

EROSIÓN DE MATERIALES PARA APLICACIONES EN PRÓTESIS DE VÁLVULAS CARDÍACAS

WEAR EROSION OF MATERIALS USED IN HEART VALVES PROSTHESIS

M.R. Rosenberger*, L.A. Guerrero, M.L. Vera, CE. Schvezov

Instituto de Materiales de Misiones (IMAM) (UNaM-CONICET), Posadas, Misiones, Argentina.
e-mail: rrmario@fceqyn.unam.edu.ar

Recibido: 16/12/12 – Aprobado: 28/08/13

Se estudia la erosión de materiales utilizados en la construcción de prótesis de válvulas cardíacas, Acero inoxidable 316 y Poli-metacrilato de metilo (PMMA) a niveles de desgaste bajos, esperados en estos dispositivos. Como material erosivo se utilizó SiC 220 mesh (65 μm de diámetro), en dos composiciones diferentes: 0,1 y 1 % en peso, suspendidas en una solución de glucosa al 50%P/P, (viscosidad de 0,01540 kg/(m.s)). Se usó un flujo de 2200 cm^3/min y dos tamaños de boquillas de: 2,3 y 6,4 mm de diámetro, en dos ángulos de incidencia diferentes, 60° y 90°. Los ensayos se realizaron por un período de 11 horas. Se partió de probetas de PMMA y Acero inoxidable 316 pulidas a espejo. Las escaras de desgaste se observaron al microscopio óptico. El tipo de fallas observadas en las probetas luego de los ensayos fueron: Puntos o cráteres (pequeños y grandes), Rayas largas, Rayas cortas y Rayas en forma de comas. En PMMA el desgaste se incrementó al aumentar la cantidad de partículas erosivas, tanto en los ensayos a 60° como a 90°. En cambio, no se observaron cambios en el nivel de con el ángulo de incidencia. En el acero inoxidable 316 se observó un incremento en el nivel de desgaste al reducir el ángulo de incidencia, de 90° a 60°.

Palabras Claves: Erosión, Desgaste, Prótesis de válvulas cardíacas, Biomateriales.

Erosion of poly-methyl-metacrilate (PMMA) and 316 stainless steel, materials used in the fabrication of prosthetic heart valves, were studied. Particles of SiC, 65 μm in diameter (200 mesh), are used as erosive materials carried on a glucose solution as a carrier fluid. Two compositions of particles were used: 0.1 and 1 %wt. A flow rate of 2200 cm^3/min and two different outlet holes were used, the sample was located at 3 cm approximately of the outlet hole. The tests were performed for 11 hours. The initial surface of the PMMA and the stainless steel were polished up to a mirror like surface. The erosion scars were observed by optical microscopy. The types of failures found were: points or craters (small or large), large scratches, short scratches and comma-like scratches. On the PMMA the wear increase when the amount of particles increase; however, no difference was observed when the incidence angle was changed. On the 316 stainless steel there the wear increased when the incidence angle change from 90° to 60°.

Key Word: Erosion, Wear, Prosthetic heart valve, Biomaterials.

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

I. INTRODUCCIÓN

El Poli-metacrilato de metilo (PMMA) y el Acero inoxidable 316 son materiales utilizados en prótesis de válvulas cardíacas. Estos materiales al estar en contacto con sangre y ser más rígidos que los tejidos vivos pueden estar propensos a sufrir daños por la interacción con algún componente de la sangre [1, 2]. Se sabe que algunos diseños de válvulas cardíacas del tipo mecánicas inducen alteraciones en el flujo sanguíneo introduciendo altos valores de gradientes de velocidad. Esto está acrecentado con el pulso de fluido inherente al sistema circulatorio. Lo que puede provocar situaciones con velocidades locales muy elevadas y por consiguiente bajas presiones, induciendo situaciones límites donde se altere a los componentes normales de la sangre, por ejemplo glóbulos rojos, y hasta altere a los materiales de las prótesis, por ejemplo: proyecciones de sangre sobre el material que alteran la superficie del material o cavitación que dañan también la superficie del mismo [1,3].

En este trabajo se quiere evaluar la resistencia a la erosión de acero inoxidable 316 y PMMA, en las condiciones de severidad extrema que se esperaría en las prótesis de válvulas cardíacas. Se toma como referencia para el nivel de severidad a la velocidad del fluido en las cercanías de la prótesis, que de acuerdo a la bibliografía está en el rango de 2 a 5 m/s [1].

La literatura sobre erosión en estos materiales está enfocada a condiciones de altas velocidades (mayores a 50 m/s) y flujo de partículas [4, 5, 6], que son condiciones apropiadas para el corte o maquinado de los mismos. Por ello, en este trabajo se estudia la resistencia a la erosión en condiciones de baja severidad erosiva utilizando partículas de pequeño tamaño y alta dureza, y bajas velocidades y flujos de partículas, de tal forma que constituya un ensayo acelerado para comparar la resistencia a la erosión de diferentes materiales [7].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1. Fluido para el transporte de partículas

Se seleccionó una solución de viscosidad adecuada para mantener las partículas de desgaste en suspensión, evitando así que las mismas decanten en el fondo del recipiente. Para ello, se utilizó una solución acuosa de sacarosa al 50 % p/p, preparada con azúcar blanca común. Las características que posee esta solución son: Concentración: 50 % p/p, Densidad: 1230 kg/m³, Viscosidad: 0,01540 kg/(m.s). Se utilizaron 400 ml de la solución.

Se pesaron cantidades iguales de azúcar y agua (245,92 g) y debido a la elevada concentración de azúcar, la disolución debió realizarse con agua a una temperatura de aproximadamente 80 °C que luego se enfrió hasta la temperatura de ensayo de 28 +/- 3 °C.

II.2. Partículas erosivas

Como material erosivo se seleccionó SiC (carburo de silicio) particulado. Las características más relevantes de este material son: Tamaño promedio: 65

x10⁻⁶ m (200 mesh), Densidad: 1230 kg/m³, Dureza: 2745 kg/mm² (HV).

Puede verse en la Figura 1 que las partículas poseen formas irregulares y bordes angulosos, razón por la cual se eligió este material para la realización de los ensayos.

Se realizaron experiencias con dos concentraciones de SiC: 0,1 % P/P y 1 % P/P (peso de partículas/ peso de solución).

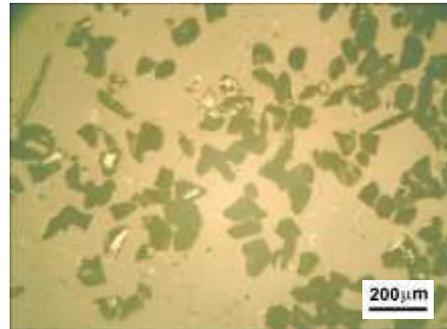


Figura 1. Partículas de carburo de silicio.

II.3. Materiales de ensayo

Se ensayaron dos materiales: poli-metacrilato de metilo (PMMA) y acero inoxidable 316.

El PMMA se tomó de una plancha de calidad comercial pulido que se cortó con una sierra de mano hasta dimensiones de aproximadamente 2 x 2 x 1 cm.

El acero inoxidable 316, es de tipo comercial. Las probetas se prepararon a partir de una plancha de 3 mm de espesor y se cortaron en cuadrados de 2 cm de lado.

Cada probeta de acero inoxidable se incluyó en resina de acrílico para su preparación metalográfica. El desbaste se realizó con lija de #220 hasta #1000. Luego se pulió con diamante de 1 micrómetro y etilenglicol, para lubricar la superficie y facilitar el pulido.

Finalmente, luego de alcanzar una terminación especular se desincluyeron las probetas para ser utilizadas en los ensayos de desgaste.

II.4. Ensayo de erosión

Los ensayos de erosión se realizaron utilizando una máquina de erosión que opera en un proceso de circuito cerrado, con la recirculación continua de fluido conteniendo partículas en suspensión.

El fluido que contiene las partículas erosivas se encuentra dentro de un recipiente, y es sometido a una agitación continua, de manera de mantener las partículas en suspensión y evitar que las mismas decanten en el recipiente o en alguna otra parte del sistema, asegurando una suspensión homogénea durante todo el ensayo. Se usó un flujo de 2200 cm³/min y dos tamaños de boquillas de: 2,3 y 6,4 mm de diámetro, en dos ángulos de incidencia diferentes, 60° y 90°. Con ambas boquillas se logran velocidades promedio de 8,82 m/s y 1,14 m/s.

El movimiento del fluido se logra gracias a una bomba peristáltica, la cual succiona el fluido desde el recipiente y lo inyecta sobre las probetas mediante una manguera de silicona y la boquilla. El fluido se recoge

directamente dentro del recipiente, con lo que se logra un circuito cerrado con recirculación.

El material erosivo se proyecta sobre la probeta en dirección vertical descendente y la orientación de la misma puede ser regulada, lo que posibilita obtener diferentes ángulos de ataque, como puede verse en el esquema de la Figura 2.

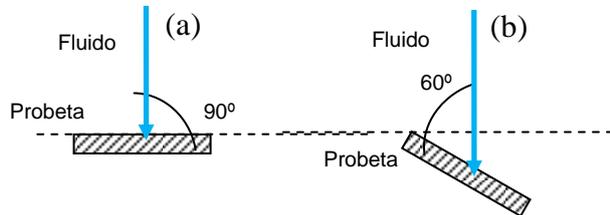


Figura 2. Ángulos de incidencia del flujo de partículas respecto a las probetas: a). 90°, b): 60°.

Cada una de las probetas se sometió a 11 h de ensayos parciales, en períodos de tiempo de 1 a 3 h. Después de cada ensayo parcial, se sacó la probeta del sistema, y se la enjuagó con detergente y abundante agua, se roció con alcohol y se secó con aire caliente. Finalmente, se observó cada probeta en el microscopio para identificar los cambios producidos por la erosión.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.1. Resultados del PMMA

III.1.1. Efecto de la concentración de partículas

Luego de las observaciones realizadas con el microscopio óptico, se identificaron las siguientes fallas en las escaras de desgaste, que se ilustran en la Figura 3.

- a) Rayas cortas
- b) Rayas largas
- c) Rayas en forma de comas
- d) Puntos
- e) Cráteres

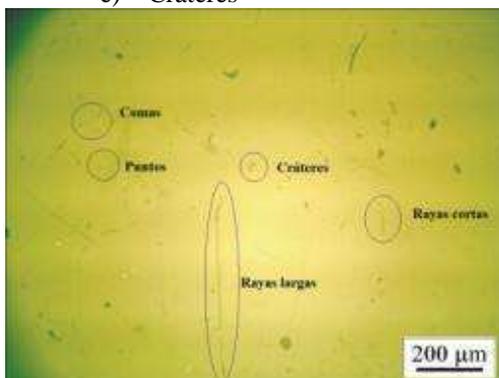


Figura 3. Fallas observadas en las probetas.

La aparición de las diferentes fallas depende, además de la concentración, del diámetro de la boquilla utilizada. No se observaron diferencias con respecto al ángulo de inclinación de la probeta.

Se observaron los siguientes casos:

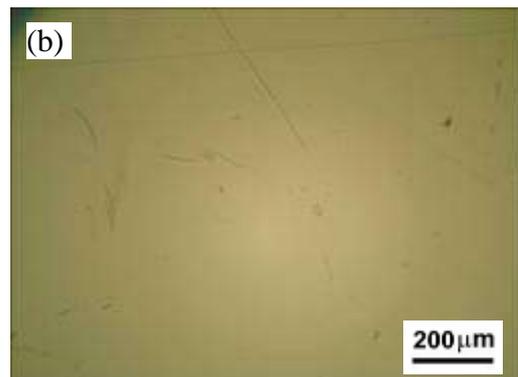
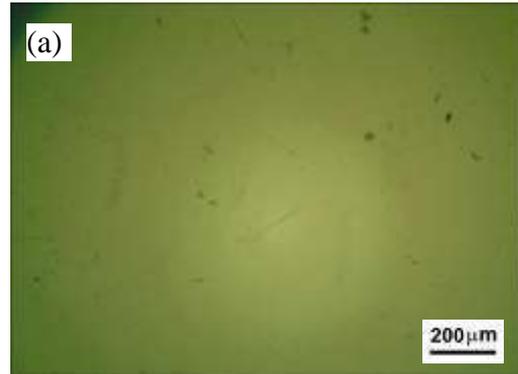


Figura 4. a) Probeta de PMMA, 0,1% SiC, 90°, 6,4 mm. b) Probeta de PMMA, 0,1% SiC, 60°, 6,4 mm.

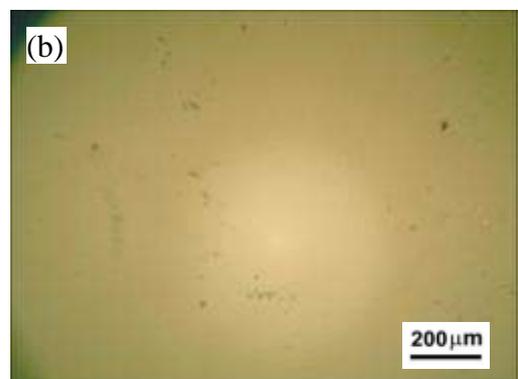
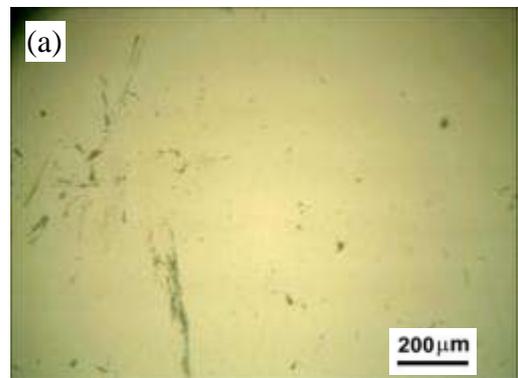


Figura 5. a) Probeta de PMMA, 1% SiC, 90°, 6,4 mm. b) Probeta de PMMA, 1% SiC, 60°, 6,4 mm.

- i. **0,1 % SiC:** se observaron puntos y comas y rayas largas. Cuando el ángulo es de 90° se observaron rayas cortas, ver Figura 4.
- ii. **1 % SiC:** se observaron una mayor cantidad de puntos, cráteres y rayas cortas, respecto al punto i. Cuando el ángulo es de 90° se observaron comas. En ningún caso se observaron rayas largas, ver Figura 5.

Todas las fallas observadas pueden explicarse por un mecanismo de corte [8], donde rayas cortas, largas y comas se producirían cuando las partículas se mueven tangencialmente a la superficie del material. En cambio los puntos pueden ser considerados como un proceso de corte donde la partícula impacta en forma normal a la superficie. La falla en forma de cráter se puede explicar como un conjunto de puntos donde luego de generarse el primer punto los siguientes van agrandando paulatinamente la cavidad hasta alcanzar una magnitud de cráter. Otra forma de explicar la formación de los cráteres es con un mecanismo de desgaste por fatiga, donde el impacto de múltiples partículas sobre una misma área va produciendo el debilitamiento de una porción de la superficie, probablemente por la propagación de fisuras en la subsuperficie [8], dando finalmente un cráter.

III.1.2. Efecto del diámetro de la boquilla

La escara de desgaste presentó dos formas diferentes según la boquilla:

- a) *Extendida:* Los daños se distribuyeron quasi-homogéneamente sobre toda la superficie. Se presentó cuando se utilizó la boquilla de mayor diámetro. Se pudieron observar todos los tipos de fallas. Este tipo de escara apareció independientemente de la concentración de partículas y del ángulo de incidencia.
- b) *Concentrada:* Es una zona de la probeta donde el material de la superficie cambió su apariencia, volviéndose una superficie menos reflectante y, por lo tanto, traslúcida (no transparente). Se presentó cuando se utilizó la boquilla de menor diámetro. Sólo se observaron fallas tipo puntos. Este tipo de escara tiene forma de anillo, ver Figura 6.

Este efecto observado en la probeta cuando se redujo el tamaño de la boquilla ha sido observado en otros materiales y es porque el desgaste por erosión se concentra en la periferia del área donde impacta el fluido. El desgaste es mayor en esa zona porque las partículas presentes allí tienen una mayor velocidad e impactan con mayor energía sobre el material [9].

III.1.3. Efecto del ángulo de incidencia

La escara presentó ligeras diferencias en su forma según el ángulo entre el fluido incidente y la superficie de la probeta. Se observaron dos tipos de formas cuando se utilizó la boquilla de menor diámetro, es decir, cuando la escara resultó de tipo concentrada.

- a) *Circular:* Se presentó cuando el ángulo de incidencia del fluido fue de 90° .
- b) *Ovalada:* Se presentó cuando el ángulo de incidencia del fluido fue de 60° .

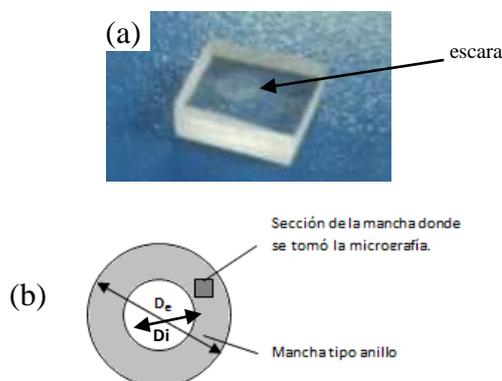


Figura 6. Escara concentrada. a) Probeta de PMMA con escara de forma circular, b) Sección de la escara circular donde se tomaron las micrografías

Si bien las escaras presentaron formas prácticamente regulares, se midieron los diámetros internos y externos en dos puntos, que a simple vista parecen ser los valores máximo y mínimo de la escara. Los valores promediados del diámetro interior y exterior de los anillos se dan en la Tabla 1.

Las fallas encontradas cuando el ángulo de incidencia fue de 90° son puntos en todos los casos, independientemente del tamaño de la boquilla o concentración de partículas. Cuando se utilizó la boquilla de mayor diámetro se encontraron cráteres, comas y rayas cortas. No se observaron rayas largas en ninguno de los casos.

Cuando el ángulo de incidencia fue de 60° se observaron puntos en todos los casos. También, se observaron cráteres y rayas cortas en los casos en los que la concentración fue del 1% de SiC, y comas en el caso de 0.1% de SiC. No se observaron rayas largas en ninguno de los casos.

Tabla 1. Tamaño de las escaras de tipo concentrada sobre PMMA.

| MATERIAL | FORMA | De [mm] | Di [mm] |
|---------------------|----------|---------|---------|
| PMMA (90°) | Circular | 7,33 | 2,33 |
| PMMA (60°) | Ovalada | 6,8 | 2,35 |

La forma de la escara circular u ovalada es consistente con que el área de impacto es mayor cuando la probeta está ubicada a un ángulo menor a 90° . Por lo tanto, el óvalo se observa en el sentido perpendicular al eje de rotación de la probeta.

Dado que los diámetros interiores son similares y los diámetros exteriores son menores en la probeta ensayada a 60° y además la escara es ovalada se puede calcular el área de la escara para la probeta ensayada a 90° siendo igual a $37,9 \text{ mm}^2$, y para la probeta ensayada

a 60° igual a 27,7 mm². Por lo tanto, la probeta ensayada con un ángulo de incidencia a 60° sufrió menor desgaste. Esto es lo esperado para un material de tipo frágil [8,9] frente al desgaste por erosión.

III.2. Resultados del Acero Inoxidable

En el acero inoxidable se evaluaron dos parámetros: el diámetro de la boquilla y el ángulo de inclinación.

Luego de las observaciones realizadas con el microscopio óptico, se identificaron en las escaras de desgaste los mismos tipos de falla que en el PMMA (Figura 3).

La aparición de las diferentes fallas dependió del diámetro de la boquilla utilizada y del ángulo de inclinación.

III.2.1. Efecto del diámetro de la boquilla

La escara de desgaste presentó dos formas diferentes según la boquilla:

- Extendida:* Los daños se distribuyeron quasi-homogéneamente sobre toda la superficie. Se presentó cuando se utilizó la boquilla de mayor diámetro. En ella se pudieron observar todos los tipos de fallas. Este tipo de escara apareció independientemente del ángulo de incidencia.
- Concentrada:* Es una zona de superficie donde el material cambió su apariencia, volviéndose una superficie menos reflectante que únicamente dispersa la luz incidente. Se presentó cuando se utilizó la boquilla de menor diámetro. Sólo se observaron fallas tipo puntos. Este tipo de escara tiene la forma de un anillo ver Figura 7.

Tabla 2. Tamaño de las escaras de tipo concentrada sobre Acero inoxidable.

| MATERIAL | FORMA | De [mm] | Di [mm] |
|------------------|--------------|---------|---------|
| Acero inox (90°) | Circular | 5,60 | 3,23 |
| Acero inox (60°) | Semicircular | 4,80 | 2,55 |

De forma similar a lo encontrado en el acrílico cuando la escara es extendida se observaron todos los tipos de fallas, que pueden explicarse por un proceso de corte en dirección tangencial o normal a la superficie, y los cráteres por un proceso de desgaste por fatiga. Cuando la escara es concentrada las fallas superficiales son únicamente puntos, esto puede explicarse pues la distribución de velocidades de fluidos es muy notoria en la periferia [9] y las partículas presentes en esa parte impactan con mayor energía en la dirección normal a la superficie, por lo que esa elevada velocidad provocaría un flujo turbulento que, a su vez, impide también que haya un deslizamiento tangencial de las partículas sobre

la superficie y disminuyendo drásticamente la posibilidad de que se generen rayas en la superficie.

III. 2. 2. Efecto del ángulo de incidencia

La escara presenta ligeras diferencias en su forma según el ángulo entre el fluido incidente y la superficie de la probeta. Se observaron dos tipos de formas cuando se utilizó la boquilla de menor diámetro, es decir, cuando la escara resultó de tipo concentrada:

- Circular:* Se presentó cuando el ángulo de incidencia del fluido fue de 90°.
- Semicircular:* Se presentó cuando el ángulo de incidencia del fluido fue de 60°.

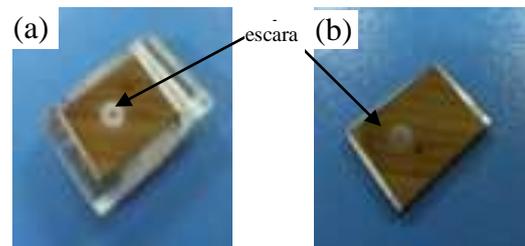


Figura 7. a) Probeta de acero inoxidable con escara de forma circular. b) Probeta de acero inoxidable con escara de forma semicircular.

Si bien las escaras presentaron formas prácticamente regulares, se midieron los diámetros internos y externos en dos puntos, que a simple vista parecen ser los diámetros mayores y menores de la escara, los resultados se detallan en la Tabla 2.

Las fallas encontradas cuando el ángulo de incidencia fue de 90° son puntos en todos los casos. Cuando la escara es de tipo extendida la densidad de puntos es muy baja, en cambio cuando la escara es de tipo concentrada la densidad de puntos es alta, ver Figura 8. Además, se observaron comas y rayas cortas cuando la escara fue de tipo extendida. En ningún caso se observaron cráteres ni rayas largas.

El área de la escara en la probeta ensayada a 90° es igual a 16.4 mm², y en la probeta ensayada a 60° la escara es semi-elíptica el área de la escara 6.50 mm². Por lo tanto, la probeta ensayada con un ángulo de incidencia a 60° sufrió menor desgaste. Esto es lo esperado para un material de tipo frágil frente al desgaste por erosión [8]. Un comportamiento similar fue encontrado para aceros inoxidables austeníticos con manganeso [10].

Las fallas encontradas cuando el ángulo de incidencia fue de 60° son puntos en todos los casos. Cuando la escara es de tipo extendido la densidad de puntos es muy baja, en cambio cuando la escara es de tipo concentrada la densidad de puntos es alta, ver Figura 9. Cuando la escara es de tipo extendido también se observaron cráteres y comas. En ningún caso se observaron rayas cortas ni rayas largas en las escaras de las probetas de acero inoxidable.

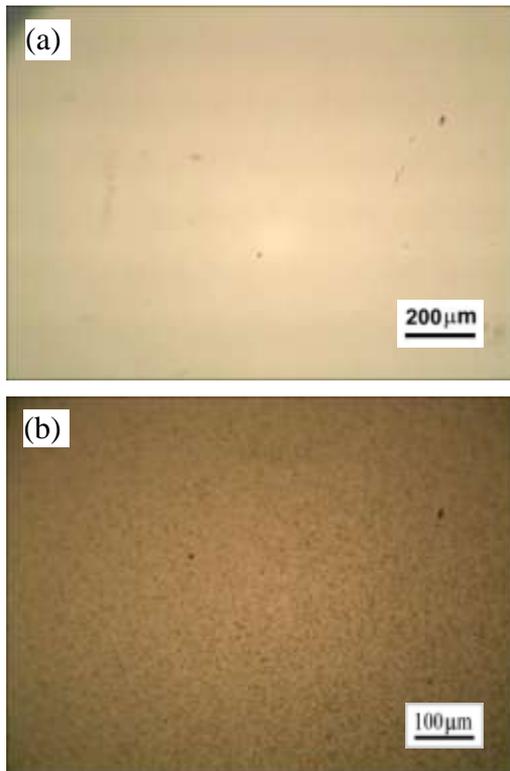


Figura 8. a) Probeta de acero inoxidable, 1% SiC, 90°, 6,4 mm. b) Probeta de acero inoxidable, 1% SiC, 90°, 2,3 mm

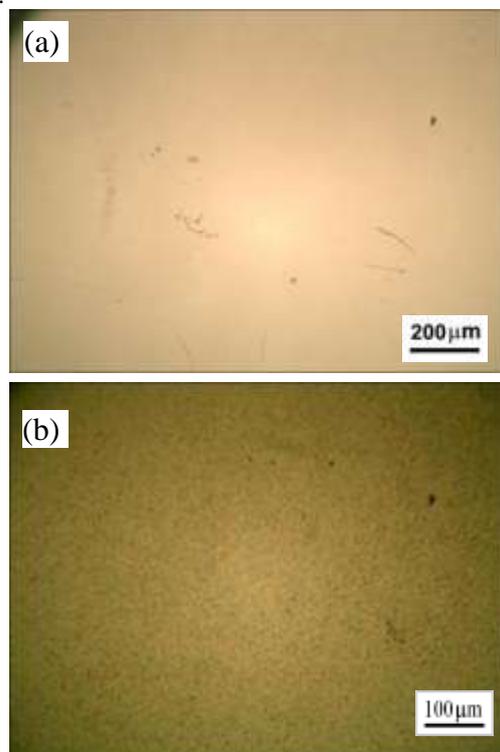


Figura 9. a) Probeta de acero inoxidable, 1% SiC, 60°, 6,4 mm. b) Probeta de acero inoxidable, 1% SiC, 60°, 2,3 mm

IV. Conclusiones

Luego de someter a desgaste por erosión los materiales poli-metacrilato de metilo (PMMA) y acero inoxidable 316 se encontró que:

En PMMA el desgaste se incrementó al aumentar la cantidad de partículas erosivas, con presencia de una mayor cantidad de rayas cortas y de rayas en forma de comas y además por la aparición de puntos pequeños y algunos cráteres. No se observaron cambios en el nivel de desgaste cuando el ángulo de incidencia cambió de 60° a 90°.

En el acero inoxidable 316 con un ángulo de incidencia 90° y 1 % de SiC, se presentaron rayas cortas, en forma de comas y algunos puntos. Con un ángulo de incidencia de 60° se presentaron mayores cambios sobre la superficie de acero inoxidable con respecto a los cambios observados en el acrílico. Hay una mayor cantidad de rayas en forma de coma y una mayor cantidad de puntos y cráteres pequeños.

VI. Referencias

- 1.- Lim, W.L., Chew, Y.T., Low, H.T., Foo, W.L., J.Biomech. **36**, 1269 - 1280 (2003).
- 2.- Abraham, G.A.; Cuadrado, T.R., Revista de la Federación Argentina de Cardiología **26(4)**, 491 - 497 (1997).
- 3.- Andersen, T.S., Johansen, P., Christensen, B.O., Paulsen, P.K., Nygaard, H., Hasenkam, J.M., Ann Thorac Surg **81**, 34-41(2006).
- 4.- Getu, H., Ghobeity, A., Spelt, J.K., Papini, M., Wear **263**, 1008-1015 (2007).
- 5.- Getu, H., Spelt, J.K., Papini, M., Wear **270**, 922-928 (2011).
- 6.- Lim, W.L., Chew, Y.T., Chew, T.C., Low, H.T., J Biomech. **31**, 411 - 421 (1998).
- 7.- Maozhong, Y, Baiyun H., Jiawen H., Wear **252**, 9-15 (2002).
- 8.- Zum-Gahr, K., in "Microstructure and wear of materials", Ed. Elsevier, Amsterdam (1987).
- 9.- Finnie, I., Wear **186-187**, 1-10 (1995).
- 10.- Yildizli, K., Eroglu, M., Karamis, M.B., Tribology in Industry **27**, 15-21 (2005).