

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

Eduardo C. de MEDEIROS¹; Elvys M. CURI²; Richard M. CASTRO³; Luiz Carlos de C. CAVALER⁴.

¹Faculdade SATC, eduardocosta.90@hotmail.com; ²Faculdade SATC, elvys.curi@satc.edu.br; ³Faculdade SATC richard.castro@satc.edu.br; ⁴Faculdade SATC, luiz.cavaler@satc.edu.br

RESUMO

Os processos mecanizados da extração de carvão nas minas se realizam com os mineradores contínuos, os quais são submetidos a desgaste severo de abrasão e de corrosão na superfície de deslizamento. Alguns materiais são recomendados para aplicações de desgaste severo de abrasão, destacando-se os aços de baixa liga, temperados, de alta resistência com dureza elevada. Este estudo teve o objetivo de comparar a resistência ao desgaste de materiais conhecidos como aços Hardox® 450, 550 e polímero UHMW em ensaios de campo, usando uma parte da superfície do minerador contínuo. O processo de desgaste se realizou usando corpos de prova com as mesmas dimensões e colocados nas posições por onde o material mineral é transportado. O procedimento consistiu em avaliar o desgaste produzido após de três dias de trabalho, e em seguida as amostras foram retiradas e mensuradas as perdas de massa e sua rugosidade. A avaliação do desgaste real permitiu conhecer a resistência ao desgaste de cada material. Após cada teste determinou-se a perda de volume. Nestes ensaios foi quantificado a perda de massa, o coeficiente de desgaste, sendo significativamente menor o coeficiente para o aço Hardox® 550. Com estes dados se estima o tempo de vida de cada material, programando-se as trocas anuais e, finalmente o custo-benefício de cada um destes.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo; Aços de baixa liga; Coeficiente de desgaste, Minerador contínuo.

ABSTRACT

The mechanized processes of the extraction of coal in the mines, are carried out with the continuous miners, which are subjected to severe wear of abrasion and corrosion on the sliding surface. Some materials are recommended for severe abrasion wear applications, especially low strength, tempered, high strength steels with high hardness. This study aimed to compare the wear resistance of materials known as Hardox® 450 and 550 steels in field tests using a portion of the continuous miner's surface. The wear process was performed using specimens of the same dimensions and placed in the positions where the mineral material is transported. The procedure consisted in evaluating the wear produced after three days of work, and then the samples were removed and the mass losses and their roughness were measured. The evaluation of the actual wear allowed to know the wear resistance of each material. After each test the volume loss was determined. In these tests the mass loss, the coefficient of wear, was quantified, and the coefficient for the Hardox® 550 steel was significantly lower. With these data the life time of each material was estimated, the annual changes being programmed and finally the cost benefit of each of these.

Key-Words: Abrasive wear; Low alloy steels; UHMW polymer; Coefficient of wear.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Hirschi (2012) nos EUA, 33% da produção de carvão é devido às minas subterrâneas, e 60% em todo o mundo. Desde a década de 1960, a prática de extração de minério com o minerador contínuo vem sendo a mais comum nestas minas. Com o ingresso dos mineradores contínuos, o setor de mineração

subterrânea de carvão, passou por uma mecanização, iniciando um período de crescimento na produtividade.

A extração do carvão no interior da mina se automatizou, através dos mineradores contínuos com o sistema de transporte até a saída do tunel. O minerador contínuo é semelhante a uma fresadora de grande porte, e seu processo de corte e retiro do material se realiza usando um cabeçote que gira

circularmente e produz um corte direto à superfície do mineral, direcionando o material fraturado ao sistema transportador da máquina. O minério extraído cai em um prato, e em seguida é transportado por meio de dois corpos girantes chamados estrelas, à corrente de arrasto, que leva ao calhão e cauda, deixando na faixa transportadora que leva à entrada da mina. Durante este processo o mineral se desliza sobre metais produzindo o desgaste por abrasão e corrosão.

Para Arnold (1992), o custo do desgaste em uma nação industrializada fica entorno de 1 a 4% do produto interno bruto. Estes dados foram mais visíveis nos setores mineração, processamento mineral, agrícola, onde se realiza movimentação do terreno entre outros exemplos, nos arados, equipamento de mineração, e trituradores. O desgaste pode ser descrito como uma mudança indesejável, tanto nas dimensões quanto na massa da peça ou equipamento. Devido à ação mecânica gera-se desprendimento gradual das partículas na superfície em movimento.

No transporte o desgaste abrasivo é severo pelo deslizamento do material com alta dureza sobre a superfície de metal. A corrosão se ativa por conter no material minerado componentes que formam ácidos reagindo com a superfície. Segundo Santos (2015) o desgaste abrasivo corrosivo ocorre com sinergia, já que há uma correlação do desgaste mecânico com formação e estabilização de filmes passivos atacados pela corrosão (desgaste químico). A depassivação e repassivação dentro dos processos complexos de desgaste mecânico-químico é maior que o desgaste individual. Também influenciam outros fatores, tais como, tamanho do entalhe do abrasivo, carga aplicada, concentração de partículas abrasivas na lama e sua acidez.

Stolarski (1990) argumenta que há relação entre o desgaste abrasivo e as propriedades dos materiais, em especial o equilíbrio direto entre a dureza em Vickers com o desgaste abrasivo. Conforme Trezona *et al*, (1999) o desgaste abrasivo se classifica em duas formas, abrasão de dois corpos e abrasão de três corpos. Na abrasão de dois corpos tem-se duas superfícies que entram em contato, na superfície fixa tem-se o primeiro corpo onde o desgaste é alarmante, já na parte móvel haverá o segundo corpo que se movimenta em contato constante direto ou indireto, de modo que a força se transmite entre os corpos. A abrasão de três corpos é composta por duas superfícies semelhante em deslizamento, com a adição de um

terceiro material sólido proveniente ou não dos dois primeiros corpos, este terceiro corpo ficará entre as duas superfícies.

Archard (1953) *apud* Kawakame (2000) mostra que a dureza ou pressão média de escoamento da superfície, é a propriedade mais relevante do material para controlar a quantidade de desgaste. Ao observar esta característica, Archard sugeriu um modelo matemático que permite quantificar o volume removido de material, no desgaste por unidade de deslizamento percorrido. O modelo de cálculo foi desenvolvido por Archard para o desgaste por deslizamento, mas se mostrou eficaz para o desgaste abrasivo entre dois corpos.

Entre os aços resistentes ao desgaste abrasivo, destacam-se os de baixa liga e alta dureza, sendo mais conhecido o Hardox® que tem diferentes ordem de dureza. Os aços são temperados com objetivo de aumentar a dureza, mas na medida em que a dureza aumenta dificulta-se a solda por isso, os aços de 400 a 450 HB são preferidos (Costa, 2014).

Por outro lado à literatura científica informa como vantagem que o polímero Ultra Alto Peso Molecular (UHMW) devido a seu baixo coeficiente de atrito e sua propriedade de auto lubrificação de não ser afetado pelo desgaste corrosivo. O material é usado nas indústrias cerâmica, cimenteira, de mineração, entre outras (Vedapar, 2016).

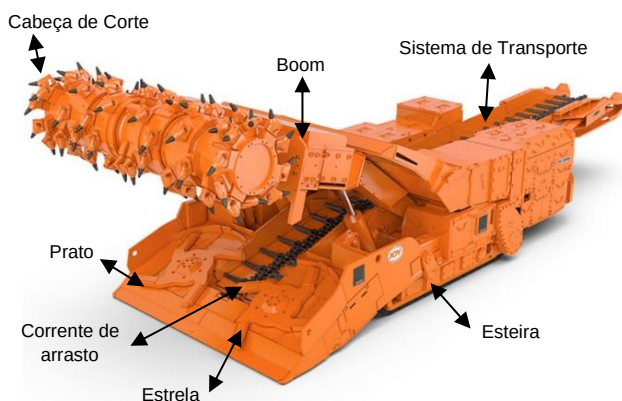
Para prolongar a vida útil da superfície de trabalho da máquina, foi instalada a chapa de aço de alta resistência Hardox® 450, com o objetivo de reduzir o desgaste abrasivo, entretanto o material é afetado pelo ambiente abrasivo e corrosivo com a pressão da corrente de arrasto.

O objetivo desta pesquisa foi comparar a resistência ao desgaste de três materiais, Hardox® 450, Hardox® 550 e um polímero, avaliando-os durante o funcionamento do minerador. A avaliação dos materiais foi realizada utilizando seis corpos de prova com formato retangular, fixados no transportador do minerador contínuo dentro da mina. Realizou-se a análise da resistência ao desgaste confrontando as perdas de volume de cada corpo de prova, calculando-se os coeficientes de desgastes e a projeção sua vida útil. Os ensaios foram realizados na indústria Carbonífera Rio Deserto unidade - Mina 101. Os resultados fornecem informação para minimizar os custos e aumentar a vida útil da chapa de transporte do minerador contínuo.

2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A metodologia do ensaio consistiu em preparar corpos de prova, para serem colocados no sistema de transporte do minerador contínuo mostrado na Figura 01. A etapa prévia ao ensaio é a preparação do sistema de transporte. Os corpos de prova foram pesados, medido a rugosidade e a dureza antes e depois de cada ensaio, com o objetivo de comparar o desgaste abrasivo e corrosivo dos materiais submetido às condições de trabalho do minerador contínuo, operando normalmente na mina de carvão.

Figura 1. Minerador contínuo série 12CM.



Fonte: Joyglobal (2016).

2.1 PREPARAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE NO MINERADOR CONTÍNUO

O minerador contínuo foi preparado para colocar três corpos de prova no centro da superfície do sistema de transporte. O preparo foi realizado com três recortes ao longo da chapa de desgaste para colocar os corpos de prova, substituindo-se parcialmente o aço Hardox® 450 usada em operação.

A composição química dos aços de alta resistência e dureza são apresentadas na Tabela 1.

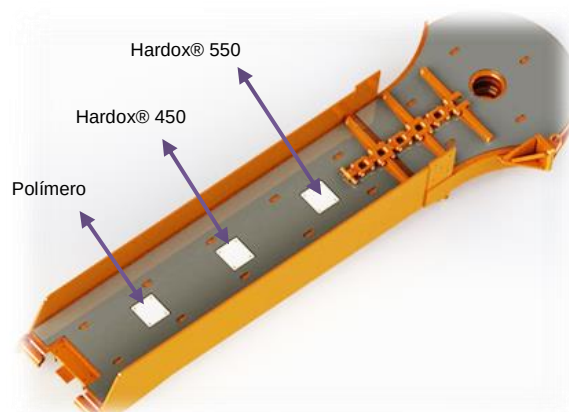
Tabela 1- Composição química aço Hardox® 450 e 550 [%] máx.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Balanço
Hardox® 450	0,26	0,70	1,60	0,025	0,01	1,40	1,50	0,60	0,005	93,90
Hardox® 550	0,37	0,50	1,30	0,02	0,01	1,40	1,40	0,60	0,004	92,82

Fonte: Catálogo do fabricante SSAB (2017).

No processo de funcionamento o primeiro corpo de prova submetido ao contato com o minério e a corrente de arrasto foi o polímero UHMW, e em sequência, o aço Hardox® 450 e ao final a chapa de Hardox® 550. A Figura 2 apresenta as posições do corpo de prova no sistema de transporte,

Figura 2. Sistema de transporte montado com os corpos de prova para desgaste.

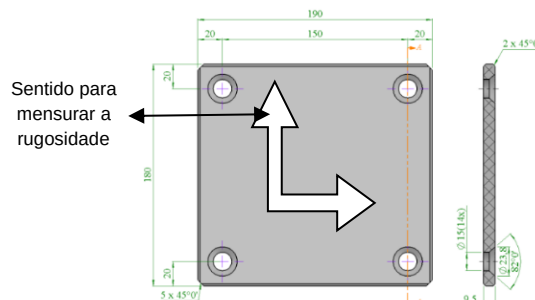


Fonte: Autor (2017).

2.2 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE DESGASTE

Para realizar os ensaios, foram fabricados dois conjuntos com três corpos de prova dos diferentes materiais, totalizando seis corpos de provas. As dimensões utilizadas foram: 9,53 mm de espessura, por 180 mm de largura e 190 mm de comprimento. Todos têm quatro furos escareados com diâmetro 15 mm de alojamento dos parafusos conforme se mostra na Figura 3. Cada corpo de prova se fixa com quatro parafusos allen de cabeça escareada com rosca UNC 1/2", permitindo a troca sem o uso de oxicorte ou similares, medida necessária para evitar danos aos corpos de prova.

Figura 3. Dimensões do corpo de prova e direção da medição de rugosidade.



Fonte: Autor (2017).

2.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Antes de iniciar os ensaios em campo, foram realizadas medições de perda de massa e rugosidade no Laboratório de Vibrações e Tribologia (LAVITRI). Os ensaios de ensaios de tração, microdureza e de microestrutura, no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI).

2.3.1 Medida de perda Massa

Inicialmente os seis corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão, depois de cada ensaio voltou-se a pesar. Desta forma controlou-se a perda de massa em cada ensaio. No processo de controle inicial da massa se realizaram 5 medições em cada corpo de prova, utilizando uma balança de precisão mod. AD3300 - MARTE, com resolução 0,01 g de faixa de medição de 0 a 3 kg.

2.3.2 Análise da Rugosidade Superficial

Foi mensurada a rugosidade com auxílio do rugosímetro digital portátil TR-100 de resolução 0,01 μm , conforme a norma ABNT NBR 4287:2002, determinando-se a rugosidade média R_a (μm). Foram coletadas a rugosidade dos corpos de prova antes e a cada troca do mesmo, realizando a cada ciclo de ensaio, tanto no sentido horizontal quanto na direção vertical do corpo de prova.

2.3.3 Dureza Superficial

Este ensaio teve por objetivo medir a dureza superficial dos materiais, por se tratar de uma variável importante para a determinação do coeficiente de desgaste. A medida da dureza dos aços Hardox® se realizou através de um microdurômetro eletrônico Shimadzu HMV-2TAD, conforme a norma ASTM E384-11e1, na escala Vickers com o indentador de forma pirâmidal.

A medida da dureza do polímero é normalmente avaliada em escala Shore D. Contudo, considerar esse valor no cálculo no coeficiente de desgaste é inadequado por que deveria ser na escala Vickers. Por isso, foi necessário realizar a medição de dureza na escala Brinell empregando o durômetro Mitutoyo – HR-400, seguindo a norma ABNT NBR 6506-1:2010. As conversões das durezas se realizaram por meio de tabelas de equivalências, e em valores intermédios se calcula por interpolação. A Tabela 1 apresenta alguns

valores de equivalências da dureza Brinell e Vickers usado na interpolação.

Tabela 2 - Dureza equivalente aproximada.

HB - Brinell [kgf/mm ²]	578	535	534	495	469	461	116	33,2
HV - Vickers [N/mm ²]	615	570	569	528	500	491	124	36

Fonte: Autor (2017).

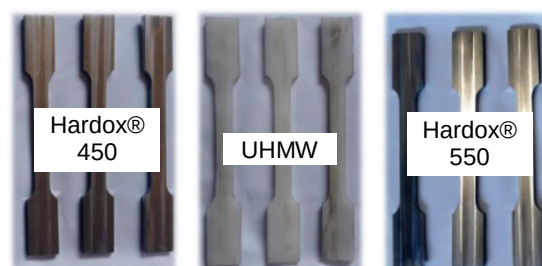
2.3.4 Análise de Microestrutura

Nas análises de microestrutura foram observadas, a fase do aço, tamanho de grão, sua forma, inclusões e compara-se a proporção aproximada do carbono no aço. A mostra teve um ataque químico de nital 2% durante 10 segundos, para revelar com nitidez as características do material. No ensaio e na aquisição dos dados foram utilizados o microscópio eletrônico Olympus mod. BX51M, e o Software AnalySIS GetI.

2.3.5 Ensaio de Tração

Para o ensaio de tração foram preparados três amostra, retirados da mesma chapa usados no minerador contínuo. Os corpos de prova, mostrados na Figura 4, foram dimensionados conforme a norma ABNT NBR ISO 6892:2013 para metais e ASTM D 638-02a para polímeros. Os ensaios se realizaram na máquina de tração EMIC DL-10000.

Figura 4. Corpos de prova para ensaio de tração.



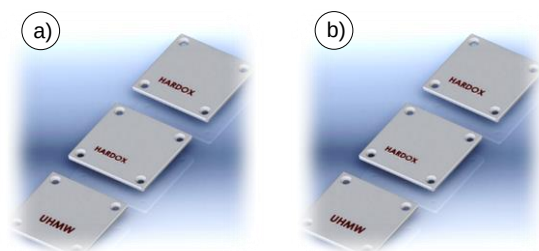
Fonte: Autor (2017).

2.4 TESTES EM CAMPO

Cada peça foi marcada com uma identificação de rastreamento com a denominação de conjunto A e B, cada conjunto foi composto por uma chapa do polímero, Hardox® 450 e Hardox® 550. O ensaio iniciou-se com o conjunto A da Figura 5(a). Cada material foi pesado e medido sua rugosidade, após três dias de trabalho foi substituída pelo conjunto B, mostrada na Figura 5(b). Logo, foi

pesado e medido a rugosidade do conjunto A, e se avaliou a quantidade da massa perdida. Após três dias trabalhando o conjunto B, foi retirado para analisar a rugosidade e perda de massa, dando fim ao primeiro ciclo.

Figura 5. Conjuntos de corpos de prova: a) conjunto A e b) conjunto B.



Fonte: Autor (2017).

Ao colocar o conjunto A no minerador, foi iniciado o segundo ciclo, desta vez foram quatro dias de teste em campo. Após o tempo determinado de trabalho teve a troca para o “conjunto B”, após se realizou os ensaios de perda de massa e rugosidade do conjunto retirado. Concluindo-se os quatro dias de trabalho retirou-se o conjunto B, para realizar os mesmos ensaios. No terceiro ciclo o tempo de teste retornou a três dias, mantendo os ensaios iguais.

Os dados coletados foram organizados em uma planilha do software Excel®, facilitando os cálculos e a comparação de perda de volume entre os materiais analisados. A avaliação do desgaste, em relação ao volume do material removido ΔQ , se usa o modelo de Archard (Kawakame, 2000) da seguinte equação:

$$\Delta Q = k \left(\frac{N}{H} \right) \cdot L \quad [\text{mm}^3] \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde:

N [N]: Carga normal sobre a superfície de desgaste.

H [N/mm²]: Dureza do material estudado.

k [--]: Coef. de desgaste de Archard (adimensional).

L [mm]: Distância percorrida pela superfície.

O coeficiente de desgaste adimensional k , é relacionado com a dureza do material em teste e o coeficiente de desgaste dimensional, mostrado na seguinte equação.

$$k = K \cdot H \quad [--] \quad [\text{Eq. 02}]$$

Onde:

H [N/mm²]: Dureza do material estudado.

K [mm²/N]: Coeficiente de desgaste dimensional.

O que permite reescrever a Eq. 02 da forma:

$$\Delta Q = K(N \cdot L) \quad [\text{mm}^3] \quad [\text{Eq. 03}]$$

Onde:

N [N]: Carga normal sobre a superfície de desgaste.

K [mm²/N]: Coef. de desgaste dimensional.

L [mm]: Distância percorrida pela superfície.

A carga normal N se relaciona com a pressão e a área de contato:

$$N = A \cdot P \quad [\text{N}] \quad [\text{Eq. 04}]$$

Onde:

P [N/mm²]: Pressão normal.

A [mm²]: Área nominal de contato.

O volume removido ΔQ , calcula-se com a densidade e a massa removida.

$$\Delta Q = \frac{\Delta m}{\rho} \quad [\text{mm}^3] \quad [\text{Eq. 05}]$$

Onde:

ρ [kg/mm³]: Massa específica

Δm [kg]: massa retirada do corpo de prova

Com os dados de perda de volume, carga aplicada, distância percorrida e dureza dos materiais modelaram-se as tendências da perda de material através da equação de Archard, comparando os diferentes desempenhos dos materiais.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

Nesta parte apresentam-se os resultados dos testes em laboratórios do material e de campo do corpo de prova instalado no sistema de transporte do minerador contínuo.

3.1 DUREZA SUPERFICIAL

Os resultados de dureza superficial são apresentados na Tabela 3. Ao comparar com os dados do fabricante, observou-se que estava conforme a tolerância do fabricante do aço Hardox® 450 e aço Hardox® 450. Para o polímero não foi identificado informações em HB.

Tabela 3 – Resultados das medições de durezas dados do fabricante.

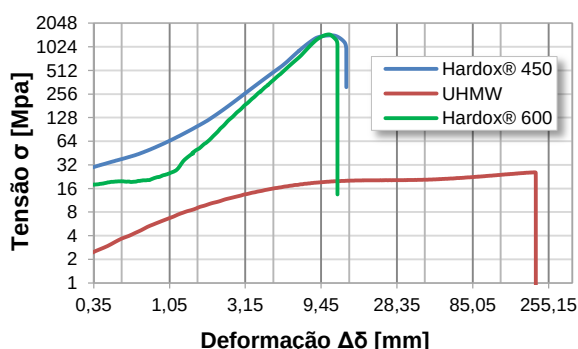
Materiais em teste	Brinell HB [kgf/mm ²]	Vickers HV [N/mm ²]	Dado do Fabricante
Polímero	33,2	36	63 Shore D
Hardox® 450	469	500	450 ± 25 HB
Hardox® 550	535	570	550 ± 25 HB

Fonte: Autor (2017).

3.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os resultados dos ensaios de tração se mostram na Figura 6, na tensão σ [MPa] com a variação do comprimento $\Delta\delta$ [mm] em escala logarítmica.

Figura 6. Resultados dos ensaios de tração dos materiais (escala logarítmica).



Fonte: Autor (2017).

Os resultados das propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 4 e comparadas com os indicados pelos fabricantes. Os aços Hardox® 450 e 550 estão dentro das tolerâncias dos fabricantes, entretanto o polímero UHMW se mostrou abaixo dos dados encontrados nas literaturas, com a tensão de escoamento menor em 12,1 MPa e a tensão de máxima 10,7 MPa menor.

Tabela 4 - Resistência mecânica dos materiais avaliados.

Propriedade mecânica	Tensão de escoamento σ_e [MPa]		Tensão Máxima σ [MPa]		Alongamento δ [%]	
	Corpo de prova	Fabricante	Corpo de prova	Fabricante	Corpo de prova	Fabricante
Hardox® 450	1348,8	1200	1444,2	1400	3,3	3,2-80
Hardox® 550	1391,9	1400	1508,1	1700	9,3	10-50
Polímero	5,9	18	19,3	30	50	200

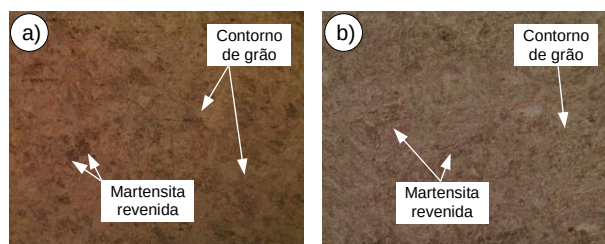
Fonte: Autor (2017).Fonte: Autor (2017).

3.3 ANÁLISE DE MICROESTRUTURA

Através da análise de microestrutura obtiveram-se as imagens mostradas na Figura 7(a) para Hardox® 450 e 7b para Hardox® 550. Nestas foi observado os contornos dos grãos e a martensita revenida, que tem uma resistência maior se for comparada com a martensita simples, devido que a possui maior tenacidade e ductilidade.

Segundo o fabricante SSAB, a linha Hardox® passa por o tratamento térmico para ter maior resistência ao desgaste. Na amostra do aço Hardox® 550, apresentado na Figura 7(b), há um maior índice de concentração de martensita revenida, isto seria possível devido a que possui um teor de carbono de 0,37 %, como foi mostrado na Tabela 1, enquanto o aço Hardox® 450 seu índice é de 0,26 % de carbono, ocorrendo menor incidência de martensita revenida.

Figura 7. Micrografia dos aços – ampliação (500x): a) Hardox® 450, b) Hardox® 550.



Fonte: Autor (2017).

3.4 ANÁLISE DA PERDA VOLUMÉTRICA

Com as medidas da massa do corpo de prova antes e após dos testes, foi analisado a perda de massa em cada ciclo, realizado com a mesma carga horária de trabalho e carregamento de material transportado ao longo da superfície. Os dados coletados estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados da massa dos corpos de prova analisados durante as trocas [kg].

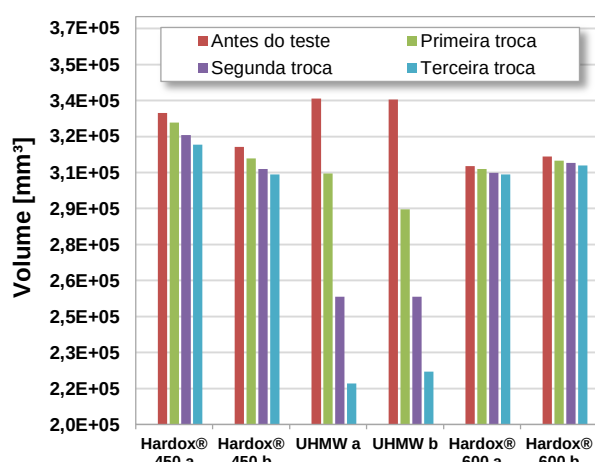
Método	Hardox® 450 A	Hardox® 450 B	UHMW A	UHMW B	Hardox® 550 A	Hardox® 550 B
Antes do teste	2,589	2,478	0,361	0,361	2,416	2,447
1ª troca	2,558	2,441	0,332	0,318	2,405	2,433
2ª troca	2,517	2,406	0,285	0,285	2,393	2,425
3ª troca	2,485	2,388	0,251	0,256	2,384	2,417
Total de perda	0,104	0,090	0,110	0,105	0,031	0,030

Fonte: Autor (2017).

Analisando a perda total de massa na Tabela 5 observou-se que o material Hardox® 450 e o polímero UHMW tiveram valores próximos. A chapa de Hardox® 550 teve uma perda inferior aos outros materiais.

Para observar melhor o material removido, os valores em massa se convertem a unidade de volume, usando a Equação 05 e as densidades de cada material, os aços 7850 kg/mm³ e o polímero UHMW 927 kg/mm³. Os resultados são apresentados conforme Figura 8.

Figura 8. Perda de volume x ciclo de troca para cada material estudado.



Fonte: Autor (2017).

A análise numérica identifica uma perda de volume no polímero UHMW de nove vezes maior se for comparado com o aço Hardox® 450 e trinta e seis vezes maior quando se compara com o aço Hardox® 550. Realizando um outro comparativo entre os aços, a Hardox® 450 teve uma perda de três vezes maior do que a Hardox® 550.

Com as dimensões do corpo de prova mostrada na Figura 8, considerando a área de contato do corpo de prova em 34.200 mm², calcula-se a espessura perdida de cada material no final dos testes. Na Tabela 6 apresenta-se a comparação de espessuras perdidas.

Tabela 6 - Espessura removida no final dos testes [mm].

Material	Hardox® 450 A	Hardox® 450 B	UHMW A	UHMW B	Hardox® 550 A	Hardox® 550 B
Total de perda	0,39	0,34	3,47	3,32	0,12	0,11

Fonte: Autor (2017).

Com a análise da espessura perdida dos corpos de prova, se explica melhor o comportamento da perda do material. Como foi observado, o polímero UHMW teve uma perda elevada de 3,47 mm no corpo de prova A e 3,32 mm no corpo de prova B. O aço Hardox®450 apresentou a perda de 0,39 mm no corpo de prova A, e 0,34 mm no corpo de prova B. No aço Hardox® 550 a perda foi de 0,12 mm no corpo de prova A e 0,11 mm no corpo de prova B. Na Figura 9 é apresentado os corpos de prova após dos ensaios.

Figura 9. Corpos de prova após os ensaios em campo.



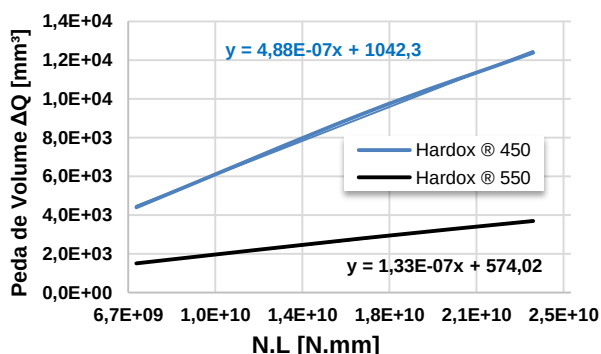
Fonte: Autor (2017).

Comparando os materiais com o aço Hardox® 450 usado atualmente, verificou-se que o polímero UHMW teve uma perda de espessura nove vezes maior, entretanto o aço Hardox® 550 teve uma perda de espessura três vezes menor.

3.5 COEFICIENTES DE DESGASTE

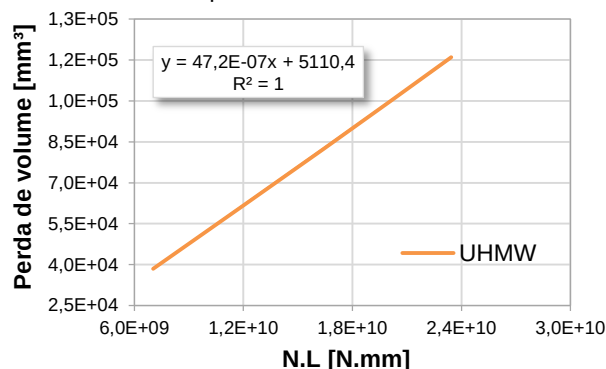
O coeficiente de desgaste dimensional de Archard (K), conforme Equação 3, foi determinado graficamente usando os programas de Excel. O resultado é mostrado na Figura 10 para os aços e na Figura 11 para o polímero, com a relação entre o volume perdido ΔQ com a carga (N) e o percurso de desgaste (L). A constante da reta $y = mx + b$ é o coeficiente de desgaste dimensional (K [mm²/N]). Quanto maior é o ângulo da reta, maior é o volume perdido. Na análise do volume perdido, o polímero UHMW possui o maior coeficiente de desgaste adimensional de $47,2 \times 10^{-7}$, seguida pela Hardox® 450 com $4,8 \times 10^{-7}$ e por último a Hardox® 550 com $1,33 \times 10^{-7}$.

Figura 10. Coeficiente de desgaste dimensional (K) do Hardox® 450 e 550.



Fonte: Autor (2017).

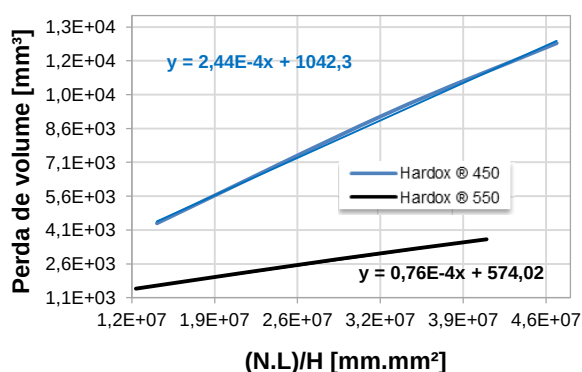
Figura 11. Coeficiente de desgaste dimensional (K) do polímero – UHMW.



Fonte: Autor (2017).

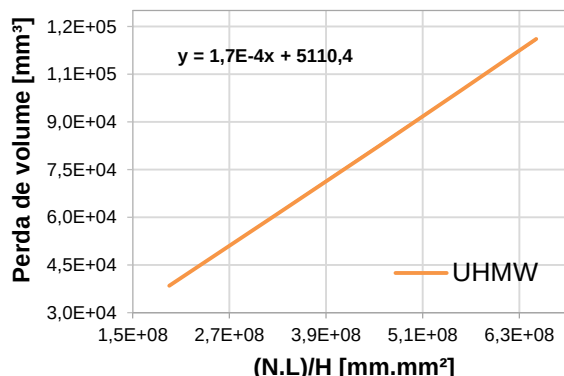
As Figuras 12 e 13 apresentam os coeficientes de desgaste adimensional (k) minúsculo dos aços e polímero respectivamente fundamentado com a relação da Eq. 01 de Archard, o volume perdido ΔQ com a carga (N), o percurso de desgaste (L) e a dureza do material estudado (H), igualmente a inclinação da reta gera o coeficiente de desgaste.

Figura12. Coeficiente de desgaste adimensional (k) dos aços Hardox® 450 e 550.



Fonte: Autor (2017).

Figura13. Coeficiente de desgaste adimensional (k) do polímero UHMW.



Fonte: Autor (2017).

Quando foram comparados os resultados obtidos do coeficiente k com os da literatura, obtiveram-se valores aproximados, tal como se mostra na Tabela. 7.

Tabela 7 - Comparação dos coeficientes de desgaste k obtidos com os da literatura.

Material	k	Literatura	k
Hardox® 450	2,44E-04	Aço de baixo carbono contra aço de baixo carbono	4,50E-04
UHMW	1,7E-04	PTFE contra aço ferramenta	2,50E-05
Hardox® 550	7,61E-05	Aço inox ferrítico contra aço ferramenta	1,70E-05

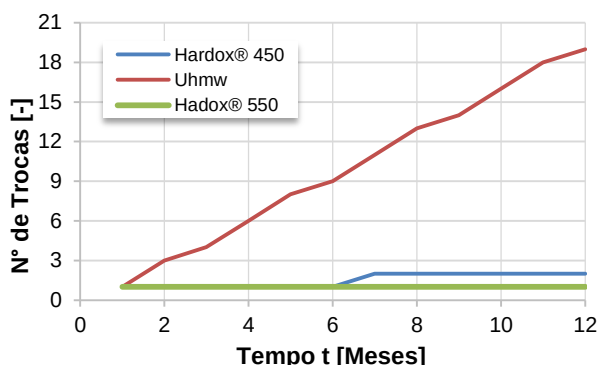
Fonte: Autor (2017).

O análise ao desgaste se resume com a tendência na projeção do tempo, com o denominado coeficiente de desgaste k adimensional da Equação 02, com o coeficiente K dimensional da Equação 03, e quanto maior é o valor maior será a perda de material.

3.6 ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL

Com base nos dados da perda de volume, relacionado com uma área constante e redução de espessura gerada pelo desgaste, se estima a vida útil de cada material, para um tempo de um ano de maneira gráfica apresentado na Figura 14, com uma perda programada de 5 mm na espessura, para a troca do material.

Figura 14. Gráfico de nº de troca x meses.



Fonte: Autor (2017).

Para a determinação da estimativa do número de trocas de chapas, considerou a perda da espessura. A mineradora trabalha de segunda a sexta feira, sendo dez dias o equivalente a duas semanas. O polímero UHMW perdeu 3,4 mm em duas semanas e levou 3 para perder 5 mm gerando uma troca. Em um período anual irá ocorrer 56 semanas, dividido nas 3 semanas que ocorre uma troca, então durante este período anual se teria 19 trocas. Na Figura 14 mostram os cálculos de maneira gráfica para os três materiais.

Analisando o gráfico da Figura14 verifica-se que o polímero UHMW tem um tempo de vida útil menor, por possuir o maior coeficiente de desgaste entre estes materiais, ocasionando um número maior de trocas, descrevendo-se em dezenove trocas no período de um ano, uma diferença considerável quando comparado ao aço Hardox® 450 que necessitava de duas trocas e a Hardox® 550 que não apresentou a necessidade de troca neste período.

3.7 ANÁLISE DE CUSTO BENEFÍCIO

O valor atual de mercado de cada material é apresentado na Tabela 8. Além disso, os custos por troca, para recobrir a superfície que sofrerá o desgaste no sistema de transporte do minerador contínuo.

Tabela 8 - Custos das chapas e o custo gerado por troca.

Material	Valor de mercado [R\$/kg]	Peso total [kg]	Custo por troca [R\$]
Hardox® 450	6,97	280,62	1.955,95
UHMW	30,00	33,14	994,16
Hardox® 550	9,76	280,62	2.738,89

Fonte: Autor (2017).

Com base nos valores da Tabela 8, o polímero UHMW possui o menor valor na troca. Com um custo menor em R\$ 961,79 de que a Hardox® 450 usada atualmente. No caso da Hardox® 550 que possui o maior valor, com uma diferença de R\$ 783,00 a mais em relação a Hardox® 450.

Mesmo que o polímero UHMW possui um menor valor por troca, o mesmo possui a maior perda de espessura, necessitando de um maior número de paradas para sua manutenção. Foram contabilizadas dezenove trocas com um custo anual de R\$ 19.883,17. O aço Hardox® 450 teve duas trocas durante o mesmo período tendo um custo anual de R\$ 3.911,89 um custo menor de R\$ 15.971,28 em relação com o UHMW. O aço Hardox® 550 não necessitou de troca durante este período, mantendo o custo de R\$ 2.738,89 gerando uma economia de R\$ 1.173,00 quando comparado com a chapa usada atualmente ou seja a Hardox® 450, sem incluir o custo dos mecânicos e o tempo que o equipamento ficara parado sem produzir durante a troca.

4. CONCLUSÃO

Com os resultados comparativos dos ensaios, conclui-se:

O polímero UHMW não apresentou boa resistência ao desgaste, em nenhum dos ensaios realizados, mesmo com um valor de mercado menor este material se revelou inadequado à atividade proposta. Com todos os valores distintos comparados com a literatura há uma incerteza se o material empregado seja de fato o UHMW, já que os ensaios dos materiais não coincidem com os da literatura.

O aço Hardox® 450 usado atualmente possui um bom coeficiente de desgaste, gerando uma perda menor de volume, isso resulta em um tempo de vida útil maior, quando comparado com outras chapas de aços. Com sua resistência mecânica e dureza elevada o material se torna adequado para ambientes com desgaste abrasivo. A perda de massa foi menor, se mostrando superior ao polímero.

Entre os materiais analisados, o Hardox® 550 foi o material que teve melhor desempenho, com uma resistência mecânica elevada, maior do que o material usado atualmente. O coeficiente de desgaste foi o menor aos demais materiais, por ter menor perda de volume. Embora que o valor comercial é o maior entre os materiais analisados,

mas quando for observado por um período anual, seu valor se justifica por ter uma vida útil acima dos demais materiais, gerando uma economia considerável.

A final, o aço Hardox® 550 está sendo recomendado para substituir a chapa de aço Hardox® 450 usada atualmente.

5. BIBLIOGRAFIA

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

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

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

ARNOLD, A. E; **Friction, Lubrication, and Wear Technology.** Volume 18 of the ASM Handbook. 1992.

ASTM - AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. D 638-08 **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** 2008

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

ASTM - AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. G40-01 – **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion.** Annual Book of Standards Volume 03.02: Wear and Erosion; Metal Corrosion. Philadelphia, USA, 2001.

COSTA V. M. **Análise da Tenacidade de uma Junta Soldada de um Aço Resistente à Abrasão da Série 450 HB.** Dissertação de mestrado Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2014.

HIRSCHI, J, C. **A Dynamic Programming Approach to Identifying Optimal Mining Sequences for Continuous Miner Coal Production Systems.** Dissertation. Southern Illinois University Carbondale. pg 21 e 22. 2012

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

SANTOS M. B., LABIAPARI W. S., ARDILA M. A. N., DA SILVA J. W. M., DE MELLO J. D. B. **Abrasion– corrosion: New insights from force measurements.** Wear Vol 332-333, pp. 1206–1214, 2015

STOLARSKI, T. A. **Tribology in Machine Design,** Butterworth-Heinemann cap 2, pg. 20 e 21. 1990.

TREZONA, R. I., ALLSOPP D. N, HUTCHINGS I. M., **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test,** University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy, Pembroke Street, Cambridge, CB2 3QZ, UK. Pg. 212 e 213, 1999.

Vedapar, <http://www.vedapar.com.br/uhmw-pe-ultra-3.html>, acesso em 2016