

ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE ABRASIVO POR REJEITO DO CARVÃO MINERAL NA CALHA DE DIRECIONAMENTO UTILIZANDO AÇO INOXIDÁVEL, AÇO DOMEX E O POLÍMERO UHMW

Rogério S. JÚNIOR¹, Elvys Isaías M. CURI², Fabio PERUCH³, Richard de M. CASTRO⁴

Faculdade SATC, Engenharia Mecânica - Rua Pascoal Meller, 73 - CEP 88.805-380 - CP 362 - Criciúma - SC - Brasil.

rogerio_salvaro@hotmail.com¹; elvys.curi@satc.edu.br²; fabio.peruch@satc.edu.br³; richard.castro@satc.edu.br⁴

RESUMO

O processo de mineração requer de uma etapa de beneficiamento do carvão para que as impurezas sejam retiradas, nessa etapa o material mineiro é transportado por correias transportadoras e descarregado em funil e calhas direcionadoras. O carvão mineral é corrosivo e abrasivo desgastando o material por onde se desliza. Este trabalho tem por objetivo avaliar o desgaste da superfície das calhas direcionadoras por onde ocorre o deslizamento do carvão mineral, simulando estas condições no laboratório de tribologia, com o propósito de selecionar o material mais apropriado para estas condições. O estudo se realiza em um Tribômetro tipo pino sobre disco com esfera de cerâmica como abrasivo e outro Tribômetro constituído de uma bancada em rampa com o rejeito do carvão mineral como abrasivo tornando o resultado mais preciso, de modo que seja possível comparar através do estudo de desgaste abrasivo e do comportamento dos materiais analisados, tais como o Aço inoxidável AISI 304, o polímero de Ultra Alto Peso Molecular (UHMW) e o Aço Domex 700W, caracterizando cada um dos materiais para escolher o mais apropriado. Ao final os resultados obtidos nos dois métodos de ensaios de desgaste abrasivo foram importantes para avaliar o tempo de vida dos materiais. O polímero UHMW possui um coeficiente de atrito muito baixo mas devido a sua massa específica pequena o coeficiente de desgaste foi próximo aos metais comparados. Ao final foi realizado uma análise de custo-benefício dos materiais.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo, Aço inoxidável AISI 304; Polímero UHMW; Tribômetro; Custo-benefício.

ABSTRACT

The mining process requires a stage of beneficiation of the coal so that the impurities are removed, in stage, the mining material is transported by conveyor belts and discharged in funnel and directing rails. Mineral coal is corrosive and abrasive by wearing away the material through which it slides. This work aims to evaluate the wear of the directing rails surface where the mineral coal slides occur, simulating these conditions in the tribology laboratory, in order to select the most appropriate material for these conditions. The research was carried on pin-on-disc tribometer with ball ceramic as abrasive, and another tribometer consisting of a ramp bench with the coal tail as abrasive, making the result more precise so that it can be compared through the study of Abrasive wear and behavior of the materials analyzed, such as AISI 304 stainless steel, Ultra High Molecular Weight polymer (UHMW) and Domex 700W steel, featuring each of the materials to choose the most appropriate. At the end the results obtained in the two methods of abrasive wear tests were important to evaluate the life time of the materials. The UHMW polymer has a very low coefficient of friction but due to its small specific mass the coefficient of wear was close to the metals compared. Finally, a cost-benefit analysis of the materials was carried out.

Key-Words: Abrasive wear, AISI 304 stainless steel; UHMW polymer; Tribometer; Cost benefit

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral é uma das maiores fontes de energia não renovável do país, e se classifica em energético e metalúrgico. O carvão energético é destinado às termelétricas e o metalúrgico destina-

se, à fabricação de agregados siderúrgicos e produtos carboquímicos (Peterson, 2008).

O carvão mineral brasileiro contém altos teores de impurezas, sendo necessário seu beneficiamento (Filho, 2013). O minério bruto é

britado para diminuir sua granulometria. Isto facilita o processo de elutriação aquosa que possibilita a separação entre o carvão mineral e o rejeito, através da diferença de densidade. Após do britamento, se remove a matéria orgânica e impurezas (rejeitos), para que o beneficiamento atinga os padrões de qualidade exigidos pelas usinas termoeletricas. A matéria orgânica e impurezas do carvão, possuem alta umidade e elementos ácidos, estas corroem os materiais potencializando o desgaste dos metais, atacados pela abrasão e corrosão do rejeito.

A perda progressiva de material, devido às interações dinâmicas de duas superfícies em contato em movimentos relativos, é conhecida como desgaste. A resistência ao desgaste não é uma propriedade dos materiais e sim um comportamento complexo que depende do par de materiais em contato e de outros fatores, tais como, geometria de contato, pressão de contato, rugosidade da superfície, temperatura do meio ambiente, velocidade de deslizamento e da presença, ou não, de um lubrificante. (Kawakame, 2000).

O desgaste abrasivo é bastante comum nos aços e considerado o mais grave. Ele surge quando há contato físico direto da superfície mais dura à outra. Sob a ação da carga normal, as asperezas da superfície mais dura penetram à mais mole, produzindo deformações plásticas, e com cisalhamento o material mais mole é removido da superfície (Stolarski, 1990).

Conforme Stachowiaki (2013), qualquer material, mesmo que a maior parte seja muito macia, pode provocar o desgaste abrasivo. Além disso, segundo Tabor (1956), a perda de volume do material é diretamente relacionada com a dureza do abrasivo.

O desgaste dos polímeros é predominado pela adesão e se caracteriza pela formação de finas partículas. Em deslizamento, ocorre união momentânea entre o polímero e a superfície. Esta união se forma pelas atrações físicas, tais como forças de Van der Waals ou amolecimento térmico ou fusão da superfície. Há outros mecanismos que envolvem a transferência de material, por meio de cisalhamento laminar ou estiramento a frio. Esse tipo de desgaste é caracterizado pela formação de um filme polimérico na face da superfície mais dura. O sucesso da geração e conservação do filme, normalmente resulta em baixa taxa de desgaste. (Kawakame, 2000).

Para caracterizar a dureza dos abrasivos, se utiliza a escala de Mohs, que varia de 1 a 10 nos

minerais. Sendo 1 para talco (mole) e 10 para diamante (duro). Tabor (1956) investigou a possibilidade de que a escala fosse arbitrária, e correlacionou os valores dos minerais às medidas de dureza Vickers. (Pintaúde, 2002),

Segundo Kruschov (1957), o parâmetro usado para prever o regime de desgaste abrasivo, moderado ou severo, é a razão entre dureza do abrasivo (H_a) e a dureza do material desgastado (H). A perda de volume em função desta razão, resulta em uma curva de transição para dois regimes, moderado, na faixa entre 0,8 e 1,2, e qualquer medida maior a 1,2 estaria no regime severo. Pintaude (2009)

Segundo o experimento de Bradley (2000), o aumento do atrito no deslizamento abrasivo não significou aumento de desgaste. A relação da dureza com desgaste se apresentou de duas maneiras: em aços inoxidáveis endurecidos ao frio, mostraram que o aumento da dureza não melhorou a resistência à abrasão. Em materiais endurecidos por precipitação mostraram que o endurecimento teve pouco efeito nas fortes deformações da abrasão, mas, o atrito foi um indicador do desgaste, concluindo que nem sempre há boa correlação entre a relação de dureza e desgaste (Kruschov, 1957)

O tribômetro é um equipamento versátil para medição de propriedades de atrito e desgaste de combinações de materiais e lubrificantes sob condições específicas de carga, velocidade, temperatura e atmosfera. A caracterização tribológica envolve análises sobre as reais condições de uso do material, bem como estudos sobre o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e durabilidade do filme (Polyana *et al*, 2007).

Para avaliar o desgaste, comumente se realiza ensaios em um Tribômetro convencional tipo pino sobre disco, também é possível de realizar ensaios em um Tribômetro menos convencional (bancada em rampa), configurado para deslizamento abrasivo com uma chapa corpo de prova. Através da análise comparativa entre os resultados dos dois tribômetros, será possível determinar qual destes materiais obteve melhores resultados em relação ao custo-benefício.

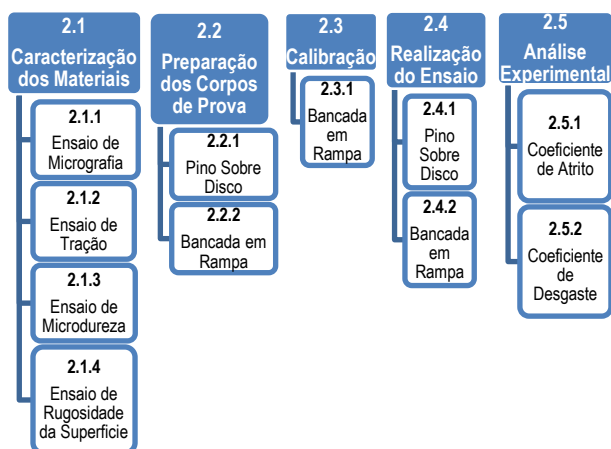
Entre os materiais resistentes à corrosão e desgaste abrasivo encontra-se o aço inoxidável AISI 304L, que apresenta as melhores propriedades para suportar tais condições, em contrapartida, possui um alto valor no mercado. O objetivo desta pesquisa é analisar a possível substituição do aço inoxidável AISI 304L por outros materiais, tais como o polímero

de Ultra Alto Peso Molecular (UHMW) ou aço DIN S700MC. O estudo é importante para a indústria carbonífera, já que permitiria a redução de custos de manutenção e uso apropriado dos materiais.

2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de tribômetros para realizar os ensaios de desgaste, e comparar os resultados. As etapas de execução dos ensaios são descritos no fluxograma da Figura 1, que resume o procedimento metodológico aplicado.

Figura 1. Fluxograma do procedimento metodológico.



Fonte: O autor (2017).

As etapas realizadas serão comentadas desde a caracterização dos materiais até a análise experimental dos resultados.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

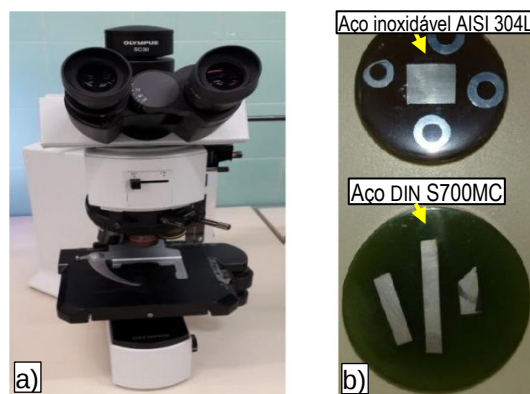
Para sua caracterização se realizaram diferentes ensaios, tais como: metalografia, micrografia, micro dureza, ensaio de tração e rugosidade da superfície. Se avaliou as propriedades mecânicas obtidas com os ensaios e se comparou a informação do fabricante para ter confiabilidade de seu normal desempenho.

2.1.1 Ensaio de Micrografia

O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização Microestrutural - LACAMI e consistiu no estudo dos materiais com o auxílio do microscópio, nele foi observado as fases presentes e identificado a granulação do material (tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões.

A análise se realizou numa pequena chapa de metal de superfície polida, embutida em resina. Se efetuou um ataque químico para visualizar com maior nitidez o contorno de grãos e as fases da microestrutura do metal. O aço DIN S700MC obteve um ataque com nital de 2%, já no aço inoxidável AISI 304L, se realizou com ataque eletrolítico na tensão de 1,1 V e corrente de 0,075-0,14 A/cm², em um tempo de banho de 120 s numa solução de 60% de HNO₃ (ácido nítrico) + 40% de H₂O (água destilada). Na microscopia, utilizou-se o microscópio eletrônico Olympus BX51M, nos corpos de prova embutidos na resina mostrada na Figura 2. Para aquisição e análise dos dados se utilizou o *Software* AnalySIS GetI.

Figura 2. Ensaio de micrografia: a) microscópio, b) CP's

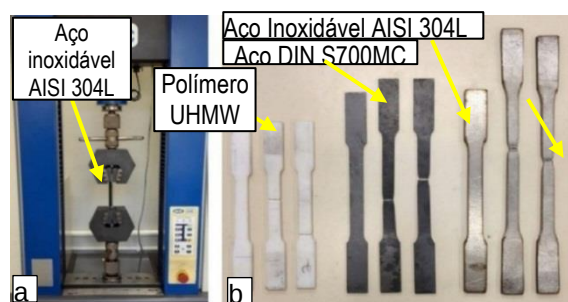


Fonte: O autor (2017).

2.1.2 Ensaio de Tração

O ensaio mecânico destrutivo se realizou conforme a norma NBR ISO 6892:2013, para os metais e a norma ASTM D 638-02a para o polímero. Na execução foi instalado os corpos de provas (CP's) na máquina EMIC DL-10000, mostrado na Fig.3a. A máquina exerce esforço unidirecional até o rompimento do material, como se mostra na Fig. 3b.

Figura 3. Ensaio de tração: a) máquina de tração, b) CP's

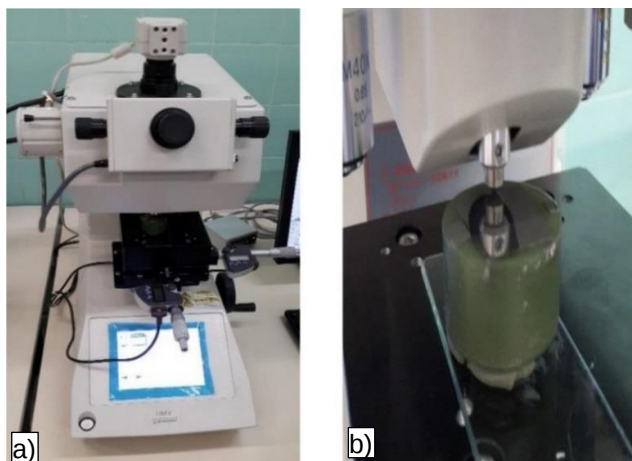


Fonte: O autor (2017).

2.1.3 Ensaio de Microdureza

No ensaio foi usado um microdurômetro eletrônico Shimadzu HMV-2TADW, que realiza aferições na superfície da amostra do metal, como se mostra na Figura 4. No ensaio se mediu a dureza Vickers de acordo com a norma ASTM E384-11e1.

Figura 4. Ensaio de microdureza: a) microdurômetro eletrônico, b) corpo de prova em ensaio.



Fonte: O autor (2017).

Para o polímero UHMW realizou-se medida de dureza na escala Shore D, segundo a norma ASTM D-2240. Com a impossibilidade de converter os valores de dureza desta escala para outra escala com indentação, foi necessário empregar um durômetro Mitutoyo HR-400 na escala Brinell, segundo norma ABNT NBR 6506-1:2010.

2.1.4 Ensaio de Rugosidade da Superfície

Determinou-se a rugosidade da chapa com o rugosímetro digital portátil TR-100. A rugosidade da superfície foi medida em cada ensaio de abrasão, em diferentes pontos e direções da superfície do material em análise, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287:2002. Utilizou-se o parâmetro de rugosidade R_a (Roughness average), sendo o valor da média aritmética em micrômetro (μm).

2.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova para os ensaios no tribômetro pino sobre disco foram preparados em formato circular, já os utilizados na bancada em rampa foram preparados para possuírem formato retangular.

2.2.1 Pino sobre Disco

No ensaio de pino sobre disco, cada disco do material teve um diâmetro de 50 mm e espessura de 7 mm aproximadamente, como é mostrado na Fig. 5. Na preparação da amostra o polímero UHMW foi usinado, e os aços DIN S700MC e inoxidável AISI 304L foram cortados no plasma CNC.

Figura 5. Corpos de prova após os ensaios: a) polímero UHMW, b) aço DIN S700MC, c) aço inoxidável AISI 304L.



Fonte: O autor (2017).

2.2.2 Bancada em Rampa

Para os ensaios no tribômetro tipo bancada em rampa, as dimensões do corpo de prova utilizadas foram de 320 x 95 mm para os aços e 290 x 140 mm para o polímero UHMW, com espessura de 3 mm, mostrado na Fig. 6.

Figura 6. Corpos de prova após os ensaios: a) polímero UHMW, b) aço DIN S700MC, c) aço inoxidável AISI 304L.



Fonte: O autor (2017).

A preparação dos aços requereu do lixamento da superfície, para que a oxidação não interfira nos valores obtidos, por outro lado, o polímero UHMW passou apenas por corte nas medidas necessárias.

2.3 CALIBRAÇÃO

As células de carga foram calibradas ao utilizar pesos padrões como cargas de referência, de maneira que os sinais de tensão fossem convertidos em valores de força (N).

2.3.1 Bancada em Rampa

A calibração das células de cargas que mensuram a força normal e de atrito, utilizadas na bancada em rampa, consistiu em relacionar as forças produzidas com os pesos padrão acima das células de carga com sinais de saída de voltagem de seu sensor. Com dados correspondentes da força e voltagem se elaborou a reta característica de calibração. A reta se constrói ao colocar pesos-padrão em sequenciais de 500 g na direção sensível à célula de carga, a resposta do sensor são valores de tensão proporcionais à carga estimulo. A saída da tensão foi coletada por uma placa analógica digital modelo NI-6009, da empresa Nacional Instruments®. Os valores sendo registrados pelo programa do software LabVIEW®.

O processamento dos dados de tensão elétrica (mV/V) e força (N), se efetuou com o software Excel, que projetou a reta de calibração, e determinou o fator de conversão de tensão a força, dessa forma, os valores de tensão obtidos nos ensaios, poderão ser convertidos para força. Na Figura 7, podem-se observar os equipamentos utilizados para calibração da bancada em rampa.

Figura 7 – Equipamentos utilizados na calibração do tribômetro bancada em rampa.



Fonte: O autor (2017).

2.4 REALIZAÇÃO DO ENSAIO

A descrição dos ensaios realizados no tribômetro pino sobre disco e na bancada em rampa estão destacados a seguir.

2.4.1 Pino sobre Disco

O funcionamento básico de um tribômetro, tipo pino sobre disco, consiste na aplicação de uma força normal conhecida, através de um pino de ponta esférica de carboneto de tungstênio. O pino se desliza com velocidade constante sobre o disco, que é o corpo de prova em avaliação, como se mostra na Figura 8.

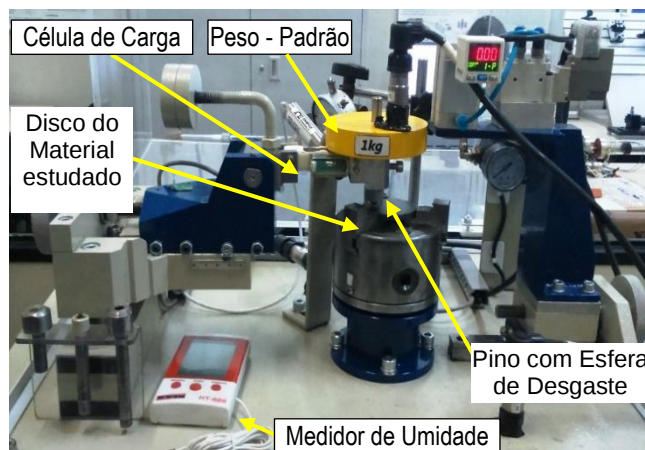
Figura 8. Princípio de funcionamento de um tribômetro do tipo pino sobre disco.



Fonte: O autor (2017).

Os Ensaios dos corpos de prova se realizaram em três velocidades tangenciais iguais, para três pesos diferentes, em uma distância percorrida padrão de 1200 m. Os ensaios geraram informações para avaliar o atrito e o desgaste dos materiais. A medida da força de atrito se efetuou a através de uma célula de carga em um sistema com umidade controlada, representado na Figura 9.

Figura 9 – Tribômetro do tipo Pino sobre Disco.



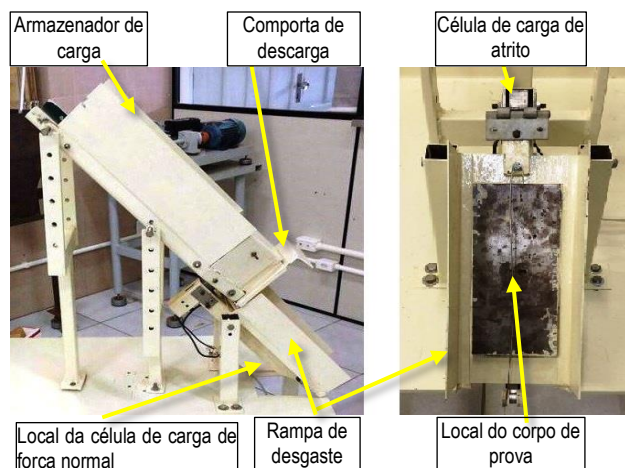
Fonte: O autor (2017).

2.4.2 Bancada em Rampa

No experimento com o tribômetro tipo bancada em rampa foram inseridos 10 kg de material abrasivo – rejeito do carvão mineral – no armazenador de carga do tribômetro mostrado na Figura 10, para produzir o desgaste abrasivo pelo material mineiro por deslizamento no corpo de prova. Para iniciar o ensaio se abre a comporta de descarga e todo o abrasivo é direcionado para a rampa de desgaste, que entra em contato com o corpo de prova, o qual ocasiona assim o desgaste no material. Nesse momento as células de carga de atrito e de força normal são responsáveis por converterem as forças aplicadas sobre o corpo de prova em sinal elétrico, os quais produzem informações para a análise de desgaste do par de materiais.

Foram realizados 10 descarregamentos por ciclo em um total de 10 ciclos para cada material. O corpo de prova é pesado tanto no início quanto após o fim de cada ciclo em uma balança de alta precisão - na ordem de 0,01 g - com a finalidade de identificar a perda de massa (Δm) ocorrida durante o ensaio.

Figura 10. Tribômetro do tipo bancada em rampa.



Fonte: O autor (2017).

2.5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

O levantamento de dados consiste basicamente em monitorar as medidas realizadas do coeficiente de atrito μ e perda de peso dos corpos de prova.

2.5.1 Coeficiente de atrito

Para calcular o coeficiente de atrito (μ) utilizou-se os conceitos de Coulomb, que relacionam

as forças de atrito (F_{at}) e normal (F_n) medidas pelas células de carga, conforme Eq. (1).

$$\mu = \frac{F_{at}}{F_n} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde:

μ [...]: Coeficiente de atrito

F_{at} [N]: Força de atrito

F_n [N]: Força normal

2.5.2 Coeficiente de Desgaste

Através da perda de massa mensurada (Δm) e da densidade específica do material (ρ), calculou-se o volume removido (Q), conforme Eq. (2).

$$\rho = \frac{\Delta m}{Q} \quad [\text{Eq. 02}]$$

Onde:

ρ [kg/m³]: Densidade do material

Δm [kg]: Perda de massa

Q [m³]: Volume de material removido

Após calcular o volume de material removido, foi necessário converter o valor obtido para milímetros cúbicos (mm³), sendo possível assim, calcular o coeficiente de desgaste através da equação de desgaste de Archard, (Hutchings, 1992), Eq. (3).

$$Q = k \frac{W \cdot L}{H} \quad [\text{Eq. 03}]$$

Onde:

Q [mm³]: Volume de material removido

k [...]: Coeficiente de desgaste adimensional

W [N]: Carga aplicada

L [mm]: Comprimento deslizado

H [N/mm²]: Dureza da superfície estudado

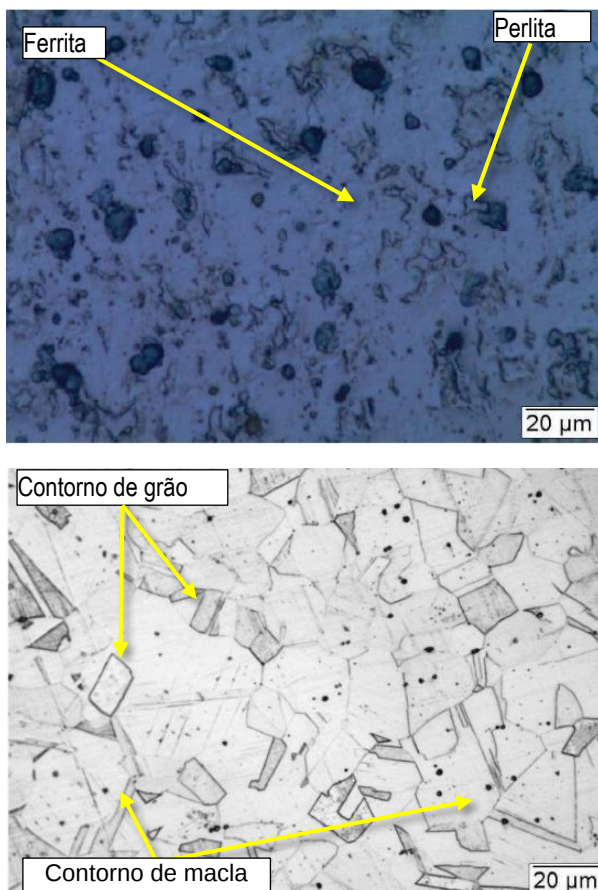
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa foram analisados todos os resultados dos ensaios de micrografia, ensaios de tração, medidas de dureza da superfície dos materiais estudados, resultados do atrito e desgaste do tribômetro tipo pino sobre disco e do tribômetro tipo bancada em rampa.

3.1 ENSAIOS DE MICROGRAFIA

Os análises são apresentadas com imagens e valores. O ensaio de micrografia foi realizado apenas para os aços, sendo apresentados conforme a Figura 11.

Figura 11. Micrografia dos aços: a) aço DIN S700MC e b) aço inoxidável AISI 304L.



Fonte: O autor (2017).

A análise micrográfica do aço DIN S700MC mostra que ele tem sua microestrutura composta por grãos irregulares finos de ferrita alongados no sentido da laminação e alguns precipitados, como o nitreto de titânio e um pouco de perlita (Costa, 2011). No que se refere ao aço inoxidável AISI 304L a análise mostra os contornos de grão e de macla do material.

3.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os resultados dos ensaios de tração foram comparados com dados dos fabricantes, ou da literatura científica, estes são mostrados na Tab. 1.

Tabela 1 - Comparação dos valores de tração dos materiais analisados.

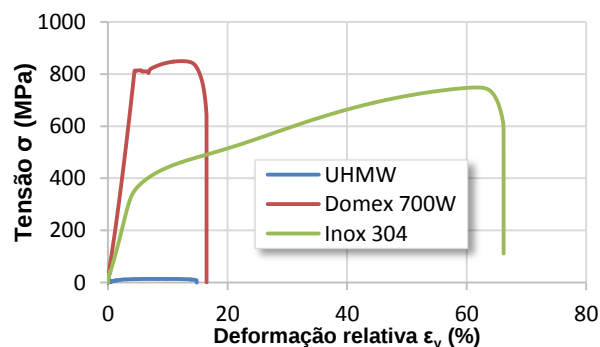
Propriedades Mecânicas	Tensão de Escoamento σ_e (MPa)		Tensão Máxima σ_{max} (MPa)		Deformação Relativa ϵ_y (%)	
	CP Média	Fabricante Mínimo	CP Média	Fabricante Mínimo	CP Média	Fabricante Mínimo
Polímero UHMW	5,9	18,0	13,4	30,0	14,8	200,0
Aço DIN S700MC	810,4	700,0	848,6	750,0	16,5	12,0
Aço Inoxidável	340,3	294 - 350	760,2	579,0	66,2	55,0

Fonte: O autor (2017).

Ao observar os valores entre o Corpo de Prova (C. P.) e os obtidos dos fabricantes, afirma-se que as características mecânicas dos aços estão nos limites estipulados. Porém, para o polímero UHMW, obteve-se resultados destoantes dos dados dos fabricantes.

Na comparação dos valores, percebe-se que o material que possui maior tensão de escoamento é o aço DIN S700MC (810 MPa), sendo 2,4 vezes maior que o aço inoxidável AISI 304L (340 MPa) e 137 vezes maior que o polímero UHMW (5,9 MPa). Na Figura 12, essa diferença de tensões e deformações entre os aços e o polímero se torna mais notável. Na deformação relativa, o aço inoxidável AISI 304L destacou-se com maior deformação (66,2 %), sendo 4 vezes maior que o aço DIN S700MC (16,5%) e 4,5 vezes maior que o polímero UHMW (14,8%).

Figura 12. Tensão x deformação dos materiais analisados.



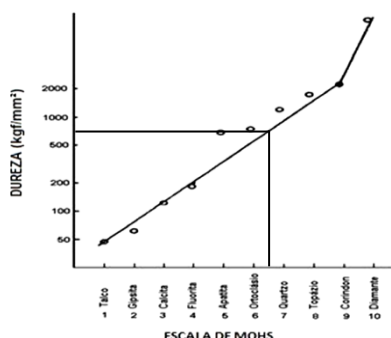
Fonte: O autor (2017).

3.3 DUREZA DA SUPERFÍCIE

O valor da dureza da superfície do abrasivo foi obtida através do uso da escala de Mohs de dureza dos minerais, pelo fato do quartzo e da pirita

serem predominantes no rejeito do carvão, alcançou um valor de 6,5 na escala. Deste modo, quantificase o valor de dureza Vickers em 800 HV com a Figura 13.

Figura 13. Escala de Mohs e Dureza Vickers

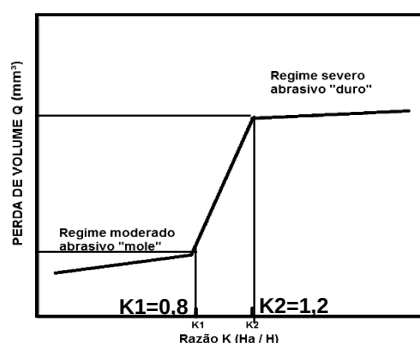


Fonte: Tabor, 1956, *apud* Pintaúde, (2002).

Os valores de conversão de dureza para o polímero UHMW foram realizados de Shore D para Brinell, a fim de comparar com outros materiais foi utilizado os valores da escala Brinell. Para o polímero UHMW, a medida da dureza se realizou usando o durômetro na escala brinell e os aços um microdurômetro na escala Vickers. Os valores de dureza foram convertidos para a unidade (N/mm^2), que é a utilizada nos cálculos matemáticos.

Segundo Tabor (1956), a dureza da superfície dos materiais (H), se relaciona com a dureza do abrasivo (H_a), a Figura 14 mostra o regimes de desgaste em função da relação de durezas.

Figura 14. Razão de dureza e perda de volume.



Fonte: Kruschov, (1957), *apud* Pintaúde, (2002)

A fim de determinar o regime de desgaste de cada caso, se for severo ou moderado, se calcula a relação de durezas ($K_i = H_a / H$), tal relação é mostrada na Tab. 2, com os valores de dureza.

Tabela 2 - Valores da dureza dos materiais.

Material	Dureza Média	Dureza (N/mm^2)	Relação (H_a/H)
Polímero UHMW	38,00 (HB)	372,66	21,00
Aço DIN S700MC	361,94 (HV)	3549,52	2,21
Aço Inoxidável	192,69 (HV)	1889,76	4,15
Abrasivo	800,00 (HV)	7845,60	-

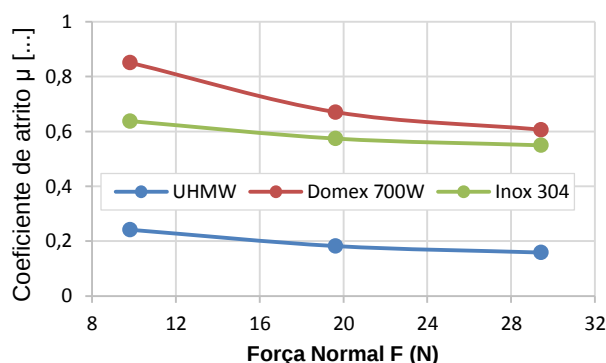
Fonte: O autor (2017).

Conforme a Figura 14, da referência bibliográfica, considera-se como regime de desgaste severo a toda relação de dureza com valor acima de 1,2.

3.4 RESULTADOS DO TRIBÔMETRO PINO SOBRE DISCO

Após de tratar os dados do ensaio, se mostra na Figura 15, o gráfico gerado para o coeficiente de atrito e na Figura 16, para o coeficiente de desgaste.

Figura 16. Coeficiente de atrito μ versus força normal F.

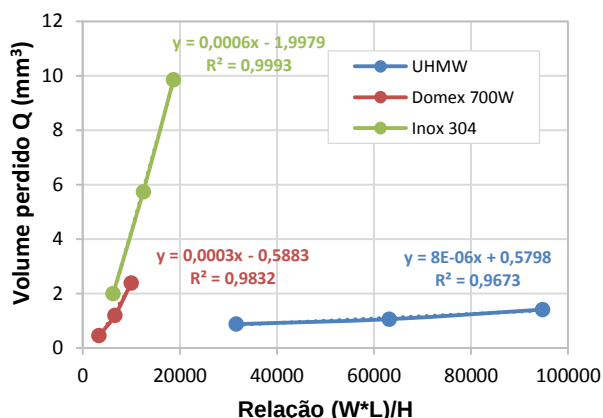


Fonte: O autor (2017).

No ensaio de pino sobre disco, da Figura 15, se observa que, quanto maior é a força normal aplicada no pino, menor é o coeficiente de atrito do sistema. Isso ocorre em todos os materiais estudados.

Na Figura 16, se destaca o gráfico que relaciona o volume perdido do material (Q), e os parâmetros ($W.L/H$) da equação de Archard. Dessa forma, se formula uma reta cuja inclinação é o coeficiente de desgaste (k) do material. Quanto maior é o coeficiente de desgaste maior é o volume perdido, portanto, o aço inoxidável 304L, tem maior perda e maior coeficiente de desgaste, na sequência aparece o aço DIN S700MC, e por último o polímero UHMW.

Figura 16. Coeficiente de desgaste (k).

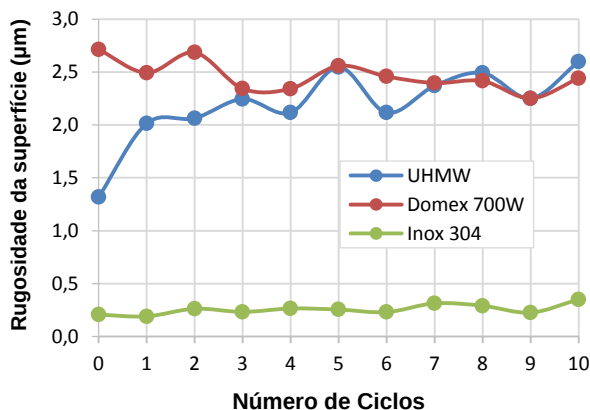


Fonte: O autor (2017).

3.5 RESULTADOS DO TRIBÔMETRO BANCADA EM RAMPA

As medidas da rugosidade (R_a) coletadas nos ensaios é apresentada no gráfico da Figura 17. Nele se observa que conforme aumenta os ciclos, a rugosidade da superfície do polímero UHMW aumenta, por outro lado do aço DIN S700MC diminuiu e do aço inoxidável AISI 304L se manteve praticamente constante.

Figura 17. Rugosidade da superfície (µm) por ciclo.

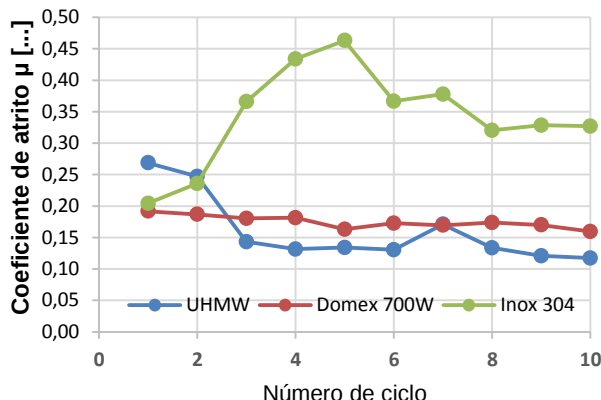


Fonte: O autor (2017).

Ao observar o gráfico de coeficiente de atrito da bancada em rampa, mostrada na Figura 18, se percebe que o polímero UHMW e o aço DIN S700MC tendem a diminuir seu coeficiente de atrito, por outro lado o aço inoxidável AISI 304L mostrou aumento no início, após o quinto ciclo, começou a reduzir seu valor, então tende a estabilizar-se, independente disso, o valor se mostrou superior aos demais.

Os valores da rugosidade e do coeficiente de atrito no polímero UHMW e aço DIN S700MC foram próximos após o terceiro ciclo. Em contrapartida a rugosidade do aço inoxidável AISI 304L foi menor e o coeficiente de atrito maior, contradizendo a ideia de que a menor a rugosidade, menor atrito.

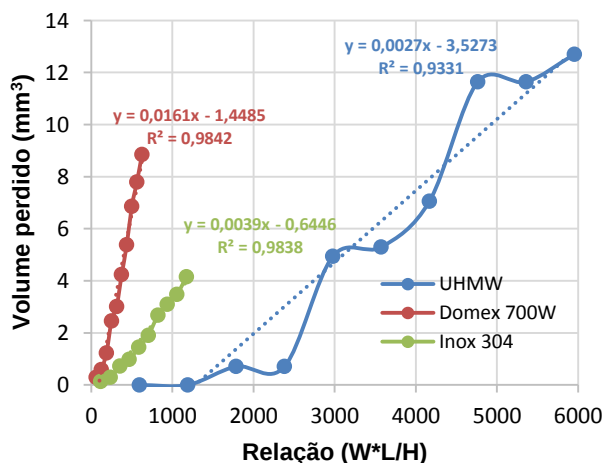
Figura 18. Coeficiente de atrito µ por ciclo.



Fonte: O autor (2017).

Na Figura 19 é apresentado o gráfico de coeficiente de desgaste para o tribômetro de bancada em rampa, onde é possível observar que o aço DIN S700MC obteve o maior coeficiente de desgaste para esse sistema, seguido pelo aço inoxidável AISI 304L e por último o polímero UHMW, com o menor coeficiente de desgaste, porém, com um volume perdido elevado. Tal fato ocorre em virtude de que a massa específica do polímero é muito baixa em comparação com a dos aços, obtendo-se assim, maior perda de volume.

Figura 19. Coeficiente de desgaste (k) por ciclo.



Fonte: O autor (2017).

Ao analisar os resultados de desgaste com a relação de durezas (Ha/H), apresentadas na Tabela 2, observou-se que o elemento de maior relação deveria ter maior volume removido, isto não ocorreu, nos aços DIN S700MC (2,21) e inoxidável AISI 304L (4,15). O resultado previsto seria que o aço inoxidável AISI 304L perderia mais volume que o aço DIN S700MC (2,21), porém os resultados mostram ao contrário. Essa relação de dureza não se aplicou também ao polímero UHMW (21,0).

3.6 ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO

Com o intuito de descobrir o custo-benefício dos materiais aplicados nesse estudo, foram utilizados os dados do coeficiente de desgaste, obtidos através do tribômetro tipo bancada em rampa, pela razão de ser a que mais se aproxima às condições reais de uso do material. Os cálculos foram realizados empregando as Equações (2) e (3). Considerou-se uma carga de 50 kg, sobre uma área de 1 m², em 10000 ciclos de descarga de material abrasivo para cada material. Os resultados ao fim do processo podem ser vistos na Tab. 3.

Em decorrência do aço DIN S700MC não ser o ideal para aplicação em locais com alto índice de corrosão, não foram levado em consideração seus resultados na análise de custo-benefício.

Tabela 3 – Análise de Custo-Benefício.

Material	Coef. de desgaste (k)	Perda de Massa (kg)	Preço do Material (R\$/kg)	Valor de perda (R\$)
Polímero UHMW	0,0027	12,43	35,00	435,05
Aço DIN S700MC	0,0161	10,87	5,70	61,96
Aço inoxidável	0,0039	20,39	20,00	407,8

Fonte: O autor (2017).

Através desta análise de custo-benefício, percebe-se que existe uma pequena diferença no valor de perda do polímero UHMW e do aço inoxidável AISI 304L. Tal diferença se elimina com uma pequena alteração no preço do material, contudo, a princípio constatou-se que o aço inoxidável AISI 304L é o material que possui o melhor custo-benefício.

Se a análise for apenas comparando os dados de abrasão, o aço DIN S700MC apresenta

menor perda de massa, porém em um ambiente corrosivo a mistura de abrasão e corrosão potencializa o desgaste, provavelmente pelo fato da abrasão limpa a camada de material corroído que se forma na superfície, dessa forma o ataque corrosivo ocorre novamente na superfície desgastada.

4. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho chegou-se as seguintes conclusões:

- Apesar do polímero UHMW possuir uma dureza da superfície e uma resistência a tração menor em relação aos aços, esse material demonstrou uma boa resistência ao desgaste abrasivo e um coeficiente de atrito muito baixo para os dois tribômetros estudados, destacando-se no tipo pino sobre disco;
- Pode-se considerar que as características mecânicas dos materiais não influenciam diretamente no desgaste dos polímeros quando comparadas com os aços;
- O polímero UHMW evidenciou excelentes resultados no tribômetro tipo pino sobre disco, sendo o material que obteve menor volume perdido para esse tribômetro, porém, no tribômetro de bancada em rampa foi o que obteve maior perda de volume;
- No pino sobre disco o abrasivo é constante (ponta esférica), acredita-se que o desgaste adesivo ocorrido no polímero UHMW ocasionou a adesão de um pequeno filme de polímero junto à esfera, fenômeno que resultou em um baixo coeficiente de atrito e uma perda de volume reduzida para esse material nesse tribômetro. Em contrapartida essa tendência não se mostrou tão forte na bancada em rampa pela razão de que nesse tribômetro o abrasivo não é constante;
- O tribômetro tipo pino sobre disco não possui alta confiabilidade, quando se trata de análises de desgaste abrasivo, apenas para comparação entre materiais. Já o tribômetro tipo bancada em rampa se mostrou melhor para análises de descarregamentos reais, sobretudo pelo fato de trabalhar com materiais que interagem na prática;
- A alta resistência à corrosão do aço inoxidável AISI 304L e do polímero UHMW faz com que esses materiais sejam os ideais para a aplicação em calhas direcionadoras do processo de beneficiamento do carvão mineral, uma vez

que o aço DIN S700MC é descartado dessa aplicação por não possuir tal resistência;

- O aço inoxidável AISI 304L foi o material que demonstrou uma menor rugosidade da superfície durante os ensaios no tribômetro tipo bancada em rampa. Em virtude disso, seu volume perdido foi o menor de todos, além de possuir também um coeficiente de desgaste muito próximo ao do polímero UHMW, de tal modo que torna viável a aplicação em ordem real de ambos os materiais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Carbonífera Belluno e Faculdade SATC, pela colaboração e total apoio, aos bolsistas Otávio Amboni e Rodrigo Metzger pelas contribuições.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892:2013**. Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 6506-1:2010**. Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell - Parte 1: Método de ensaio, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287:2002**. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade, 2002

ASTM - AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. **D-638** Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2002.

ASTM - American Standard for Testing Materials. **D-2240**. Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness. 2003.

ASTM - AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. **E384-11e1**. Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, 2011.

BRADLEY M.S.A., BINGLEY M.S., PITTMAN A.N. **Abrasive wear of steels in handling of bulk particulates: an appraisal of wall friction measurement as an indicator of wear rate**. Wear Vol. 243, Issues 1–2, 28, pp. 25-30, 2000.

COSTA, V. M. **Caracterização mecânica e metalúrgica de juntas dissimilares de aços de alta resistência e baixa liga**. 67º Congresso ABM Internacional, At Rio de Janeiro, Volume: 67º. 2011.

FILHO, J. R. A., SCHNEIDER, I. A. H., BRUM, I. A. S., SAMPAIO, C. H., MILTZAREK, G., SCHNEIDER, C. **Caracterização de um depósito de Rejeitos para o Gerenciamento dos Resíduos de Mineração na Região Carbonífera de Santa Catarina, Brasil**, Revista Escola de Minas, Vol. 66, p. 347-353. 2013.

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

KRUSCHOV M. M., **Resistance of metals to wear by abrasion as related to hardness**. In: **Conference on lubrication and wear**, London, Proceedings, Institution of Mechanical Engineering. 1957.

PETERSON, MICHAEL. **Produção de sulfato ferroso a partir da pirita: desenvolvimento sustentável**, Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/91664/258457.pdf>. Acesso: março de 2016.

Pintaúde, G., **Análise dos regimes de desgaste moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza**. 2002. 200f. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

PINTAUDE G., BERNARDES F.G., SANTOS M.M., SINATORA A., ALBERTIN E. **Mild and severe wear of steels and cast irons in sliding abrasion**. Wear 267, pp. 19–25, 2009.

POLYANA, A. R., LÚCIA, V. S., LUIZ, F. B., VLADIMIR, J. T. A., **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo. 2007.

STACHOWIAKI, G. W., BATCHELOR, A. W., **Engineering Tribology (4th Edition)**, p.501-530, 2013.

STOLARSKI, T. A., **Tribology in Machine Design**. Oxford – UK: Butterworth-Heinemann. p. 298, 1990.

TABOR, D., **The physical meaning of indentation and scratch hardness**. British J. of Applied Physics, 1956.



V CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL

CRICIÚMA - SC – BRASIL

29 DE MAIO A 01 DE JUNHO DE 2017