

ESTUDIO DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO EN SECO DE ALGUNOS PLÁSTICOS

DIEGO GIRALDO

Ingeniero Mecánico, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

JUAN MANUEL VÉLEZ

Grupo de Tribología y Superficies (GTS), Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Recibido para revisar 22 de Marzo de 2001, aceptado 27 de Junio de 2002, versión final 22 de Agosto de 2002.

RESUMEN: Se estudió el problema del desgaste por deslizamiento en seco de tres materiales plásticos: Polietileno de Alta Densidad (HDPE), Nylon (PA) y Teflón (PTFE), mediante el estudio de las relaciones entre estructura y propiedades mecánicas en los plásticos, y una discusión acerca de su mecanismo del desgaste por deslizamiento. El enfoque del estudio fue orientado hacia las teorías vigentes acerca del comportamiento de estos materiales en la situación de desgaste por deslizamiento en seco, diferenciando entre los fenómenos adhesivos (en la superficie), y los cohesivos (zonas subsuperficiales). También se efectuó un análisis estadístico del modelo de regresión lineal, necesario para establecer la confiabilidad de los resultados, mediante el análisis de 4 supuestos: linealidad, heterocedasticidad, la normalidad y la independencia del error. Igualmente se realizó un diseño de experimentos trifactorial para el HDPE y el Nylon, y uno bifactorial para el PTFE. Se ensayaron pines de los tres materiales contra una superficie de acero AISI O1 con 45 HRC usando una máquina tipo *Pin-on-Disk* bajo norma ASTM G99-90. Se calcularon los coeficientes de desgaste de la ecuación de Archard y, complementando la información con imágenes de las superficies obtenidas con el estereoscopio, se comprobó que el desgaste de estos materiales presenta una fuerte componente adhesiva que se manifiesta en la adherencia de polímero a la contracara de acero.

PALABRAS CLAVES: Polímeros, Desgaste por Deslizamiento en Seco.

ABSTRACT: Behaviour of three representative plastics submitted to dry sliding wear was studied. The analyzed polymeric materials are: High Density PolyEthylene (HDPE), Nylon (PA) and Teflon (PTFE), using the study of two aspects: relations between polymer's structure and its mechanical properties, and the mechanism of dry sliding wear of plastics. A theoretical revision of mechanical properties of plastics and actual theories upon its performance in dry sliding wear was made, establishing the differences between adhesive phenomena present in surface, and cohesive phenomena, that act in layers of the sub-surface. A statistic analysis of linear regression model was realized. This analysis is necessary for define confiability of results, using four parameters that restrict the veracity of model. These parameters are: lineality, equality of variance, and the normality and independence of error. A trifactorial design of experiments was executed for experiences with HDPE and Nylon, and a bifactorial design for PTFE. Pins of studied materials were proved against an AISI O1 steel surface, using a pin-on-disk machine working under ASTM G99-90 standard. Wear constants of Archard's equation for materials were calculated and images of surfaces of pins and disk along the experiments were captured with a stereoscope. This information indicates that dry sliding wear of these materials present a strong component adhesive, and adherence of layers of plastic materials to disk surface is a evidence of this theory.

KEY WORDS: Polymers, Dry Sliding Wear.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
BIBLIOTECA "EFF" GOMEZ

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de materiales orgánicos en componentes mecánicos ha tenido un acelerado desarrollo en las dos últimas décadas. Algunas de las aplicaciones más interesantes de materiales poliméricos son la fabricación de componentes para maquinaria como sellos hidráulicos, casquillos, cojinetes o sincronismos de precisión, por citar algunos casos.

Entre los campos de acción del Ingeniero Mecánico se encuentra la selección de materiales, y para efectuar una correcta elección del material debe tenerse un conocimiento suficiente de sus propiedades mecánicas. En nuestro medio, en el caso de los plásticos, en la mayoría de los casos esta práctica no se realiza adecuadamente debido al desconocimiento general acerca de sus características mecánicas. En este estudio se plantean temas específicos cuyo objetivo es configurar algunos métodos concernientes a la ingeniería mecánica, que abarcan la selección e implementación de piezas fabricadas en materiales plásticos, y fundamentalmente aquellas que están sometidos a desgaste por el deslizamiento en seco.

A partir de numerosos estudios de tipo académico e industrial, se ha reconocido la importancia del estudio de los fenómenos presentes en el desgaste (Norma ASTM G99-90, Bowden, 1964 y Callister, 1996), y como gran conclusión se puede establecer que cualquier análisis metódico de una situación en donde se presente desgaste de uno o varios componentes mecánicos constituye un aporte importante para la tribología, ciencia que estudia los fenómenos relacionados con la interacción entre las superficies sólidas en contacto durante el movimiento relativo (Callister, 1996).

Si se grafica la pérdida de masa de un tribosistema durante el tiempo (o la distancia recorrida), se obtiene una forma muy similar a la mostrada en la Figura 1. En el período denominado de desgaste estacionario se puede aplicar una expresión llamada la ecuación de Archard, que consiste en establecer las variables que participan en el fenómeno, y definir una constante K característica del proceso que reúna los efectos de esas variables. Esa expresión se indica en la ecuación (1)

$$V = \frac{KWs}{H} \quad (1)$$

donde V : volumen de material removido [mm^3], K : coeficiente de desgaste, W : carga normal a la superficie [N], s : distancia de deslizamiento [mm] y H : dureza del material [N/mm^2]

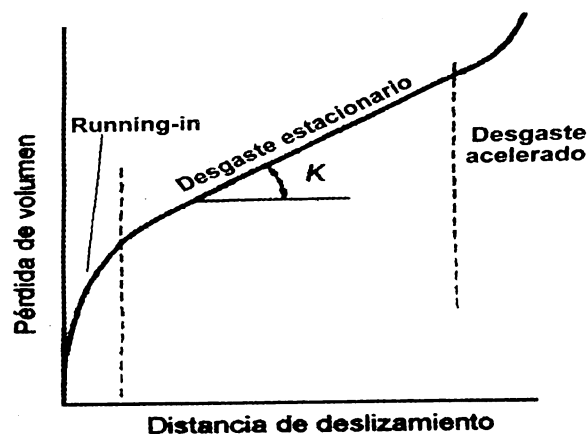


Figura 1. Variación de la rata de desgaste con la distancia o el tiempo durante el deslizamiento (Pérez, 1999).

El coeficiente de desgaste K representa el comportamiento de un tribosistema pero, aunque se plantea como una constante, depende de las condiciones particulares de trabajo. Si en el diseño se cuenta con el valor de K para el tribosistema que se presentará, entonces es posible establecer con más precisión la vida útil de los elementos que participan.

En este trabajo se seleccionaron tres materiales plásticos de amplia utilización en la industria, como son el Polietileno de alta densidad, el Nylon y el Teflón. Se pretende entonces hacer una aproximación al comportamiento de estos materiales en condiciones de desgaste en seco (sin lubricación), utilizando el equipo *pin-on-disk*. Se han mantenido fijas variables como carga aplicada, material usado como contracara y velocidad de deslizamiento. Se han controlado dentro de límites aceptables factores como la temperatura y la humedad del ambiente, la temperatura en el disco y la eliminación de posibles partículas extrañas que se introduzcan en la intercara, por citar los más preponderantes. El objetivo del estudio es conocer el comportamiento de los materiales usando como

variables la distancia recorrida y la rugosidad del disco, estableciendo, con ayuda de la medición de la pérdida de material y la observación de las superficies, algunos criterios importantes para el entendimiento del fenómeno y su posterior apropiación para aplicaciones específicas.

Dentro de los alcances del trabajo el propósito principal es presentar una discusión sobre los factores que gobiernan el proceso de desgaste por deslizamiento en seco de estos plásticos, tratando al máximo de identificar los parámetros que afectan el tribosistema.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Un compendio de las principales características de estos materiales se presenta en la Tabla 1 (Askeland, 1993, Callister, 1996). El disco para el ensayo es fabricado en un acero para herramientas AISI O1, templado y revenido, y con una dureza de 45 HRC. Dada la elevada dureza de los aceros si se compara con la de los plásticos, los mecanismos más influyentes ocurrirán en el pin y por lo tanto no se considera la microestructura del disco; sólo interesan para el modelo, las propiedades mecánicas del acero elegido con la dureza y estado presentados.

2.2 Ensayo de desgaste por deslizamiento en seco

Se efectuó el ensayo de desgaste con un equipo *Pin-on-Disk* que se acoge a la norma ASTM G99 (Askeland, 1993). El método consiste en aplicar una carga sobre un pin colocado perpendicularmente respecto a un disco. El pin permanece fijo mientras que el disco gira provocando un deslizamiento relativo en el área de contacto entre ambos elementos, formando una trayectoria circular en la superficie del disco. Este ensayo se esquematiza en la Figura 2 (Pérez, 1999).

Los parámetros que se consideran en el ensayo son:

- 1). Carga normal en el área de contacto
- 2). Velocidad de deslizamiento

- 3). Distancia acumulada
- 4). Rugosidad de la contracara
- 5). Temperatura cercana a la zona de contacto
- 6). Ambiente del laboratorio

Con estos datos es posible establecer los valores de K para cada par en contacto, y también analizar la influencia de estos parámetros en el comportamiento del tribosistema.

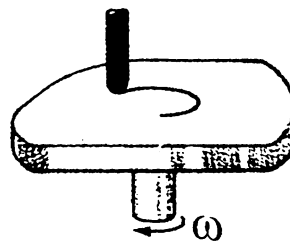


Figura 2. Esquema que muestra el ensayo de desgaste tipo *pin-on-disk* (Pérez, 1999).

2.3. Aplicación del diseño experimental

Los ensayos preliminares y el trabajo de Vaziri y colaboradores (Vaziri *et al.*, 1988) señalan que la resistencia al desgaste del Teflón es mucho menor que la del Polietileno y el Nylon, y por lo tanto las pérdidas de masa y las distancias de deslizamiento necesarias para producirlas, dividen los materiales en dos grupos: el Teflón con ciertas distancias de ensayo, y otras para el Polietileno y el Nylon.

2.3.1. Condiciones experimentales para el Teflón

Para las experiencias con el Teflón se tienen los siguientes parámetros:

Factores: Distancia de deslizamiento y rugosidad.

Niveles de observación: A partir de ensayos preliminares y del trabajo de Vaziri y colaboradores se determinaron las distancias de deslizamiento más apropiadas dependiendo del material; estas son: 250m, 500m, 750m y 1000m. Por lo tanto la variable distancia de deslizamiento tiene 4 niveles de observación.

Tabla 1. Principales características de los plásticos elegidos (Askeland, 1993, Callister, 1996)

	<i>Polietileno</i>	<i>Teflón</i>	<i>Nylon</i>
Nombre comercial	POLITRON®	TEFLON®	DURALON NYLON®
Nomenclatura	HDPE	PTFE	PA
Unidad monomérica	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}$	$-\text{N}-\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ -\text{C}- \\ \\ \text{H} \end{array} \right]_{6 \text{ veces}} -\text{N}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ -\text{C}- \\ \\ \text{H} \end{array} \right]_{4 \text{ veces}} -\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-$
Cristalinidad	70-80 %	50-70%	30-40%
Temperat. de fusión (T_m)	135 °C	327 °C	227 °C
Transición vítrea (T_g)	-90 °C	-110 °C	57 °C
Resistencia a la tracción	28 MPa	24-31 MPa	76-96 MPa
Elongación en ruptura	> 600 %	200-400 %	15-300 %
Módulo elástico	952 MPa	400-550 MPa	3700 MPa
Resistencia al impacto (Izod)	1.8 ft-lb/in	3 ft-lb/in	1.2 ft-lb/in
Coeficiente de fricción seco	0.11	.04-.08	0.32
lubricado	0.05	.04-.08	.05
Dureza	68 Shore D	55-59 Shore D	110 Rockwell R

Elección del tamaño muestral: Con el Teflón se presenta un experimento bifactorial (distancia y rugosidad). Los parámetros del ensayo que influyen en el parámetro Φ^2 (Montgomery, 1991) son: $D=0.0006 \text{ gr}$; $a=4$ (niveles para la variable distancia); $b=2$ (niveles para la variable rugosidad de la contracara); $s=0.0003 \text{ gr}$; $a=5\%$. Reemplazando estos datos se llega a $\Phi^2 = 0.66 n$. Con base en las curvas de operación (Pérez, 1999) se obtiene la Tabla 2.

Tabla 2. Elección del tamaño muestral para el Teflón

n	Φ^2	Φ	GLN	GLD	β
3	1.98	1.41	3	16	0.49
4	2.64	1.62	3	24	0.27
5	3.30	1.82	3	32	0.18

Se escoge $n=4$ réplicas por dos razones:

1). La Tabla 2 señala que la **potencia** ($1-\beta$) es 0.73. Es decir que cuando exista una diferencia de 0.0006 gr en las observaciones existe un 73% de probabilidad que el modelo las detecte.

2) Es compatible con el resultado obtenido por (Pérez, 1999) para la misma máquina y con el mismo objetivo.

2.3.2. Condiciones experimentales para el Nylon y el PoliEtileno

En los ensayos de este grupo de materiales se tienen las siguientes características:

Factores: Material, distancia de deslizamiento y rugosidad de la contracara (experimento trifactorial).

Niveles de observación: Análogamente al proceso llevado a cabo con el Teflón, se ensayaron 4 distancias de deslizamiento: 20 Km, 40 Km, 60 Km y 80 Km. Se tiene entonces:

- La variable distancia presenta 4 niveles de observación: 20, 40, 60 y 80 Km.
- La variable rugosidad tiene dos niveles de observación
- La variable material tiene dos niveles de observación: Nylon y Polietileno.

Tamaño muestral: Se elige tomar 4 muestras por dos razones:

- Se acoge la recomendación de (Barker, 1994) de contar con más de 3 réplicas.
- Como en el Teflón también $n=4$ las experiencias se tornan más homogéneas.

2.3.3. Rugosidad de la contracara

Se midió la rugosidad de las dos superficies del disco de acero usadas en los ensayos, obteniendo los valores de $0.14 \mu\text{m}$ y $0.84 \mu\text{m}$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Pérdidas de masa

4.1.1. Pérdida de masa del Teflón

En la Figura 3 se ilustran las pérdidas de masa de los pines de Teflón para las dos rugosidades y las distancias indicadas. Igualmente se presentan los resultados del análisis del modelo lineal realizado con el programa para PCs STATGRAPHICS 4.0 Plus.

Para los análisis de los modelos lineales se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

1. Variable dependiente (y): Pérdida de masa
2. Variable independiente (x): Distancia de deslizamiento
3. Nivel de confianza: 95%
4. Nivel de significancia: 0.05
5. Valores límite del estadístico D para Durbin-Watson: $D_U = 1.36$, $D_O = 1.08$ (Montgomery, 1991)
6. Valor c para la prueba de Bartlett es 1.139 (Barker, 1994)
7. El valor límite del estadístico X^2 con 3 grados de libertad es 7.81 (Montgomery, 1991)

4.1.2. Pérdida de masa del Polietileno (HDPE)

En la Figura 4 se ilustran las pérdidas de masa de los pines de HDPE para las dos rugosidades y las distancias indicadas. Igualmente se presentan los resultados del análisis del modelo lineal.

4.1.3. Pérdida de masa del Nylon (PA)

En la Figura 5 se ilustran las pérdidas de masa de los pines de PA para las dos rugosidades y las distancias indicadas. Igualmente se presentan los resultados del análisis del modelo lineal. En la misma Figura se comparan los resultados para los tres materiales, notándose claramente las diferencias en sus repuestas frente al desgaste, en cuanto a las pérdidas de material se refiere.

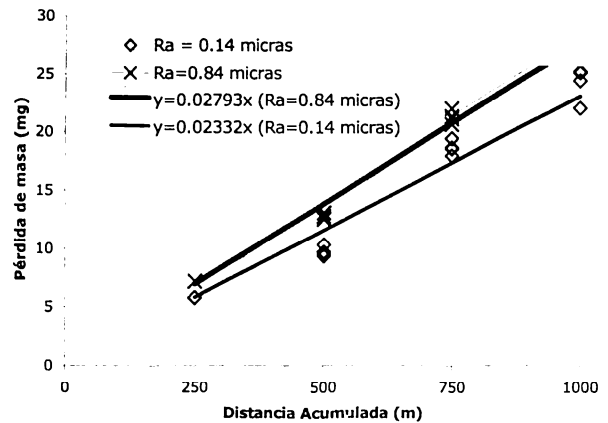


Figura 3. Pérdida de masa vs. Distancia de deslizamiento para el Teflón. $V=1 \text{ m/s}$. $P=1.7 \text{ Kg-f}$. Se muestran los resultados para ambas rugosidades, y el modelo lineal obtenido.

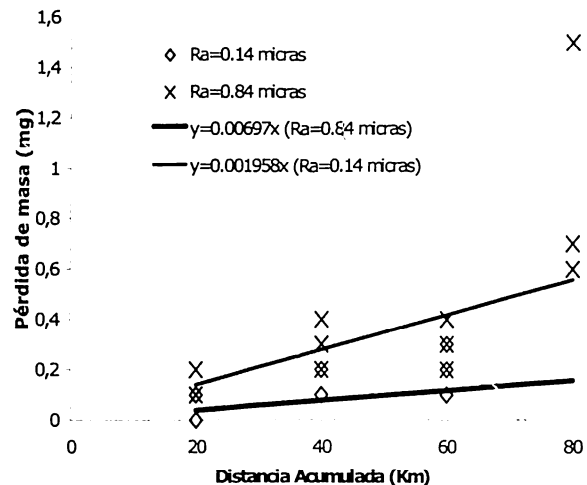


Figura 4. Pérdida de masa vs. Distancia de deslizamiento para el HDPE. $V=1 \text{ m/s}$. $P=1.7 \text{ Kg}$. Se muestran los resultados para ambas rugosidades, y el modelo lineal obtenido.

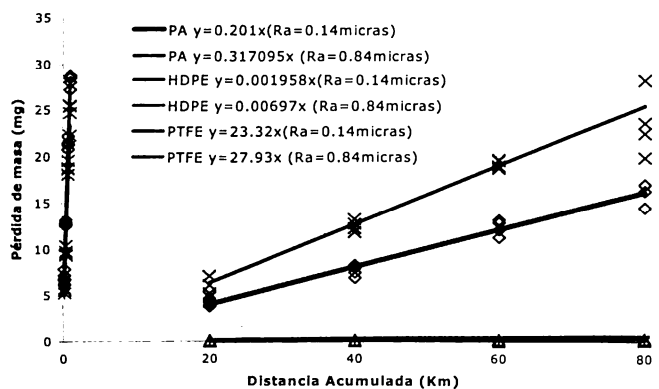


Figura 5. Pérdida de masa de los tres materiales de estudio, para $V=1 \text{ m/s}$. $P=1.7 \text{ Kg-f}$.

4.2. Cálculo del coeficiente de desgaste

Para estimar el coeficiente de desgaste por medio de la relación de Archard se tienen los siguientes parámetros para cada tribosistema dados en la Tabla 3:

Tabla 3. Valores para el cálculo del coeficiente de desgaste

Material	Densidad (gr/cm ³)	Dureza HR- R	Rugosidad disco (μm)	Pendiente del modelo y=bx
HDPE	0.95	60	0.14	0.002 mg/Km
			0.84	0.007 mg/Km
PA	1.15	11	0.14	0.201 mg/Km
		0	0.84	0.317 mg/Km
PTFE	2.18	48	0.14	0.02320 mg/m
			0.84	0.02793 mg/m

Nota: La carga aplicada en todos los ensayos fue 16.66 N.

Despejando de la ecuación de Archard se tiene

$$K^* = \frac{bH}{\rho P} \quad (2)$$

Donde K^* = es el coeficiente de desgaste, que se indica con asterisco pues la dureza de los plásticos ensayados en este estudio se expresa en unidades de Rockwell R. Para efectos de comparación con otros resultados, debería expresarse en N/m^2 , y entregar así un coeficiente de desgaste adimensional. En la ecuación (2), se tiene:

b = Pendiente del modelo lineal obtenido para las gráficas de pérdida de masa contra distancia de deslizamiento.

ρ = densidad del material

P = carga aplicada

En la Tabla 4 se consignan los valores calculados de K^* .

Tabla 4. Valores del coeficiente de desgaste

Material	Rugosidad el disco	$K^* (HR-R \times m^2/N)$
Polietileno	0.14 μm	7.423×10^{-15}
	0.84 μm	2.6423×10^{-14}
Nylon	0.14 μm	1.154×10^{-12}
	0.84 μm	1.821×10^{-12}
Teflon	0.14 μm	3.066×10^{-8}
	0.84 μm	3.69×10^{-8}

4.3. Discusión acerca de los valores de K^*

4.3.1. Influencia de la Rugosidad

En los tres materiales se incrementó la rata de desgaste con el aumento de la rugosidad. En (Pérez, 1999) se obtuvieron resultados semejantes en experiencias realizadas con siete plásticos comerciales (entre ellos el HDPE, el Nylon y el Teflón). Se establece otra consistencia con (Hutchings, 1992), pues en dicho trabajo se indica cómo la rata de desgaste del HDPE tiene un mínimo para una rugosidad dada (0.05 μm), y que a partir de allí empieza a aumentar con el valor de R_a . En tribosistemas con superficies muy pulidas, la alta rata de desgaste se explica por la fuerte adhesión que se presenta en un área casi equivalente al área aparente de contacto (Hutchings, 1992, Williams, 1994 y Zum, 1987). En el rango de rugosidades de las experiencias realizadas, el incremento en el valor de K^* con la rugosidad puede atribuirse al hecho de que la influencia del mecanismo de desgaste abrasivo aumenta con la rugosidad en este rango, aunque el mecanismo predominante siga siendo la adhesión (Hutchings, 1992 y Zum, 1987).

4.3.2. Influencia de las propiedades mecánicas

Las ratas de desgaste de los materiales dependen en buena medida de su comportamiento mecánico. En la Tabla 5 se presentan las principales propiedades mecánicas que parecen influir en el comportamiento de los plásticos ensayados. Se asume que la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento y las condiciones ambientales se mantuvieron constantes. Como dato de relevancia, en los ensayos la presión media en el área aparente de contacto correspondiente a la carga de 1.7 Kg es de 589 MPa. La deformación se presentó casi totalmente en los pines de plástico pues las asperezas del disco de acero se comportan como cuerpos rígidos. De acuerdo con diversos autores (Hutchings, 1992, Williams, 1994 y Zum, 1987), si la deformación es plástica (permanente), el mecanismo presente es abrasivo y el fenómeno constituye un proceso *cohesivo*, mientras que la deformación elástica es característica del desgaste adhesivo y el mecanismo es *interfacial*.

Tabla 5. Principales propiedades mecánicas de los plásticos ensayados.

Parámetro	Polietileno	Nylon	Teflón
K*	$26.6-7.4 \times 10^{-14}$	$1.15-1.82 \times 10^{-12}$	$3.07-3.69 \times 10^{-8}$
Módulo Elástico	952 MPa	3700 MPa	400-550 MPa
Elongación en ruptura	>600%	15-300%	200-400%
Resistencia al impacto	1.8 ft-lb/in	1.2 ft-lb/in	3 ft-lb/in
Resistencia a la tracción	28 MPa	76-96 MPa	24-31 MPa
Cristalinidad	70-80%	30-40%	50-70%
Dureza	60 Rockwell R	48 Rockwell R	110 Rockwell R
Temperatura de fusión	135 °C	227 °C	327 °C
Transición vítrea	-90 °C	57 °C	-110 °C

En este sentido los materiales con mayor módulo elástico tienden a deformarse elásticamente lo que favorece el predominio del desgaste adhesivo, para una misma rugosidad. Si se ordenan de mayor a menor los materiales en este sentido se tiene: 1. Nylon, 2. Polietileno de alta densidad, 3. Teflón.

Hutchings (Hutchings, 1992) presenta una relación, para los plásticos, entre la resistencia al desgaste abrasivo y el producto de la resistencia última (σ_U) y la elongación en la ruptura (ϵ_U), llamada la correlación de Ratner-Lancaster. Esta relación representa el fenómeno mediante el cual los materiales poliméricos que acumulen mayor energía durante la deformación, resistirán mejor la influencia de las asperezas de la contracara, pues esa acumulación hace que durante el contacto el material se deforme elásticamente y por lo tanto las rugosidades duras del acero, en el caso de los ensayos realizados, no logren desprender tanto material como cuando la deformación es plástica. El trabajo ejecutado por las asperezas se manifiesta en deformación en los materiales más elásticos, y se traduce en microfracturas de tipo dúctil en aquellos con tendencia a la plasticidad. La relación de Ratner-Lancaster ha sido reconocida ampliamente (Hutchings, 1992), pues se ha encontrado que los materiales poliméricos se acogen bastante bien a esta tendencia. De acuerdo con ese concepto, el orden correspondiente a la resistencia a la abrasión es: 1. Polietileno, 2. Nylon, 3. Teflón. Este mismo orden es el correspondiente a la

resistencia al desgaste por deslizamiento obtenida en los ensayos.

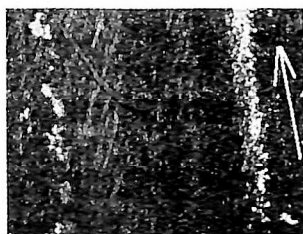
En cuanto a la cristalinidad, se ha establecido que cuando ella aumenta también lo hace la resistencia al desgaste (Hutchings, 1992, Williams, 1994 y Zum, 1987). El ordenamiento de las cadenas moleculares hace que cuando se apliquen esfuerzos el comportamiento sea dúctil, debido a la facilidad para el deslizamiento relativo de las cadenas moleculares, mientras que las regiones amorfas tiendan a romperse en vez de deformarse. En este sentido el Polietileno es el más cristalino de los tres materiales, lo que parece relacionarse con su comportamiento más dúctil y, en conjunto con su tenacidad (relacionada de alguna manera con la cantidad $\sigma_U \epsilon_U$), su resistencia al desgaste. La cristalinidad del Teflón, aunque un poco inferior, también es alta pero su capacidad de absorber energía (relacionada con la cantidad $\sigma_U \epsilon_U$, como se explicó anteriormente) es mucho menor; seguramente si se compara el Teflón con otro plástico que también tenga poca resistencia pero con menos grado de cristalinidad se encuentre que la resistencia al desgaste sea mayor en el caso del Teflón, pero deben hacerse ensayos en este sentido para sacar una conclusión definitiva.

Otro aspecto importante es el comportamiento con la temperatura. El Polietileno y el Teflón están por encima de la temperatura de transición vítrea, lo que hace que su ductilidad sea mayor respecto a aquellos que se encuentren por debajo de ella, como es el caso del Nylon. En este sentido, en (Zum, 1987) se ha

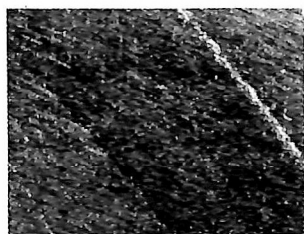
esquemático el proceso de desgaste asociado al estado viscoelástico de los plásticos. En esa descripción establece que los materiales que están por debajo de la temperatura de transición vítrea son más frágiles, y en las situaciones de desgaste por deslizamiento el material aledaño a la superficie tiende más a la microfractura que a la deformación.

4.4. Imágenes de las superficies

En la Figura 6 se muestran algunas imágenes de las superficies del disco después de los ensayos. Como se puede observar, se presentó adherencia de material polimérico a la contracara de acero, un indicio de la adhesión presente en el contacto.



Aspecto del disco cuando desliza el pin de HDPE. Se indica la dirección del deslizamiento. Distancia recorrida: 60 Km. $R_a=0.14\mu\text{m}$.

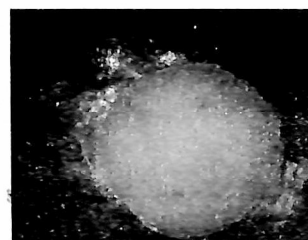


Aspecto del disco cuando desliza el pin de Nylon. Distancia recorrida: 80 Km. $R_a=0.14\mu\text{m}$.

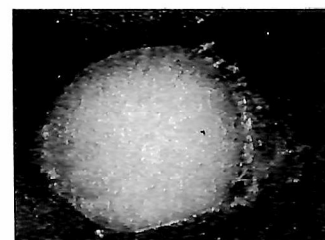
Figura 6. Dos imágenes de la superficie del disco después de los ensayos. $V=1\text{ m/s}$. $P=1.7\text{ Kg-f}$. Aumentos: $6.5\times$

En el Teflón se presentaron depósitos de plástico en la superficie del disco, posible señal de una adhesión localizada debida posiblemente a elevaciones puntuales de temperatura que facilitaron el ablandamiento del material. Estos depósitos no se presentaron ni en el HDPE ni en el Nylon.

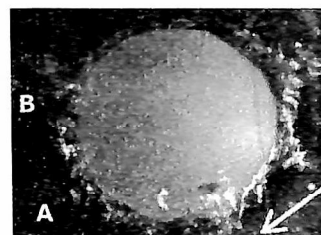
También se notan los escombros alrededor de la trayectoria de los pines; la presencia de estos escombros posiblemente esté ligada a los mecanismos de desgaste abrasivo y al rompimiento de uniones debido a la adhesión. En todos los materiales se detectaron capas de polímero transferidas y adheridas al disco de acero, aunque la apariencia de estas capas variaban de un material a otro. Zum-Gahr (Zum, 1987) encontró que estas películas delgadas, para el HDPE, tienen un espesor que varía entre 10 y 50 nm. En la Figura 7 se muestran las superficies de algunos pines después de los ensayos.



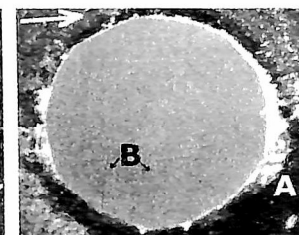
Pin de Teflón. $R_a=0.84\mu\text{m}$. Distancia acumulada: 750 m



Pin de Teflón. $R_a=0.14\mu\text{m}$. Distancia acumulada: 500 m.



Pin de HDPE. Se indica la dirección del deslizamiento. 80 Km. y $R_a=0.84\mu\text{m}$



Pin de Nylon. $R_a=0.14\mu\text{m}$. Se indica la dirección del deslizamiento. 80 Km

Figura 7. Aspecto de los pines después de los ensayos. Se señalan con letras algunas características relevantes. $V=1\text{ m/s}$. $P=1.7\text{ Kg-f}$. Aumento: $4.7\times$.

En las imágenes se observan algunas particularidades en los bordes como la presencia de flecos (pequeñas tiras) y la formación de rebordes continuos; el tamaño y la distribución de estas particularidades varían con el material, la rugosidad y la distancia recorrida.

4.5. Discusión con base en las imágenes obtenidas

La transferencia de material polimérico al disco de acero se da como resultado de un mecanismo de desgaste adhesivo. Esta transferencia se refiere generalmente en la literatura (Hutchings, 1992, Vaziri et al., 1988, Williams, 1994 y Zum, 1987), tanto a nivel descriptivo como mediante imágenes semejantes a las mostradas en las Figuras 6 y 7. Las características de esta transferencia parecen deberse al ablandamiento del polímero durante el contacto y su adhesión al acero como consecuencia del establecimiento de fuerzas de enlace como fuerzas de Van der Waals, electrostáticas y/o de enlace de hidrógeno (Zum, 1987).

El aspecto del material transferido estuvo afectado por el tipo de plástico, pues la forma y distribución del material adherido dependió del termoplástico ensayado. En el Teflón se

observaron depósitos de material no continuos, si se quiere "discretos", y que fueron los más fáciles de remover, mientras que el Polietileno formó una película muy delgada y unas líneas de material adherido, según (Zum, 1987), características del desgaste por deslizamiento de este material. El Nylon por su parte mostró una capa adherida muy notoria y relativamente gruesa, cuya remoción requirió mayor cuidado por su gran adherencia al disco; otra característica fue que cubrió casi toda el área aparente de contacto.

La estructura de los termoplásticos desempeña un papel muy importante en la forma como ellos se desgastan. El Polietileno tiene una cadena molecular con un ángulo entre los enlaces relativamente grande (109°) lo que para algunos autores (Zum, 1987) lo convierte en un plástico de perfil "suave", y una estructura altamente cristalina. Cuando se presentan esfuerzos cortantes las cadenas tienden a deslizarse respecto a las otras y el material fluye; esta fluidez está favorecida además por el estado gomoeástico del HDPE, ya que a temperatura ambiente se encuentra por encima de la temperatura de transición vítrea. Además, su temperatura de fusión es la más baja de los tres materiales ensayados, y por ello el ablandamiento se facilita. Tal vez sea por estas razones que el Polietileno forma rápidamente una capa protectora en el disco, y la rata de desgaste del par material Polietileno-Polietileno así formado, es mucho más baja que la original de acero-Polietileno.

El aumento de la rugosidad favorece el desgaste abrasivo. La cantidad de escombros aumentó con la rugosidad, así como la formación de flecos en el Teflón, el menos dúctil de los materiales ensayados. Estos aspectos encontrados de la influencia de la rugosidad, coinciden con las descripciones de (Zum, 1987), (Hutchings, 1992) y (Vaziri et al., 1988). En este último trabajo inclusive se afirma que "...aunque el desgaste abrasivo de los polímeros no es el fenómeno predominante en los ensayos *pin-on-disk*, se ha mostrado que existe un incremento considerable en las ratas de desgaste con el aumento de la rugosidad de la contracara durante el deslizamiento polímero-acero."

5. CONCLUSIONES

Los valores de coeficiente de desgaste asociados a la relación de Archard fueron los registrados en la Tabla 5. Como se puede observar el Polietileno tiene la resistencia al desgaste más alta, y es del orden de 150 veces mayor que la del Nylon, y unas 400.000 veces mayor que la del Teflón.

Está difundida la creencia de que cuando se presente un coeficiente de fricción más bajo, el desgaste es menor. Uno de los resultados más importantes es que la rata de desgaste del Teflón, un material usado en situaciones donde se requiere baja fricción, es la más alta de los termoplásticos ensayados. El Polietileno por su costo y bajo coeficiente de desgaste y el Nylon por su alto módulo elástico, su alta resistencia a la tracción y su costo se constituyen en excelentes alternativas en el momento de seleccionar un material.

La adhesión es el fenómeno predominante en el desgaste por deslizamiento de los termoplásticos, y en este proceso de desgaste por deslizamiento en seco sobre acero se transfiere plástico que se adhiere a la contracara. Cuando la rugosidad aumenta se incrementa la influencia del desgaste abrasivo y el desgaste por deslizamiento aumenta.

El modelo obtenido mediante una regresión lineal constituye una excelente opción para tomar decisiones en el momento de calcular una variable que se piensa se comporta linealmente. Un análisis estadístico cuidadoso de la regresión lineal entrega información valiosa sobre la influencia de las variables interrelacionadas.

Los resultados obtenidos son congruentes con los registrados en la literatura, lo que constituye un verdadero logro pues los métodos, los materiales y los equipos pueden diferir mucho.

En (Pérez, 1999) se realizó un trabajo con aceros al carbono con la misma carga y velocidad de deslizamiento, en la misma máquina *pin-on-disk* donde se efectuaron los ensayos aquí registrados. Si se comparan los resultados se puede observar que las ratas de desgaste del Nylon y del Polietileno son del orden de 1.000 y de 100.000 veces menores, respectivamente, que las del acero 1075, el más

resistente al desgaste entre los evaluados en dicho trabajo.

REFERENCIAS

- Albarracín, P. *Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz*. Tomo I. Segunda Edición. Bucaramanga: Ed. Litochoa, 1993.
- Askeland, D. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Tercera Edición. Ed. International Thomson, 1998.
- ASM, Metals Handbook. *Friction, Lubrication and Wear Technology*. Vol 18. E.U.A., 1992.
- ASTM D785-93. Standard Test method for Rockwell Hardness of plastics and Electrical Insulating Materials.
- ASTM G99-90. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus.
- ASTM G40-94. Standard terminology relating to wear and erosion.
- Barker, T. *Quality by Experimental Design*. Segunda Edición. Editroial Marcel Dekker Inc. 1994.
- Bowden, F., Tabor, D. *The friction and lubrication of solids*. Part II. Oxford. Clarendon press, 1964.
- Callister, W. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Tomo II. Editorial Reverté, Barcelona, 1996.
- Da Silva, C., Tanaka, D. *Efeito da carga e da velocidade no coeficiente de atrito dinâmico entre Polietileno de alta densidade e aço galvanizado*. IV Seminário de desgaste. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 1998.
- Empaquetaduras y Empaques. Catálogo de productos.
- Flory, P. *Principles of polymer chemistry*. Cornell University Press, Ithaca, N.Y., 1953.
- Harper, CH. *Handbook of Plastics, Elastomers and Composites*. McGraw Hill Inc., 1992.
- Hotter, D. Materials: advanced materials and processing technologies give engineers more options. *Machine Design*, 69, (11), 1997.
- Hotter, D. Plastics still popp under the hood. *Machine Design*, 70 (4), 1998.
- Hutchings, I.M. *Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials*. Ed. Edward Arnold, a Division of Hodder Headline PLC, 1992.
- Kelley, J. Polymers get in gear new developments in polyketone chemistry boost gear perfomance. *Machine Design*, 69 (17), 1997.
- Linke, Udo, Wolf-Ulrich, K. Preparation of Polished Specimens and Thin Sections of Plastics. *Praktische Metallographie* 17, 1980.
- Montgomery, D. *Diseño y Análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamericana S.A. México, 1991.
- Montgomery, D., Runger, G. *Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería*. Editorial McGraw Hill Book Company, 1996.
- Pérez, C. Estudio del Desgaste por Deslizamiento en seco en un equipo "Pin-on-disk". Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 1999.
- Plásticos Industriales. Catálogo de productos.
- Smith, W. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Ed. McGraw Hill Book Company 1993.
- Strong, A.. *Plastics: materials and processing*. Prentice Hall, 1996.
- Thorton, P., Colangelo, V. *Fundamentals of Engineering Materials*. Ed. Prentice Hall. New Jersey, 1985.
- Vander, G. *Metallography, Principles and practice*. McGraw Hill Book Company, 1984.
- Vaziri, M., et al. An investigation of the Wear of Polymeric Materials. *Wear*, 122, 1988.
- Walpole, R., Myers, R. *Probabilidad y Estadística*. Ed. McGraw Hill, México, 1996.
- Williams, J. *Engineering Tribology*. Oxford University Press, 1994.
- Zum, K-H. *Microstructure and Wear of Materials*. Tribology series 10 Netherlands: Ed. Elsevier Science Publishing Company Inc., 1987.