

EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE MATERIALES METÁLICOS BAJO LA ACCIÓN DE MEZCLAS EROSIVAS. PRIMERA PARTE

Roberto Sagaró Zamora (*), José Antonio Gómez Lujo (*), Gerlín Cuevas Tassé (*),
Carlos López Remón (*), Demis Alfonso Alfonso (**)

*Universidad de Oriente, **Instituto Universitario de Tecnología, Caripito, Monagas, República Bolivariana de Venezuela

Los efectos del desgaste por impacto bajo la acción de mezclas erosivas tienen especial significación para el equipamiento de las industrias química, minera y del petróleo. Los ensayos fueron realizados para el acero 35 XGCA tratado térmicamente, el acero inoxidable AISI 316, la superaleación Hastelloy C-276 de manera comparativa con el material patrón de acero 35XGCA, investigándose el papel del endurecimiento por deformación y los mecanismos de desgaste. Como variables independientes se emplearon el ángulo de impacto de las partículas abrasivas y la velocidad relativa de las muestras y las partículas erosivas. Los ensayos fueron realizados en el tribómetro de recipiente de mezcla con movimiento rotatorio. Los resultados mostraron una gran influencia en la magnitud del desgaste erosivo del ángulo de impacto de las partículas erosivas para ángulos oblicuos en el caso de los aceros 35 XGCA con y sin tratamiento térmico. El acero inoxidable AISI 316 y la superaleación Hastelloy C-276 presentaron los mejores comportamientos como resultado de su habilidad de endurecimiento por deformación

Palabras clave: *desgaste erosivo, aleaciones base níquel, endurecimiento por deformación.*

The effects of slurry erosion wear have special significance for the chemical, mine and petroleum industries. Typical metallic material like steel 35XGCA, AISI 316 stainless steel and superalloy Hastelloy C-276 as compared materials with samples of steel 36XGCA, were investigated in order to evaluate the role of work-hardening ability and the damage mechanism. As analyzed variables were used the impact angle at different relative speeds between samples and erosive particles. Tests were carried out in the slurry erosion tribometer. The results showed a strong influence of the impact angle, especially for the steel 35XGCA with and without thermal treatment. The AISI 316 stainless steel and the superalloy Hastelloy C.276 showed the best behaviour as a result to its good work-hardening ability.

Key words: *erosive wear, nickel based alloy, deformation strengthening.*

Introducción

El desgaste es uno de los tres grandes problemas industriales (conjuntamente con la fatiga y la corrosión) que conllevan a la sustitución de los elementos de las máquinas y mecanismos. Aunque rara vez puede considerarse catastrófico, provoca una notable disminución de la eficiencia de los sistemas mecánicos, pérdidas de potencia, incremento del consumo de lubricantes y, en general, una disminución de la vida útil del elemento en cuestión. Uno de los tipos de desgaste más frecuentes en la industria química, minera o de la construcción es el producido por la suspensión de partículas abrasivas en agua o en cualquier otro líquido (mezclas erosivas o *slurry*). La erosión en sistemas tribológicos es descrita por

algunos autores como un tipo de desgaste abrasivo que implica a un factor velocidad. En aquellos casos, en los que el desgaste surge como resultado de la acción de partículas presentes en un gas o líquido, al desgaste resultante se le conoce como erosivo por impacto o choque debido a mezclas. /1/

Actualmente, está establecido que el desgaste erosivo es un fenómeno complejo que incorpora numerosos procesos simultáneos relacionados con los materiales, así como complejos fenómenos químicos y mecánicos. La forma de la partícula, el tamaño, la densidad de carga, velocidad de la partícula y el ángulo de choque, constituyen los parámetros por considerar para las partículas. También ejercen gran influencia la microestructura, tenacidad y dureza del material impactado. /2/

El presente trabajo de investigación pretende evaluar el comportamiento de diferentes materiales metálicos bajo la acción de una mezcla erosiva, correlacionando su resistencia al desgaste con la velocidad de operación y el ángulo de impacto de las partículas erosivas.

Materiales y procedimiento experimental

Teniendo en cuenta los trabajos realizados por diferentes investigadores, se escogió el método usado por S. Lathabai y sus colaboradores /3/. (Prueba de recipientes de mezcla con movimiento

rotatorio), que es una prueba estandarizada (ASTM STP 940) /4/, que de acuerdo con la literatura es más operacional y sencilla, y permite estudiar cómo influyen parámetros tales como la mezcla, la concentración y tamaño de grano en la razón de desgaste de los materiales en estudio. Se utilizó un modelo experimental, basándose en un diseño factorial n^k . Como variables operacionales se seleccionaron el ángulo de impacto de las partículas y la velocidad. Los efectos principales y los efectos interrelacionados marcarán el valor del desgaste que es la variable dependiente. Las tablas 1 y 2 resumen la matriz experimental y las características de los materiales ensayados.

Tabla 1
Niveles de las variables independientes

Niveles	Ángulo de impacto(°)	Velocidad (m/s)
-1	30	2,93
1	90	4,87

Tabla 2
Composición química de los materiales ensayados

Denominación	Composición química (%)	Características	Dureza (HV)	Densidad (g/cm ³)
35XGCA	C-0,35, Si-1,10, Mn-0,9, Cr-1,15, P-0,025, S-0,025, Cu-0,3, Ni-0,3, Fe-95,85	Estructura refinada de perlita granular y ferrita en los límites de los granos de la perlita.	201	7,86
35XGCA (temple y revenido)	C-0,35, Si-1,10, Mn-0,9, Cr-1,15, P-0,025, S-0,025, Cu-0,3, Ni-0,3, Fe-95,85	Martensita + perlita y austenita retenida. Producto del temple y del revenido bajo.	420	7,86
Hastelloy C-276	C-0,01, Si-0,03, Mn-0,5, Cr-15,5, Ni-57, W-3,75, Mo-16, Fe-5,5, S-0,02, Co-1,25, V-0,2	Matriz γ (austenítica) con carburos MoC esféricos en los contornos de granos y formando islas dispersas en la matriz.	200	8,865
AISI 316 SS	C -0,08 ; Cr -18 ; Fe -62 ; Mn -2 ; Mo -3 ; Ni -14 ; P -0,045 ; S -0,03; Si -1	Matriz austenítica monofásica.	217	8

La composición química de la mezcla erosiva empleada es como sigue: SiO₂, 13,73 %, Al₂O₃, 3,47 %, Fe₂O₃, 3,1 %, CaO, 41,85 % y MgO, 0,03 %. Las pérdidas por ignición fueron de un 35,3 % y el residuo soluble de 1,52 %.

En la figura 1 se muestra un diagrama esquemático de la instalación para esta prueba. Seis probetas en forma de barra rectangular de aproximadamente 30 mm de largo x 8 mm x 8 mm de sección transversal, son montadas radialmente

entre un disco circular anexado al fondo de un eje y un disco móvil del mismo diámetro. El dispositivo se sumerge en la mezcla contenida en un recipiente de polietileno, al que se le han dispuesto cuatro aletas verticales, localizadas a 90° de las paredes que ayudan a prevenir la formación de movimientos intensos en remolino o espiral, así como la turbulencia.

Las probetas fueron rectificadas hasta un acabado superficial $R_a=0,8 \mu\text{m}$. Para la obtención de

las curvas de dinámica de desgaste, las muestras ensayadas fueron sometidas a iguales tiempos de exposición para obtener la dependencia gráfica de desgaste erosivo en función del tiempo. La razón de desgaste volumétrico se obtuvo como resultado de considerar el desgaste gravimétrico (con precisión de 0,000 1 g), y la densidad de cada uno de los materiales. La duración de los ensayos fue de 8 h, registrándose el desgaste volumétrico de las muestras cada 2 h.

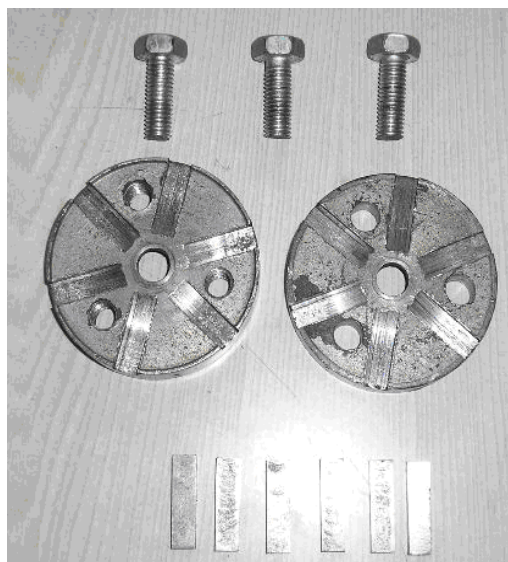
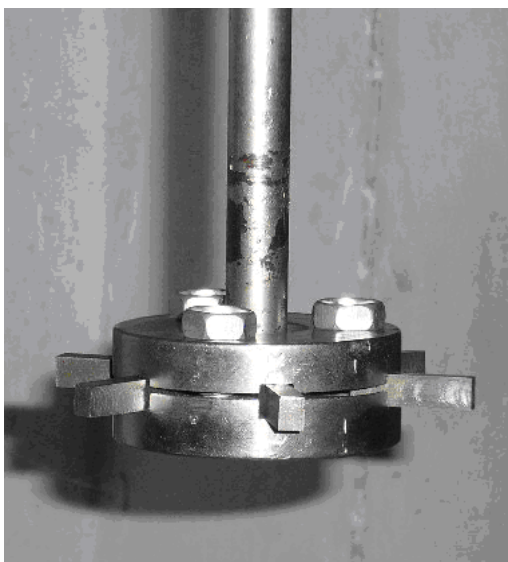


Fig. 1 Dispositivo empleado en los ensayos de desgaste en recipiente de mezcla con movimiento rotatorio.

Los resultados de los experimentos fueron procesados según el paquete estadístico Statgraphics 5,1, a partir del cual se establecieron las dependencias de las variables analizadas. Se aceptaron aquellos modelos para lo cual el estadígrafo $F=95\%$ de confiabilidad, y un error admisible de hasta un 5%.

Discusión de resultados

La tabla 3 resume la influencia de las variables analizadas para cada uno de los materiales analizados a través de las ecuaciones de regresión ajustadas.

Material	Ecuación de regresión ajustada
Acero 35XGCA	$W_v = -13,070\ 5 + 0,098\ 161\ 4\ \alpha + 5,234\ 33\ V - 0,035\ 155\ 2\ \alpha\ V$
Acero 35XGCA (T.T)	$W_v = -10,234\ 9 - 0,007\ 121\ 25\ \alpha + 3,848\ 04\ V + 0,007\ 340\ 21\ \alpha\ V$
AISI 316 SS	$W_v = -0,697\ 078 - 0,00\ 605\ 12\ \alpha + 0,381\ 198\ V + 0,001\ 067\ 15\ \alpha\ V$
Hastelloy C-276	$W_v = -1,163\ 3 + 0,000\ 564\ 37\ \alpha + 0,45\ 00\ 86V - 0,000\ 357\ 388\ \alpha.V$

donde:

W_v : desgaste volumétrico (mm^3);

V : velocidad (m/s);

α : ángulo de impacto.

Hastelloy C-276

La figura 2 presenta la superficie de respuesta obtenida del procesamiento de los experimentos para el material Hastelloy C-276.

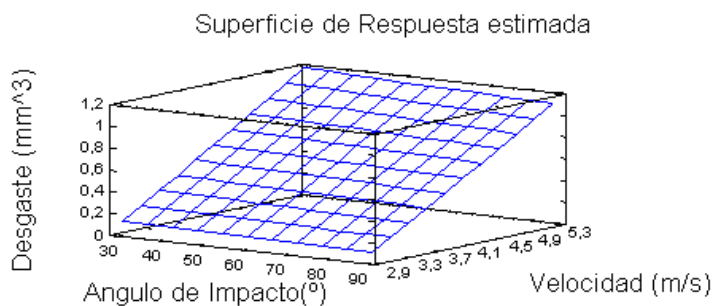


Fig. 2 Superficie de respuesta para el material Hastelloy C-276.

De la figura anterior se puede inferir que este material es más sensible desde el punto de vista de su resistencia al desgaste a los cambios de velocidad; sin embargo, el desgaste varía poco con la variación del ángulo de impacto de las partículas erosivas. Se puede observar que para valores máximos de la velocidad relativa el desgaste es mayor para un

ángulo de 30°, lo que de acuerdo con lo publicado en la literatura especializada /5,6/, este comportamiento obedece a un mecanismo dúctil, donde el desprendimiento de material ocurre precedido de deformaciones plásticas y endurecimiento del material por deformación, para luego dar paso al microcorte por la acción de la partícula erosiva.

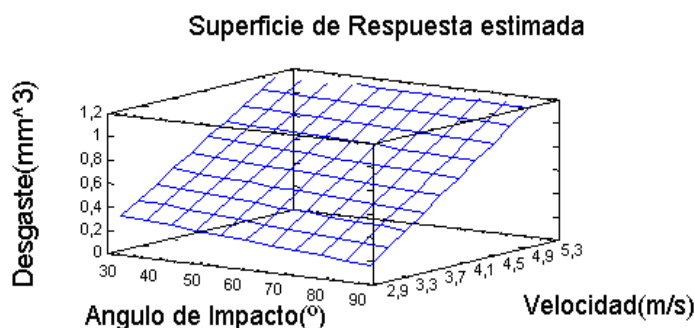


Fig. 3 Gráfico de superficie de respuesta desgaste vs ángulo de impacto y velocidad relativa para el material AISI 316.

Material AISI 316

Para el acero inoxidable AISI 316 la variable de mayor influencia en el desgaste coincidió ser la velocidad (figura 3), aunque a diferencia del Hastelloy C-276 el ángulo de impacto de las partículas erosivas provoca aquí cambios en los

valores del desgaste de manera más significativa. Si analizamos las zonas definidas por la superficie de respuesta, se observa un incremento del desgaste para el ángulo de 30°. Esto permite sugerir en este material un mecanismo de desgaste que puede considerarse como dúctil, teniendo en cuenta los estudios realizados por Ekberg

/7/, que concluyó que para los materiales dúctiles el ángulo de incidencia (entre la dirección de la partícula que impacta y la superficie) que presenta mayor razón de desgaste ($E_{máx.}$) tiene lugar para $15^{\circ} \leq E_{máx.} \leq 30^{\circ}$.

Material acero 35XGCA

Se puede observar como en los casos anteriores, que un aumento de la velocidad traería aparejado un aumento del desgaste. Sin embargo, un aumento del ángulo ocasiona una disminución en el desgaste (figura 4).

Como se puede observar, que los mayores valores de desgaste se obtuvieron para el ángulo de 30o a la velocidad máxima, sin embargo, para el ángulo de 90° se observa una considerable disminución del desgaste. Es necesario destacar las zonas más críticas delimitadas por la superficie de respuesta para el acero 35XGCA, pues claramente se puede comprobar que para las condiciones de velocidades mínimas, la influencia del ángulo de impacto es poco significativa en el desgaste producido en ambos casos; sin embargo, en la zona de las altas velocidades se puede ver un notable incremento del desgaste para el ángulo de 30° en comparación con el ángulo de 90°.

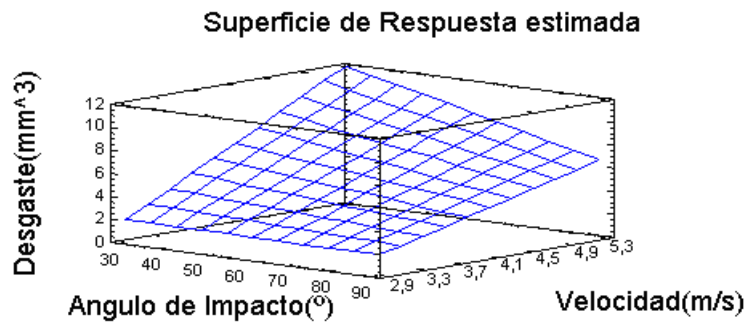


Fig. 4 Superficie de respuesta para el material acero 35XGCA.

Material 35XGCA Tratado Térmicamente (T.T)

En la figura 5 se representa la tendencia general del desgaste del material 35XGCA al variar el ángulo de impacto y la velocidad relativa. De la figura se puede concluir una notable influencia de la velocidad. El ángulo de

impacto, por su parte, provocó los mayores valores de desgaste para el ángulo de 90° a velocidad máxima. De acuerdo con la literatura consultada, el mecanismo de desgaste para este material se comporta como una rotura frágil, debido a la alta dureza adquirida durante el tratamiento térmico recibido ./8/

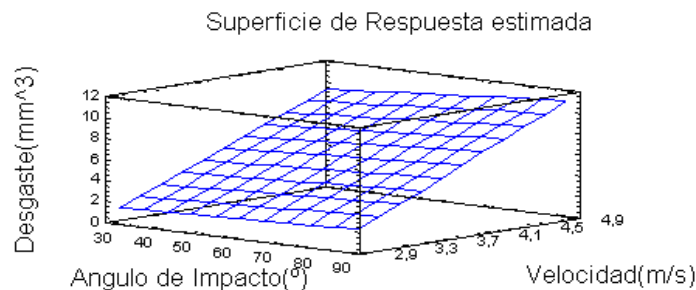


Fig. 5 Influencia del ángulo de impacto y la velocidad relativa en el desgaste volumétrico del material 35XGCA.

Dinámica de desgaste de los materiales ensayados

Las figuras 6 y 7 representan la dinámica de desgaste para los diferentes materiales ensayados.

Como se puede observar, en todas las pruebas los materiales Hastelloy-C y el AISI 316 mostraron un menor desgaste volumétrico de manera comparativa bajo las condiciones experimentales que el material 35XGCA con y sin tratamiento térmico.

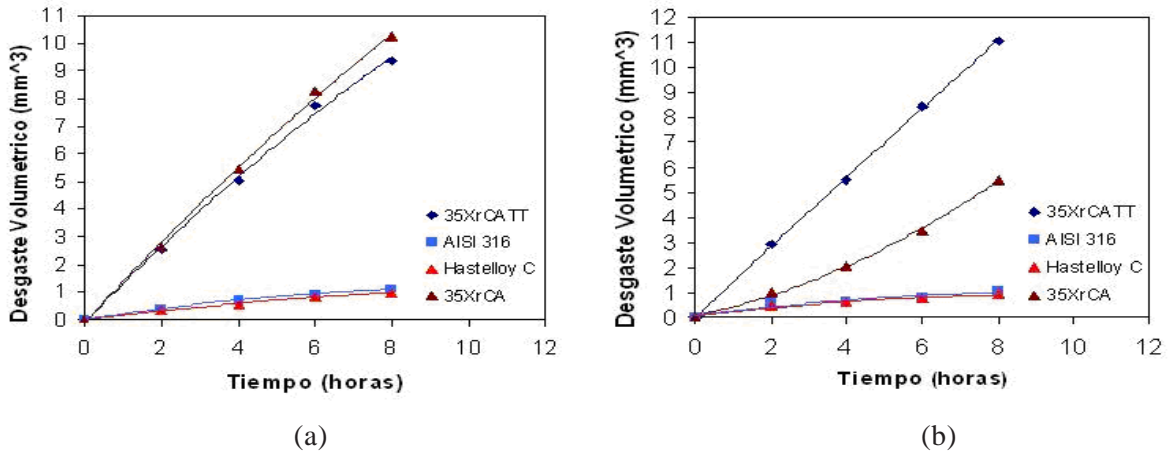


Fig. 6 Dinámica de desgaste de los materiales ensayados para $V = 4,87 \text{ m/s}$ (a) $\alpha = 30^\circ$ (b) $\alpha = 90^\circ$.

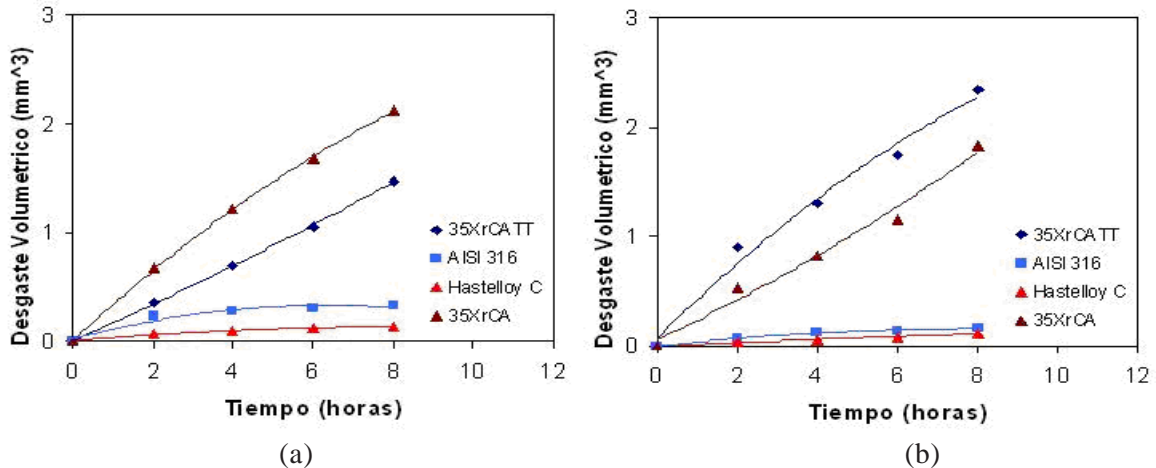


Fig. 7 Dinámica de desgaste de los materiales ensayados para $V = 2,93 \text{ m/s}$ (a) $\alpha = 30^\circ$ (b) $\alpha = 90^\circ$.

Se pudo apreciar en todos los ensayos experimentales que la velocidad jugó un papel preponderante en el desgaste, y se observó que las condiciones más críticas de desgaste se obtuvieron para las pruebas donde las velocidades fueron máximas. Analizando las condiciones extremas para la velocidad máxima y ángulo de 90° , el material acero 35XGCA tratado térmicamente se desgastó a razón de dos veces más que el mismo material 35XGCA sin tratamiento térmico, y éste a su vez se desgastó a razón de 5,97 veces más que el Hastelloy C-276,

que presentó la mayor resistencia al desgaste, conjuntamente con el inoxidable AISI 316, al parecer estos dos últimos materiales mostraron una tendencia hacia un período de desgaste establecido.

Para $\alpha = 30^\circ$ y $V = 4,87 \text{ m/s}$, los materiales que experimentaron el mayor desgaste fueron el acero 35XGCA con y sin tratamiento térmico (a razón de 1,09 veces más); este último a su vez se desgastó a razón 10,31 veces más que el Hastelloy C-276 y el acero inoxidable AISI 316.

Conclusiones

- Las corridas experimentales de los materiales estudiados, arrojaron que la variable que mayor influencia tuvo en el desgaste para todos los materiales ensayados, fue la velocidad relativa entre el flujo de partículas erosivas y el material erosionado. Los materiales de mayor resistencia al desgaste erosivo por mezclas, fueron el Hastelloy C-276 y el acero inoxidable AISI 316. El acero 35XGCA con y sin tratamiento térmico presentó una alta tasa de desgaste erosivo en comparación con los materiales antes expuestos.
- Con el procesamiento de la data experimental se lograron establecer las ecuaciones de regresión ajustadas, que demostraron la significación estadística de las variables ángulo de impacto y velocidad relativa, así como sus interacciones.
- Con los resultados obtenidos en la experimentación, se pudo constatar que no existe una relación directa entre la dureza de la superficie del metal y la resistencia al desgaste erosivo por impacto, tal y como quedó demostrado para el acero 35XGCA tratado térmicamente que exhibió una alta razón de desgaste. No puede aceptarse pues, que la posibilidad de incremen-

tar la vida útil de aquellos elementos de máquinas expuestos a la acción de mezclas erosivas a partir del tratamiento, sea el proceder idóneo para lograr una mayor resistencia al desgaste producido por la mezcla erosiva.

Bibliografía

1. Finnie, I., "Some Reflections on the Past and Future of Erosion", *Wear* 186-187, págs. 1-10, 1995.
2. Burstein, G. T., "Effect of Angle on the Slurry Erosion-Corrosion of 304L Stainless Steel", *Wear* 240 (2000), págs. 80-94.
3. Lathabai, S.; Pender, D. C., "Microstructure Influence in Slurry Erosion of Ceramics", *Wear* 189 (1995) 122-135 CSIRO Division of Materials Science and Technology, Clayton, Victoria, Australia.
4. *Slurry Erosion: Uses, Applications and Test Methods*, ASTM STP 940, ASTM, Philadelphia, PA, 1987, págs. 185-210.
5. Sundararajan, G.; Manish, R., "Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures", *Tribology International* 30, No. 5, 1997, págs., 339-359.
6. Clark, H.; Tucson, J.; Wong, K. K., "Measurements of Specific Energies for Erosive Wear Using a Coriolis Erosion Tester", *Wear* 241, 2000, págs. 1-9.
7. Eckberg, Anders, "Wear-Some Notes", ASME International, *ASME Handbook*, vol. LIII, Parts I, II.
8. Iwai, Y.; Nambu, k., "Slurry Wear Properties of Pump Lining Materials", *Wear* 210, 1997, págs. 211-219.