ruídos sem atingir valores significativos o que pode caracterizar um ensaio com contato metal-metal, podendo ser uma das razões do aumento do atrito para a concentração de 10% (Fig. 4.3).

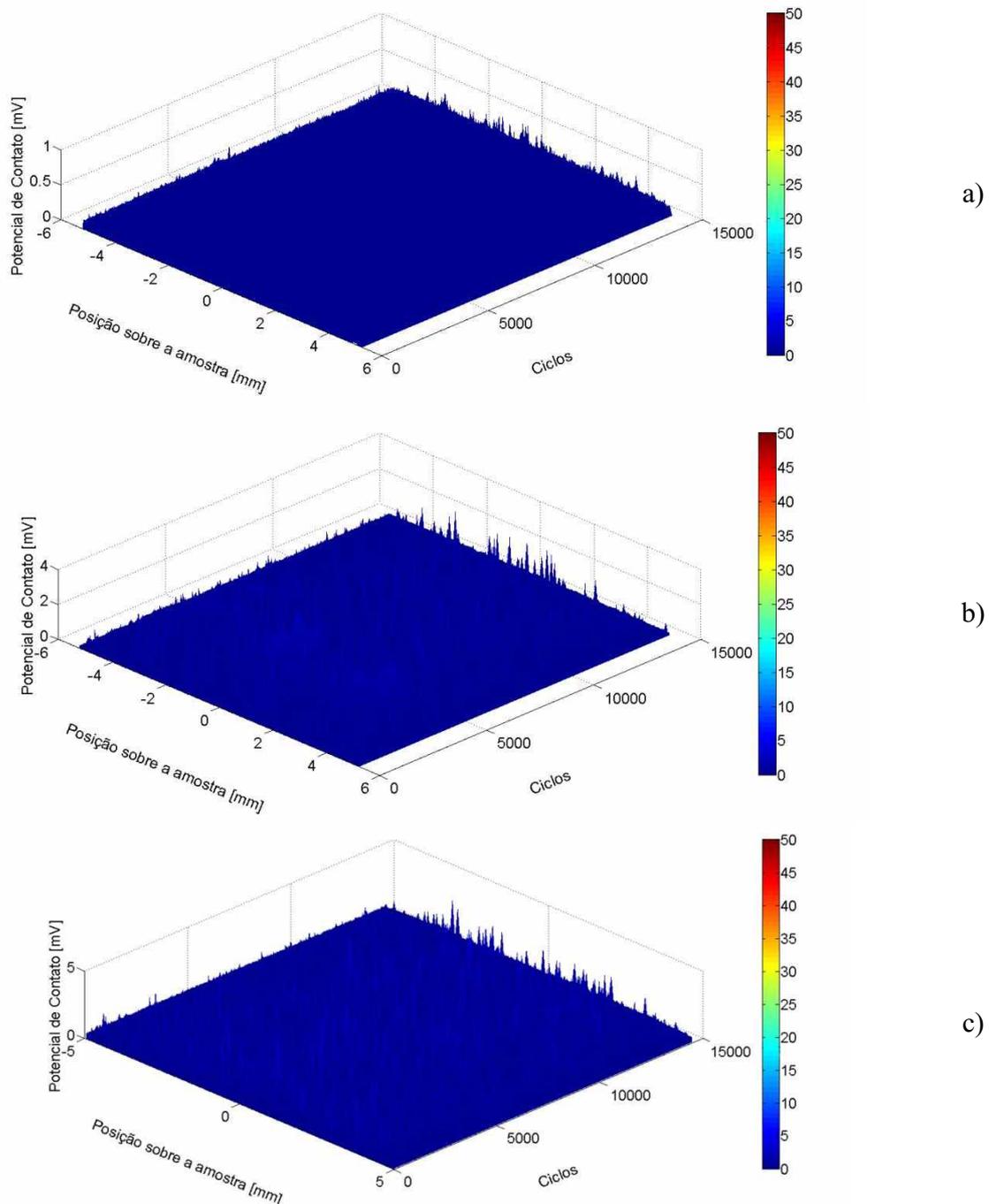


Figura 4.7: Evolução do potencial de contato Fe_2O_3 , (a) Referência, (b) 1%, (c) 10%.

A Fig. 4.8 demonstra os potenciais de contato típicos tanto para os ensaios com adição de Fe_3O_4 como para o ensaio de referência, onde, assim como o Fe_2O_3 o potencial de contato permaneceu estável, com valores muito baixos durante todo o ensaio, apresentando apenas ruídos sem atingir valores significativos.

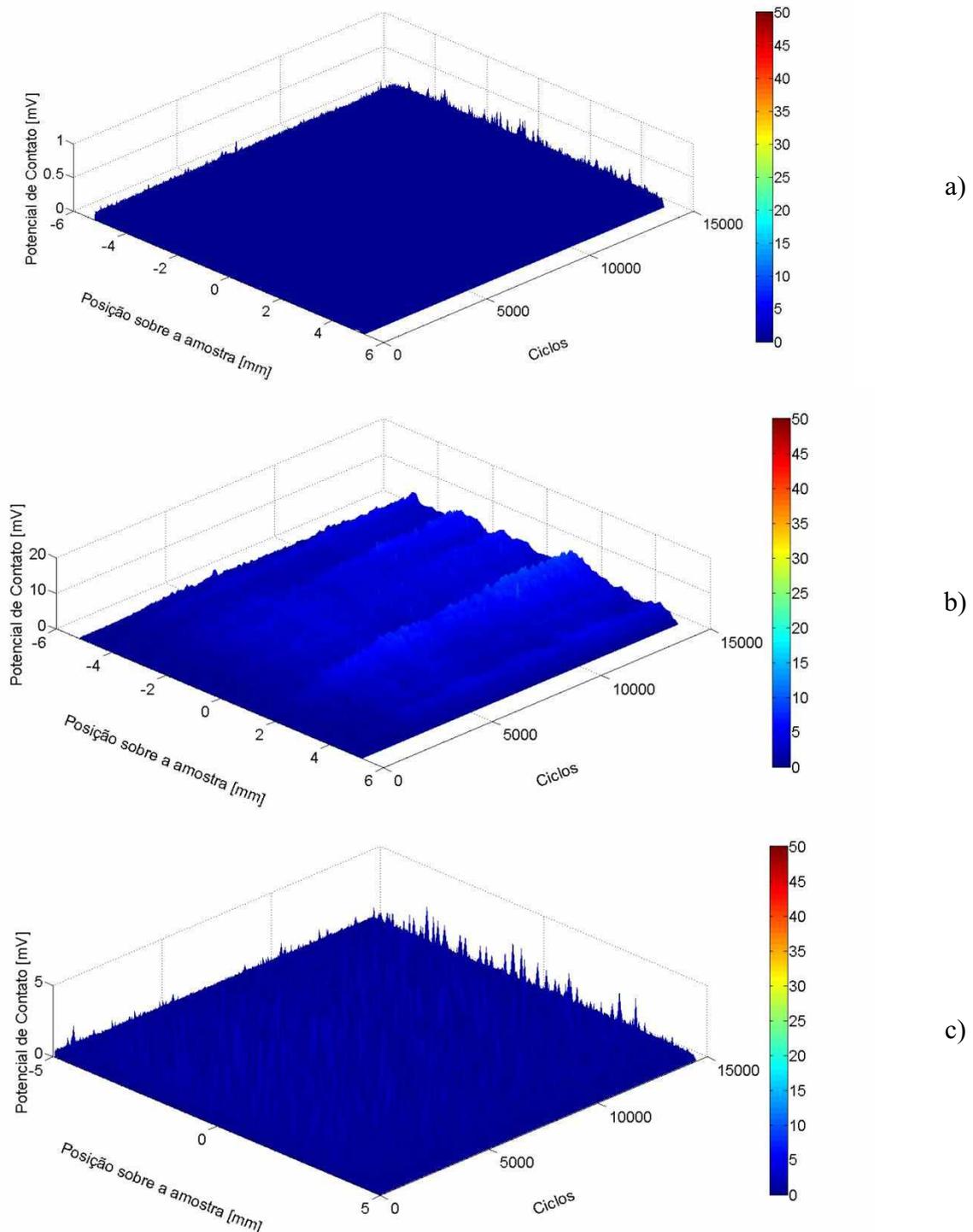


Figura 4.8: Evolução do potencial de contato Fe_3O_4 , (a) Referência, (b) 1%, (c) 10%.

A dureza relativa da partícula abrasiva em relação ao material (H_A/H_M) tem influência considerável sobre a taxa de desgaste do sistema. Geralmente, para materiais heterogêneos, quando a dureza relativa das partículas em relação aos materiais em contato é menor que 0,9 há uma tendência de ocorrer um menor desgaste abrasivo, estando em um regime de desgaste suave com deformação elástica e plástica das superfícies em contato, podendo resultar em desgaste por fadiga superficial e/ou adesão. Porém, quando a dureza relativa é maior que 1,5 o mecanismo de desgaste tende a sofrer uma transição para o regime severo, levando a um aumento no desgaste. Entre esses dois valores, há um regime de transição entre os regimes de desgaste suave e severo (ZUM GAHR, 1987; HUTCHINGS, 1992).

As Fig. 4.9 e Fig. 4.10 mostram um comparativo das marcas de desgaste para as condições de adição de partículas de Fe_2O_3 e Fe_3O_4 analisadas via microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Observa-se que para a condição com adição de Fe_2O_3 – 1% (Fig. 4.9-a) a trilha de desgaste apresenta deformações plásticas conforme indicado pela seta vermelha, nota-se também, que o desgaste foi maior nas bordas da trilha apresentando riscos característicos de desgaste abrasivo, indicado pelas setas amarelas. Para a concentração de 10% (Fig. 4.9-b) observa-se um desgaste mais uniforme por toda a trilha apresentando uma quantidade maior de riscos característicos de desgaste abrasivo, apresentado pelas setas amarelas e ainda pequenos pontos de prováveis indentações (setas brancas).

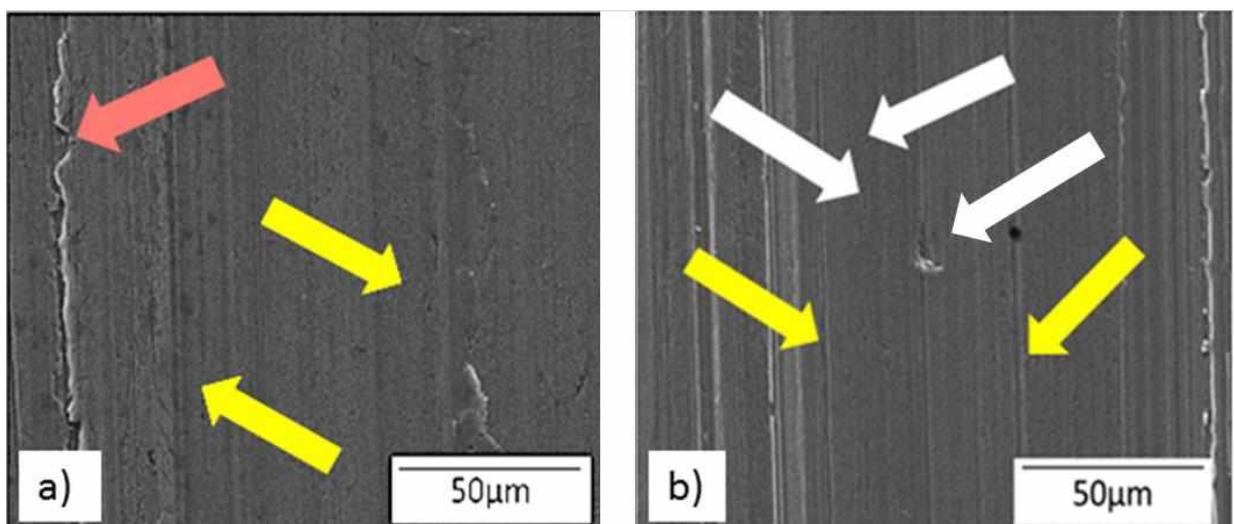


Figura 4.9: Análise via MEV por elétrons secundários das amostras com adição de Fe_2O_3 (a)1%, (b) 10%.

Para a condição com adição de Fe_3O_4 – 1% (Fig. 4.10-a) a marca de desgaste é aparentemente mais lisa (seta vermelha), apenas com deformação plástica. Já para a condição de 10% (Fig. 4.10-b) observou-se pequenas deformações plásticas nas bordas da mesma (seta vermelha), e apresentou também marcas de riscos (setas amarelas).

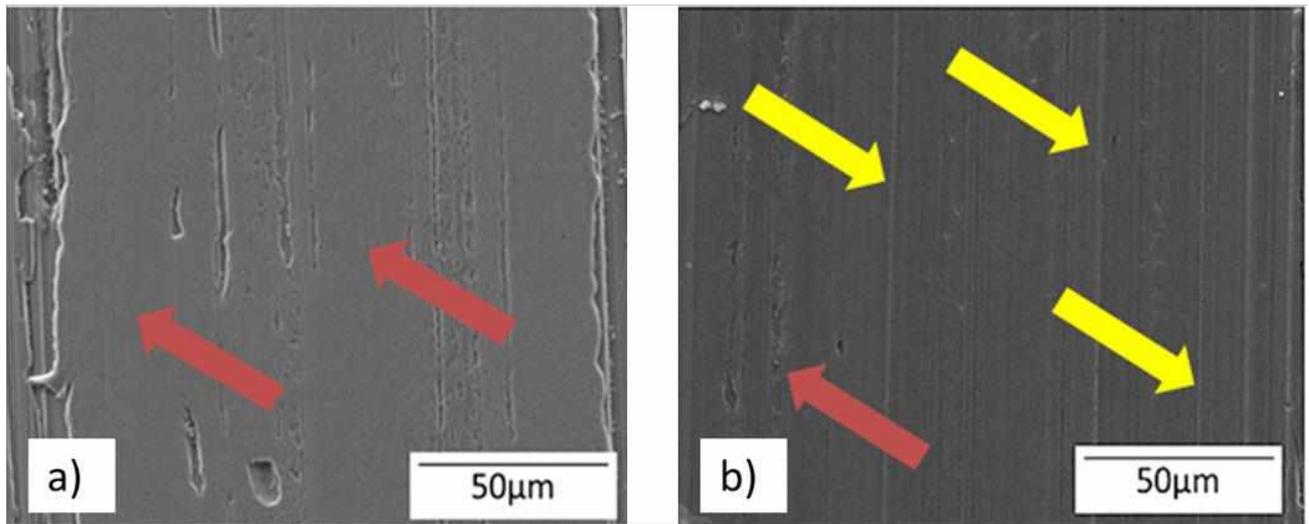


Figura 4.10: Análise via MEV por elétrons secundários das amostras com adição de Fe_3O_4 (a)1%, (b) 10%.

No gráfico de desgaste do contra corpo Fig. 4.11, observa-se um aumento significativo do desgaste, onde o Fe_2O_3 apresentou uma taxa de desgaste muito maior para as concentrações de 1% e 10%, com um aumento de 151, 37% e 591,65% em relação à referência, respectivamente. Já o Fe_3O_4 apresentou uma redução no desgaste para as concentrações de 1% e 10%, uma redução de 79,61% e 34,76% em relação à referência, respectivamente.

Como comentado anteriormente, a dureza relativa da partícula abrasiva em relação ao material (H_A/H_M) tem influência considerável sobre a taxa de desgaste do sistema. Para o Fe_2O_3 a dureza relativa das partículas apresentou valores de aproximadamente 1,7, onde para esse valor a tendência é que ocorra um desgaste com regime severo. Já para o Fe_3O_4 a dureza relativa das partículas apresentou valores entre 0,5 e 0,7, o que caracterizaria um desgaste com regime suave.

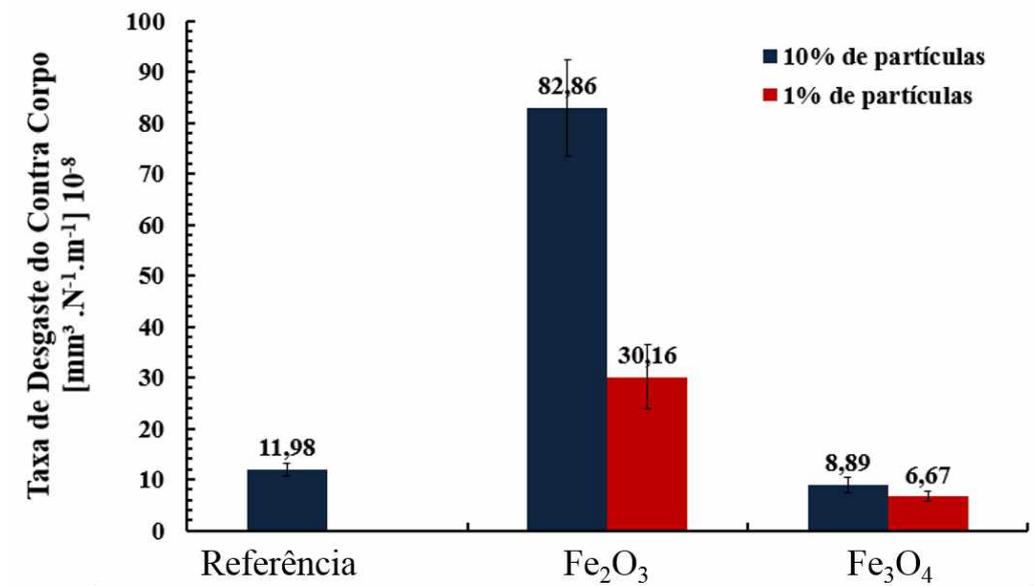


Figura 4.11: Taxa de desgaste do contra corpo.

A Fig. 4.12 exibe as marcas de desgaste nos contra corpos, onde pode ser observado um desgaste maior para o Fe₂O₃-10%. Notam-se marcas que caracterizam um desgaste abrasivo, mostrados pelas setas amarelas, sendo essas marcas mais evidentes no Fe₂O₃-10%, verificou-se também a possível formação de uma tribocamada evidenciado pelas setas brancas, onde para o Fe₂O₃-1% houve uma redução do desgaste do contra corpo na região de formação.

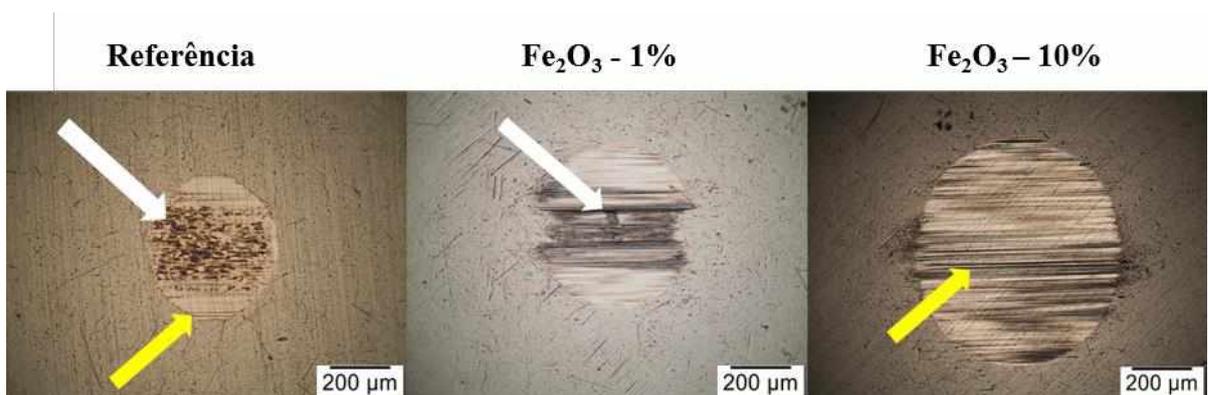


Figura 4.12: Imagem microscópio óptico das marcas de desgaste contra corpo.

A Fig. 4.13 exibe as marcas de desgaste para os contra corpos. Notam-se marcas que caracterizam um desgaste abrasivo, (setas amarelas), ao contrário do Fe₂O₃, as marcas de desgaste foram mais pronunciadas para a concentração de 1%, observou-se também a possível formação de uma tribocamada mostrada pelas setas brancas, onde também houve uma redução do desgaste do contra corpo na região de formação.

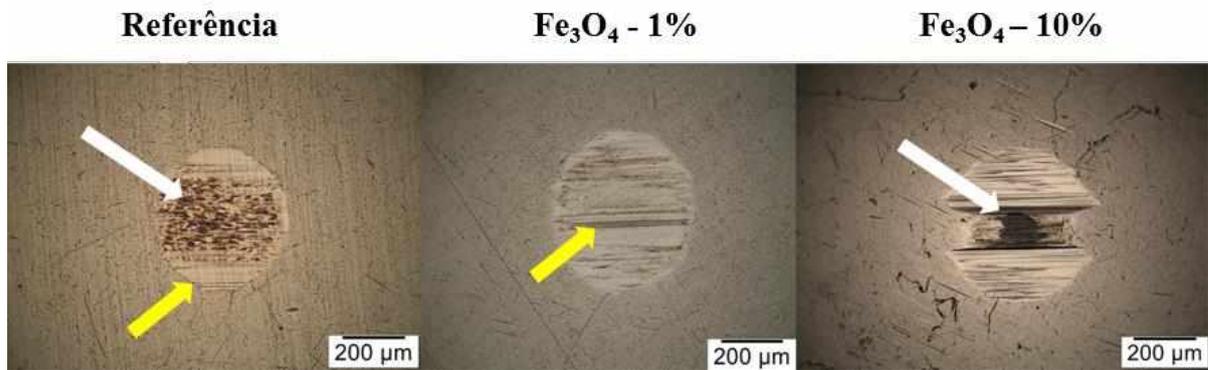


Figura 4.13: Imagem microscópio óptico das marcas de desgaste contra corpo.

Como comentado anteriormente, esses resultados podem ter ocorrido devido à dureza relativa da partícula abrasiva em relação ao material e a fragmentação das partículas de óxido em partículas menores e mais arredondadas. Observou-se que para o Fe_2O_3 na concentração de 1% as partículas poderiam ter se fragmentado em partículas menores diminuindo o desgaste, já para a concentração de 10% a força normal estaria melhor distribuída sobre as partículas, e essa força não seria suficiente para fragmentá-las, indentando-as na amostra e intensificando o desgaste. Para o Fe_3O_4 a dureza das partículas é próxima da dureza da amostra o que caracterizou teoricamente um regime suave, com o aumento da concentração a força normal seria melhor distribuída sobre as partículas diminuindo a fragmentação das mesmas e aumentando o desgaste.

O que sugere que existe uma influência da presença de óxidos no comportamento tribológico, onde principalmente a dureza relativa entre partícula abrasiva e superfícies em contato, se mostrou o fator determinante no desgaste dos corpos.

CAPÍTULO V

Conclusão

Ao analisar os resultados obtidos, a adição de óxidos de ferro mostrou ter grande influência no desgaste por deslizamento lubrificado.

Quando adicionado partículas de Fe_2O_3 com concentração de 1%, não houve variação no atrito, por outro lado houve um aumento da taxa de desgaste de 151%. Para a adição de Fe_2O_3 com concentração de 10% ocorreu um aumento no atrito de 8% e um aumento muito maior na taxa de desgaste de 591%.

Quando adicionado partículas de Fe_3O_4 , os resultados se mostraram contrários, para ambas as concentrações não houve variações significativas para o atrito, porem promoveram uma redução da taxa de desgaste de 79,61% quando adicionadas para a concentração de 1% e uma redução de 34% para a concentração de 10%.

Sugerindo que a adição de partículas de óxido tem influência no desgaste por deslizamento, onde a dureza relativa deles em relação aos corpos, tamanho e concentração foi o fator determinante.

CAPÍTULO VI

Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Estudar a influência da carga normal aplicada sobre as partículas com a variação da taxa de desgaste.
- Estudar o comportamento tribológico com a utilização de outros óxidos.
- Avaliar o desgaste das amostras.

Capítulo VII

Referências bibliográficas

- ASM, I. **ASM Handbook: Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology**. [s.l.: s.n.].
- BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**. [s.l.] CRC Press, 2001.
- CHANDRASEKARAN, T. Grinding abrasive wear and associated particle size effect. **Materials Science and Technology**, v. 8, p. 722–728, 1992.
- DA SILVA, W. M.; BINDER, R.; DE MELLO, J. D. B. Abrasive wear of steam-treated sintered iron. **Wear**, v. 258, n. 1–4, p. 166–177, jan. 2005.
- HALLING, J. **Principles of Tribology**. [s.l.: s.n.].
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. [s.l.] Edward Arnold, 1992.
- JOST, H. P. Tribology — Origin and future. **Wear**, v. 136, n. 1, p. 1–17, fev. 1990.
- LANDMAN, U. et al. Atomistic Mechanisms and Dynamics of Adhesion, Nanoindentation, and Fracture. **Science**, v. 248, n. 4954, p. 454–461, abr. 1990.
- MISRA, A.; FINNIE, I. On the size effect in abrasive and erosive wear. **Wear**, v. 65, n. 3, p. 359–373, jan. 1981.
- ODI-OWEI, S.; ROYLANCE, B. J. The effect of solid contamination on the wear and critical failure load in a sliding lubricated contact. **Wear**, v. 112, n. 3–4, p. 239–255, nov. 1986.
- OKTAY, S. T.; SUH, N. P. Wear Debris Formation and Agglomeration. **Journal of Tribology**, v. 114, n. 2, p. 379, 1992.
- OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. **Efeito De Partículas De Desgaste No**. [s.l.: s.n.].
- PROFITO, F. J. **Modelagem Unidimensional Do Regime Misto De Lubrificação Aplicada 77 a Superfícies Texturizadas**. [s.l.] Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2010.

- RAPOPORT, L. et al. Superior tribological properties of powder materials with solid lubricant nanoparticles. **Wear**, v. 255, n. 7–12, p. 794–800, ago. 2003.
- SHERRINGTON, I.; HAYHURST, P. Simultaneous observation of the evolution of debris density and friction coefficient in dry sliding steel contacts. **Wear**, v. 249, n. 3–4, p. 182–187, maio 2001.
- STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. [s.l.] Elsevier Science, 2005.
- SUH, N. P. **Tribophysics**. [s.l.] Prentice-Hall, 1986.
- TOMIMOTO, M.; MIZUHARA, K.; YAMAMOTO, T. Effect of Particles on Lubricated Friction - Verification of Dead Time Phenomenon and Friction Theory. **Tribology Transactions**, v. 45, n. 1, p. 94–102, 2002.
- WILLIAMS, J. **Engineering Tribology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- WILLIAMS, J. A. **Engineering tribology**. [s.l.] Oxford University Press, 1994.
- YUAN, C. Q. et al. The characterization of wear transitions in sliding wear process contaminated with silica and iron powder. **Tribology International**, v. 38, n. 2, p. 129–143, 2005.
- ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. [s.l.] Elsevier Science, 1987.