

COMPORTAMIENTO EN DESGASTE DESLIZANTE DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD ENTRECruzADO CON RADIACIÓN GAMMA

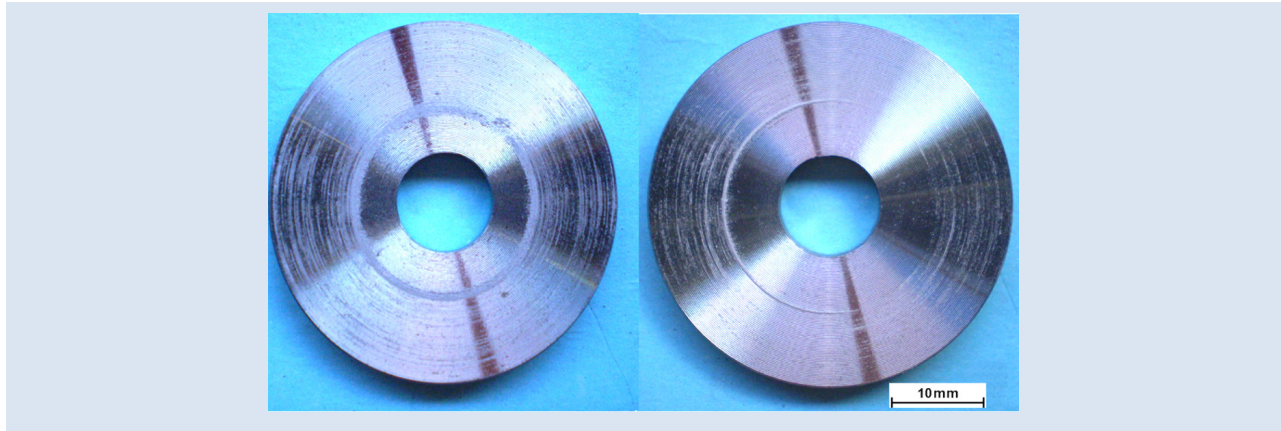
Walter R. Tuckart^{1*}, Michelle L. Rosevear², Erica Molinari¹, Marcos Gregorio¹, Marcelo D. Failla^{1,3}

1: Dpto. de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, ARGENTINA

2: Swinburne University of Technology, Engineering and Industrial Science, Melbourne, AUSTRALIA

3: Planta Piloto de Ingeniería Química, CONICET, ARGENTINA

* e-mail: wtuckart@uns.edu.ar



RESUMEN

El propósito del trabajo fue evaluar el comportamiento de polietilenos irradiados con rayos gamma sometidos a desgaste deslizante. Para ellos se utilizaron dos polietilenos lineales, que fueron irradiados con radiación gamma a temperatura ambiente, aplicándose a cada grupo dosis de 2, 5, 10 y 20 Mrad. Los estudios tribológicos fueron realizados usando un tribómetro Pin On Disc. Los ensayos se efectuaron aplicando cargas normales entre 2, 5 y 15 N. Se encontró que la velocidad de desgaste se incrementa con la carga aplicada en los materiales irradiados con bajas dosis, mientras que aquellos irradiados con las dosis más altas la velocidad de desgaste atraviesa por un valor máximo con la carga.

Palabras claves: Desgaste deslizante, Entrecruzamiento por irradiación, Polietileno.

SLIDING WEAR BEHAVIOUR OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE CROSS-LINKED BY GAMMA RADIATION

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the sliding wear behavior of γ -irradiated linear polyethylene. The polymers used were two linear polyethylenes that were irradiated by γ rays at room temperature. Equal total doses of 2, 5, 10 and 20 Mrad were applied. Tribological tests were performed in a Pin On Disc tribometer with normal loads between 2, 5 and 15 N. The results show that the wear rate increases with the applied load in the case of the samples irradiated with the lowest doses, while the wear rate displays a maximum with the applied load in the samples irradiated with the highest dose.

Keywords: Sliding wear, Cross-linked by irradiation, Polyethylene.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de polietilenos en partes de dispositivos sometidas a deslizamiento y en contacto con superficies en movimiento relativo, se ha extendido en distintas ramas de la ingeniería que demandan propiedades tribológicas relacionadas óptimas, por ejemplo deslizamiento, fricción y/o resistencia al desgaste [1]. Una manera que ha permitido lograr esas características es mediante el empleo de polietilenos de ultra alto peso molecular y materiales derivados de estos por modificación a través de entrecruzamiento. En la literatura abierta existe abundante cantidad de estudios dedicados a la mejora de las propiedades de este tipo de polietileno, aunque es muy limitada la información que se puede encontrar sobre las propiedades tribológicas de otros polietilenos modificados o no. En este trabajo se presentan algunos resultados preliminares del estudio orientado a evaluar y conocer el comportamiento de desgaste de polietilenos entrecruzados. En este caso el entrecruzamiento del polietileno se produce por irradiación con rayos gamma.

La radiación con alta energía de polietileno es un tratamiento ampliamente empleado en la industria con diferentes propósitos, en particular para esterilización y proveer estabilidad termomecánica al polímero. La exposición del polietileno a la radiación resulta en la formación de radicales libres que subsecuentemente reaccionan tendiendo a promover el entrecruzamiento de las cadenas de moléculas, si las condiciones son apropiadas [2,3]. El entrecruzamiento produce un aumento del peso molecular y cuando el material absorbe dosis superior a una dosis crítica se genera una red molecular. El material entonces se divide en una red entrecruzada denominada gel y en una fracción soluble, la proporción de gel aumenta con la dosis de irradiación hasta que a dosis suficientemente alta prácticamente todo el material forma parte del gel. Además del nivel de dosis aplicada, existen varios factores que afectan el grado de entrecruzamiento molecular y la proporción de gel, los principales son: la estructura molecular, el nivel de cristalinidad, el entorno medioambiental y el tipo de tratamiento que se aplique en etapas posteriores a la irradiación [2-4]. Como consecuencia de los cambios estructurales que se producen varias propiedades del polímero son modificadas entre las cuales se encuentran las mecánicas y tribológicas

[4,6].

En trabajos realizados por K. Matsubara et. al. [6] utilizando polietileno irradiado deslizando contra acero recubierto con cromo, encontraron que el desgaste del polímero incrementa con la dosis de radiación hasta un valor de dosis denominado "crítico" y que superar este valor el desgaste disminuye. Se consideró que el factor que determina este fenómeno es la temperatura que alcanza la superficie de contacto que puede ser cercana a la de fusión del polímero. Posteriormente, S. Bahadur et. al. [7] en un estudio de desgaste abrasivo de polietileno y acero, concluyeron que la velocidad del desgaste durante el régimen estacionario se incrementa rápidamente con el tamaño de las partículas de desgaste. Este trabajo analiza el comportamiento en desgaste del polímero considerando las características topográficas de la superficie de la contraparte de acero, sin tener en cuenta las características del polímero.

En el presente trabajo se irradiaron dos polietilenos de alta densidad de distintos pesos moleculares, con dosis que variaron en un rango amplio para producir, primero un aumento del peso molecular y luego distintas proporciones de gel en la estructura. La resistencia al desgaste deslizante se determinaron efectuando ensayos de desgaste utilizando acero como contraparte. Los resultados son analizados en función de las características estructurales del polímero.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Material

Los polietilenos empleados tienen peso molecular promedio en peso de 55,000 g/mol (PE5) y 81,000 g/mol (PE8) estimados mediante cromatografía de exclusión de tamaño. Con estos polímeros se prepararon láminas de 0,5 mm de espesor por moldeo por compresión utilizando una prensa hidráulica a temperatura controlada de 150°C, luego del moldeo el material se enfrió rápidamente en baño de agua-hielo. La cristalinidad de las muestras, determinada por calorimetría fue, en promedio, de 65 y 60% para PE5 y PE8, respectivamente.

En un paso posterior, de las láminas se cortaron muestras en forma de tiras las que fueron divididas en distintos grupos para ser irradiadas en el Centro Atómico Ezeiza con rayos gamma generados por fuente de ^{60}Co . La irradiación se realizó a

temperatura ambiente con las muestras encapsuladas en ampollas de vidrio bajo vacío (10^{-4} torr) aplicando una velocidad de dosis de 0,33 Mrad/h. Se aplicaron dosis totales de 2, 5, 10 y 20 Mrad sobre cada grupo de muestras. Luego de la irradiación el material fue tratado térmicamente a 140°C por 5 minutos y luego enfriado lentamente hasta temperatura ambiente. Este tratamiento térmico también fue aplicado a las muestras que no fueron irradiadas. La proporción de gel fue establecida utilizando extracción selectiva de material soluble con xileno caliente, siguiendo procedimientos estandarizados (4).

La cristalinidad de los materiales fue estimada comparando el calor de fusión con el valor correspondiente para un polietileno totalmente cristalino (69 cal/g) [8]. El calor de fusión fue determinado del área de endotermas de fusión registradas utilizando un calorímetro Perkin-Elmer Pyris I calibrado usando un estándar de Indio y operado a una velocidad de calentamiento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Se realizaron ensayos mecánicos de tracción sobre muestras con forma de hueso de 0.5 mm de espesor, y 4 mm de ancho y con una longitud de la zona de deformación de 12 mm. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente usando una máquina de ensayo universal Instron 1120 operada a una velocidad de desplazamiento de cabezal de 10 mm/min. Se midieron las siguientes propiedades mecánicas: esfuerzo de fluencia, esfuerzo último de rotura y relación de estirado máxima.

El porcentaje de gel, la cristalinidad expresada en porcentaje, y las propiedades mecánicas medidas se

presentan en la Tabla 1. En la misma se puede observar un incremento de la proporción de gel con la dosis, lo cual origina una disminución en el nivel de cristalinidad de polímero. Estos cambios estructurales se manifiestan en las propiedades mecánicas como una disminución en el esfuerzo de fluencia y en la relación de estirado máxima a la rotura. En el caso de PE5 se observó un comportamiento frágil con rotura al iniciarse la fluencia, mientras que en los otros materiales el comportamiento fue dúctil.

2.2 Ensayos de Desgaste

El comportamiento tribológico de los materiales fue determinado utilizando un tribómetro del tipo “Pin-on-Disc” según la norma ASTM G99-05 [9]. Los ensayos consistieron en colocar las muestras obtenidas de las láminas con dimensiones de 10 mm de ancho y 10 mm de largo en contacto directo con la superficie de un disco rotante de acero con un diámetro central de pista de 32 mm. La velocidad de rotación fue 375 rpm igual en todos los ensayos, los que duraron 30 minutos, esto es equivalente a un recorrido total de 1884 m. No se utilizó lubricación externa y se aplicaron cargas normales a las muestras de 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5 y 15 N. El sistema tribológico fue expuesto a un ambiente de aire seco cuya temperatura fue controlada en $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Para cuantificar la resistencia de desgaste se empleó la técnica de diferencia de masa (antes y después del ensayo) utilizando un balanza de precisión marca Precisa de 10^{-4}g de sensibilidad. El valor medido de la pérdida de masa fue dividido por la distancia de deslizamiento en metros para obtener la velocidad

Tabla 1. Características estructurales y propiedades de los materiales.

Muestra	Dosis (Mrad)	Gel (%)	Cristalinidad (%)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo de rotura (MPa)	Relación de estirado
PE8	0	0	71	33	27	12
	2	0	64	25	31	12
	5	38	59	24	32	8,5
	10	76	57	24	33	6,8
	20	85	56	22	32	4,9
PE5	0	0	70	32	- ^a	- ^a
	5	9	60	26	24	8
	10	43	56	26	26	7,4
	20	67	54	24	23	5,6

^a Comportamiento frágil

de desgaste. Los resultados reportados resultan de un promedio de al menos tres ensayos para cada material. También durante el transcurso de los ensayos fue registrada la fuerza de fricción producida en el contacto en función del tiempo de ensayo. Esto permitió calcular el coeficiente de fricción de acuerdo con la norma ASTM G115 -04 [10].

Los discos rotantes de 5 mm de espesor de acero AISI 4140 fueron confeccionados a través de operaciones de torneado. Las características topográficas de la superficie metálica fue determinada mediante perfiles de rugosidad (ISO 3274:1996) [11] empleando un rugosímetro marca Prazis. Los valores obtenidos son presentados en la Tabla 2. La dirección de medida es respecto al eje central.

Tabla 2. Características topográficas de la superficie metálica.

Dirección de medida	Parámetro [μm]		
	Ra	Rz	Rt
Normal	12,49	39,26	40,65
Tangencial	6,56	27,57	34,77

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comportamiento en fricción deslizante

En la Figura 1 se presenta el valor del coeficiente de fricción (COF) en función de la carga usada en los ensayos para el PE8 y los polímeros irradiados con las dosis indicadas. En la figura es posible observar que, para todas las muestras el COF es de aproximadamente 0,08 cuando se utilizó la carga más baja (7,5 N).

Al incrementar el nivel de carga, se aprecia un crecimiento en el coeficiente de fricción hasta alcanzar un valor cercano a ~0,2. También es posible advertir que en el caso de PE8, datos identificados como 0 Mrad, y en la muestra irradiada con 2 y 5 Mrad, muestran un comportamiento similar, teniendo una tasa creciente del valor del COF con la carga desde ~0,10 hasta ~0,17.

Mientras que las muestras que presentaron una proporción alta de gel, irradiadas con dosis de 10 y 20 Mrad, muestran un comportamiento diferente respecto de las precedentes. En el caso de la muestra irradiada con 10 Mrad el COF alcanza un valor alto

de 0,34 cuando se aplicó la mayor carga. Mientras que en el caso de la muestra irradiada con 20 Mrad el valor de COF aumenta rápidamente a 0,22 cuando se usó una carga de 10 N, para luego aumentar lentamente hasta alcanzar un valor de 0,24 con la carga de 15 N.

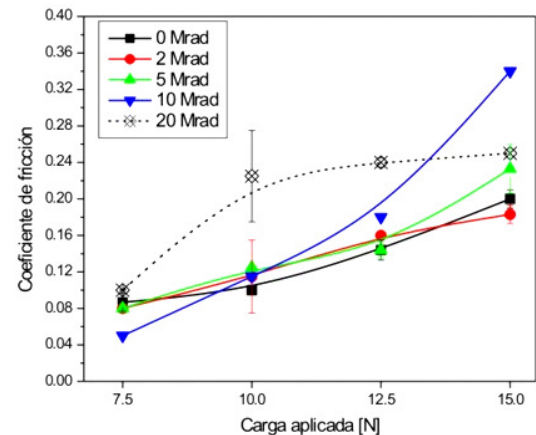


Figura 1. Coeficiente de fricción en función de carga de ensayo del PE8 y los materiales irradiados con distintas dosis.

Los ensayos de desgaste realizados sobre PE5 y los materiales obtenidos de su irradiación se realizaron con cargas de hasta 10 N, debido que el uso de cargas mayores causaba niveles de desgastes elevados y en algunos casos el nivel de daño producía la destrucción de las muestras al inicio del ensayo.

En la Figura 2 se presentan los resultados de COF para el polímero PE5 y los modificados con las dosis indicadas. Es posible observar en dicha figura, que la variación del COF con la carga aplicada es semejante a la observada en el caso de PE8, en cuanto a que en la mayoría de los casos muestran una tendencia a aumentar levemente con el nivel de carga. Cuando se usaran las cargas más bajas los valores del COF fueron cercanos a ~0,12 mientras que alcanzó un valor promedio de ~0,17 cuando se aplicaron las cargas más altas.

Por otra parte, no es evidente una dependencia definida de COF con el nivel de dosis recibida por la muestra. En la bibliografía se han informado valores de COF de referencia para el par acero-polietileno que varían entre 0,18 y 0,39, los valores encontrados en este trabajo se ubican dentro del rango cuando se usaron las cargas de mayores [12-17].

De acuerdo a resultados presentados en la literatura,

el nivel de cristalinidad afecta el valor del coeficiente de fricción medido en ensayos de fricción donde el polímero desliza en seco sobre metal [16,17]. Así polietilenos con relativamente bajo nivel cristalinidad (50-55%) presentan coeficientes de fricción aproximadamente 50% mayores que polietilenos de con mayor nivel de cristalinidad (75-80%) cuando son ensayos en condiciones idénticas de deslizamiento. Los resultados encontrados muestran que PE5 y PE8, que poseen niveles de cristalinidad semejantes, tiene valores de COF semejante que está de acuerdo con los resultados mencionados anteriormente. Sin embargo, los materiales irradiados, que tienen cristalinidad menores y disminuyen con la dosis, o gel, no presentan un ordenamiento definido del COF con respecto a este parámetro estructural.

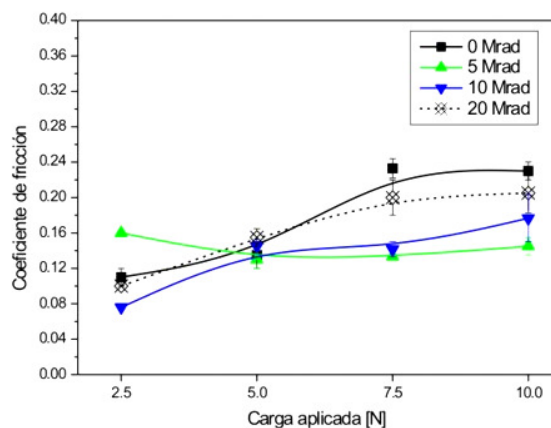


Figura 2. Coeficiente de fricción en función de la carga de ensayo del PE5 y los materiales obtenidos con distinta dosis de radiación.

A partir de los datos presentados en las Figuras 1 y 2, se infiere una relación no lineal entre el valor del COF con el nivel de carga aplicado. Esto evidencia un apartamiento respecto de la primera ley de fricción deslizante de Amontons, según la cual la fuerza de fricción es proporcional a la carga normal aplicada. En el deslizamiento de polímeros-acero, este comportamiento no es desconocido, y se debe a que el valor del COF en polímeros es altamente dependiente de una combinación compleja de diversos factores como la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento y la temperatura [1].

El contacto entre polímero y metal es, en general, predominantemente elástico antes que plástico, excepto cuando la superficie metálica es muy rugosa, como es el caso de la superficie empleada en

el presente estudio. En tal condición, a bajas cargas, el área de contacto real es una pequeña fracción del área aparente de contacto y por lo tanto, el área de contacto se mantiene proporcional a la carga aplicada y el COF permanece constante [7]. Esto es consistente con lo observado en los resultados de COF de PE5 con cargas moderadas a altas.

Por otro lado, cuando las cargas son aún más altas como las empleadas en PE8, la deformación elástica en los puntos de contacto en las asperezas individuales puede ser relativamente grande de manera que la situación se pueda aproximar a la de contacto de una sola aspereza, siendo además afectado por la presencia de flujo plástico alrededor del contacto [1]. Esto provoca un incremento de la temperatura superficial por efecto de la disipación por calor friccionante, este incremento de la temperatura podría afectar la magnitud de la fuerza de fricción haciendo que esta aumente con la carga normal aplicada [13]. Para verificar esta hipótesis se están desarrollando trabajos experimentales adicionales.

3.2 Comportamiento en desgaste

Los resultados de desgaste obtenidos se presentan en las Figuras 3 y 4 donde se representa la velocidad de desgaste en función de la dosis. En las figuras se dibujaron líneas con el solo propósito que ayuden a visualizar diferencias e indicar tendencias.

Los datos correspondientes a PE8 son presentados en la Figura 3. En el caso del material sin irradiar, se puede observar que la velocidad de desgaste no cambia significativamente hasta cargas de 12,5N, para luego aumentar rápidamente a una carga mayor de 15 N. Algo semejante ocurre con las muestras irradiadas a dosis de 2 y 5 Mrad.

Para el caso de la muestra irradiada con 10 Mrad no se observaron cambios importantes en el desgaste para las distintas cargas ensayadas. Por otra parte se puede apreciar que en el caso de la muestra irradiada con 20 Mrad, el desgaste producido con carga de 15 N es menor al medido cuando se ensayo con 12,5 N.

Efectuando una comparación de la velocidad de desgaste en función de la dosis a una carga determina se distingue que en el polímero PE8 y en los materiales irradiados presentan un nivel de desgaste semejante con una leve tendencia a disminuir con la dosis aplicada.

Al utilizar una carga de 12,5 N se observa un

cambio significativo de tendencia cuando se supera la dosis de 10 Mrad donde se evidencia un aumento en la velocidad de desgaste. Por otra parte, cuando se aplicó la mayor carga, 15 N, se puede evidenciar una marcada disminución del desgaste con la dosis de irradiación.

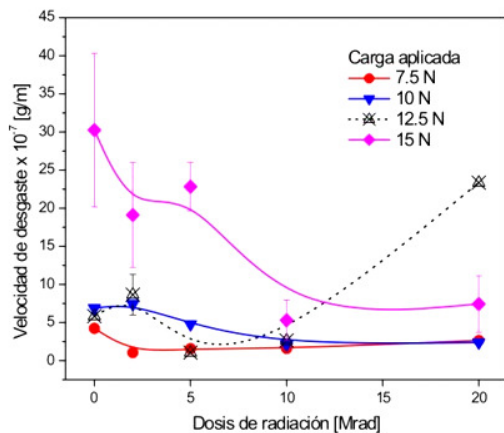


Figura 3. Velocidad de desgaste en función de la dosis de radiación para PE8 y sus modificados para las carga de ensayo indicadas.

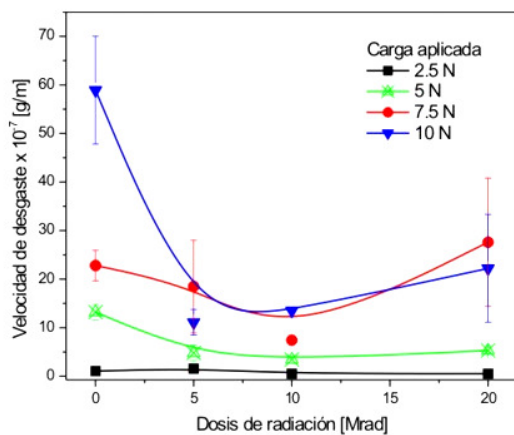


Figura 4. Velocidad de desgaste en función de la dosis de radiación de PE5 y sus modificados para las carga de ensayo indicadas.

Los resultados de los ensayos de desgaste de las muestras de PE5 son presentados en la Figura 4. En esa figura es evidente que el polímero PE5 muestra una velocidad de desgaste mucho mayor que la correspondiente a PE8, cuando se comparan a una misma carga aplicada de 7,5 y 10 N. Además, los materiales obtenidos por irradiación de PE5 con dosis entre 2 y 10 Mrad presentan mayor desgaste que las correspondientes muestras irradiadas de PE8. Por otra parte es notable observar en la figura que existe comportamiento de desgaste similar al

observado en el grupo de muestras de PE8.

Cuando se utilizaron cargas bajas, todas las muestras presentan aproximadamente un nivel de desgaste semejante e independiente de la dosis. Sin embargo, a cargas iguales y superiores a 7,5 N se evidencia una disminución inicial de la velocidad de desgaste con la dosis, hasta niveles de dosis de 10Mrad, a partir de la cual se produce un incremento en el desgaste.

La observación de las características de la superficie de desgaste del polímero y de las partículas de polímeros generadas en el proceso que quedan sobre el disco sugiere que el mecanismo de desgaste que prevalece es de tipo abrasivo. En la Figura 5 se muestra imágenes de la superficie de los discos luego de un ensayo de desgaste del material PE8 irradiado con 20Mrad. Estas imágenes fueron elegidas por ser representativas del aspecto que adquiere la superficie del disco luego de los ensayos realizados. Se puede distinguir en las imágenes, en particular en la izquierda, que se generaron numerosas partículas las que quedaron depositadas al costado del camino de deslizamiento.

Considerando estas características se trató de analizar los resultados aplicando uno de los enfoques usados para describir el desgaste abrasivo como lo es el propuesto por Ratner-Lancaster [17]. Estos autores han presentado evidencias experimentales que sugieren que la velocidad de desgaste abrasivo en polímeros resulta inversamente proporcional al producto del esfuerzo de rotura y la deformación correspondiente. Teniendo en cuenta esto, se trato de relacionar la velocidad de desgaste medida con los valores de las propiedades mecánicas mencionadas incluidas en la tabla 1, pero no se encontró una correlación entre los resultados de desgaste y propiedades mecánicas como la propuesta por Ratner y Lancaster [18].

Los resultados de desgaste coinciden con los observados por Matsubara et al [6] en cuanto existiría una carga crítica, por encima de la cual el desgaste de los materiales aumenta rápidamente en los materiales sin irradiar o irradiados con niveles de dosis bajas con proporción de gel relativamente baja. Por otra parte, la velocidad de desgaste puede aumentar levemente, pasar por un máximo o disminuir continuamente con la dosis, si la carga aplicada es respectivamente menor, semejante o mayor que la crítica. Así, para el caso de los materiales irradiados con dosis de hasta 10 Mrad,

los ensayos de desgaste se realizaron con cargas menores a la crítica. Estos fenómenos han sido vinculados con un aumento en la temperatura de la superficie de deslizamiento, haciendo que se modifiquen los mecanismos de desgaste que prevalecen. Cuando se aumenta la carga puede existir una mayor contribución de la componente adhesiva de desgaste respecto de la abrasiva, lo cual otorga un incremento en la resistencia al desgaste.

Evidencia de que el mecanismo de desgaste tenga una componente adhesiva se puede deducir a partir de las imágenes de los discos incluidas en la Figura 5. Se puede distinguir en las imágenes que sobre el camino de deslizamiento (el ancho de pista de deslizamiento son indicados por la flecha en rojo) queda material adherido a la superficie, particularmente notable en el caso que se utilizó la carga mayor de 15N.



Figura 5. Imágenes de discos post ensayo con PE8 con 20 Mrad efectuados con distintas cargas. Izq. 10 N. Der. 15 N.

Al incrementar la presión de contacto, es posible que se produzca un aumento de temperatura que promueve la adherencia del material al disco, incrementando de esta manera la componente de adhesión del proceso tribológico y reduciendo la velocidad de desgaste.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican para una mismo nivel de carga el polietileno PE8, que es el de mayor peso molecular, presenta una velocidad de desgaste menor que el PE5.

Los polímeros irradiados con bajas dosis presentan velocidades de desgaste que aumentan con la carga, mientras que la velocidad de desgaste de aquellos materiales irradiados con altas dosis parece alcanzar un valor máximo con el aumento de la carga aplicada.

Se encontraron evidencias que el mecanismo principal de desgaste es abrasión, aunque para algunas de las muestras también participa una componente adhesiva.

El coeficiente de fricción medido alcanza valores de aproximadamente 0,10 para cargas bajas y aumenta con la carga aplicada hasta alcanzar un valor cercano a 0,21 que se corresponde con los valores reportados en la literatura para polietilenos. El cambio en el valor del coeficiente con la carga podría ser debido a que la temperatura de contacto superficial aumenta con la carga del ensayo, lo que va a ser verificado en trabajos futuros.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo desean agradecer el apoyo otorgado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología, el Departamento de Ingeniería de la UNS y CONICET.

6. REFERENCIAS

- [1]. Hutchings I M; "Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials", 1992: Arnold.
- [2]. Lyons, B.J. ; Weir, F.E. The radiation Chemistry of Macromolecules. Vol II. Chap. 14 (M. Dole Ed.), Academic Press, New York, NY (1973)
- [3]. Chodák I. Properties of crosslinked polyolefin-based materials. Prog Polym Sci, 1995; 20 (6): 1165-1199.
- [4]. Failla, M.D.; Vallés, E.M.; Lyons, B.J. J Appl Polym Sci 1999, 71, 1375.
- [5]. Shen C., JH Dumbeton, Wear 1974, 30, 349-364
- [6]. Matsubara K, Watanabe M. *Wear* 1967; 10: 214-222.
- [7]. Bahadur S, Stiglich AJ. *Wear* 1981; 68: 85-95.
- [8]. Quinn, F. A., Jr.; Mandelkern, L. J Am Chem Soc 1958, 80, 3178.]
- [9]. ASTM G99-05: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus; ASTM International, 2010.
- [10]. ASTM G115 -04: Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear; ASTM International, 2010.
- [11]. ISO 3274:1996: Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments; ISO, 2010.

- [12]. Wang S, Ni Z, Ge S. *Adv. Mat. Res.* 2010; 97-101: 605-609.
- [13]. Blau PJ. *Friction Science and Technology*, New York: Marcel Dekker, 1995 p. 174
- [14]. *ASM Handbook, Vol 18, Friction, Lubrication and Wear Technology*, 10ma Ed. Ohio (USA): ASM International, 1992 p.116
- [15]. Ludema K.C. “Friction, Wear, Lubrication A Textbook in Tribology”, Florida (USA): CRC Press, 1996, p. 98.
- [16]. Bahadur S, Ludema K.C. *Wear* 1971; 109-127.
- [17]. Spalding M. A., K.S. Hyum. *Polymer Engineering and Science.* 1995; 35,7, 557-563.
- [18]. Hutchings I M; “Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials”: Arnold, 1992, p. 125. 101: 605-609.