

Investigação das propriedades de resistência do desgaste abrasivo pela utilização de minerais específicos como componentes da solução abrasiva no ensaio com esfera rotativa fixa

Investigation of abrasive wear resistance properties by using specific minerals as components of the abrasive solution in the fixed rotating ball test

Investigación de las propiedades de resistencia al desgaste abrasivo mediante el uso de minerales específicos como componentes de la solución abrasiva en la prueba de bola giratoria fija

Recebido: 09/12/2024 | Revisado: 01/02/2025 | Aceitado: 05/02/2025 | Publicado: 07/02/2025

Gustavo Evangelista da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0284-8016>
Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil
E-mail: gustavoe.silva67@gmail.com

José Gedael Fagundes Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6018-3417>
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Brasil
E-mail: gedaelfagundes@gmail.com

Flavio Luiz costa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6409-9365>
Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil
E-mail: flaviolcosta@gmail.com

Resumo

Setores industriais, em parceria com universidades, têm estudado o desgaste abrasivo. Este estudo tem o objetivo de analisar a ação do desgaste sobre as superfícies dos equipamentos, por meio da medição de parâmetros como área, diâmetro e volume desgastado, resultando na determinação do coeficiente de desgaste. Realizou-se uma pesquisa experimental laboratorial, na qual, foram utilizados três minerais abrasivos: gnaisse, rejeito de minério de ferro e carboneto de silício. Os materiais passaram por cominuição e peneiramento, coletando-se o passante da malha 400 mash. Os ensaios de desgaste foram realizados em corpos de prova de aço ASTM A-36, preparados no Centro Tecnológico (CTec) da Universidade do Estado de Minas Gerais, campus João. Foram definidos quatro ensaios de desgaste, com distâncias de deslizamento de 25, 50 e 100 metros. O equipamento utilizado combinou força normal com a carga C para avaliar o desgaste abrasivo. Durante os ensaios, as polpas abrasivas foram aplicadas gota a gota na área de contato entre os corpos de prova e a esfera fixa. Os resultados mostraram que o rejeito de minério de ferro e o gnaisse apresentaram variação crescente no coeficiente de desgaste, com índices distintos. O carboneto de silício também apresentou crescimento no coeficiente de desgaste, mas, no último ensaio, houve uma redução. Este estudo demonstra a viabilidade do equipamento desenvolvido para simular o desgaste abrasivo, fornecendo dados importantes sobre os fatores que influenciam o desgaste e a obtenção do regime permanente de desgaste.

Palavras-chave: Minerais abrasivos; Aço ASTM A-36; Coeficiente de desgaste; Simulação de desgaste; Regime permanente.

Abstract

Industrial sectors, in partnership with universities, have studied abrasive wear. This study aims to analyze the action of wear on equipment surfaces, by measuring parameters such as area, diameter, and worn volume, resulting in the determination of the wear coefficient. Experimental laboratory research was carried out, in which three abrasive minerals were used: gneiss, iron ore waste, and silicon carbide. The materials underwent comminution and sieving, collecting the 400-mash pass-through. The wear tests were carried out on ASTM A-36 steel specimens, prepared at the Technological Center (CTec) of the State University of Minas Gerais, João Monlevade campus (UEMG-João Monlevade). Four wear tests were defined, with sliding distances: 25, 50, and 100 meters. The equipment used combined normal force with load C to evaluate abrasive wear. During the tests, the abrasive slurries were applied drop by drop to the contact area between the test specimens and the fixed sphere. The results showed that iron ore waste and gneiss showed increasing variation in wear coefficient, with different rates. There was an increase in the

wear coefficient in silicon carbide tests, but in the last test, there was a reduction. This study demonstrates the feasibility of the equipment developed to simulate abrasive wear, providing important data on the factors that influence wear and the achievement of a permanent wear regime.

Keywords: Abrasive minerals; ASTM A-36 Steel; Wear coefficient; Wear simulation; Permanent regime.

Resumen

Los sectores industriales, en colaboración con las universidades, han estudiado el desgaste abrasivo. Este estudio tiene como objetivo analizar la acción del desgaste sobre las superficies de los equipos, midiendo parámetros como área, diámetro y volumen desgastado, dando como resultado la determinación del coeficiente de desgaste. Se llevó a cabo una investigación experimental de laboratorio, en la que se utilizaron tres minerales abrasivos: gneis, desechos de mineral de hierro y carburo de silicio. Los materiales fueron sometidos a trituración y tamizado, recogiendo el paso de malla de 400 µm. Se realizaron ensayos de desgaste en probetas de acero ASTM A-36, preparadas en el Centro Tecnológico (CTec) de la Universidad Estadual de Minas Gerais, campus João Monlevade (UEMG - João Monlevade). Se definieron cuatro pruebas de desgaste, con distancias de deslizamiento de 25, 50 y 100 metros. El equipo utilizado combinó fuerza normal con carga C para evaluar el desgaste abrasivo. Durante las pruebas, las suspensiones abrasivas se aplicaron gota a gota en el área de contacto entre las muestras de prueba y la esfera fija. Los resultados mostraron que los desechos de mineral de hierro y el gneis mostraron una variación creciente en el coeficiente de desgaste, con diferentes tasas. El carburo de silicio también mostró un aumento en el coeficiente de desgaste, pero en la última prueba hubo una reducción. Este estudio demuestra la viabilidad del equipo desarrollado para simular el desgaste abrasivo, proporcionando datos importantes sobre los factores que influyen en el desgaste y el logro de un régimen de desgaste permanente.

Palabras clave: Minerales abrasivos; Acero ASTM A-36; Coeficiente de desgaste; Simulación de desgaste; Régimen permanente.

1. Introdução

Nos tempos atuais, estamos testemunhando um aumento considerável no interesse por estudar os diversos modos de desgaste sobre peças e equipamentos industriais. No cenário industrial, a ocorrência de prejuízos devido ao desgaste de peças e equipamentos é um desafio premente. Os desgastes exigem reparos frequentes e causam a paralisação de equipamentos, resultando em impactos financeiros consideráveis. Visando superar esses desafios, profissionais das áreas de engenharia e técnicos mecânicos têm se empenhado na busca contínua por soluções que aumentem a vida útil de máquinas e equipamentos expostos ao desgaste abrasivo. Esse esforço é particularmente relevante para grandes empresas, que almejam reduzir os impactos financeiros decorrentes do desgaste (Oliveira, 2015). Um exemplo deste é a indústria siderúrgica que lida com muitos abrasivos e há desgaste nas máquinas e equipamentos siderúrgicos (Pinto Jr. et al., 2018). Por outro lado, os centros de pesquisa e universidades têm se dedicado a estudos voltados para a mitigação dos impactos dos desgastes abrasivos. Nesse contexto, estabelecem parcerias com empresas visando desenvolver projetos de pesquisa e extensão. Essa colaboração tem o propósito de estimular futuros profissionais a aprofundar seu entendimento sobre o desgaste e a trabalhar na construção de equipamentos que possam operar por períodos mais prolongados. Dessa forma, busca-se reduzir os custos associados a manutenções inesperadas e à substituição de peças indesejadas.

O desgaste é caracterizado como uma deterioração progressiva de superfícies sólidas causada pelo movimento relativo entre materiais distintos, resultando na perda gradual de massa (Cozza, 2006). Este fenômeno permeia diversos segmentos industriais, afetando elementos em contato mútuo durante o movimento, e propagando-se entre peças e equipamentos. O desgaste abrasivo é um fenômeno que ocorre a partir da movimentação de partículas abrasivas duras contra uma superfície, seja ela metálica ou não metálica, ocorrendo de maneira natural ou forçada, provocando deslocamento, amassamento ou perda de massa nas peças em questão.

A decisão de aprofundar os estudos relacionados ao controle e compreensão do desgaste de peças e equipamentos possui importância significativa para a indústria. A necessidade de aprofundar esse entendimento justifica-se pela sua

contribuição necessária na prevenção e controle de danos e falhas nos processos industriais. Neste contexto, este estudo foca especificamente na investigação do desgaste abrasivo, uma das áreas mais impactadas pelos efeitos do desgaste.

Dentre as diversas formas de desgaste, o desgaste abrasivo é o mais prevalente, podendo representar até 50% dos casos, sendo considerado o tipo mais severo de desgaste (Oliveira, 2015). O desgaste microabrasivo é caracterizado por partículas de tamanho médio entre 3 e 6 μm , enquanto o desgaste abrasivo é caracterizado por partículas abrasivas com tamanhos variando aproximadamente de 50 a 250 μm (Cozza, 2011).

A avaliação dos ensaios de desgaste abrasivo tem como principal objetivo mensurar o coeficiente de desgaste gerado por diferentes materiais abrasivos. No presente estudo, os materiais abrasivos empregados foram o gnaiss, o carboneto de silício e o rejeito de minério de ferro.

O gnaiss é uma rocha metamórfica composta predominantemente por minerais como quartzo, feldspato e mica. O rejeito de minério de ferro é um resíduo gerado durante o processo de beneficiamento do minério de ferro, caracterizando-se como um subproduto da mineração. Já o carboneto de silício é um material sintético obtido através de processos de produção em fornos de resistência elétrica. Esses materiais, por possuírem minerais de grande dureza em suas composições, são ótimos agentes de abrasão. No caso dos gnaisses eles são do grupo do quartzo-feldspático, que em sua composição contém 20% deste grupo. O rejeito de minério de ferro contém predominantemente areia, composta majoritariamente por quartzo, além de óxidos e hidróxidos de ferro que não foram removidos durante o processo de beneficiamento do minério de ferro. O carboneto de silício é obtido a partir da combinação de carbono com quartzo ou sílica, minerais caracterizados por sua alta dureza e abundância na natureza. O processo de obtenção do carboneto de silício ocorre em altos fornos, onde temperaturas elevadas são aplicadas. Após o resfriamento da mistura, o material é obtido, sendo utilizado tanto como abrasivo quanto como material refratário em altos fornos.

É fundamental compreender que o desgaste não se limita apenas à remoção de material; frequentemente, ele também acarreta alterações na geometria e na microestrutura do material devido à deformação plástica e a outros mecanismos de degradação superficial, como a fadiga de contato e a adesão (Bayer, 1994).

A variedade de formas de desgaste é complexa de se entender, exigindo uma exploração profunda das variáveis envolvidas no processo, como dureza, tenacidade, ductilidade, módulo de elasticidade, tensão de escoamento, propriedades relacionadas à fadiga, estrutura e composição das superfícies em contato, geometria e pressão de contato, temperatura, coeficiente de atrito, acabamento superficial, presença de lubrificante e componentes (Stoeterau, 2004).

O presente trabalho aborda um tema relevante para diversos setores industriais, especialmente o setor de mineração, onde os equipamentos são frequentemente submetidos a altas taxas de desgaste. Este estudo tem o objetivo de analisar a ação do desgaste sobre as superfícies dos equipamentos, por meio da medição de parâmetros como área, diâmetro e volume desgastado, resultando na determinação do coeficiente de desgaste. Uma compreensão aprofundada dos mecanismos de desgaste abrasivo é necessária para obter informações confiáveis que possam melhorar a resistência e a durabilidade dos componentes utilizados em ambientes altamente agressivos, onde as taxas de desgaste são superiores às encontradas em áreas menos exigentes. Este estudo se concentra na análise da ação do desgaste sobre as superfícies dos equipamentos, por meio da medição de parâmetros como área, diâmetro e volume desgastado, resultando na determinação do coeficiente de desgaste específico para o local onde ocorreu o processo abrasivo. Essas informações contribuirão para uma série de estudos interligados, fornecendo uma base consistente para a otimização do desempenho e da longevidade dos equipamentos.

2. Material e Métodos

Realizou-se uma pesquisa experimental laboratorial de natureza quantitativa (Pereira et al., 2018; Gil, 2017; Shitsuka et al., 2014), na qual, foram utilizados três minerais abrasivos: gnaiss, rejeito de minério de ferro e carboneto de silício.

Com a intenção de compreender os processos de desgaste, foi desenvolvido um equipamento que simula o ensaio de desgaste abrasivo por esfera rotativa fixa. Este equipamento é composto por um eixo de rotação que sustenta uma esfera, a qual é posta em movimento rotativo controlado por um software específico. Durante o ensaio, um corpo de prova é comprimido contra a esfera em movimento, gerando as chamadas calotas de desgaste. Essa configuração permite a investigação detalhada das diferentes formas de desgaste, proporcionando uma análise precisa das condições abrasivas a que os materiais são submetidos.

A avaliação dos testes de desgaste abrasivo visa principalmente medir o coeficiente de desgaste dos materiais em estudo, permitindo comparar o desgaste causado por cada tipo de pó abrasivo analisado. No ensaio de desgaste abrasivo, foram testados três tipos de materiais abrasivos: gnaíse, resíduo de minério de ferro e carboneto de silício. Todas as amostras dos materiais abrasivos testados, bem como os ensaios de desgaste abrasivo, foram realizadas no laboratório do Centro Tecnológico (CTec) da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) – Unidade João Monlevade - MG.

A seguir, apresenta-se a descrição do equipamento utilizado nos ensaios abrasivos, bem como a descrição dos materiais ensaiados e todos os procedimentos metodológicos adotados para a obtenção dos dados. É importante ressaltar que o desgaste gerado está intimamente relacionado à distância percorrida. No presente trabalho, foram definidas as distâncias de 25, 50 e 100 metros. Essas distâncias foram mantidas constantes para todos os materiais abrasivos testados, garantindo que todas as demais condições de ensaio fossem semelhantes para cada material. Dessa forma, todos os ensaios foram executados atendendo aos critérios de semelhança.

Ao atender às condições de semelhança dos ensaios para diferentes materiais abrasivos, as calotas de desgaste geradas podem apresentar características dimensionais e formatos circulares semelhantes (Oliveira, 2015). Para garantir a manutenção dos critérios de semelhança, os testes de desgaste foram realizados de forma a atender consistentemente os critérios de distância percorrida, gotejamento da polpa abrasiva e rotação constante de 100 rpm em todos os ensaios, para os três materiais abrasivos testados.

2.1 Construção do Equipamento e suas Formas de Desgaste

O Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior, do curso de Engenharia de Minas da Universidade do Estado de Minas Gerais, liderou o projeto e construção do equipamento de desgaste abrasivo. Este equipamento, denominado "Máquina de Desgaste Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa", atende os requisitos para execução de ensaios de desgaste proposto pela ISO 26464 (Oliveira, 2015). Ele permite a análise das propriedades de desgaste abrasivo, como riscamento, rolamento, e riscamento + rolamento (misto). Comparando a outros equipamentos de simulação de desgaste abrasivo, que utiliza a técnica de disco de borracha com areia seca, o ensaio realizado nesse tipo de equipamento é considerado impróprio para simular desgaste abrasivo, pois sob baixas tensões a três corpos partículas abrasivas podem ficar incrustadas na roda, reproduzindo localmente uma situação de desgaste abrasivo a dois corpos (Hutchings, 1998).

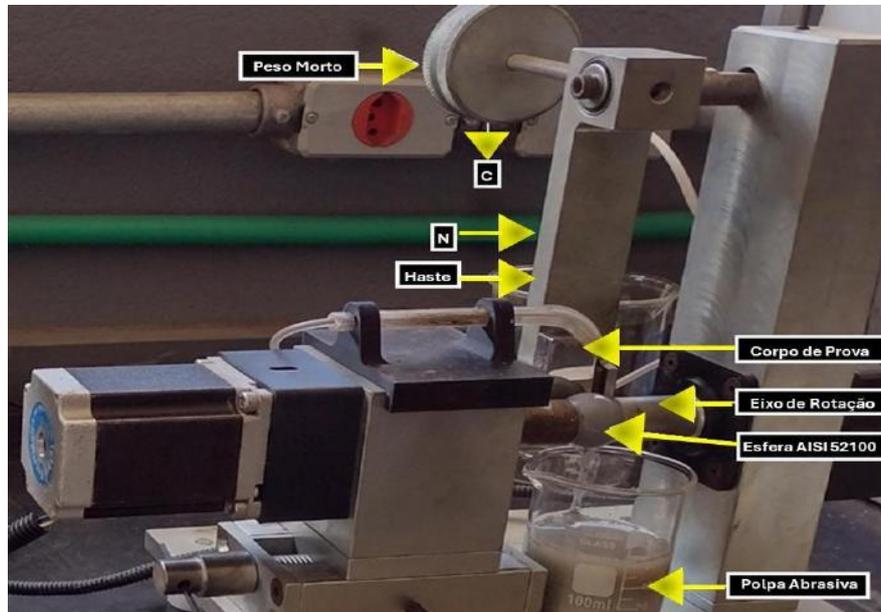
A classificação do tipo de desgaste originado por partículas abrasivas nos corpos de prova foi baseada nas marcas deixadas nas calotas geradas durante o processo. O fenômeno de "desgaste misto", onde a área total de contato da esfera e da polpa abrasiva com os corpos de prova é representada por A_t , uma área de rolamento representada por A_r e uma área de atuação por riscamento, representado por A_g , é uma das formas de desgastes sofridos. A interação entre essas áreas é representada pelos índices "t", "r" e "g", inferiorizando respectivamente a "rolling" e "grooving" (Cozza, 2011).

2.2 Mecanismo de Funcionamento do Equipamento

O equipamento de desgaste por esfera fixa opera aplicando uma força normal N através de um peso morto, combinado com uma carga C . Essas forças pressionam a peça que mantém os corpos de prova, fazendo-os entrar em contato

com a esfera fixa no eixo de rotação do equipamento. Durante esse processo, uma polpa abrasiva, composta pelos minerais previamente descritos, é gotejada sobre a área de contato. A Figura 1 ilustra o equipamento de desgaste abrasivo em operação.

Figura 1 - Equipamento de ensaio de desgaste abrasivo.



Fonte: Dados da pesquisa.

A máquina da Figura 1 é controlada por um software no qual são inseridas as informações sobre a distância de deslizamento S , a força normal N e a velocidade de rotação (RPM). Com esses parâmetros configurados, inicia-se o teste de simulação de desgaste. Após cada ensaio, é necessário afrouxar a esfera, girá-la e reapertá-la, garantindo que a esfera não permaneça em um único ponto de contato. Esse procedimento também ajuda a remover áreas da seção da esfera que possam estar oxidadas, o que poderia introduzir erros no processo.

2.3 Corpos de Prova

Para os ensaios, foram utilizados corpos de prova de aço carbono ASTM A-36 com dimensões de 40x20x10 mm. Esses corpos de prova foram usinados e passaram por processos de lixamento e polimento. Foram realizados vários passos de lixamento, utilizando lixas de diferentes granulometrias, seguidas por polimento com massa diamantada. A Figura 2 mostra os corpos de prova em diferentes projeções de lixamento e polimento.

Figura 2 - Corpos de prova após sua preparação de lixamento da sua superfície.



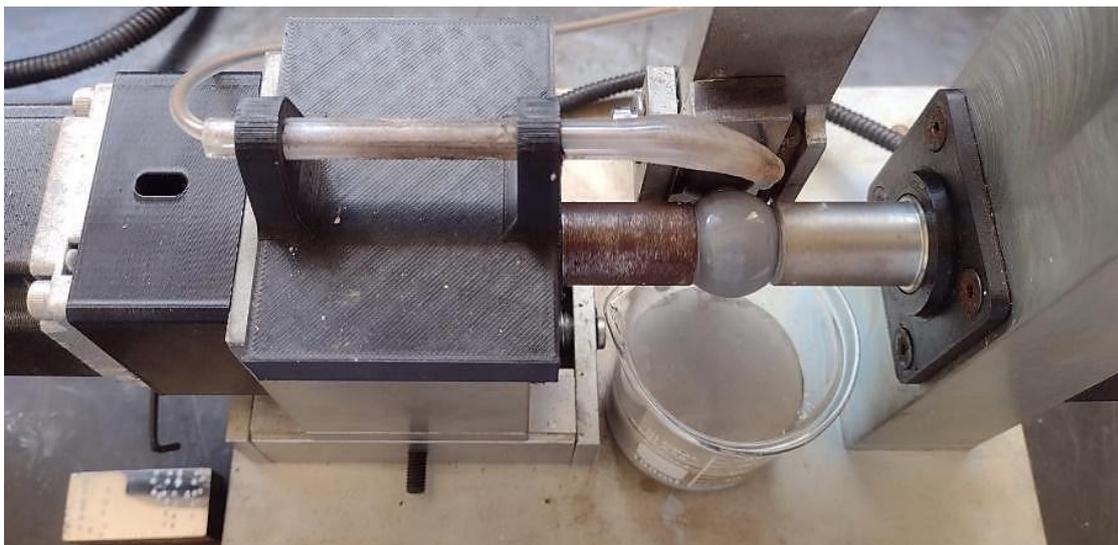
Fonte: Dados da pesquisa.

Os corpos de prova foram armazenados em um dessecador para evitar a transmissão.

2.4 Esferas

Três esferas de aço AISI 52100, com diâmetro de 25 mm, foram empregadas e fixadas no eixo de rotação do equipamento de ensaio de desgaste. A Figura 3 ilustra o eixo contendo a esfera fixada durante um ensaio de simulação de desgaste.

Figura 3 - Eixo contendo a esfera fixada em uma simulação de desgaste.



Fonte: Dados da pesquisa.

Essas esferas foram utilizadas para entrar em contato com os corpos de prova, gerando as calotas de desgaste.

2.5 Polpa Abrasiva

No preparo das polpas abrasivas, responsáveis por gerar o desgaste microabrasivo, foram testados três materiais distintos: carboneto de silício, gnaiss e rejeito de minério de ferro. Os materiais utilizados na preparação da polpa abrasiva passaram por um processo de cominuição, realizado em um moinho de bolas, exceto a amostra de carboneto de silício.

A amostra de gnaiss, uma rocha metamórfica, passou por várias etapas de cominuição até atingir a proporção de 500 gramas de material com granulometria inferior a 400 *mesh* (37 μm). O rejeito de minério de ferro, adquirido da empresa Vale, Mina de Brucutu, localizada no município de São Gonçalo do Rio Abaixo-MG, também passou pelo processo de cominuição para obter a quantidade mínima de 500 gramas de material, com granulometria inferior a 400 *mesh* (37 μm). Esse material foi ainda submetido a dessecamento em estufa a 150°C por um período de 12 horas, a fim de eliminar toda a umidade presente na amostra. Por fim, o carboneto de silício foi apenas submetido ao peneiramento para classificação e separação de 500 gramas do material na faixa granulométrica inferior a 400 *mesh* (37 μm).

Para o preparo de cada tipo de polpa, foi pesada, em uma balança digital de alta precisão, uma quantidade de 100 gramas de água destilada e 100 gramas do material abrasivo, misturando-se ambas as porções para formar a polpa abrasiva. Assim, cada polpa utilizada nos ensaios teve uma concentração de 1:1.

Durante a realização de cada ensaio de desgaste, a polpa abrasiva foi continuamente agitada por um agitador magnético, a uma velocidade constante, para evitar que o mineral se decantasse no fundo do recipiente, mantendo uma mistura homogênea durante todo o procedimento.

2.6 Adição da Polpa durante o Ensaio de Desgaste

Durante o ensaio de desgaste, a polpa abrasiva foi aplicada por meio de um conta-gotas com sistema de controle de vazão, comumente utilizado em aquários. Esse dispositivo foi ajustado para fornecer uma vazão constante de 0,005 mL/s, garantindo um controle preciso da aplicação da polpa abrasiva ao longo de todo o ensaio. Esse controle rigoroso assegurou que a polpa abrasiva estivesse sempre presente na região de contato entre a esfera e o corpo de prova, evitando qualquer interrupção no processo de desgaste e garantindo a uniformidade das condições experimentais.

2.7 Cálculo das Grandezas Geradas no Ensaio de Desgaste Abrasivo

Na análise das calotas geradas pelo desgaste microabrasivo, foram investigadas as seguintes grandezas: o diâmetro da calota (d , em mm) e o volume removido (V , em mm^3). O cálculo dessas grandezas envolveu a relação entre a distância de deslizamento (S , em m) e o volume removido (V , em mm^3), conforme descrito pelas equações (1), (2), (3):

$$V = f(s) \tag{1}$$

$$V = \frac{\pi d^4}{64R} \quad \text{para } d < R \tag{2}$$

Onde, V é o volume removido (em mm^3), d corresponde ao diâmetro da calota de desgaste (em mm) e R o raio da esfera utilizada para gerar o desgaste (em mm).

O cálculo do desgaste foi determinado relacionando o volume removido V com a distância de deslizamento S e a Força normal (F_n), desencadeada no coeficiente de desgaste K ($\text{mm}^3/\text{N.m}$), calculado através da equação (3):

$$K = \frac{V}{S * F_n} \tag{3}$$

Para avaliar as discrepâncias nos resultados obtidos, foram calculadas a média e o desvio padrão de cada conjunto de dados correspondente aos materiais testados naquele momento.

3. Resultados e Discussão

3.1 Ensaio de desgaste

Para realizar os ensaios de desgaste, foram definidas quatro condições iguais para que houvesse os ensaios de desgaste. Os cálculos a seguir vieram a ser realizados a partir dos dados coletados nas calotas geradas nos ensaios. A tabela a seguir apresenta as condições que foram estabelecidas para a realização dos ensaios. Tabela 1 apresenta os parâmetros das quatro condições necessárias para realização dos ensaios de desgaste.

Tabela 1 - Valores das condições necessárias para realização dos ensaios.

Força Normal (N)	5	5	5
Rotação da Esfera(rpm)	100	100	100
Distância de Deslizamento (m)	25	50	100
Gotejamento da Polpa	1 gota/5 s	1 gota/5 s	1 gota/5 s
Número de Repetições	4	4	4

Fonte: Dados da pesquisa.

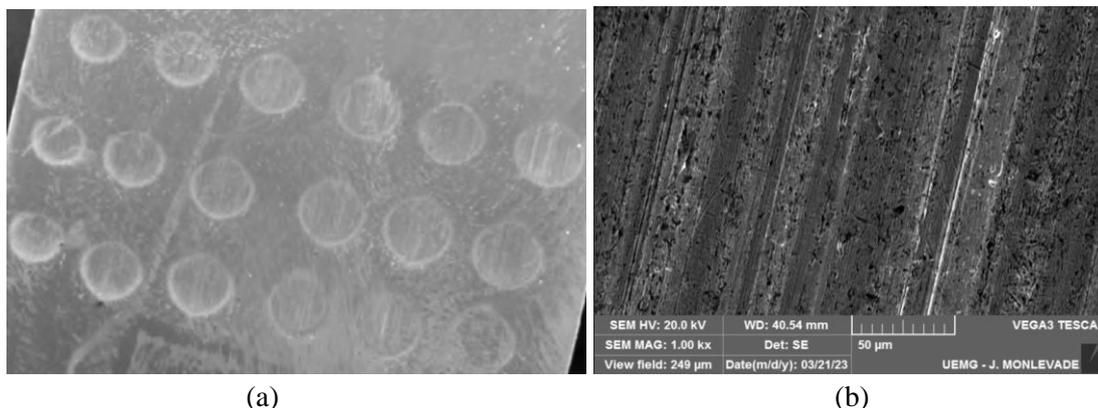
Todos os ensaios foram realizados sem que houvesse paradas intermediárias, apenas houve para troca das amostras, e troca da banda de rolagem da esfera. A polpa abrasiva foi gotejada de forma mecânica, realizada por uma bomba de aquário.

Após a análise das imagens em microscopia óptica das crateras de desgaste, os dados obtidos apresentaram similaridades com os dados encontrados na literatura, e que as calotas geradas tendem a circunferência, e os valores do diâmetro das crateras geradas pelo equipamento estão sendo dados reprodutíveis (Hutchings, 1998; Cozza, 2011; Oliveira, 2015).

3.2 Análise das Calotas Geradas nos Ensaios

Ao analisar as imagens obtidas na microscopia óptica, é observado que o comportamento do desgaste que ocorreu foram de “riscamento”, nos ensaios realizados. As imagens em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostram com mais clareza o modo de desgaste e tamanho das calotas geradas, diante das condições estabelecidas para a realização dos ensaios. Na Figura 4 podemos observar a forma do desgaste, a diferença de tamanho de cada calota gerada, devido a condição de distância de deslizamento para cada ensaio.

Figura 4 - Calotas geradas pelo desgaste abrasivo: (a) diferentes estágios de tamanho devido a condição da distância de deslizamento; (b) forma de desgaste abrasivo por riscamento.



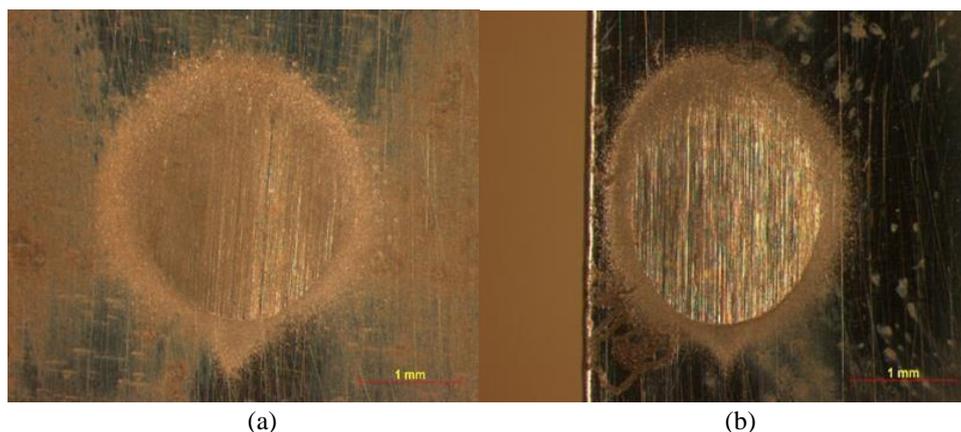
Fonte: Dados da pesquisa.

No teste de desgaste abrasivo pode ser gerado dois modos de desgaste, tanto de riscamento para rolamento e vice versa, dependendo das condições de alta concentração de pasta abrasiva, onde se predomina o desgaste por rolamento, porém para forças normais elevadas se tende o desgaste por riscamento (Oliveira, 2015).

As imagens geradas após os testes realizados, foram constatadas que a forma de desgaste é de modo por riscamento. Fato que fica evidente que quando foram visualizadas no MEV, suas ranhuras demonstraram o comportamento de desgaste por riscamento, fenômeno gerado devido a condição de aplicação de uma força normal de 5 N.

A Figura 5 apresenta imagens que foram obtidas da microscopia óptica, nela podemos observar a presença do modo de desgaste por riscamento, onde fica visível a atuação do desgaste abrasivo no corpo de prova.

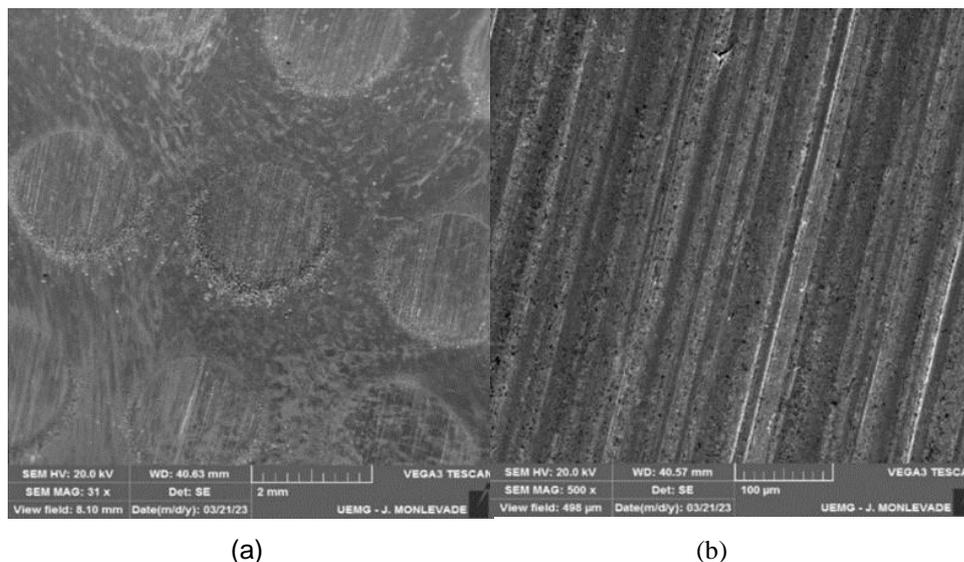
Figura 5 - Crateras de desgaste visível em “macro escala”: (a) riscamento provocado pela polpa contendo rejeito de minério de ferro $S=100$ m; (b) riscamento provocado pela polpa contendo gnaíse, para uma condição de distância de deslizamento $S=100$ m.



Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme a Figura 6, são mostradas imagens obtidas através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), onde pode-se observar o comportamento em “macro escala”, e também o comportamento em “micro escala”, gerado pelo desgaste.

Figura 6 - Crateras de desgaste obtidas nos ensaios de abrasão: (a) Riscamento em “macro escala”; (b) Riscamento em “micro escala”.



Fonte: Dados da pesquisa.

Através dos ensaios realizados neste trabalho, pode-se dizer que a distância de deslizamento do contato da esfera mais polpa abrasiva com o corpo-de-prova é fator determinante para gerar as calotas de desgaste. O deslizamento é determinante para que os ensaios atinjam ou não o regime permanente de desgaste (Oliveira, 2015).

Segundo Trezona *et al* (1999), a realização de desgaste a partir de concentrações elevadas de pasta abrasiva e força normal baixa há uma predominância de desgaste abrasivo por rolamento. Por outro lado, concentração de pasta abrasiva baixa e força normal alta há uma predominância de desgaste abrasivo por riscamento (Trezona & Hunchings, 1999).

Neste trabalho foi utilizado uma força normal de 5 N, e com isso foi observado o modo de desgaste por riscamento em todas as calotas geradas nos ensaios de desgaste. Assim, pode-se dizer que no presente trabalho atingiu-se o regime de desgaste abrasivo, devido à formação das crateras geradas nos ensaios, considerando a relação entre volume removido (V), pela distância de deslizamento (S).

3.3 análise dos dados obtidos das calotas geradas nos ensaios

Os corpos de prova após serem analisados, foi anotado as informações de circunferência, área, diâmetro, em seguida foi realizado o cálculo do volume removido (V), e do coeficiente de desgaste (K). No final da etapa foram calculados a média de cada grandeza e para a grandeza coeficiente de desgaste foi calculado o desvio padrão para verificar a dispersão dos dados.

Nas tabelas a seguir observa-se os dados obtidos nos ensaios de desgaste abrasivo dos materiais gnaisse, rejeito de minério de ferro e carboneto de silício, nas condições de distância de deslizamento de 25, 50, 100 m. Foram realizadas 4 repetições para tipo de material abrasivo ensaiado por condição de deslizamento (25, 50 e 100 metros). Com os valores estabelecidos das condições necessárias para realização dos ensaios, partiu-se para realização dos ensaios, onde obteve os valores da circunferência da calota, diâmetro, área da calota. Estes valores ao serem anotados definem o próximo passo, que através deles é feito o cálculo do volume removido em cada corpo de prova através da equação 1.

O volume removido analisado em cada ensaio foi anotado na Tabelas 2, 3, 4 onde podemos observar que o material abrasivo que teve a maior remoção de material dos corpos de prova foi o Rejeito de Minério de Ferro, que teve uma crescente no valor do volume removido em todas as repetições de ensaio.

Tabela 2 - Valores das variáveis envolvidas no ensaio de desgaste provocado pelo material abrasivo gnaïsse nas condições de deslizamento de 25, 50 e 100 m.

Gnaïsse (com distância de deslizamento de 25 m)					
Ensaio	1	2	3	4	Média
Força normal F_n (N)	5	5	5	5	5
Circunferência da calota (mm)	3,75	4,22	3,85	3,61	3,86
Diâmetro da calota (mm)	1,19	1,34	1,23	1,15	1,23
Área da calota (mm²)	1,12	1,42	1,18	1,04	1,19
Volume removido (mm³)	0,00800408	0,01276861	0,0088386	0,006841	0,009113076
Coefficiente de desgaste - K (mm³/m.N)	$6,4033 \times 10^{-5}$	$1,0215 \times 10^{-4}$	$7,071 \times 10^{-5}$	$5,473 \times 10^{-5}$	$7,290575 \times 10^{-5}$
Gnaïsse (com distância de deslizamento de 50 m)					
Ensaio	1	2	3	4	Média
Força normal F_n (N)	5	5	5	5	5
Circunferência da calota (mm)	4,532	4,72	4,985	4,934	4,793
Diâmetro da calota (mm)	1,443	1,502	1,587	1,571	1,526
Área da calota (mm²)	1,635	1,772	1,977	1,937	1,830
Volume removido (mm³)	0,01701786	0,0199765	0,024897	0,0239081	0,0214499
Coefficiente de desgaste - K (mm³/m.N)	$6,8071 \times 10^{-5}$	$7,991 \times 10^{-5}$	$9,959 \times 10^{-5}$	$9,563 \times 10^{-5}$	$8,5799 \times 10^{-5}$
Gnaïsse (com distância de deslizamento de 100 m)					
Ensaio	1	2	3	4	Média
Força normal F_n (N)	5	5	5	5	5
Circunferência da calota (mm)	6,068	6,296	5,983	5,96	6,077
Diâmetro da calota (mm)	1,932	2,004	1,904	1,897	1,934
Área da calota (mm²)	2,93	3,155	2,848	2,827	2,94
Volume removido (mm³)	0,05468499	0,0633039	0,0515831	0,0508287	0,0551002
Coefficiente de desgaste - K (mm³/m.N)	$1,0937 \times 10^{-4}$	$1,266 \times 10^{-4}$	$1,032 \times 10^{-4}$	$1,017 \times 10^{-4}$	$1,102 \times 10^{-4}$

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 3 - Os valores das variáveis envolvidas no ensaio de desgaste provocado pelo material abrasivo rejeito de minério de ferro nas condições de deslizamento de 25, 50 e 100 m.

Rejeito de Minério de Ferro (com distância de deslizamento de 25 m)					
Ensaio	1	2	3	4	Média
Força normal F_n (N)	5	5	5	5	5
Circunferência da calota (mm)	4,337	4,571	4,497	4,303	4,427
Diâmetro da calota (mm)	1,381	1,455	1,431	1,37	1,409
Área da calota (mm²)	1,497	1,663	1,609	1,473	1,561
Volume removido (mm³)	0,01427626	0,017591	0,0164588	0,0138268	0,01553823
Coefficiente de desgaste - K (mm³/m.N)	$1,1421 \times 10^{-4}$	$1,407 \times 10^{-4}$	$1,317 \times 10^{-4}$	$1,106 \times 10^{-4}$	$1,2431 \times 10^{-4}$

Rejeito de Minério de Ferro (com distância de deslizamento de 50 m)					
Ensaio	1	2	3	4	Média
Força normal F_n (N)	5	5	5	5	5
Circunferência da calota (mm)	4,938	5,266	5,579	5,337	5,28
Diâmetro da calota (mm)	2,07	2,022	1,995	2,038	2,031
Área da calota (mm²)	1,94	2,207	2,477	2,267	2,223
Volume removido (mm³)	2,223969	0,0309696	0,0390491	0,0327049	0,03167317
Coefficiente de desgaste - K (mm³/m.N)	$9,5786 \times 10^{-5}$	$1,239 \times 10^{-4}$	$1,562 \times 10^{-4}$	$1,308 \times 10^{-4}$	$1,2669 \times 10^{-4}$
Rejeito de Minério de Ferro (com distância de deslizamento de 100 m)					
Ensaio	1	2	3	4	Média
Força normal F_n (N)	5	5	5	5	5
Circunferência da calota (mm)	6,504	6,351	6,267	6,404	6,381
Diâmetro da calota (mm)	2,07	2,022	1,995	2,038	2,031
Área da calota (mm²)	3,367	3,21	3,126	3,263	3,241
Volume removido (mm³)	0,07206444	0,0656091	0,0621744	0,0677106	0,06688962
Coefficiente de desgaste - K (mm³/m.N)	$1,4413 \times 10^{-4}$	$1,312 \times 10^{-4}$	$1,243 \times 10^{-4}$	$1,354 \times 10^{-4}$	$1,3378 \times 10^{-4}$

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4 - Os valores das variáveis envolvidas no ensaio de desgaste provocado pelo material abrasivo carboneto de silício nas condições de deslizamento de 25, 50 e 100 m.

Carboneto de Silício (com distância de deslizamento de 25 m)					
Ensaio	1	2	3	4	Média
Força normal F_n (N)	5	5	5	5	5
Circunferência da calota (mm)	4,669	4,744	4,728	4,746	4,722
Diâmetro da calota (mm)	1,486	1,51	1,505	1,511	1,503
Área da calota (mm²)	1,735	1,791	1,779	1,793	1,774
Volume removido (mm³)	0,01913881	0,02040551	0,02013658	0,02045962	0,0200351
Coefficiente de desgaste - K (mm³/m.N)	$1,5311 \times 10^{-4}$	$1,6324 \times 10^{-4}$	$1,6109 \times 10^{-4}$	$1,6368 \times 10^{-4}$	$1,603 \times 10^{-4}$
Carboneto de silício (com distância de deslizamento de 50 m)					
Ensaio	1	2	3	4	Média
Força normal F_n (N)	5	5	5	5	5
Circunferência da calota (mm)	5,81	5,764	5,753	5,884	5,803

Diâmetro da calota (mm)	1,849	1,835	1,831	1,873	1,847
Área da calota (mm²)	2,686	2,644	2,633	2,755	2,68
Volume removido (mm³)	0,04587619	0,04450245	0,04411569	0,04830485	0,0456998
Coefficiente de desgaste - K (mm³/m.N)	1,835 x 10 ⁻⁴	1,7801 x 10 ⁻⁴	1,7646 x 10 ⁻⁴	1,9322 x 10 ⁻⁴	1,828 x 10⁻⁴
Carboneto de silício (com distância de deslizamento de 100 m)					
Ensaio	1	2	3	4	Média
Força normal <i>F_n</i> (N)	5	5	5	5	5
Circunferência da calota (mm)	5,943	6,227	6,15	6,14	6,115
Diâmetro da calota (mm)	1,892	1,982	1,958	1,954	1,946
Área da calota (mm²)	2,811	3,086	3,01	3	2,977
Volume removido (mm³)	0,05029493	0,06056954	0,05768865	0,05721869	0,056443
Coefficiente de desgaste - K (mm³/m.N)	1,0059 x 10 ⁻⁴	1,2114 x 10 ⁻⁴	1,1538 x 10 ⁻⁴	1,1444 x 10 ⁻⁴	1,129 x 10⁻⁴

Fonte: Dados da pesquisa.

As Tabelas 2, 3, 4 respectivamente trazem os dados obtidos através das condições estabelecidas na Tabela 1, onde foi definido os critérios necessários para que as tabelas subsequentes atendessem os critérios, para que os valores encontrados nelas estejam de forma mais claras e fidedignas as equações 1 e 2, que definem os valores do volume removido e coeficiente de desgaste. Na Tabela 5 observa-se o coeficiente de desgaste K(mm³/m.N) dos minerais constituinte das polpas abrasivas para as três condições de distância de deslizamento ensaiadas.

Tabela 5 - Valores de coeficiente de desgaste K(mm³/m.N) dos minerais constituinte das polpas abrasivas.

Variável		Coeficiente de desgaste - K (mm ³ /m.N)		
		Gnaisse	Rejeito de Minério de Ferro	Carboneto de silício
Distância de deslizamento - S (m)	25	7,290575 x 10 ⁻⁵ ± 0,00000890628	1,2431 x 10 ⁻⁴ ± 0,0000061913	1,603 x 10 ⁻⁴ ± 0,000002127
	50	8,5799 x 10 ⁻⁵ ± 0,0000063039	1,2669 x 10 ⁻⁴ ± 0,000010739	1,828 x 10 ⁻⁴ ± 0,00000328
	100	1,102 x 10 ⁻⁴ ± 0,000004952	1,3378 x 10 ⁻⁴ ± 0,0000035821	1,129 x 10 ⁻⁴ ± 0,000003774

Fonte: Dados da pesquisa.

Através das tabelas pode-se observar que os valores encontrados no presente trabalho, realizados com os três tipos de amostra de minerais distintas, eles: rejeito de minério de ferro, carbeto de silício, gnaisse, tiveram uma pequena variação do coeficiente de desgaste comparando entre si. E sua dispersão dos dados analisados do coeficiente estão com variação bem próximas.

Os resultados encontrados para rejeito de minério de ferro em seu coeficiente de desgaste esteve mediante a um crescimento de cada distância de deslizamento empregada, não obtendo uma constância em seu coeficiente de desgaste.

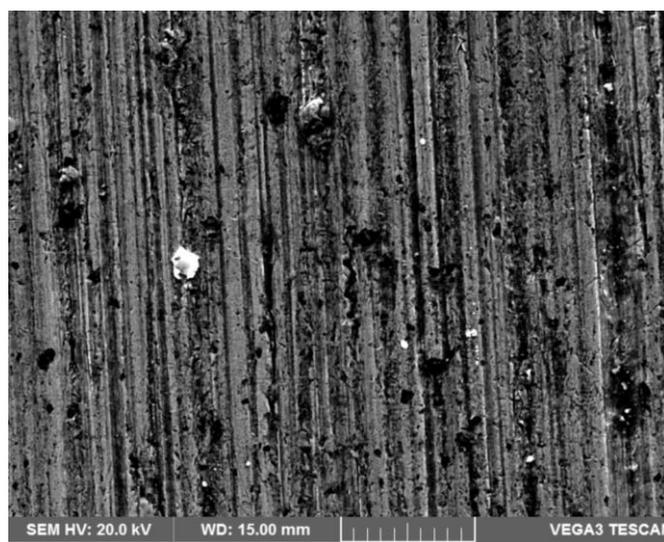
Outro ponto interessante observado foi para o gnaisse que apresentou os menores valores do coeficiente de desgaste, entre os três tipos de minerais comparados, porém o gnaisse apresentou um comportamento de uma crescente em função do

seu valor de coeficiente de desgaste, e mesmo possuindo os menores índices de desgaste entre os três materiais, também não atingiu valores constante do coeficiente de desgaste.

Já o carboneto de silício veio apresentando uma crescente no valor do coeficiente, nas duas primeiras condições de deslizamento (25, 50 m), porém na última condição estabelecida de deslizamento de 100 m seu valor reduziu, seguindo um possível caminho de redução, ou no decorrer dos testes houve a incorporação de partículas abrasivas que pode ter reduzido a taxa de desgaste abrasivo na superfície do corpo de prova (Silva & Costa, 2018). A incorporação de partículas pode ocorrer devido a peça possuir poros, que foram provenientes de sua fabricação. Também, outro fator que pode ser causador da incorporação de partículas é a energia cinética decorrente do gotejamento da polpa abrasiva que chega com grande valor na superfície de contato, gerando pontos de cortes/furos assim se incrustando o material abrasivo (Silva & Costa, 2018).

A Figura 7 demonstra possível incorporação de partículas de material na amostra após a realização dos ensaios de desgaste, a imagem obtida pelo MEV, e possível observar nas ranhuras do modo de desgaste por riscamento pequenos poros, e partículas que ficaram pelo caminho dos sulcos gerados pelo desgaste abrasivo.

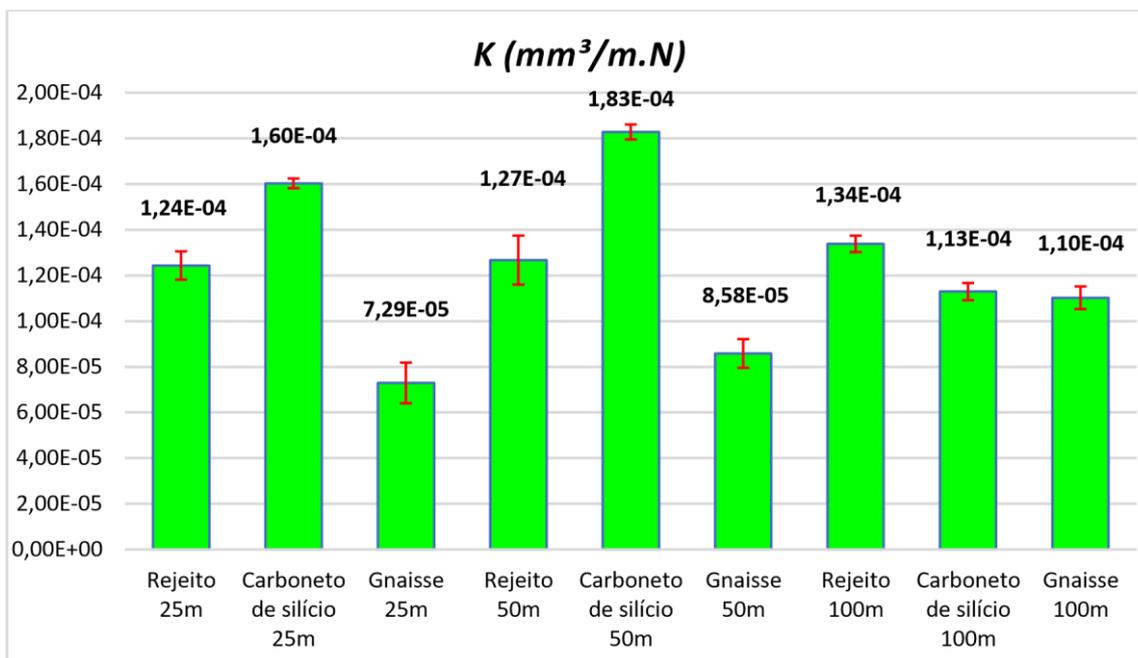
Figura 7 - Imagem em micro escala obtida por MEV, onde observa pequenos poros, pequenas partículas abrasivas nas ranhuras do desgaste.



Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico do coeficiente de desgaste (K) (Gráfico 1) nos permite ter uma visão mais clara do comportamento de cada mineral após a análise de seus dados, portanto podemos observar o quanto o desgaste de cada mineral em suas condições de ensaio se comportou através dos números coletados das Tabelas 2, 3, 4.

Gráfico 1 - Taxa de desgaste pela distância de deslizamento nas três polpas abrasivas utilizadas nos ensaios.

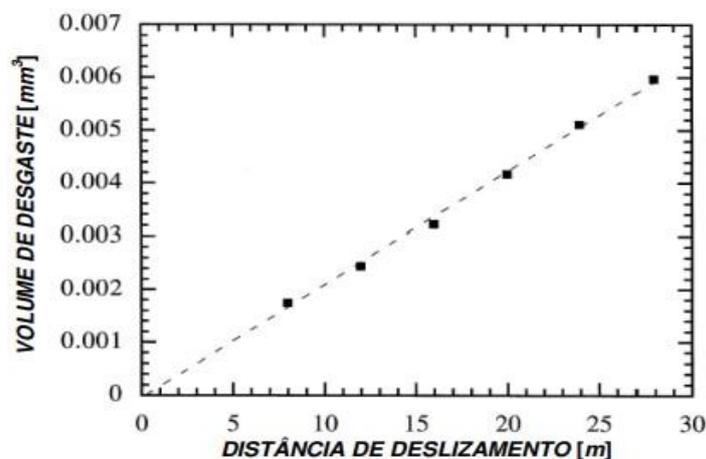


Fonte: Dados da pesquisa.

3.4 Obtenção do Regime Permanente de Desgaste

Verifica-se que o processo de desgaste abrasivo atinge o seu regime permanente quando ele passa a agir de forma constante, isto é, quando o seu coeficiente de desgaste em função da distância de deslizamento $K = f(S)$ atingi valores constantes, também pode ser verificado se processo atingiu ou não seu regime permanente através do volume em função da distância de deslizamento $V = f(S)$, onde o volume apresente uma variação linear em relação a distância de deslizamento (Cozza, 2006). No Gráfico 2 pode-se observar o comportamento de desgaste de um determinado material, seu volume removido pela distância de deslizamento, onde ele adota comportamento de um regime permanente.

Gráfico 2 - Variação linear do volume de desgaste, pela distância de deslizamento.

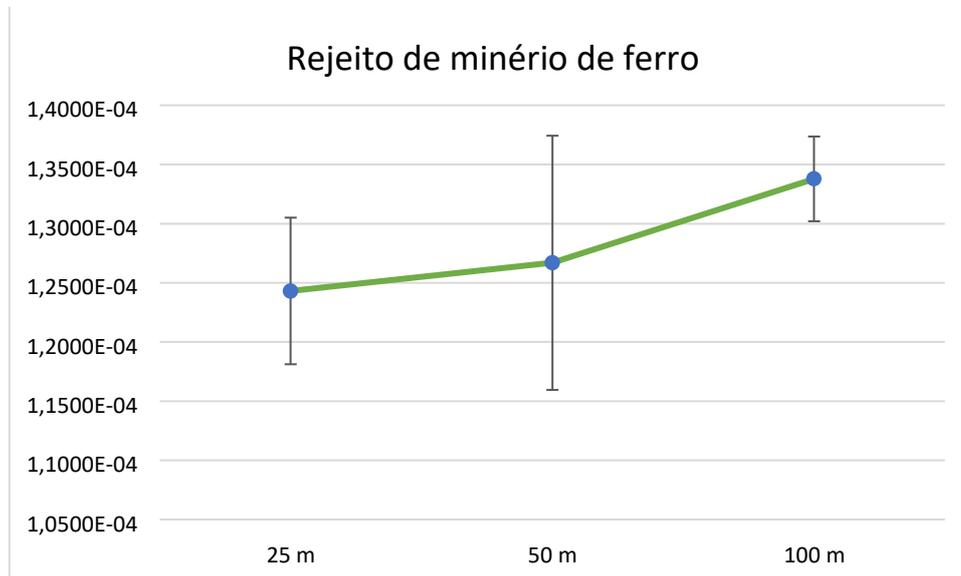


Fonte: Trezona, *et al.* (1999).

Os resultados que foram obtidos nos ensaios do rejeito de minério de ferro o seu valor do coeficiente de desgaste em função da distância de deslizamento $K = f(S)$, mostram que a polpa abrasiva de 1:1 de rejeito de minério de ferro mais água destilada não atingiu o regime permanente de desgaste, com isto as distancias de deslizamento foram insuficientes. O Gráfico

3, podemos ver o comportamento gráfico da polpa do rejeito de minério de ferro, onde podemos ver que a o crescimento do coeficiente de desgaste variando a distância de deslizamento.

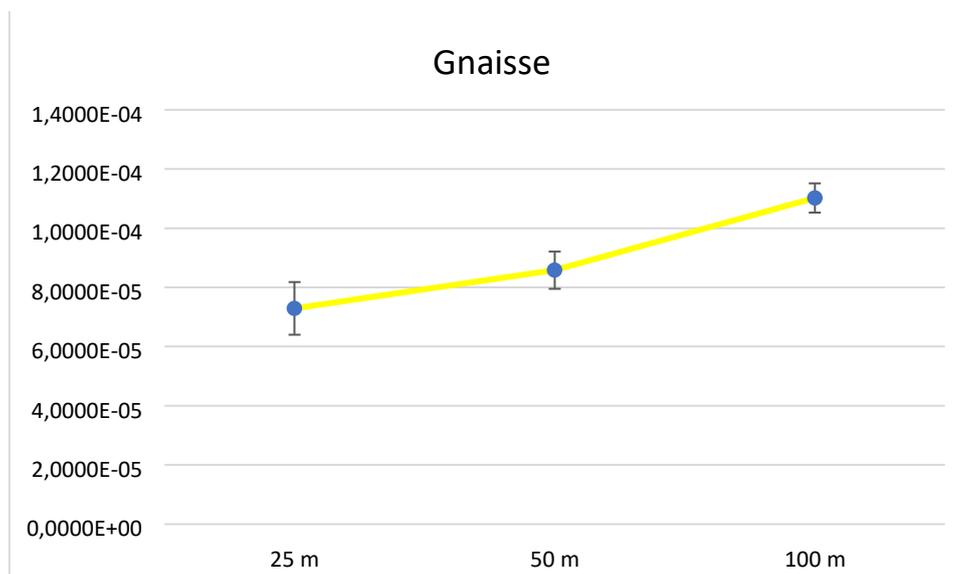
Gráfico 3 - Coeficiente de desgaste do rejeito de minério de ferro pela distância de deslizamento.



Fonte: Dados da pesquisa.

Já os resultados que foram obtidos nos ensaios do gnaïsse, os seus valores de coeficiente de desgaste em função da distância de deslizamento $K = f(S)$ demonstraram semelhança com o mesmo comportamento observado no rejeito de minério de ferro, então a polpa abrasiva de 1:1 de gnaïsse mais água destilada, não atingiu o regime permanente de desgaste, sendo insuficiente as distâncias de deslizamento para se atingir o regime permanente do desgaste abrasivo. No Gráfico 4 observa-se o comportamento gráfico da polpa do gnaïsse, onde pode-se observar que ainda ocorre o crescimento do coeficiente de desgaste variando a distância de deslizamento.

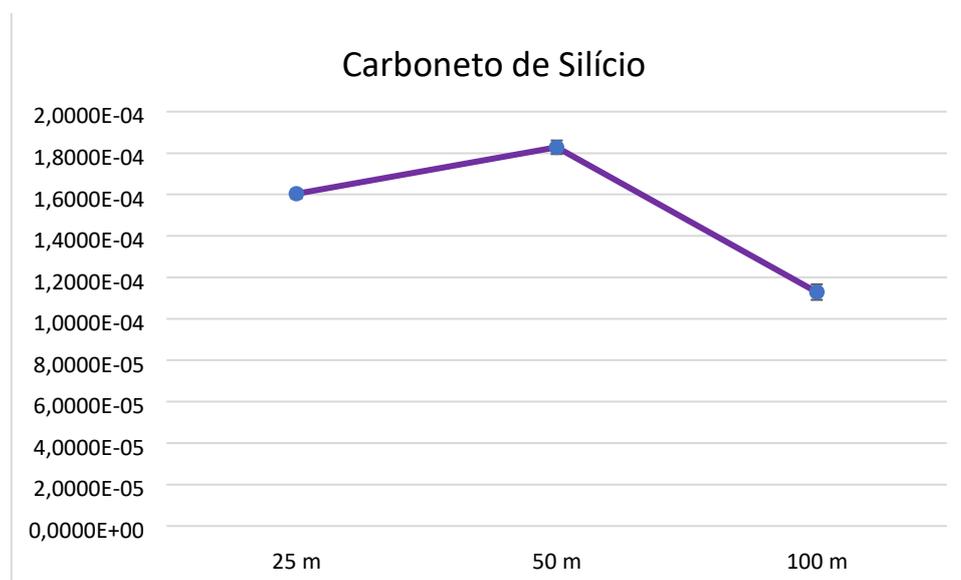
Gráfico 4 - Coeficiente de desgaste gnaïsse, pela distância de deslizamento.



Fonte: Dados da pesquisa.

Nos resultados que foram obtidos nos ensaios, do carboneto de silício os seus valores de coeficiente de desgaste em função da distância de deslizamento $K=f(S)$ não demonstraram nenhuma semelhança com o mesmo comportamento observado no rejeito de minério de ferro, e gnaíse, porém a polpa abrasiva de 1:1 de carboneto de silício mais água destilada, não atingiu o regime permanente de desgaste, que também não ocorreu nas demais polpas. Porém no carboneto de silício houve uma mudança brusca na direção do coeficiente de desgaste podendo ser explicada pela possível incorporação de partículas de carboneto de silício ao corpo de prova, com tudo sendo insuficiente as distâncias de deslizamento para que se atingiu-se o regime permanente do desgaste abrasivo. Já o comportamento gráfico da polpa do carboneto de silício mostrado no Gráfico 5, podemos ver que ainda ocorreu uma grande variação do coeficiente de desgaste pela distância de deslizamento.

Gráfico 5 - Coeficiente de desgaste do carboneto de silício, pela distância de deslizamento.



Fonte: Dados da pesquisa.

Para os 3 materiais que foram utilizados neste trabalho podemos dizer que não alcançou o regime permanente, mesmo com a distância de 100 m o coeficiente de desgaste não atingiu o regime.

Segundo Cozza (2006), não à existência de uma n de deslizamento característica, ou uma faixa de valores, onde o regime permanente seja alcançado. Isso depende diretamente dos materiais utilizados, e das características adotadas, e estabelecidas para as condições de obtenção do coeficiente de desgaste.

No trabalho de Trezona e Hutchings (1999), o coeficiente de desgaste entrou em regime permanente a partir de 8 m de distância de deslizamento, com esfera de diâmetro de 25,4 mm, e uma rotação de 37,6 rpm e uma $F_n = 0,26 N$. Neste trabalho a maior distância utilizada foi de 100 m. Portanto, uma explicação plausível do coeficiente de desgaste não ter alcançado o regime permanente diante dos resultados obtidos e os resultados tomados como referência, provavelmente está relacionado com a distância de deslizamento, que para os materiais e condições utilizados pode ter sido baixa.

4. Conclusão

Os objetivos foram alcançados, os resultados encontrados apontaram que os abrasivos utilizados podem ser aplicados para o ensaio de desgaste para simular condições abrasivos.

No trabalho realizado os materiais abrasivos utilizados tiveram comportamentos semelhantes a outros trabalhos encontrados na literatura. As imagens obtidas demonstraram que o modo de desgaste gerado apresenta forma de riscamento,

onde foi confirmado após análise em microscopia óptica, e análise em micro escala e microscopia eletrônica de varredura, embora não focem os mesmos materiais abrasivos e nem a faixa granulométrica a mesma utilizada nos presentes trabalhos.

As amostras dos minerais constituintes das polpas abrasivas, juntamente aos dados coletados e analisados mostraram um comportamento de variação do coeficiente de desgaste dos materiais utilizados para realização dos ensaios. Houve um aumento da taxa de desgaste dos materiais rejeito de minério de ferro e gnaïsse a cada vez que aumentava a distância de deslizamento nos ensaios, não alcançando um coeficiente de variação linear. O comportamento da polpa do carboneto de silício foi pouco distinto das demais, devido seu coeficiente apresentar uma queda quando foi submetido a distância de deslizamento de 100 m, tendo como resposta plausível a incorporação de partículas da polpa ao corpo de prova. Porém, os resultados confirmam que não foi alcançado um coeficiente de desgaste com uma variação linear situação semelhante aos testes realizados com rejeito de minério de ferro e gnaïsse.

Os resultados encontrados sugerem que a distância de deslizamento utilizada no presente trabalho e as condições adotadas na realização dos ensaios, foram insuficientes para que se atingisse o regime permanente de desgaste.

Agradecimentos

- À Fapemig pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.
- À UEMG - Unidade João Monlevade, pelas análises realizadas no CTEC
- Ao Professor José Gedael, pelo apoio na condução do experimento.

Referências

- Cozza, R. C. (2006). *Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP.
- Cozza, R. C. (2011). *Estudo do desgaste e atrito em ensaios microabrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante*. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Bayer, R.G. (1994). Mechanical wear prediction and prevention. Marcel Dekker. 657 p.
- ISO. (2008). ISO 26424:2008(en). Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-scale abrasion test.
- Gil, A. C. (2017). *Como elaborar projetos de pesquisa*. 6ed. Atlas.
- Hutchings, I.M. (1998). Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach. *Tribology International*. 31(1-3), 5-15. [https://doi.org/10.1016/S0301679X\(98\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0301679X(98)00004-8).
- Oliveira, D. L. (2015). *Construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem*. Dissertação Mestrado em Engenharia - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP.
- Pereira a. s. et al. (2018). metodologia da pesquisa científica. UFSP.
- Pinto Jr., D. M. et al. (2018). *Tecnologia siderúrgica*. Ed. Poisson.
- Rabinowicz, E., Dunn, L. A. & Russell, P. G. (1961). A study of abrasive wear under three-body conditions. *Wear*, 4(5), 345-55. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164861900023>. 10.1016/00431648(61)900023.
- Shitsuka, R. et al. (2014). Matemática fundamental para tecnologia. (2a ed.) Editora Erica.
- Silva, V. A. & Costa, A. R. Desgaste de poliuretano por erosão úmida: desenvolvimento de um ensaio tecnológico. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 15(2), 144-150, 2018.
- Stoeterau, R. L. (2004). *Introdução ao projeto de máquina-ferramentas modernas*. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica. <https://docplayer.com.br/4121521Introducao-ao-projeto-de-maquina-ferramentas-modernas.html>. Acesso em: 03 dez. 2023.
- Trezona, R. I. & Hutchings, I. M. (1999). Three-body abrasive wear testing of soft materials. *Wear, Lausanne*. 233/235, 209-21.