

AVALIAÇÃO DO DESGASTE E SUBSTITUIÇÃO DO MATERIAL DO REVESTIMENTO INTERNO DO GRANULADOR DE MASSA UTILIZADO NA INDÚSTRIA CERÂMICA

Lucas Zanoni de Rolt¹

Reginaldo Rosso Marcello²

Resumo: A indústria cerâmica tem evoluído no Brasil nos últimos anos e muito atrelado ao processo de fabricação via seca. Junto da implementação desse processo surgem demandas por peças de reposição que tenham bom desempenho com menores custos. O estudo do presente trabalho está relacionado ao granulador umidificador de massa cerâmica, utilizado no processo via seca. O revestimento de politetrafluoretileno (teflon) do presente estudo se encontra na parte interna do granulador, e o qual está submetido a desgaste acelerado. O objetivo é alterar o material do revestimento para polietileno de ultra alta densidade (UHMW) natural ou de baixo atrito, a fim de obter um melhor desempenho. Para isso foi realizado ensaios de abrasão e de erosão nas amostras. Para o ensaio erosivo utilizou-se um equipamento de jateamento para simular o desgaste. O desgaste foi avaliado via equação de perda volumétrica para ambos os casos. Os ensaios convergiram para uma perda volumétrica menor nas amostras de UHMW em comparação com o politetrafluoretileno.

Palavras-chave: Desgaste, erosão, UHMW, politetrafluoretileno, teflon, granulador.

1. INTRODUÇÃO

O setor cerâmico nacional teve uma grande evolução nos últimos anos, levando o Brasil a expressivos números na produção de revestimentos cerâmicos. Esse aumento de produção é associado a utilização do processo de produção chamado de via seca. No Brasil há um constante crescimento desse processo, que é responsável por cerca de 70% da produção de revestimentos cerâmicos. Sua utilização em larga escala se dá pelo fator energético, que demonstra um consumo térmico aproximadamente 40% inferior em produções que utilizam esse processo, em comparação ao processo via úmida de massa atomizada. (MELCHIADES, 2011)

Aliado ao crescimento da produção de revestimentos cerâmicos utilizando o processo via seca, surgem as demandas por máquinas, serviços e peças de reposição atrelados a este processo.

¹ Graduando em Bacharel em Engenharia Mecânica. E-mail: lucasderolt@gmail.com

² Prof. Me. Reginaldo Rosso Marcello. E-mail: reginaldo.marcello@satc.edu.br

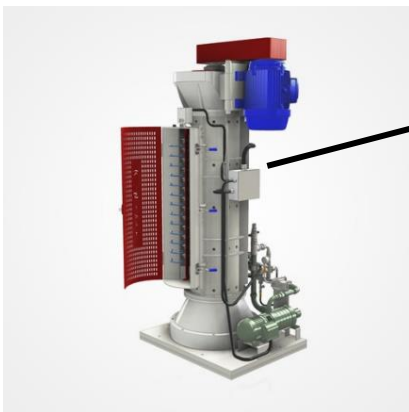
Algumas máquinas e equipamentos em que partes da estrutura são expostas ao contato direto com a massa cerâmica, são revestidas com chapas de politetrafluoretileno (Teflon™) tendo como objetivo fazer com que não haja acúmulo de massa cerâmica nas paredes e a massa escoe por entre os equipamentos de forma fluída, sem alteração dos grãos e evitando acúmulos que possam formar abóbodas ou torrões.

Num mercado competitivo em que se deve entregar o melhor produto pelo menor custo, é fundamental a busca por melhorias nos equipamentos e processos visando sempre a maior produtividade. O desgaste dos componentes é um problema quando o assunto é qualidade e periodicidade na manutenção, pois o tempo de parada destes equipamentos impacta diretamente na redução da produtividade.

O objeto desse estudo é o revestimento interno do granulador de massa, utilizado no processo via seca. Esse equipamento é responsável por formar grãos a partir da massa cerâmica já moída, através de um eixo que rotaciona a aproximadamente 3000 rotações por minuto, com pás acopladas a este e adicionando umidade a massa, o equipamento realiza formação de grãos que posteriormente serão prensados.

O estudo consiste em caracterizar o material e avaliar o desgaste do revestimento de politetrafluoretileno interno do granulador e dessa maneira propor a troca por outro material. A máquina onde se encontra o revestimento a ser estudado é demonstrado na Fig. 1 abaixo:

Figura 1: Revestimento estudado



Fonte: K-sider (2020)



Fonte: Do autor (2019)



Fonte: Do autor (2019)

Um problema que deve ser contornado é que o revestimento mesmo após o desgaste deve manter a superfície lisa para que a massa cerâmica não grude no mesmo. Sendo assim os materiais escolhidos para serem comparados com o politetrafluoretileno foram o UHMW natural e UHMW denominado de baixo atrito pelo fabricante.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção serão apresentados os estudos literários relacionados ao tema proposto e estudos sobre mecanismos de desgaste, propriedades dos materiais para o revestimento, e características do abrasivo.

2.1 APLICAÇÕES

As aplicações do teflon e UHMW na indústria cerâmica são diversas, desde a moagem, classificação, transporte de massa e prensas. O baixo atrito proporcionado pelos materiais e resistência a abrasão da matéria-prima os tornam úteis.

2.1.1 Granulador de massa

Segundo Melchiades (2011) as empresas brasileiras que produzem revestimentos cerâmicos pelo processo via seca utilizam na sua grande maioria granuladores verticais para fazer a granulação da massa. Após ser granulada, a massa é direcionada aos silos de descanso e depois para prensagem. As principais propriedades dos grãos para prensagem são a fluidez e as propriedades mecânicas. A fluidez implica no preenchimento homogêneo dos estampo das prensas, fator importante para obtenção das propriedades mecânicas exigidas em todo o corpo do produto.

2.2 DESGASTE DO REVESTIMENTO

O desgaste pode ser definido como uma avaria na superfície sólida ocasionando alteração ou remoção do material por ação mecânica de um líquido, gás

ou outro sólido. Segundo Budinski (ASM, 2001 *apud* Both, 2011) o desgaste é dividido em quatro categorias: abrasão, erosão, adesão e fadiga superficial.

A resistência ao desgaste não se trata de uma propriedade dos materiais e sim de uma ação complexa de um conjunto de fatores, inclusive depende do par de materiais analisados. As taxas de desgaste não dependem somente das propriedades mecânicas quando num sistema tribológico, mas também da geometria de contato, rugosidade da superfície, pressão de contato, velocidade de deslizamento, temperatura e ambiente ao qual será exposto, bem como outros detalhes (KAWAKAME, 2000).

2.2.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste por abrasão é ocasionado por partículas duras ou protuberâncias, que em movimento, são forçadas contra uma superfície. Assim ocorre o dano a superfície acarretando perda progressiva de material. O custo do desgaste abrasivo foi estimado entre 1 e 4% do produto interno bruto de um país industrializado (ASM INTERNACIONAL, 1992).

Os polímeros podem obter graus admiravelmente elevados quando se trata de resistência ao desgaste abrasivo, comparando-os a um metal de mesma dureza. Sua maior durabilidade está atribuída à elevada resistência à abrasão por arrancamento de grãos e por não fraturar grãos que poderiam formar arestas afiadas, comparado aos metais. (SILVA, 2017).

De acordo com Hutchings (1992), os materiais comuns abrasivos estão representados na Tab. 1:

Tabela 1: Alguns materiais abrasivos e suas durezas

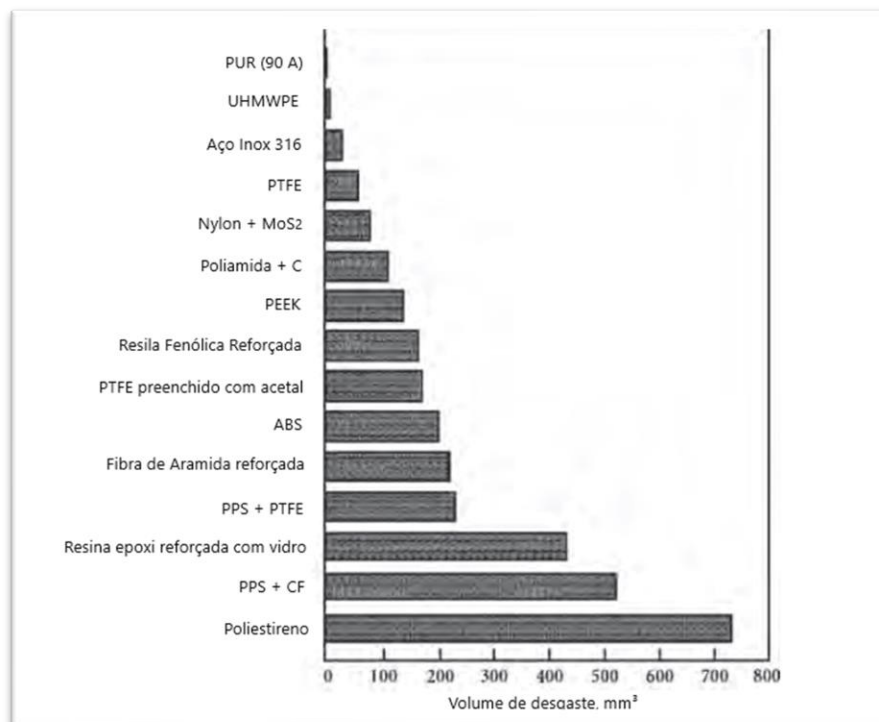
Material	Dureza (HV)
Diamante	6000-10000
CBN	4500
Alumina (Al ₂ O ₃)	1800-2000
Sílica (SiO ₂)	750-1200
Fluorita	180-190

Fonte: Adaptado de Hutchings (1992).

Conforme (ASM Internacional, 1992) a abrasão ocorre pelo tipo de contato e o ambiente. O contato entre dois corpos e três corpos são as classificações dos tipos. Abrasão em dois corpos ocorre quando o abrasivo é deslizado sobre a superfície e a três corpos, quando há uma partícula entre duas superfícies que desliza livremente entre eles.

O desgaste abrasivo dos materiais geralmente é avaliado pelo teste de abrasão por roda de borracha (ASTM G-65). Abaixo na Fig. 2 um exemplo de estudo de desgaste realizado por Budinski (2007):

Figura 2: Desgaste volumétrico de alguns polímeros



Fonte: Adaptado de Budinski (2007)

O ensaio padrão "A" da norma poderia desgastar totalmente a amostra, sendo assim o autor utilizou 400 revoluções de duração. Os resultados mostram o poliuretano como mais resistente polímero nessa modalidade de desgaste, seguido do UHMW. O teflon (PTFE) teve bom desempenho, sendo esse atrelado ao seu baixo atrito. Frequentemente os dois primeiros polímeros são mais utilizados na indústria, devido à resistência mecânica. (BUDINSKI., 2007).

De Medeiros (2017) reescreveu a Eq. (1) com base no modelo de desgaste de Archard para definir o coeficiente (K) dimensional:

$$\Delta Q \text{ (mm}^3\text{)} = K(N.L) \quad (1)$$

Onde:

- K é equivalente ao coeficiente de desgaste dimensional [mm²/N];
- N é a carga normal sobre a superfície que desgaste [N];
- L a distância percorrida com a carga [mm];
- ΔQ a perda volumétrica [mm³].

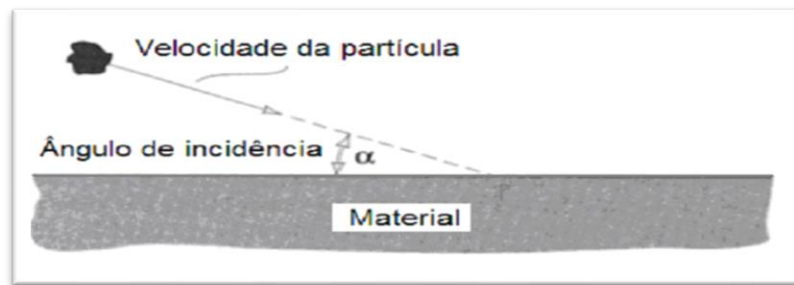
2.2.2 Desgaste Erosivo

O desgaste erosivo é provocado pelo impacto de partículas duras transportadas por fluido, atingindo uma outra superfície denominada macia. Afetam muitos equipamentos e componentes, como turbinas e compressores, inclusive transporte e processamento de materiais particulados e ciclones, porém oferecerem vantagens quando se trata de jato abrasivo, utilizado para limpeza e preparo superficial, (STRAFFELINI, 2015).

Davis, J. R. (2001) comenta que as variáveis primárias que influenciam no desgaste erosivo são: ângulo de incidência Fig. 3, velocidade da partícula e o fluxo de partículas. Além das primárias, variáveis referentes ao abrasivo e ao material erodido são: tamanho da partícula e forma e a dureza; o comportamento do material no ambiente e a dureza são variáveis do material.

A erosão provocada pelas partículas é resultado também do arraste de particulados por um fluido contra a superfície. A degradação do material ocorre pela energia de impacto, provida da energia cinética, gerando elevadas tensões de contato e removendo material. A influência na degradação ocorre de forma diferente em ângulos diferentes (SILVA, 2008 *apud* Oliveira, 2011).

Figura 3: Ângulo de incidência das partículas.



Fonte: Silva, 2008 apud Oliviera, 2011.

Quando o ângulo de impacto é baixo o desgaste a erosão é análogo à abrasão. Outrora quando o ângulo é alto (normal a superfície) o material é deslocado por falha plástica ou quebradiça, (RAGHAVENDRA, 2012).

Entre os vários materiais que são estudados e utilizados no desgaste erosivo, destacam-se os metais e polímeros. O desgaste erosivo dos polímeros no geral apresenta melhor resultado que o do aço, mas o mecanismo de falhas e danos dos polímeros são complexos. Uma característica do desgaste polimérico é a incorporação de particulados sobre a superfície do polímero, impregnando na mesma. Esses particulados podem rolar e deslizar sobre a superfície em vez de serem rebatidos. Ondulações e deslocamentos laterais de massa, que ocorrem quando o ângulo de incidência é baixo, em torno de 30° (SILVA, 2017).

Estudos demonstram que materiais dúcteis tendem a apresentar maior resistência ao impacto normal, enquanto materiais frágeis tendem a ter maior volume arrancado pelo impacto. Eles concluem que a eficiência a erosão pode ser utilizada para conhecer a resistência a erosão de diversos polímeros e compósitos (S. ARJULA e A.P. HARSHA, 2006).

Quando partículas erosivas atingem a superfície do revestimento em um ângulo menor que 90° , o desgaste é iniciado por deformação na superfície, resultante da componente vertical, ocasionando um recuo de material e num segundo momento, a componente horizontal é responsável pelo corte do material. O efeito ocorre simultaneamente, e o desgaste final é a combinação dos dois momentos (CHAHAR, 2018).

Em seus estudos (Kumar, Rahul et al., 2020) utilizou um acelerador centrífugo e 6 quilogramas de sílica para realizar ensaio controlado de desgaste

erosivo para teflon puro, teflon com adição e outros materiais. Ele comenta que para materiais dúcteis, ângulos de incidência de 15° a 30° podem erodir mais as amostras que ângulos maiores. Os mecanismos de desgaste observados para essas condições são rasgamento, corte, arrancamento, fratura frágil seguida de rompimento e formação de cavacos do material dúctil.

2.3 MATERIAIS PARA O REVESTIMENTO

Os polímeros lineares, ou seja, não ramificados (alta densidade) Polietileno e Politetrafluoretileno apresentam baixos coeficientes de atritos quando comparados a maioria dos demais polímeros e possuem boas aplicações em regiões onde se busca deslizamento de materiais. (KAWAKAME, 2000).

Os coeficientes de atrito em polímeros deslizando contra eles mesmos, ou contra metais ou cerâmicas estão na faixa de 0,1 a 0,5 embora valores fora desta faixa podem ser observados. (MENEZES *et al.*, 2013).

2.3.1 Politetrafluoretileno

Esse plástico é conhecido pela elevada inércia química devido à forte ligação carbono-flúor em sua estrutura e possui uma energia superficial muito baixa. Conseqüentemente, o politetrafluoretileno (PTFE, teflon) tem uma superfície escorregadia e apresenta poucas tendências para formar ligações fortes com outros materiais. Seu coeficiente de atrito é baixo, tanto que se tem observado valores tão baixos quanto 0,04, sob cargas elevadas e baixas velocidades de escorregamento (STOETERAU 2004).

Este polímero apresenta uma camada de transferência quando ao deslizar contra um sólido duro, ou seja, mesmo sem lubrificação pode atingir coeficientes de atrito tão baixos quanto 0,05 (SANTANA, 2009 *apud* Stachowiak e Batchelor, 1996).

A densidade encontrada para o politetrafluoretileno pode variar de 0,7 g/cm³ a 3,35 g/cm³ (MATWEB, 2020)

2.3.2 Polietileno de Ultra-alto Peso Molecular

O polietileno de ultra-alto peso (UHMWPE) molecular possui propriedades de absorção de impacto, resistência a abrasão, baixa absorção de água, baixo coeficiente de atrito e é autolubrificante. (SINHA, 2009).

Massas molares entre três e seis milhões estão classificados os polietilenos de ultra alto peso molecular ou simplesmente PEUAPM (UHMW). São fabricados utilizando a polimerização catalisada por metallocenos (HARADA, J., WIEBECK, H., 2005).

Em seus estudos, Wang Y. (1998) realizou testes com um equipamento de erosão de partículas transportadas pelo ar, onde o UHMWPE obteve maior desgaste erosivo em ângulos próximos a 30° utilizando pó de carvão como abrasivo.

A densidade encontrada para o polietileno de alta densidade (UHMWPE) pode variar de 0,8 g/cm³ a 1,45 g/cm³ (MATWEB, 2020)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após os principais assuntos serem abordados na revisão bibliográfica, iniciam-se os procedimentos experimentais, onde foram definidos os métodos e análises para que o estudo traga um bom resultado. Para caracterizar o revestimento desgastado e a massa cerâmica foram realizados ensaios de espectrometria de fluorescência (FRX), análises de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com composição química pontual pelo método de energia dispersiva. Depois foram realizados ensaios de desgaste abrasivo e erosivo em amostras de uhmw e teflon para compará-los.

3.1 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X POR ENERGIA DISPERSIVA - EDXRF (FRX)

A fluorescência de raios X é uma técnica analítica multielementar e não destrutiva, usada para obter informações qualitativas e quantitativas da composição elementar das amostras. Esta metodologia está baseada na produção e detecção de

raio-X característicos, emitidos pelos elementos constituintes da amostra quando irradiada com elétrons, prótons, raio-X ou gama com energias apropriadas.

As composições químicas da argila, politetrafluoretileno e da areia utilizada no ensaio de abrasão foram realizadas no LAQUA/LABSATC. O equipamento usado foi um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF) da marca Shimadzu, modelo EDX-7000.

3.2 ANÁLISE QUÍMICA PONTUAL POR MÉTODO DE ENERGIA DISPERSIVA - EDS

A análise química pontual, também conhecida como microanálise, foi obtida das ampliações das imagens do politetrafluoretileno desgastado. O equipamento EDS Quantax Bruker acoplado ao microscópio eletrônico realiza a análise por intermédio da varredura por energia dispersiva EDS (Energy Dispersive Scanning). O ensaio consiste na aquisição do espectro de energia, que incide sobre a superfície da amostra com a ampliação desejada, por meio do microscópio, e posteriormente, é feita a quantificação dos elementos constituintes da amostra. Dessa forma é possível a identificação de possíveis materiais abrasivos, incrustados na superfície do polímero desgastado.

3.3 ANÁLISE DE IMAGEM POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)

Para o corpo de prova retirado em aplicação foram realizados ensaios de microscopia eletrônica por varredura (MEV) para possível identificação do mecanismo de desgaste e confirmação da origem do abrasivo.

Realizaram-se ensaios via MEV nos corpos de provas ensaiados no desgaste erosivo com intuito de analisar os mecanismos de desgaste.

3.4 ENSAIO DESGASTE ASTM G-65

O ensaio de desgaste por roda de borracha ASTM G-65 (2016) objetiva quantificar a taxa de desgaste utilizando areia como abrasivo, uma roda de borracha e uma determinada carga pressionando a amostra contra a roda. O ensaio simula

abrasão a baixa tensão e desgaste a três corpos em que a areia vaza entre a amostra e a roda numa vazão entre 300 e 400 g/min. Os resultados são apresentados pela perda de volume das amostras.

Para esse ensaio foi selecionado o procedimento B que menciona 10 minutos para teste e o mesmo dividido em 5 ensaios. Abaixo seguem outros dados parametrizados na Tab. 2:

Tabela 2: Parâmetros ensaio utilizados

Parâmetros	Dados
Vazão abrasivo	350 g/min
Carga	130 N
Ensaio por amostra	5
Tempo de ensaio	2 min
Granulometria da areia	50 mesh
Diâmetro da roda	220 mm
Rotação da Roda	200 rpm

Fonte: Do Autor (2019)

Antes do início do ensaio e em cada intervalo, as peças foram limpas com álcool isopropílico 99,8%, secos e pesados em balança com resolução de 0,01 g para coleta de dados.

Conforme ASTM G65-16 (2016) o resultado do ensaio será expresso em perda de volume, pela equação abaixo:

$$\text{Volume Perdido (m}^3\text{)} = \frac{\text{Massa perdida (kg)}}{\text{massa específica (}\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\text{)}} \quad (2)$$

Para utilização da equação anterior e a equação de desgaste, encontrou-se a massa específica de cada material. Para cálculo da massa específica foram retiradas uma amostra de cada material, pesadas na balança com resolução de 0,01 g. Após isso, foram medidas com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm e calculado o volume das amostras.

Para uma avaliação conforme literatura, utilizou-se a Eq. (1) para plotar o gráfico de perda volumétrica por distância percorrida multiplicado pela carga.

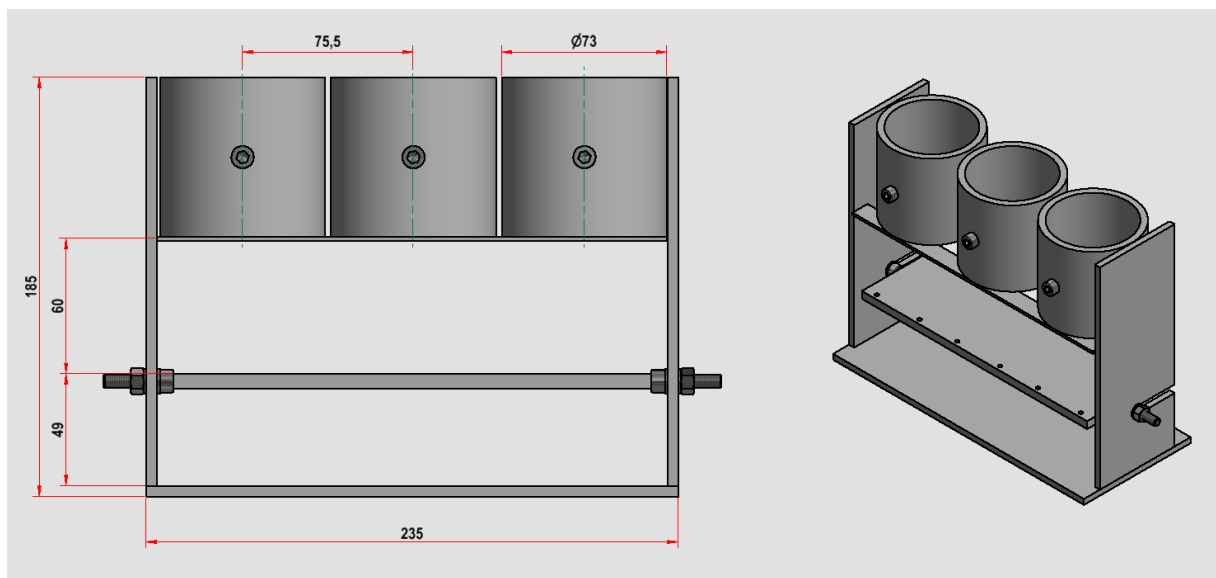
3.5 ENSAIO DESGASTE EROSIVO

Ensaio de desgaste erosivo geralmente são executados em laboratórios com equipamentos preparados conforme a norma ASTM G-76 (2018) ou em bancadas contruídas homologadas pela norma. A norma indica as condições de trabalho para padronização dos testes mas também abre parenteses para condições diferentes. Para isso ela indica que sejam divulgadas as alterações das condições e variáveis.

Devido ao custo desse tipo de ensaio em laboratório e até mesmo a construção de um similar em que várias condições devem ser controladas, para poder apresentar um resultado de desgaste erosivo foi desenvolvido um ensaio a partir de um equipamento de jateamento abrasivo industrial utilizado para preparação de superfícies para a pintura.

O ensaio consiste em utilizar o equipamento de jato com areia como abrasivo nas condições normais de uso em que peças de aço são normalmente jateadas com acabamento ao metal quase branco, padrão Sa 2.1/2. O suporte desenvolvido comporta três amostras ao mesmo tempo e possui um tubo na parte superior para posicionar o bico do jato centralizado com as amostras, conforme Fig. 4:

Figura 4: Suporte para ensaio jateamento



Fonte: Do Autor (2020)

A chapa de base para as amostras pode ser rotacionada para que o ensaio ocorra em diferentes ângulos.

Devido a dificuldade de regular o equipamento e a falta de dados de vazão e velocidade das partículas, equações para desgaste erosivo não poderão ser aplicadas. Para avaliar o desgaste erosivo dessa forma utilizou-se a equação de perda volumétrica, Eq. (2), expressando resultados de volume perdido em mm^3 .

3.5.1 Funcionamento do equipamento de jateamento

O equipamento de jateamento é composto por um tanque onde o material abrasivo é armazenado. Também possui uma válvula na parte superior que ao abrir o registro da rede de ar, o tanque começa a ser pressurizado e a válvula se fecha. Abaixo do tanque existe outro registro que regula a quantidade de material que sai do tanque. Uma linha de ar ingressa diretamente após o registro geral passa pela válvula inferior e vai diretamente para o bico. A vazão do material e de ar no bico são controladas por esses registros de esfera manuais, ou seja, não apresentam precisão.

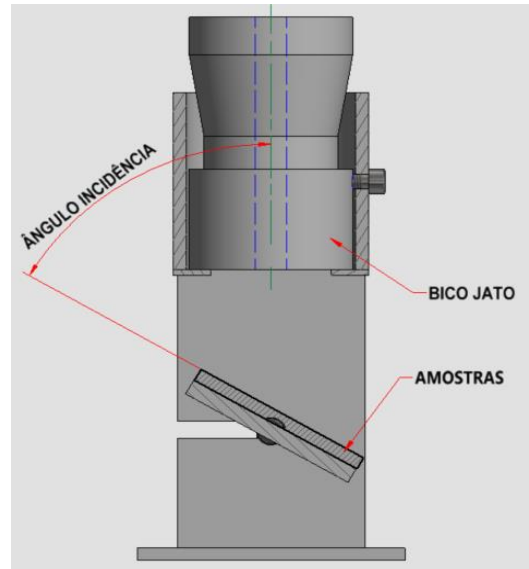
3.5.2 Procedimento do ensaio

Inicialmente as amostras foram cortadas, furadas e após isso, limpas com álcool isopropílico 99,8%, logo foram secas e pesadas em uma balança com resolução de 0,0001 g para a coleta de dados. Para os ensaios foram fabricadas quatro amostras para que cada material fosse testado em quatro ângulos diferentes de desgaste.

A dimensão das amostras foi obtida arbitrariamente, definidas a partir do projeto do suporte para que fosse compacto. As amostras tem 65mm de comprimento e 50mm de largura. Amostra de teflon possuem espessura de 3mm e as de UHMW 6mm.

Cada etapa do ensaio consiste em expor ao desgaste uma amostra de cada material presa ao suporte. As amostras foram expostas utilizando como base o ângulo de incidência referenciado na literatura, conforme Fig. 5:

Figura 5: Posicionamento das amostras



Fonte: Do Autor (2020)

Os ângulos de incidência adotados foram de 15°, 30°, 60° e 90°. Dessa forma o ensaio abrange os ângulos de menor e de maior desgaste dos materiais dúcteis.

Conforme citado, o equipamento de jato foi regulado simulando um trabalho comum. Cada amostra ficou exposta ao jateamento durante 10 minutos. Após a primeira amostra ser ensaiada o jato foi desligado, logo a posição do bico foi alterada para a próxima amostra novamente.

Depois de serem ensaiadas, as amostras foram limpas e pesadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados das análises e ensaios realizados nos materiais, desde ensaios laboratoriais de análise química e imagem, à ensaios de desgaste. Análises do abrasivo presente no processo, da massa cerâmica, do politetrafluoretileno sem desgaste, da areia usada como abrasivo no teste de roda de borracha e das amostras de UHMW serão apresentadas a seguir.

4.1 RESULTADOS ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA (FRX)

Tornou-se necessário conhecer a composição química da massa cerâmica utilizada para identificar os principais materiais abrasivos, para isso foi utilizado o

método FRX. Também foi confirmada a composição química do teflon, amostra essa retirada em aplicação.

4.1.1 Espectrometria de fluorescência FRX da massa cerâmica

Para conhecer a composição química da massa cerâmica utilizada no processo via seca, uma amostra do material foi retirada de uma cerâmica da região que utiliza o processo via seca. Vale ressaltar que nem todas as cerâmicas que utilizam o processo via seca possuem massas cerâmicas com a mesma composição.

A composição química da amostra retirada foi caracterizada conforme Tab. 3:

Tabela 3: Análise massa cerâmica

Compostos Químicos	Composição	Compostos Químicos	Composição
SiO ₂	67,267%	ZrO ₂	0,032%
Al ₂ O ₃	18,349%	Rb ₂ O	0,020%
K ₂ O	5,714%	ZnO	0,017%
Fe ₂ O ₃	5,242%	SrO	0,011%
MgO	1,908%	Cr ₂ O ₃	0,007%
TiO ₂	0,770%	Ir ₂ O ₃	0,007%
CaO	0,326%	Y ₂ O ₃	0,007%
SO ₃	0,141%	PbO	0,003%
MnO	0,085%	Ga ₂ O ₃	0,003%
V ₂ O ₅	0,045%	NbO	0,002%
P ₂ O ₅	0,041%	ThO ₂	0,002%
		Total:	100%

Fonte: Do Autor (2019)

Na caracterização das argilas para fabricação de cerâmica, os elementos mais presentes foram a Sílica e Alumina. Os dois possuem altas durezas e são um dos responsáveis pelo desgaste dos componentes. A alumina possui uma dureza maior que a sílica e está em 18,349% da amostra.

4.1.2 Espectrometria de fluorescência de raios X FRX do teflon virgem

Para validar a origem do material utilizada originalmente no revestimento, realizou-se a análise do mesmo, os resultados são mostrados na Tab. 4:

Tabela 4: Análise química teflon

Compostos Químicos	Composição
C ₂ F ₄	99,916%
Cl	0,031%
Si	0,030%

Fonte: Do Autor (2019)

A análise da amostra de politetrafluoretileno acusou para aproximadamente 100% de C₂F₄ (politetrafluoretileno). Os demais elementos foram ocultados por serem considerados de baixa concentração, são aditivos poliméricos como, Cl, Si e S e outros, considerados residuais e impurezas.

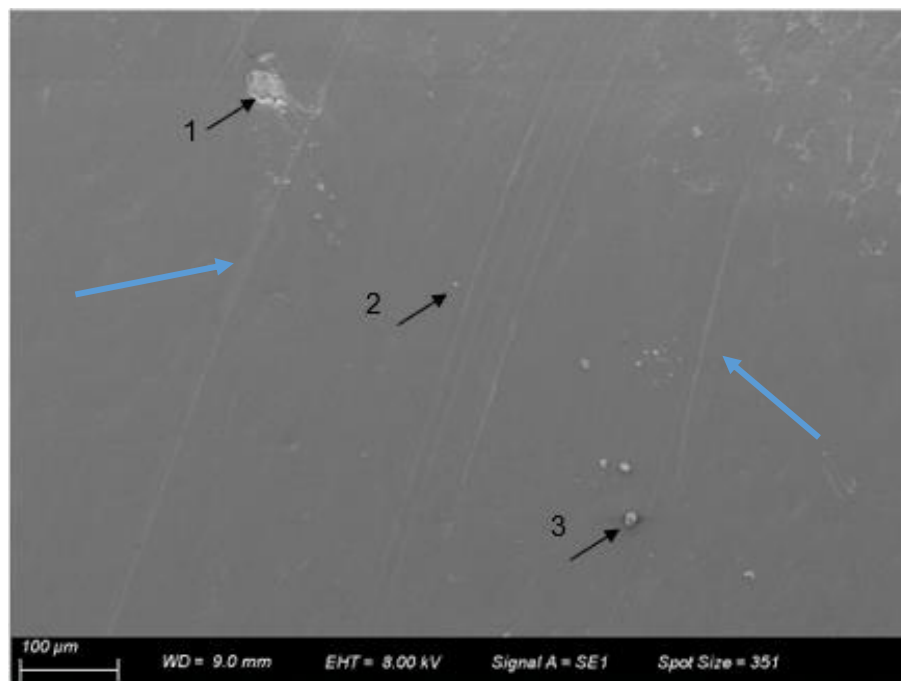
4.2 ANÁLISES QUÍMICAS PONTUAIS POR MÉTODO DE ENERGIA DISPERSIVA - EDS

As análises químicas foram realizadas para identificação do material abrasivo presente no ambiente onde são aplicados os revestimentos. Foi identificando seus principais abrasivos, como Alumina e Sílica. Também foi realizado a análise do politetrafluoretileno desgastado e teste pontual para identificar presença ou não de abrasivo na superfície do revestimento.

4.2.1 Análise química pontual politetrafluoretileno desgastado

A análise química pontual foi realizada para identificar a presença do abrasivo na superfície desgastada do politetrafluoretileno, visto que as aplicações do revestimento o material abrasivo está escoando sob ele. Na Fig. 6 podemos ver três pontos que foram analisados e na Tab. 5 suas composições químicas:

Figura 6 : Imagem MEV teflon desgastado 300x



Fonte: Do Autor (2019)

Tabela 5: Composição química pontual teflon desgastado

Teflon desgastado			
Elemento	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Silício	37,77%	0,68%	19,05%
Ferro	8,65%	0,00%	0,00%
Alumínio	15,64%	0,28%	0,91%
Carbono	0,00%	22,91%	25,92%
Flúor	14,37%	75,87%	8,54%
Oxigênio	23,56%	0,00%	9,85%
Cloro	0,00%	0,26%	17,48%
Sódio	0,00%	0,00%	18,24%
Total	100%	100%	100%

Fonte: Do Autor (2019)

No ponto [1] da Fig. 06 a análise química pontual resultou para uma concentração de Silício, Oxigênio, Alumínio e ferro em maiores quantidades, elementos que vem a formar SiO_2 (Sílica) e Al_2O_3 (Alumina). Visto isso, o ponto [1] pode ser uma incrustação de massa cerâmica que ficou no revestimento de politetrafluoretileno.

No ponto [2], mais de 98% são Flúor e Carbono, elementos base do politetrafluoretileno.

Já no ponto [3] também foram encontrados vestígios da massa cerâmica, incluindo também o contaminante cloreto de sódio (NaCl).

Além disso foram identificados sulcos na superfície do teflon desgastado, indicados pelas setas azuis.

4.3 ENSAIOS DE DESGASTE

Para caracterização do desgaste das amostras foram utilizados dois ensaios, ensaio de abrasão por roda de borracha conforme norma ASTM G-65 e para o ensaio de erosão, foi utilizado um ensaio com equipamento de jateamento.

4.3.1 Ensaio abrasão por roda de borracha

A massa específica de cada amostra é expressa abaixo na Tab. 6 e foi calculada através da massa de um pedaço da amostra e o cálculo do volume desse pedaço da amostra:

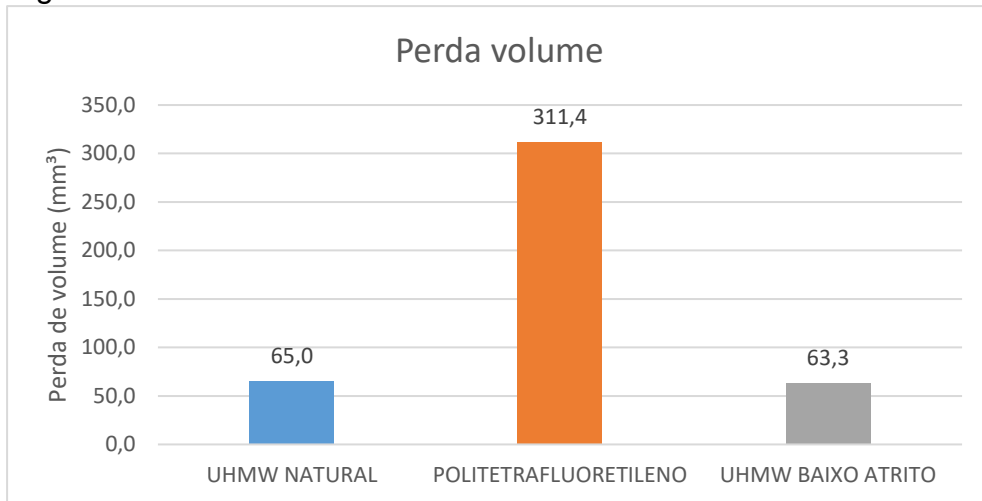
Tabela 6: Massa específica das amostras

Material	Massa específica (g/m³)
Uhmw baixo atrito	0,79
Uhmw natural	0,77
Politetrafluoretileno	1,83

Fonte: Do Autor (2019)

O próximo resultado demonstra a perda volumétrica de cada material que foi ensaio através do ensaio de erosão. Para melhor visualização o resultado foi apresentado em mm³, conforme podemos ver na Fig. 7:

Figura 7: Perda volumétrica das amostras

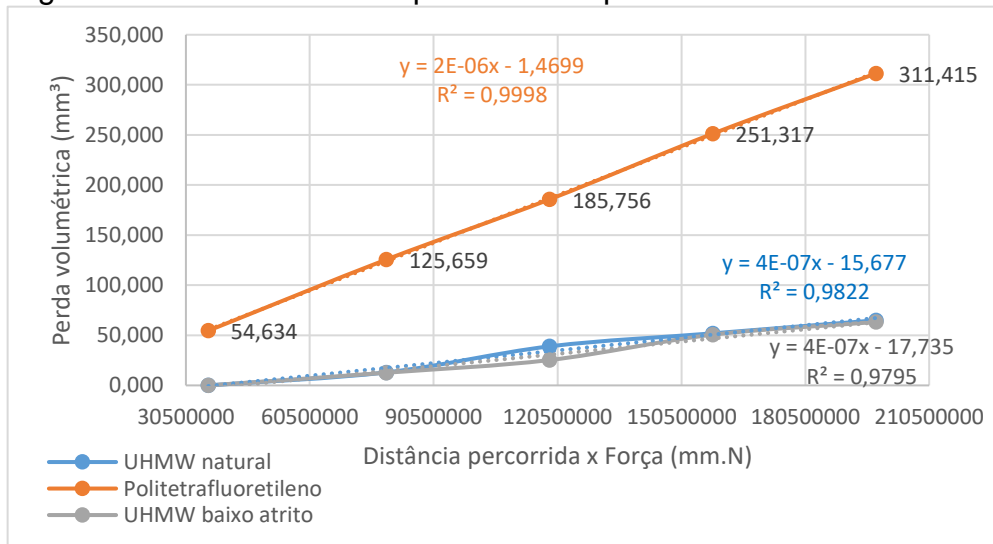


Fonte: Do Autor (2019)

É possível notar que o teflon apresentou um desgaste maior que as amostras de UHMW em relação a perda de massa. Este comportamento deve-se ao fato de o teflon ser aproximadamente 90% cristalino apresentando assim menor tenacidade. Esta característica pode facilitar o rompimento das cadeias poliméricas e contribuir de forma significativa para a perda volumétrica. (KOLTZENBURG, S., 2017)

Utilizando a massa específica encontrada para cada amostra, observa-se na Fig. 8 a perda volumétrica por distância percorrida ou coeficiente de desgaste dimensional (K) [mm²/N]. É válido dizer que a inclinação da reta equivale ao coeficiente de desgaste, logo, quanto mais inclinada a reta maior o desgaste da amostra:

Figura 8: Perda volumétrica por distância percorrida



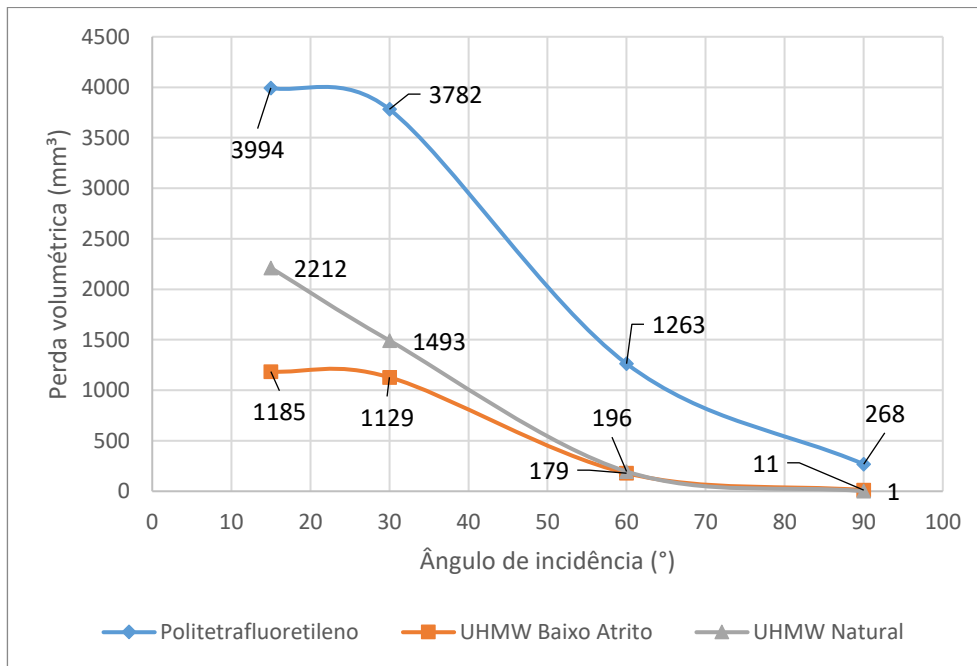
Fonte: Do Autor (2019)

É possível observar pelo coeficiente de desgaste menor que o UHMW teve um desempenho melhor em relação ao teflon e que praticamente não houve diferença de desgaste entre o UHMW natural e o baixo atrito.

4.3.2 Ensaio erosivo por jateamento

Os resultados a seguir do ensaio erosivo através do jateamento estão expressos por perda volumétrica de amostra para cada ângulo ensaiado, conforme se observa na Fig. 9:

Figura 9: Perda volumétrica pelo ângulo de incidência



Fonte: Do Autor (2020)

Observa-se que as amostras de politetrafluoretileno tiveram novamente um desgaste maior em todos os ângulos ensaiados e que nesse ensaio o UHMW baixo atrito apresentou melhor desempenho que o UHMW natural nos ângulos menores a 60°. Os ensaios encontrados na literatura apontam para um maior desgaste de materiais dúcteis encontrado num ângulo de incidência de 30°.

O ensaio erosivo resultou em um perfil de desgaste a amostra de politetrafluoretileno similar ao encontrado em aplicação, tanto no ângulo de incidência de 15° e 30°, mostrado na Fig. 10:

Figura 10: Amostra politetrafluoretileno a 15°



Fonte: Do Autor (2020)

Já ambas as amostras de UHMW apresentaram perfis semelhantes a Fig. 11:

Figura 11: Amostras de UHMW ensaiadas 15°



Fonte: Do Autor (2020)

As amostras de politetrafluoretileno tinham espessuras menores que as de UHMW e acabaram sendo furadas pelo ensaio. Apesar disso, o desgaste do UHMW não foi tão profundo quanto no politetrafluoretileno.

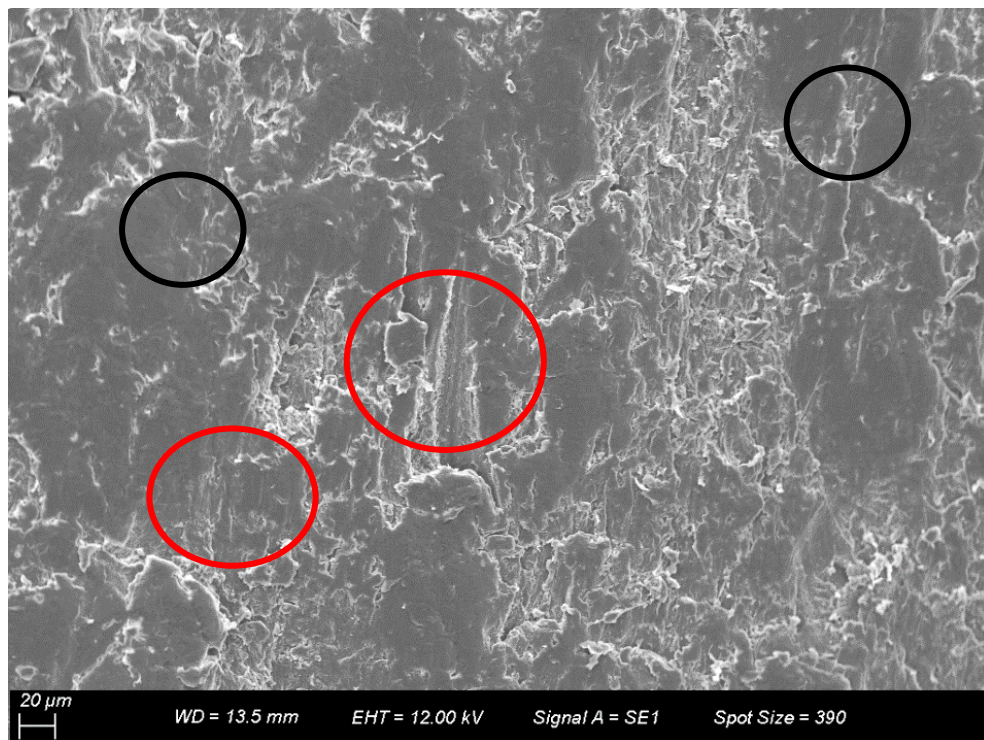
4.4 ANÁLISE DA IMAGEM POR MICROSCÓPICA MEV APÓS ENSAIO EROSIVO

Visto a semelhança superficial do modo de desgaste entre as amostras coletadas em campo de politetrafluoretileno e a amostra ensaiada via desgaste erosivo, optou-se por realizar análise microscópica MEV nas amostras após ensaio

erosivo. Como foram 12 amostras, a microscopia foi feita apenas nas amostras de cada material ensaiadas no ângulo de incidência de 15°, que acabaram demonstrando maior desgaste.

O acabamento superficial do material também é um requisito importante, a seguir podemos verificar os resultados da microscopia MEV da superfície próxima ao centro do desgaste de cada amostra. A seguir conforme Fig. 12 vejamos a amostra de politetrafluoretileno, em sequência a Fig. 13 para o UHMW natural e Fig. 14 para o UHMW de baixo atrito:

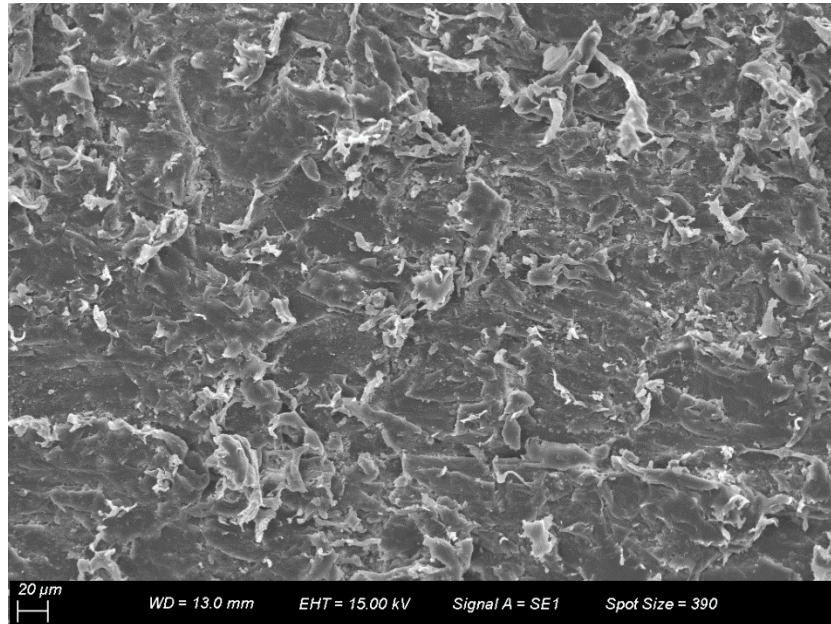
Figura 12: Politetrafluoretileno após ensaio erosivo 500x



Fonte: Do Autor (2019)

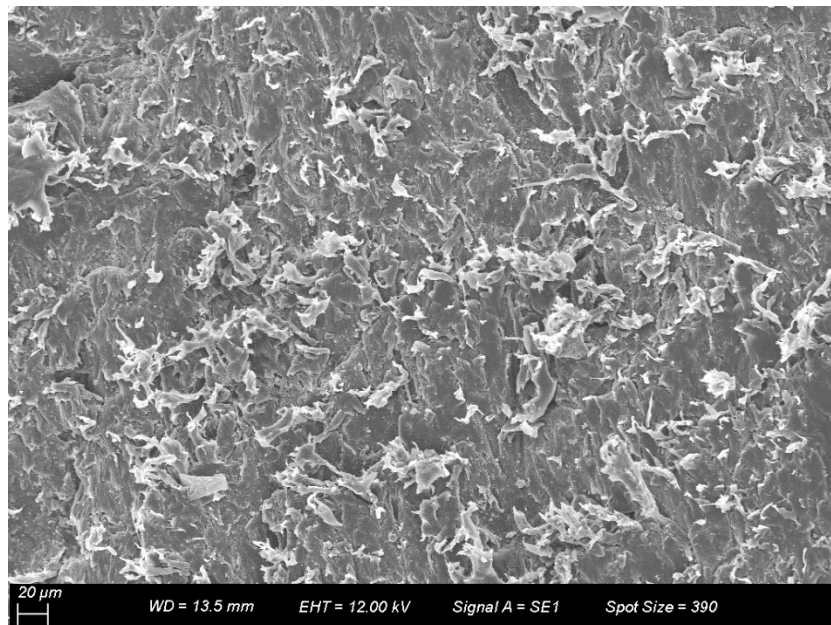
Observa-se na Fig. 12 pontos na superfície onde o material manteve regiões na superfície lisas (em preto) e pontos onde ocorreu arrancamento e deslocamento do material base (em vermelho).

Figura 13: UHMW natural após ensaio erosivo 500x



Fonte: Do Autor (2020)

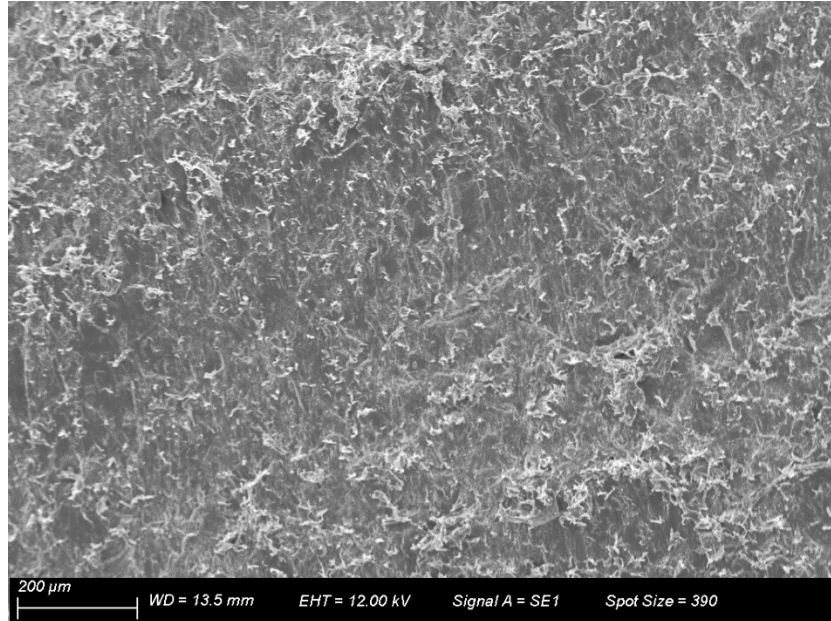
Figura 14: UHMW baixo atrito após ensaio erosivo 500x



Fonte: Do Autor (2020)

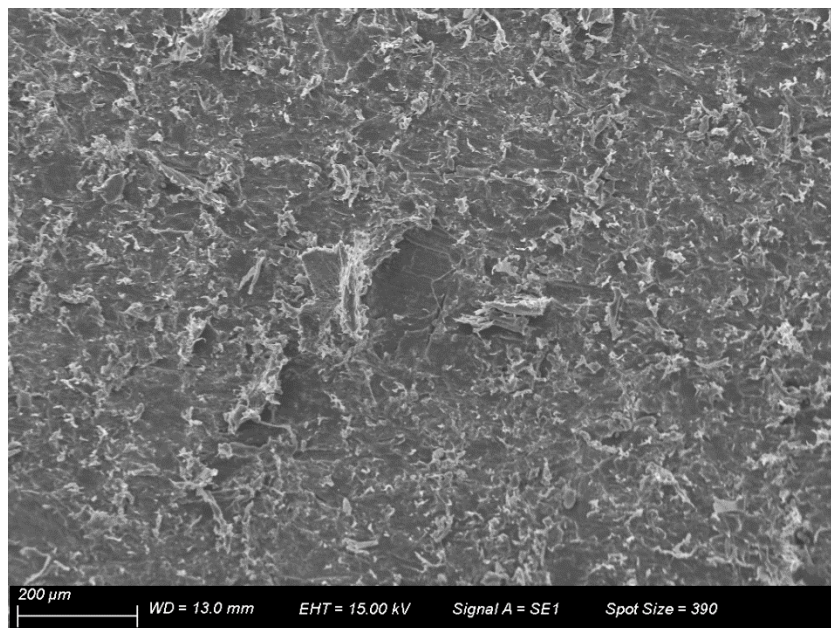
Já na Fig. 13 e Fig. 14 a superfície das amostras do UHMW natural e UHMW baixo atrito demonstraram poucas partes lisas na superfície e regiões onde ocorreu acúmulo de fibras soltas, criando uma região áspera em forma de escada, conforme se observa ver na Fig. 15 e Fig. 16:

Figura 15: UHMW baixo atrito após ensaio erosivo 200x



Fonte: Do Autor (2020)

Figura 16: UHMW natural após ensaio erosivo 200x



Fonte: Do Autor (2020)

Além dos pontos já citados, podemos observar a presença de vários mecanismos de desgaste nas amostras, dentre eles a formação de cavacos, cortes, rasgos e arrancamentos.

5. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir alguns pontos:

- O revestimento de politetrafluoretileno utilizado atualmente prevalece o mecanismo de desgaste erosivo;
- Tanto o UHMW natural quanto o de baixo atrito tiveram melhor desempenho contra o desgaste comparado ao politetrafluoretileno, porém apresentaram superfícies ásperas e com sulcos após serem expostas ao ensaio erosivo, e que em aplicação, poderiam gerar problemas de acúmulo da massa cerâmica nos sulcos gerados, prejudicando a formação dos grãos no processo;
- O ângulo de incidência do desgaste erosivo que mais gerou desgaste nas amostras foi o de 15°, o que consta na literatura é entre os ângulos de 15° de 30°, são os mais severos para esses tipos de materiais;
- O equipamento utilizado no ensaio erosivo não apresentava opções de regulagem e não foi possível manter controle de vazão e nem velocidade de partículas;
- A substituição do material poderá ser feita em caráter de teste em área para avaliar a performance do UHMW em relação a rugosidade, visto seu melhor desempenho em relação ao desgaste.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após as conclusões sobre é possível sugerir alguns pontos relevantes para futuros trabalhos:

- Incluir na gama de amostras blendas de polímeros para possivelmente buscar melhores desempenhos;
- Realização de ensaio para avaliar o coeficiente de atrito dos materiais;
- Desenvolver um equipamento focado na avaliação do desgaste erosivo, com controle dos parâmetros conforme norma.

REFERÊNCIAS

ASM International. ASM Handbook, “Friction, Lubrification and Wear Technology”. Ed. Cotell, 4th edition, Vol. 18. Detroit, USA, 1992, 1879 p.

ASTM G65-16, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, 2016;

ASTM G76-18, Standard Test Method for Conducting Erosion Tests By Solid Particle Impingement Using Gas Jets, 2018;

ARJULA, Suresh; HARSHA, A. P. Study of erosion efficiency of polymers and polymer composites. Polymer testing, v. 25, n. 2, p. 188-196, 2006.

BOTH, G. B., 2011, “Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio”. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre/RS, 122 f.

BUDINSKI, Kenneth G. Guide to friction, wear and erosion testing. West Conshohocken, USA: ASTM international, 2007.

CHAHAR, Bharat Singh; SIDDHARTHA, Ananat Krishna Pun. Erosion wear of ductile materials: a review. 2018.

DAVIS, Joseph R. (Ed.). Surface engineering for corrosion and wear resistance. ASM international, 2001.

DE MEDEIROS, Eduardo C. et al. Comparação do desgaste abrasivo das chapas de aço hardox® 450 e 550 e do polímero uhmw usados na superfície do sistema de transporte do minerador contínuo Joy modelo 14CM09, V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, Criciúma – SC – Brasil, 2017.

HARADA, J., WIEBECK, H., 2005, “Plásticos de engenharia: Tecnologias e aplicações”, Ed. Artliber, São Paulo, 350 p.

HUTCHINGS, I. M., 1992, “Tribology – Friction and wear of engineering materials”, London, British Library.

KAWAKAME, M. S. e BRESSAN, J. D., *Atrito e Desgaste em Polímeros*, 14º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Pedro – SP, 2000, pg.53401-53412.

KOLTZENBURG, Sebastian; MASKOS, Michael; NUYKEN, Oskar. **Polymer Chemistry**. Berlin, Germany:: Springer, 2017.

KUMAR, Rahul et al. Performance of polyimide and PTFE based composites under sliding, erosive and high stress abrasive conditions. *Tribology International*, p. 106282, 2020.

K-SIDER EQUIPAMENTOS PARA CERÂMICA E MINERAÇÃO. Disponível em: <http://ksider.com.br/produto/umidificador-de-massa-ks-g-1315-2/>; Acesso em 04 de julho de 2020;

MATWEB. MATERIAL PROPERTY DATA. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4d14eac958e5401a8fd152e1261b6843>>. Acesso em: 20 de junho de 2020.

MATWEB. MATERIAL PROPERTY DATA. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=f9470672aa5549cb9c7b157677d02062>>. Acesso em: 20 de junho de 2020.

MELCHIADES, Fabio Gomes. “Comparative study between dry and wet routes to the Porcelain tiles bodies preparation”. 2011. 214 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

MENEZES, Pradeep L. et al. (Ed.). *Tribology for scientists and engineers*. New York: Springer, 2013.

OLIVEIRA, H. P. S., 2011, “Contribuição ao estudo de desgaste erosivo e abrasivo de poliuretanos utilizados na indústria mineradora e petrolífera”. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2011, Parte I, 106 f.

RAGHAVENDRA, Dr. Gujjala. (2012). Studying the Parameters of the Solid Particle Erosion and Test Procedure. Caspian Journal of Applied Sciences Research. 1. 176-181.

SANTANA, S. J. de., 2009, “Avaliação tribológica dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado em contato com aço AISI 52100”. Dissertação (Mestrado) UFRN – Natal – RN, 2009, 89 f.

SILVA, V. A. da., 2017, “Desgaste de poliuretano por erosão úmida: Desenvolvimento de um ensaio tecnológico”. Dissertação (Mestrado) UFOP – CETEC – UEMG, Ouro Preto – MG, 2017, 73 f.

SINHA, K. S., “Polymer Tribology”, Imperial College Press, London, 2009, 724p.

STOETERAU, R. L., 2004, “Tribologia” – Apostila de Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis-SC, 179 pg. 20, 22.

STRAFFELINI G. Wear Mechanisms. In: Straffelini G, editor. Friction and Wear. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Cham: Springer; 2015.p 292.

WANG, Y. Q. et al. The blast erosion behaviour of ultrahigh molecular weight polyethylene. Wear, v. 218, n. 1, p. 128-133, 1998.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força concedida para realização do trabalho, aos professores e em especial ao meu orientador Reginaldo Rosso Marcello, e a todos que de certa forma contribuíram com o andamento do trabalho.