

Diseño y construcción de un dispositivo para la evaluación cualitativa de desgaste abrasivo en poliuretano¹

RESUMEN

Se diseña y construye un dispositivo que evalúa el desgaste abrasivo de manera cualitativa en poliuretano rígido, con resultados coherentes.

Palabras clave: Abrasivo, polímeros, poliuretano, desgaste.

1. Introducción

A través del tiempo, la mecánica se ha inclinado por el estudio de los metales para conocer sus propiedades, empleándolos en diversos proyectos que mejoren la calidad de vida. En los últimos años se han estudiado materiales no metálicos con nuevas y mejores aplicaciones y ventajas mecánicas y económicas en los procesos de obtención y fabricación. El poliuretano rígido es un termoestable que, debido a sus múltiples cualidades en cuanto a la composición, origina una gran cantidad de incógnitas acerca de sus propiedades y, por ende, de sus aplicaciones. El desgaste por abrasión es una de las causas más frecuentes de inhabilidad en los elementos metálicos, por esta razón, los materiales termoestables han tenido una gran acogida, al lograrse obtener con algunos de ellos piezas con mejor respuesta ante este suceso.

Las empresas dedican una parte del proceso de producción a la evaluación de las propiedades de la materia prima y el producto terminado. Estas evaluaciones son menos frecuentes en las microempresas, debido a carencias tecnológicas, humanas o económicas. Las empresas de polímeros presentan varios inconvenientes, por desconocimiento de las propiedades de estos materiales; una de las propiedades más importantes es la resistencia al desgaste por abrasión; por tanto, es necesario determinar de una manera rápida y sencilla los comportamientos del material frente a la acción abrasiva a la que está sometido. La meta principal del presente proyecto consistió en diseñar y construir un dispositivo que permita evaluar cualitativamente, de manera práctica, el comportamiento del poliuretano rígido ante el desgaste abrasivo.

Autores

Fernando López Rincón²

Andrés Camilo Peña Garzón³

Director

Henry Moreno Acosta⁴

1 Proyecto curricular de Tecnología Mecánica.

2 Tecnólogo Mecánico. Correo electrónico: statu12@hotmail.com

3 Tecnólogo Mecánico. Correo electrónico: andrescamilopena@hotmail.com

4 Ingeniero Mecánico, docente Facultad Tecnológica Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: h.moreno.a@gmail.com

La construcción del dispositivo se llevó a cabo con base en las pruebas abrasivas Taber, con las que se trabajó de manera paralela, no idéntica, apoyados en otras normas relacionadas con el desgaste abrasivo, ya que por ser este un proyecto de carácter tecnológico solo puede llegar hasta la medición cualitativa, dados los costos de fabricación no asumibles; por tanto, la máquina ofrece información cualitativa, mas no cuantitativa, del fenómeno de desgaste abrasivo de un poliuretano.

2. Etapa de investigación

2.1 Poliuretano

Los elastómeros de poliuretano son una serie de polímeros (cadenas entrelazadas de moléculas) cuyo componente básico es el grupo -uretano (formado por carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno). Se caracterizan por una elasticidad intrínseca, que varía de acuerdo con sus componentes y formas de enlace, con lo que se logra una gran variedad de productos que se fabrican por colada, además de componentes industriales con óptimas propiedades mecánicas, según lo requiera cada aplicación específica. El poliuretano rígido es un material termoestable caracterizado por su dureza inusual; presenta alta resistencia al impacto, abrasión, compresión y degradación por el oxígeno, el ozono y el aceite, además de la combinación única de las características que lo distinguen de los elastómeros convencionales.

Por todo lo anterior, en los últimos años se ha venido trabajando la caracterización del poliuretano rígido y se han obtenido datos de materiales base, siempre teniendo en cuenta que sus propiedades varían según el porcentaje en sus componentes y que se torna complicado predecir un comportamiento específico, que en el caso del desgaste por abrasión determina su vida útil. El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo. Es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la superficie. Los análisis de los sistemas han demostrado que el 75% de las fallas mecánicas se deben al desgaste de las superficies en rozamiento.

2.2 Desgaste por abrasión

Las partículas abrasivas producidas por los residuos del desgaste o por partículas extrañas de arena y polvo circundante permanecen atrapadas en la superficie deslizante y eliminan material, principalmente por formación de surcos. Cuando un grupo de partículas duras se desliza sobre una superficie blanda, al aplicar el esfuerzo normal se graban en esta una serie de surcos conocidos como desgaste por abrasión de dos cuerpos. Las partículas duras sueltas que entran a la interfaz deslizante actúan como esmeriles. El proceso de eliminación de metal por socios se conoce como desgaste por abrasión entre tres cuerpos. Las partículas duras pueden ser residuos metálicos atrapados como resultado del rozamiento o bien capas previas de óxidos. Una situación de desgaste por abrasión de tres cuerpos da lugar al desgaste acelerado y aumenta la propensión al rayado de las partes de una maquinaria.

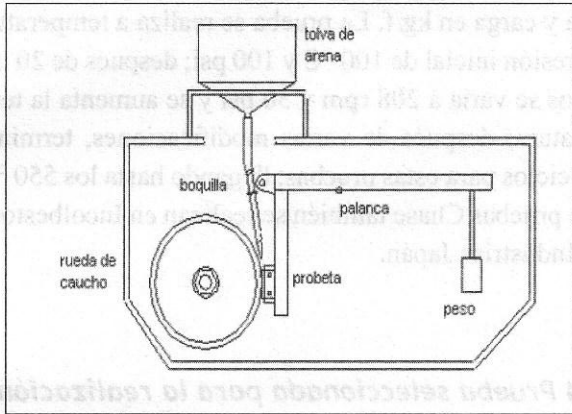
2.3 Métodos para evaluar el desgaste abrasivo

2.3.1 Arena seca sobre rueda de caucho

La prueba de arena seca sobre rueda de caucho involucra una probeta estándar a desgastar, con arena de tamaño y composición controlados. El abrasivo es introducido entre la probeta y una rueda giratoria recubierta con caucho de clorobutil; la fuerza es aplicada por un brazo de palanca, mientras un flujo controlado de arena desgasta la superficie de prueba. La rotación de la rueda es tal que la cara en contacto se mueve con el flujo de arena.

La duración de la prueba y la carga aplicada varía según el procedimiento normalizado; las probetas son pesadas antes y después de la prueba y la masa perdida se registra. Esto es necesario para convertir la masa perdida a volumen perdido en milímetros cúbicos; por diferencias en densidad de los cuerpos, se reporta un volumen de pérdida hallado por este método, como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Método de arena seca sobre rueda de caucho.



2.3.2 Prueba Taber

Un bloque de prueba se carga contra un tambor rodeado por un abrasivo en rotación, a una velocidad determinada y un determinado número de revoluciones. El volumen de desgaste en el bloque se calcula según el peso perdido. La fuerza de fricción se regula para mantener el bloque de prueba en su lugar, como se observa en la Figura 2.

Los resultados del desgaste son reportados como volumen perdido en m^3 o mm^3 en la probeta y en el disco. Cuando dos materiales diferentes han sido probados, es recomendable que cada uno se lo pruebe en ambas posiciones del disco. El desgaste total se halla por las mediciones apropiadas de las probetas, antes y después de la prueba. En la Figura 3 se muestra el dispositivo comercializado por la empresa Elcometer.

Figura 2. Método de prueba Taber.

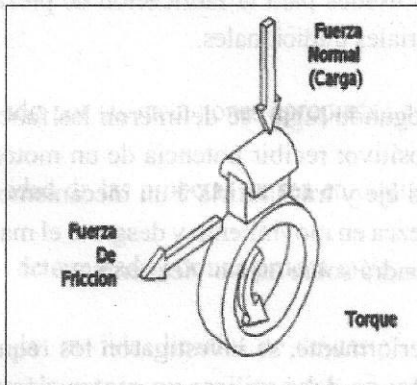
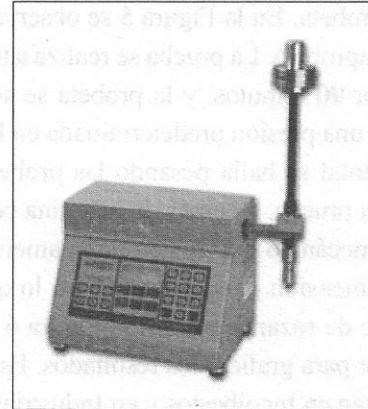


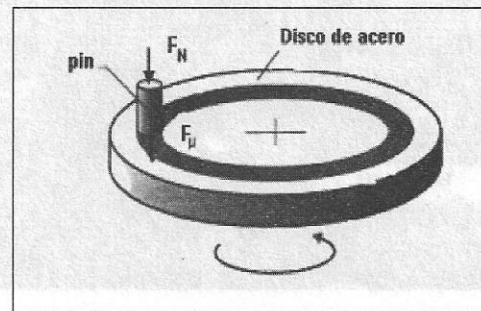
Figura 3. Dispositivo Elcometer para pruebas Taber.



2.3.3 Pasador sobre un disco giratorio

Para realizar la prueba de pasador sobre disco giratorio se requieren dos probetas: la primera es un pasador con un determinado radio y está ubicada perpendicularmente a la otra probeta, que usualmente es un disco circular liso; la máquina puede mover la probeta hacia el centro del disco o hacia su periferia. En ambos casos, el disco se encuentra rotando y el pasador se desliza sobre este de modo circular; la probeta de pasador es presionada contra el disco mediante un sistema de palancas, sistema hidráulico o neumático. En la Figura 4 se observa el esquema del método.

Figura 4. Método de prueba pin sobre disco.



2.3.4 Prueba Fast

Regida por las normas SAE441 y JIS-D4420, la prueba consiste en disponer la cara de la probeta sobre la cara de

un disco abrasivo que gira a 823 rpm, generando un desgaste en la probeta. En la Figura 5 se observa el disco y el brazo portaprobeta. La prueba se realiza a temperatura ambiente, por 90 minutos, y la probeta se somete contra el disco a una presión predeterminada en la máquina. El desgaste total se halla pesando las probetas antes y después de la prueba. Además, la máquina consta de un transductor mecánico que indica gráficamente la variación en la dimensión de la probeta, con lo que se halla el coeficiente de rozamiento. En la Figura 6 se muestra el transductor para graficar los resultados. Estas pruebas Fast se realizan en Incolbestos y en Industrias Japán.

Figura 5. Disco y brazo porta probeta.

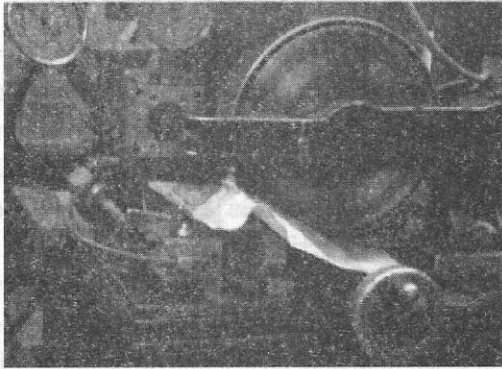
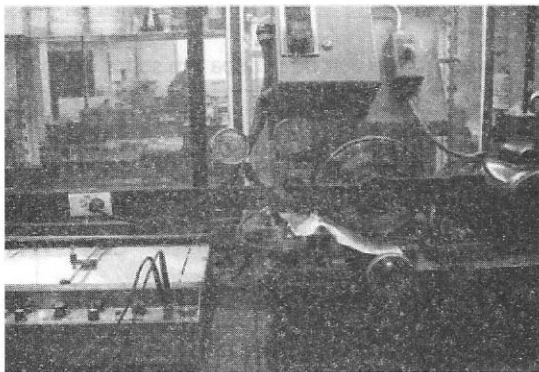


Figura 6. Sistema para obtener la gráfica.



2.3.5 Prueba Chase

Esta prueba se rige por las normas SAE_ JIS 661. En ella la probeta está estática sobre un disco abrasivo que gira a 312 rpm, generando un desgaste en la probeta.

Para la prueba Chase se manejan las variables temperatura y carga en kg/f. La prueba se realiza a temperatura y presión inicial de 100 °C y 100 psi; después de 20 minutos se varía a 208 rpm y 50 psi y se aumenta la temperatura; después de varias modificaciones, terminan los ciclos para estas pruebas, llegando hasta los 550 °C. Las pruebas Chase también se realizan en Incolbestos y en Industrias Japán.

2.4 Prueba seleccionada para la realización del proyecto

El ensayo está basado en uno de los métodos de la prueba Taber (Figura 2), que consiste en someter una probeta fija sobre el perímetro de un tambor abrasivo en movimiento giratorio, por un tiempo o número de ciclos determinados (1.000). El tambor parte con una velocidad inicial igual a cero, luego mantiene una velocidad de 72 rpm durante la prueba. Posteriormente, se procede a medir la probeta o calcular la pérdida de masa y así la variación de volumen de la probeta, dado que los resultados se dan en pérdida de volumen por número de ciclos.

3. Etapa de diseño

3.1 Metodología del diseño

El proceso de diseño se llevó a cabo de la siguiente manera:

- En primer lugar, se identificó la necesidad presentada en la empresa de polímeros, que es la de encontrar una relación de desgaste abrasivo entre los poliuretanos usados para la fabricación de piezas y otros materiales tradicionales.
- En segundo lugar, se definieron las funciones del dispositivo: recibir potencia de un motor a través de un eje y transmitirla a un mecanismo que permanezca en movimiento y desgaste el material que se pondrá sobre esta o viceversa.
- Posteriormente, se investigaron los requisitos del diseño: se debe utilizar un motor eléctrico cuya

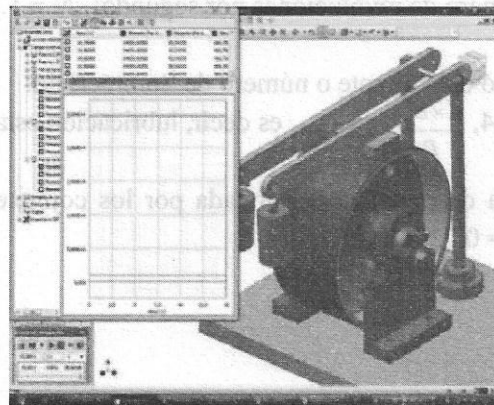
potencia depende de la prueba de desgaste abrasivo, a determinada velocidad de giro de salida; el motor debe ir asegurado al conjunto del dispositivo, que no trabajará a la intemperie y lo hará a bajas temperaturas; en el eje de salida del motor se usa un acoplamiento flexible que protege la máquina de cargas creadas por desalineaciones, además de que estos trabajan muy bien a velocidades bajas.

- Luego se determinaron los criterios de evaluación: en primer lugar, la seguridad, que se logra con una disposición cómoda de las probetas en el dispositivo, ya que los brazos portaprobetas tienen más de 180 grados de giro, lo que ofrece buen espacio para manipular las probetas, con un temporizador electrónico. Con esto se busca que el operario solamente tenga que encender el dispositivo y sin intervenir a lo largo de la prueba; únicamente se espera a que el dispositivo realice su trabajo. Hay que considerar un buen desempeño y bajos costos de manufactura, operación y mantenimiento; para esto se tienen en cuenta factores como tamaño, peso, buena apariencia, entre otros.
- Después de definir las anteriores especificaciones, se procedió a postular varias soluciones basadas en los métodos descritos.
- Se procedió a estudiar cada una de estas posibilidades teniendo en cuenta los ítems del 3.1.1 a 3.1.4. Al abrir un abanico de posibilidades, lo más pertinente fue conocer los antecedentes en este campo, las normas que rigen actualmente y los métodos utilizados por grandes industrias caracterizadas por utilizar la última tecnología.
- Todos los métodos son válidos, puesto que evalúan el desgaste abrasivo. Por ejemplo, el método de arena seca sobre caucho es muy útil, pero requiere una demanda continua de abrasivo, pues se va contaminando y perdiendo prueba tras prueba. El pasador de disco giratorio se utiliza con dos movimientos y puede que presente dificultades al realizar la prueba con materiales demasiado maleables en esta posición. La prueba Fast realizada en Incol-

bestos es excelente, pero eleva bastante los costos, dada la precisión requerida en la carga a la probeta y por el transductor para la medición. La prueba Chase también es muy buena, pero se centra más en las variables de carga y temperatura, y esta última usualmente no se tiene en cuenta para pruebas con plásticos. Por último, está la prueba Taber, que utiliza una probeta fija a un brazo que descansa sobre la superficie abrasiva de un tambor de movimiento giratorio, muy utilizada para medición de desgaste abrasivo en plásticos, por su facilidad para la construcción y movimientos sencillos, por lo que se eligió como guía para realizar el dispositivo.

- Se decidió hacer la medición con la variación del espesor de la probeta que se presenta tras el paso del abrasivo, dado que para medir peso resultaba con un margen de error muy amplio, por lo que se habría presentado la obligación de hacer la medición en un laboratorio especializado, y ello incrementa los costos. La medición se realizó con un comparador de carátula, ubicado siempre en el mismo punto, para tener certeza en la medida.
- Para construir el dispositivo, se comenzó por hacer el dimensionamiento, determinando las fuerzas que intervienen en cada pieza para poder comenzar los cálculos de diseño. En la Figura 7 se muestra el prototipo diseñado en un software. Los cálculos de diseño se relacionan a continuación:

Figura 7. Prototipo digital creado para la construcción del dispositivo.



3.2 Cálculo del motor

Para calcular el motor requerido para el dispositivo se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

El momento de inercia del sistema: equivalente a $MIt = 0.23 \text{ Kg.m}^2$

El torque efectivo que debe transmitir: equivalente a $\tau = 17.39 \text{ N.m}$

La fuerza de fricción que ejercen las probetas: equivalente a $Ff = 19.52 \text{ N}$

El torque general del sistema: equivalente a $Tt = 19.37 \text{ N.m}$

Por tanto la potencia del motor debe ser de: $P = 146 \text{ Watts}$.

3.3 Selección de acople

Para seleccionar el acople indicado se tuvieron en cuenta los siguientes factores: tamaño del acople, máxima velocidad que maneja y torque permitido; lo que conlleva seleccionar un acople L075.

3.4 Cojinetes

Para escoger unos cojinetes convenientes se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

Coefficiente de fricción (ecuación de Petroff) $f = 0.2$

N: Número de revoluciones por segundo: $N = 1.2 \text{ rps}$

Número del cojinete o número de Sommerfeld: $S = 4.14, \frac{\mu \times N_j}{P} = 2.5E-4$, es decir, lubricación estable.

Pérdida de potencia ocasionada por los cojinetes: en Watts = 0,7226.

3.5 Varilla que soporta el brazo portaprobeta

Escoger un punto de diseño donde se presenta un mayor esfuerzo:

‘A’: Punto de diseño

Momento torsor = 0

Esfuerzo en la sección circular: $\sigma = 4.02 \text{ MPa}$

Esfuerzos principales: $\sigma_1 = \sigma_2 = 4.02 \text{ MPa}$

Von Misses: $\sigma^{-1} = \sigma_1 = 4.02 \text{ MPa}$

Factor de seguridad real: $FSr = 3.17$

3.6 Cálculos para los tornillos

Fuerza inicial o de apriete: $F_i = 10468.53 \text{ N}$

Factor de seguridad real: $N = 1.02$

4. Fabricación

4.1 Fabricación de los ejes en poliuretano

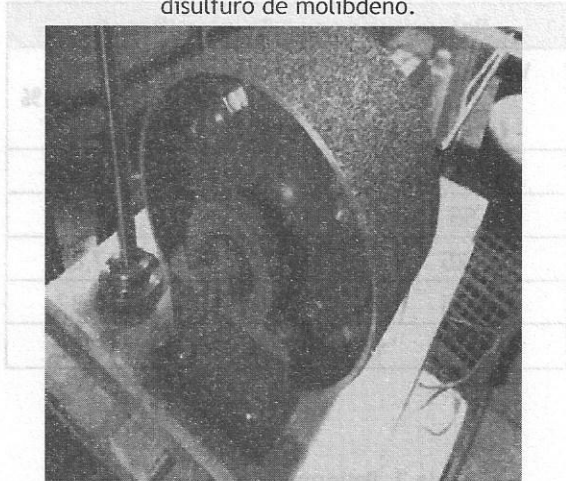
En primera instancia se creó un modelo en madera con un sobredimensionamiento del 1% respecto a la pieza final. Con este modelo se realizó un molde en poliuretano de dureza 80 shore A, con catalizador al 3%, al cual se le aplicó masilla para tapar las porosidades y desmoldeante de silicona para evitar adherencias al extraer la pieza; este proceso tomó dos horas, y el horneado se realizó a 100 °C, mínimo por ocho horas. Se presenta una reacción exotérmica que mantiene cerca de 80 °C; de la misma manera se comenzó a trabajar la pieza. La mezcla se hizo de forma manual, en un tiempo no mayor a 5 min; posteriormente, se hizo el vertimiento. La extracción tomó cerca de 30 min. y después vino su respectivo horneado. Por último, se realizaron los mecanizados: el refrentado y los agujeros. Los acoples están hechos en poliuretano elastomérico, que ofrece

absorción de vibraciones y cuida el mecanismo ante un cambio brusco de fuerza.

4.2 Fabricación de los cojinetes

Los cojinetes están hechos en resina epoxi con 10% de disulfuro de molibdeno (Figura 8). Por ser este un termoestable, se repite el proceso realizado para las piezas en poliuretano; para proceder luego a la construcción del modelo en madera y del molde, y al horneado del molde. Posteriormente se mezcló el disulfuro y la resina y se vertió en el molde, con un tiempo de colada de 30 minutos; después se horneó en las mismas condiciones del poliuretano. Los mecanizados se aplicaron en torno para dar paralelismo y crear los agujeros concéntricos donde ensamblan los ejes; luego se taladraron los agujeros para la sujeción.

Figura 8. Cojinetes hechos en resina epoxi con disulfuro de molibdeno.



4.3 Fabricación de la varilla que soporta el brazo portaprobeta

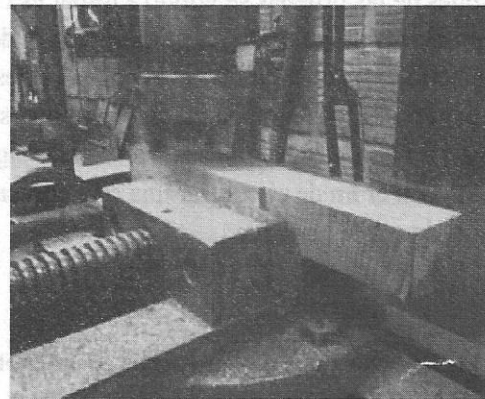
Se adquirió varilla de acero 1020 de $\phi = 5/16''$ y se mecanizó en un torno paralelo a un diámetro de 15 mm, con la finalidad de dar presentación al soporte. Posteriormente, se llevó al taladro fresador donde se mecanizaron los planos que sirvieron de referencia para crear el agujero en el cual se inserta el pasador que sostiene los brazos portaprobetas.

5. Realización de los ensayos

Por último, se probó la máquina realizando las pruebas de desgaste abrasivo al poliuretano rígido, al poliuretano con plastificante, al polipropileno y al poliestireno. Gracias a estas se determinaron los datos posteriormente asociados, cumpliendo con uno de los objetivos de este proyecto.

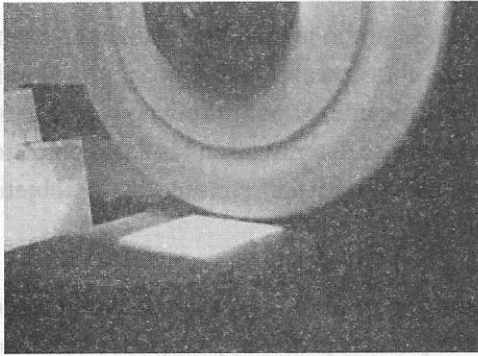
Se mecanizaron unos modelos con la finalidad de hacer los moldes para las probetas y las partes del dispositivo hechas en poliuretano. En la Figura 9 se visualiza el proceso de mecanizado.

Figura 9. Mecanizado de modelos.



Antes de realizar la prueba, se procedió a rectificar las caras de las probetas que presentaban una rugosidad grande, como se observa en la Figura 10. A algunas no fue necesario aplicarles este procedimiento y a otras ello no fue pertinente, por su recubrimiento. Con el proceso de rectificado se obtuvo un valor $0,04 \leq R_t \leq 2,5$, que son buenas cifras para el procedimiento realizado.

Figura 10. Rectificado de probetas.



Al inicio de la prueba se midieron las probetas y con un comparador de carátula se tomó el cero para cada una; después de las pruebas se volvió a tomar esa información en el mismo punto de la primera vez, y de esta forma se halló la diferencia que provocaba el desgaste en cada material. El sistema de medición se muestra en las Figura 11. Con esa diferencia se crearon las siguientes gráficas con el fin de encontrar una relación entre la dureza y el desgaste abrasivo.

Figura 11. Medición de la probeta hecha en poliuretano.



5.1 Resultados

En las Tablas 1-5 se relaciona la variación que se obtiene por diferencia de la medida inicial con la medida después de la prueba y la dureza medida en *shore D*, lo que brinda datos para relacionar la resistencia del material. El dato de desgaste es equivalente a la variación de la dimensión de la probeta. Los datos se relacionan

de la siguiente manera: en la Tabla 1, el poliuretano de uso general; en la Tabla 2, el poliuretano con 10% de plastificante; en la Tabla 3, el polipropileno recuperado; en la Tabla 4, poliestireno; y en la Tabla 5 se expone un comparativo de todos los materiales.

Tabla 1. Poliuretano uso general.

Poliuretano uso general		
Variación (mm)	Dureza (Shore D)	Desgaste %
1,89	80	46,55
1,6	79	39,40
1,7	80	41,87
1,76	80	43,34
1,7375	79,75	48,84

Tabla 2. Poliuretano con 10% de plastificante.

Poliuretano con 10% plastificante		
Variación (mm)	Dureza (Shore D)	Desgaste %
0,55	72	13,54
0,55	73	13,54
0,725	73	17,85
0,825	72	20,32
0,6625	72,5	18,62

Tabla 3. Polipropileno recuperado.

Polipropileno recuperado		
Variación (mm)	Dureza (Shore D)	Desgaste
0,4	70	9,85
0,2	68	4,92
0,275	71	6,77
0,125	70	3,07
0,25	69,75	7,02

Tabla 4. Poliestireno.

Poliestireno		
Variación (mm)	Dureza (Shore D)	Desgaste %
3,58	76	88,1773399
4,06	76	100
3,23	76	79,5566502
3,36	77	82,7586207
3,5575	76,25	100

Tabla 5. Tabla de comparación.

Material	Desgaste %*	Dureza Sh.D*	Variación*
Poliuretano. uso general	48,84	79,75	1,7375
P. 10%	18,62	72,5	0,6625
Polipropileno	7,03	69,75	0,25
Poliestireno	100,00	76,25	3,5575

Podemos apreciar que el poliuretano presenta una buena resistencia al desgaste, al compararlo con los datos del poliestireno, material que tuvo baja resistencia al desgaste, debido a la estequiometría de la fórmula del poliuretano, que lo hace lo suficientemente rígido para soportar el abrasivo y lo suficientemente blando para no quebrarse. El poliuretano recuperado presentó una buena resistencia al desgaste abrasivo, debido a que posee gran elasticidad, la cual dificulta el ataque del material abrasivo a la probeta. En la Figura 12 se visualizan los resultados según la dureza y la pérdida de material; y en la Figura 13, teniendo en cuenta la dureza y un desgaste porcentual.

Figura 12. Dureza frente a la pérdida de material durante la prueba.

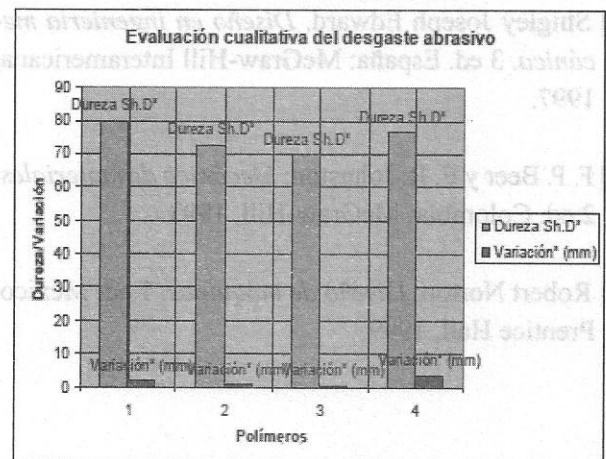
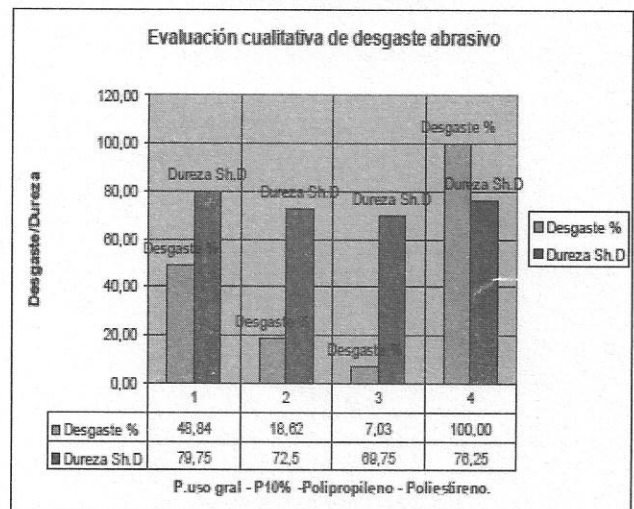


Figura 13. Resultados entre dureza y el desgaste porcentual.



Se demuestra que aunque el poliuretano de uso general y el poliestireno tengan valores cercanos de dureza, el poliuretano es mucho más resistente a la fricción que el poliestireno; también se aprecia que con un poco de plastificante en su composición el poliuretano se comporta mucho mejor frente a la abrasión.

Referencias

[1] Shigley Joseph Edward. *Diseño en ingeniería mecánica*. 3 ed. España: McGraw-Hill Interamericana, 1997.

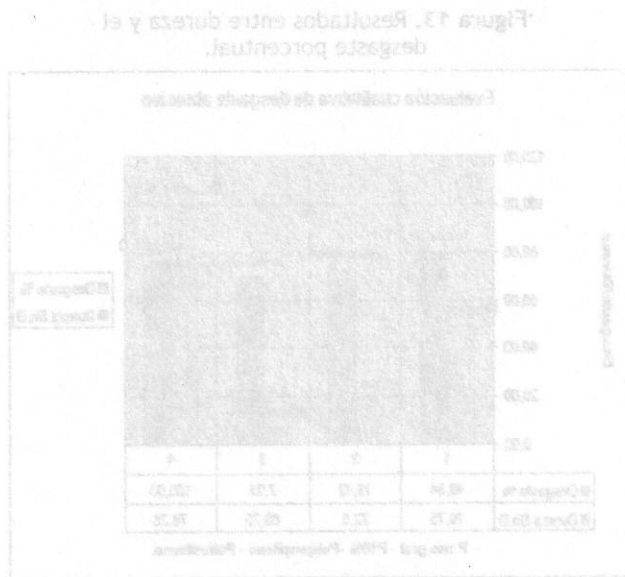
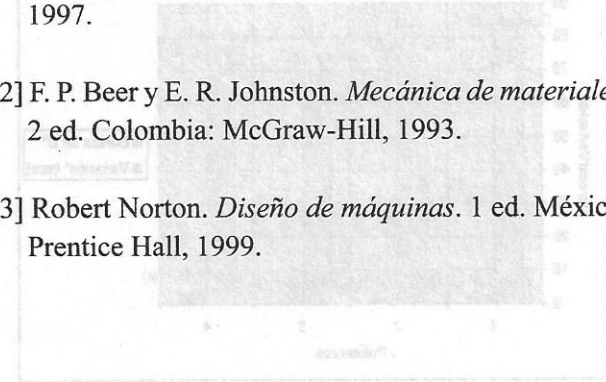
[2] F. P. Beer y E. R. Johnston. *Mecánica de materiales*. 2 ed. Colombia: McGraw-Hill, 1993.

[3] Robert Norton. *Diseño de máquinas*. 1 ed. México: Prentice Hall, 1999.

[4] Robert L. Mott. *Diseño de Elementos de Máquinas*. 4 ed. México: Prentice Hall, 2006.

[5] James F. Shackelford. *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. España: Pearson, 2005.

[6] Donald R. Askeland. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 4 ed. México: Cengage Learning, 2005.



Se demuestra que aunque el polietileno de uso general y el polipropileno tengan valores cercanos de dureza, el polietileno es mucho más resistente a la fricción que el polipropileno; también se aprecia que con un poco de plasticidad en su composición el polietileno se comporta mucho mejor frente a la abrasión.

Tabla 5. Tabla de comparación.

Materiales	Dureza (HV)	Desgaste (%)
Polietileno uso general	48,84	1,3372
P. 10%	18,62	0,6822
Polipropileno	7,03	0,22
Polietileno	100,00	3,2272

Podemos apreciar que el polietileno presenta una buena resistencia al desgaste, al compararlo con los datos del polipropileno, material que tuvo poca resistencia al desgaste, debido a la estructura de la fórmula del polietileno, que lo hace lo suficientemente rígido para soportar el abrasivo y lo suficientemente blando para no quebrarse. El polipropileno tampoco presentó una buena resistencia al desgaste abrasivo, debido a que posee gran elasticidad, la cual dificulta el ataque del material abrasivo a la probeta. En la Figura 12 se visualizan los resultados según la dureza y la pérdida de material; y en la Figura 13, teniendo en cuenta la dureza y un desgaste porcentual.