

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN DE UN ACERO AL CARBONO EN UN FLUJO MULTIFÁSICO

Dario Y. Peña Ballesteros¹, Jesus A. Machuca Martínez²

RESUMEN

A pesar de la importancia del fenómeno erosivo y su incidencia, la información brindada por la comunidad científica no es suficiente, especialmente en Colombia, aún cuando las investigaciones relacionadas muestran detalles relevantes; es por eso que se ha estudiado el fenómeno erosivo en un acero al carbono de aplicación en la industrial del petróleo. En este trabajo, los ensayos se desarrollaron en una celda de erosión junto con un electrodo de cilindro rotatorio a velocidades entre 1.0 y 4.0 m/s, con tamaños de partícula entre 50µm-150µm en agua desionizada. Se calculó la velocidad de erosión del sistema, el tipo de daño y la sinergia entre las variables y su influencia sobre el acero estudiado.

Palabras claves: Erosión, Electrodo de cilindro rotatorio, Fluido multifásico.

SUMMARY

Despite the importance of the phenomenon and its erosive impact, the information provided by the scientific community is not enough, especially in Colombia, even though the research shows relevant details; hence, this phenomenon has been studied in carbon steel which is used in the oil industry. The tests were conducted in an erosion cell along with a rotating cylinder electrode with rotation speeds between 1.0 and 4.0 m/s, particle size between 50-150 µm in deionized water. The erosion rate was calculated, type of damage and their synergistic relationship of the system and influence on steel studied.

Keywords: Erosion, Rotating cylinder electrode (RCE), multiphase system.

1. Ph.D en Corrosión. Grupo de Investigaciones en Corrosión. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Industrial de Santander. dypena@uis.edu.co

2. Ingeniero Metalúrgico. CIMA. e-mail: jesusmachuca21@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El impacto constante de partículas contra la superficie crea un daño localizado permanente y conlleva a la remoción de material por distintos mecanismos, principalmente deformaciones micro mecánicas y fractura, o la combinación de ambos (Vincent et al., 2004).

En el proceso de desgaste por erosión, existen dos mecanismos que constituyen la base del fenómeno, describiendo de esta manera el modo secuencial del daño. En materiales dúctiles, la incidencia de la partícula erosiva genera una drástica deformación plástica localizada, así como endurecimiento por deformación y formación de costras. En tales casos, la geometría de la deformación debido al impacto de las partículas, depende principalmente de la velocidad de impacto.

Por otro lado, en los materiales frágiles el deterioro es causado por agrietamiento, fractura y desprendimiento de pequeñas partes del material (Peña, 2001). Existe un extenso número de factores que asumen un rol determinante en el proceso erosivo de los materiales de ingeniería, principalmente de los aceros. Datos seleccionados experimentalmente revelan resultados valiosos para las nuevas investigaciones.

Rao y Buckley (1985), descubrieron que tanto la energía de superficie, así como la tensión, volumen atómico, punto de fusión, energía específica de fusión y dureza exhiben buena correlación con la erosión. A pesar de ello, estas propiedades no son satisfactorias en la predicción de la velocidad de erosión relativa de ciertos aceros. Probablemente tales propiedades no son lo suficientemente sensibles como para responder a las pequeñas diferencias que en últimas reflejan sutiles discrepancias en la morfología o susceptibilidad a la fractura de las fases duramente deformadas en la microestructura de los aceros.

Levy (1986) investigó, aceros al carbono y aleaciones de aluminio, encontrando que los materiales que indicaron valores de dureza y resistencia más altos, presentaron de igual forma las más altas velocidades de erosión. Se piensa entonces que las aleaciones más dúctiles detienen la erosión a través de la distribución de la energía cinética de las partículas por medio de la deformación plástica en la región de la zona de impacto, reduciendo así la concentración de esfuerzos en los puntos de impacto y aminorando a su vez el mecanismo de daño. Así mismo la ductilidad, como medida de la capacidad de elongación, está más íntimamente relacionada con la

resistencia a la erosión que otras propiedades mecánicas de los materiales. La velocidad de erosión puede ser expresada en gramos por milímetro cuadrado por minuto ($\text{g}/\text{mm}^2/\text{min}$), así como en miligramos por centímetro cuadrado por minuto ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$). También puede ser definida como la pérdida de masa de partículas que golpean la superficie del material. Esta definición es útil si el daño ocasionado por las partículas que inciden sobre ésta es de interés primario.

La transferencia de masa es sin duda un parámetro apreciable en el entendimiento del fenómeno erosivo, es esencial establecer el factor que contribuirá a desarrollar una mejor relación de las variables involucradas en el proceso, es así como se ha descubierto que bajo condiciones de erosión, el coeficiente de transferencia de masa es incrementado por:

- La remoción en la turbulencia a partir del paso de partículas a través de la capa límite.
- El incremento en la turbulencia a partir del paso de partículas a través de la capa límite.
- El aumento de la rugosidad resultado de la erosión.

El efecto de la erosión es progresivo, el daño ocasionado aumenta a medida que más y más partículas sólidas entran al sistema, además, la forma y angularidad de las mismas juegan un papel definitivo en el mecanismo de deterioro.

PARÁMETROS QUE AFECTAN LA EROSIÓN.

De acuerdo con Finnie (1960), el conocimiento de todos y cada uno de los factores que afectan el proceso de erosión es esencial, principalmente cuando se intenta desarrollar un modelo apropiado que describa el fenómeno. Obviamente, las variaciones en las propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como en el comportamiento dinámico tanto del material que causa como del que sufre la erosión, deben ser consideradas. Unos de los principales factores que pueden afectar la velocidad de erosión son:

- Concentración de partículas.
- Velocidad del fluido (velocidad de impacto de las partículas).
- Ángulo de impacto.
- Tamaño de las partículas.

- Morfología de las partículas.
- Densidad, dureza y fragilidad de las partículas.
- Naturaleza del fluido.
- Tipo de flujo.
- Naturaleza del material de trabajo.

La influencia de los primeros cinco factores sobre la velocidad de erosión es muy fuerte y cualquier cambio en ellos puede afectar intensamente la velocidad de deterioro del material.

VELOCIDAD DE PARTÍCULAS.

Finnie (1960) reportó que la velocidad de erosión de un acero AISI SAE 1020 es proporcional a la velocidad de impacto, esto es:

$$\varepsilon = bV^n \quad (1)$$

Donde V es la velocidad de las partículas y n corresponde al valor de 2. Años más tarde se reportaron trabajos sobre otros materiales dando como resultado un rango de valores de n entre 2.05 y 2.44. Goodwin et al. (1970), estudiaron la influencia de la velocidad de impacto sobre la superficie de otros materiales. Tales investigadores analizaron la influencia de la velocidad para rangos entre 200 y 1800 pies/s usando diferentes tamaños de cuarzo de 25 a 210 μm sobre un acero de 11% de cromo, concluyendo posteriormente que la velocidad de erosión es dependiente de la velocidad de impacto según la relación:

$$\varepsilon = cV^\alpha \quad (2)$$

Donde el exponente α varía de 2 a 2,3. Posteriores investigaciones, en las que usando tamaños de 125 a 150 μm de cuarzo a distintos ángulos de impacto se encontró que el exponente para la velocidad de erosión se acercaba a 2.3 para todos los materiales ensayados. A pesar de ello, valores tan altos como 6.5 también han sido reportados, así mismo, pruebas llevadas a cabo en aceros con 11% de cromo usando arenas con tamaños de 10 a 150 μm para ángulos de 20 y 90 grados se confirmó la dependencia de la velocidad y se indicó que ésta no fue afectada por el ángulo de impacto. Bitter (1963) reportó que hay una velocidad crítica por debajo de la cual no ocurre erosión, pero los valores calculados son muy bajos (menos de 10 pies/s) para que puedan ser usualmente despreciados.

TAMAÑO DE PARTÍCULAS

La implementación del criterio de disipación de energía como factor controlante de la pérdida de material por erosión ha permitido investigar el efecto del tamaño de partícula.

La comparación de este efecto con respecto a la velocidad de erosión puede hacerse enlazando la energía de disipación con la pérdida de material a través de la determinación de los valores de la energía específica, es decir, la energía cinética de impacto requerida para remover la unidad de volumen del material de prueba.

Para materiales dúctiles, la erosión relativa es esencialmente independiente del tamaño de partícula por encima de cierto valor crítico. Stack et al. (2003), encontraron que la velocidad de erosión es dependiente del tamaño del erodente en el rango de 50 a 100 μm , pero para valores de tamaño de partícula mayores a 100 μm , la dependencia de la velocidad de erosión se reduce considerablemente.

CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS

Se conoce que el efecto de la concentración de partículas en la velocidad de erosión de los materiales es progresivo, la velocidad aumenta a medida que más y más partículas entran en el sistema, la mayor presencia de abrasivo alrededor del material provoca un daño considerablemente más severo, no obstante, algunas investigaciones muestran un valor crítico por encima del cual la influencia de esta variable se ve reducida considerablemente. Clark (1991 y 2002) encontró que la pérdida de masa de material no incrementa linealmente con la carga de sólidos, dicha no linealidad indicó algún grado de interferencia partícula-partícula. Adicionalmente, sugirió que esta interferencia se hace significativa por encima del 2% en volumen.

CONDICIONES EXPERIMENTALES

Los ensayos se desarrollaron en un electrodo de cilindro rotatorio, para los cuales se utilizó una celda modificada de erosión como se muestra en la figura 1. La celda modificada de erosión, consistente de una coraza de polimetilmetacrilato con capacidad de 200ml de solución, el eje central está construido de Nylon el cual está ensamblado al cilindro rotatorio, que es un equipo de ensayos dinámicos con velocidad de rotación variable, la celda dispone de cuatro baffles centrales, diseñados para disminuir los vórtices generados por la rotación del sistema y además para garantizar la colisión

de las partículas erosivas a la muestra de estudio. En este trabajo se estudiaron tres velocidades de rotación: 1000, 2000 y 3000 rpm.

Las muestras de trabajo se fabricaron en un acero AISI SAE 1020, con las siguientes dimensiones: 3,8 cm de diámetro externo, 3,2 cm de diámetro interno, 1 cm de altura y 12 cm² de área expuesta al fenómeno erosivo; las superficies de las muestras se mantuvieron libres de polvo, humedad y otros agentes contaminantes, posteriormente, fueron desbastadas con papel de carburo de silicio, número 120, 240, 320, 400 y 600. Después del proceso de pulido, las probetas fueron lavadas con agua destilada, desengrasadas con acetona y colocadas en un desecador.

Las partículas erosivas utilizadas fueron sílice de alta pureza que se pueden observar en la figura 2, cuyo tamaño fue 50µm y 150µm y en concentraciones de 10 y 30% en peso. Los resultados obtenidos por análisis químico de la arena empleada se muestran en la tabla 1. Las velocidades de impacto fueron 1 y 4 m/s y los ángulos de impacto fueron aleatorios tal y como se presentan en una tubería con flujo turbulento.

Tabla 1. Análisis químico de la muestra de arena.

% Compuesto encontrado en la muestra						
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	SiO ₂
0.094	0.028	0.033	0.060	0.107	0.027	99.65

Para la determinación de las pruebas de erosión se utilizó la técnica de gravimetría y caracterización morfológica. En las pruebas de erosión se empleó una suspensión de partículas de SiO₂ en agua desionizada.

Los valores bajos de concentración de oxígeno menores a 0,1 ppm y de hierro disuelto menores a 2 ppm disuelto, indican que no existe una tendencia a la formación de películas de óxidos de hierro o de algún otro compuesto. Durante estas pruebas se disminuyó la componente de la corrosión en todo el sistema, inyectando gas nitrógeno treinta minutos antes de la inmersión de la muestra para reducir el nivel de corrosividad con un caudal de flujo de 150 ml/min, según lo especifica la norma ASTM G59, lográndose una concentración final de oxígeno de 0,1 ppm, medida a través de ampollas de oxígeno.

Después de cada hora de ensayo, las probetas de acero fueron desmontadas de la celda, lavadas en agua destilada, desengrasadas con acetona, secadas y puestas en el desecador por un lapso de 5 minutos, posteriormente, se pesaron en una balanza analítica con sensibilidad de 0,01 mg. Luego del análisis gravimétrico, las probetas fueron cortadas y analizadas en el microscopio.



Figura 1. Celda empleada para ensayos de erosión.

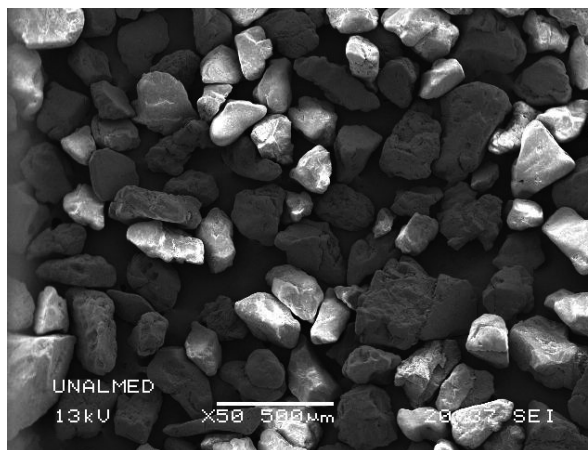


Figura 2. Micrografía de la sílice de alta pureza.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

La figura 3 muestra que a 1000 rpm y con una concentración de partículas del 10% en peso, se observó una mayor velocidad de erosión del acero para tamaños de partícula mayores, ello puede indicar que el área de impacto en la superficie del material es mayor, por lo tanto el daño fue más severo y conllevó a una remoción de metal más alta. Además, para una misma velocidad de rotación y tamaño de partícula, se observó que la velocidad de degradación de la superficie se incrementó con el aumento de la concentración de partículas, como

se puede observar en las microfotografías de las figuras 4 y 5. En términos generales, para concentraciones de partícula de 10 % en peso y velocidades de rotación de 1000 rpm, la velocidad de erosión aumenta proporcionalmente con el tamaño de partícula.

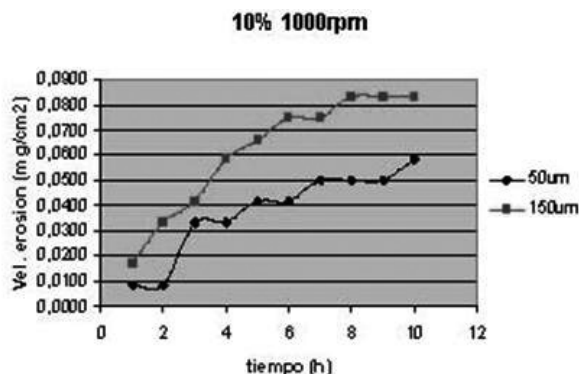


Figura 3. Curvas de erosión del acero AISI-SAE 1020 a 10% en peso y 1000 rpm

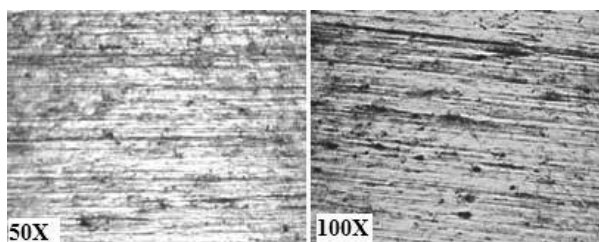


Figura 4. Microfotografía de la superficie del acero después del ensayo (10%W, 50µm, 1000 rpm).

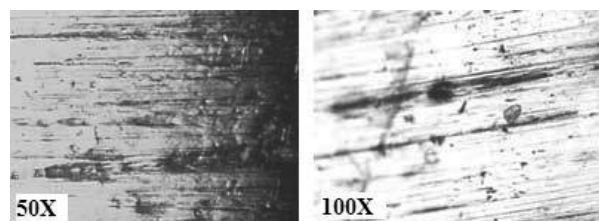


Figura 5. Microfotografía de la superficie del acero después del ensayo (30%W, 50 µm, 1000 rpm).

La tendencia de este ensayo desarrollado a 30%W y 1000rpm se muestra en la figura 6, la cual describe el mismo comportamiento a concentraciones de partícula de 10 % en peso y 1000rpm. La velocidad de erosión del material es mayor a 150 µm que a 50 µm, y en comparación con la anterior, es un orden de magnitud mayor.

Para las mismas condiciones de velocidad de rotación y tamaño de partícula, la velocidad de erosión se incrementó con el aumento de la concentración de

partículas impactando al material como se evidencian en las microfotografías de las figuras 7 y 8. No obstante, en el presente ensayo se observó que aumenta la velocidad de erosión debido al incremento de la velocidad de rotación del sistema. Lo que indica que existe una relación directa entre la velocidad de erosión del sistema y la velocidad de rotación del mismo.

La velocidad de erosión negativa en las primeras horas de ensayo se atribuye a una ganancia de masa de las probetas de acero debida posiblemente a pequeñas incrustaciones de partículas de arena (50 µm) en las superficies de las mismas con muy poca cantidad de óxido formado (lo cual termodinámicamente es inevitable por las bajas concentraciones de oxígeno); como se observa en el rango de tiempo entre 0 y 3,5 horas.

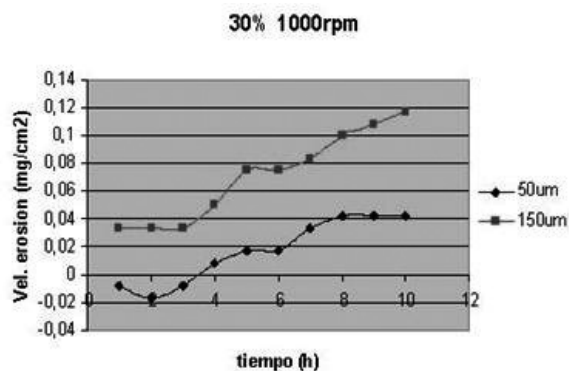


Figura 6. Curvas de erosión del acero AISI SAE-1020 a 30% en peso y 1000 rpm.

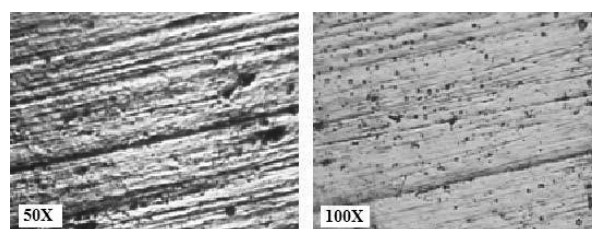


Figura 7. Microfotografía de la superficie del acero después del ensayo (10%W, 150µm, 1000 rpm).

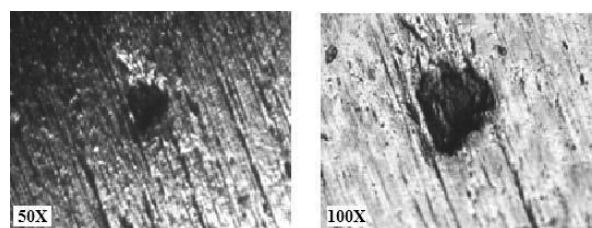


Figura 8. Microfotografía de la superficie del acero después del ensayo 4 (30%W, 150µm, 1000 rpm).

En la figura 9 se puede apreciar que aunque en la primera hora de ensayo el valor de la velocidad de erosión es similar para ambos tamaños, la diferencia entre éstas es considerable a medida que transcurre el tiempo del ensayo, observándose un mayor deterioro del material para un tamaño de 150 μm . Adicionalmente, se encontraron velocidades mayores (velocidad máxima de $\approx 0,9 \text{ mg/cm}^2$ para 150 μm a 30% en peso y 3000rpm, contra una velocidad máxima de erosión de $\approx 0,35 \text{ mg/cm}^2$ a 10% en peso. Para 50 μm , velocidad máxima de $\approx 0,4 \text{ mg/cm}^2$ a 30% en peso y 3000rpm, en contraste con la velocidad máxima de $\approx 0,15 \text{ mg/cm}^2$ a 10% en peso y la misma velocidad de rotación.

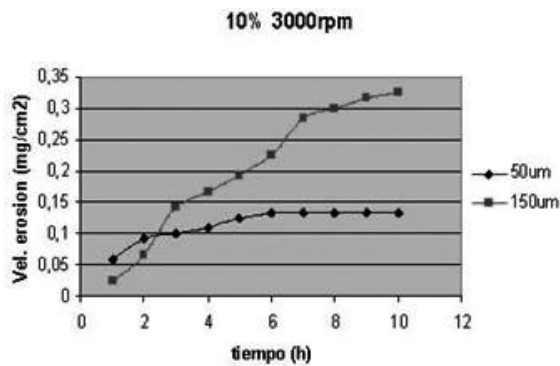


Figura 9. Curvas de erosión del acero AISI-SAE 1020 a 10% en peso y 3000 rpm.

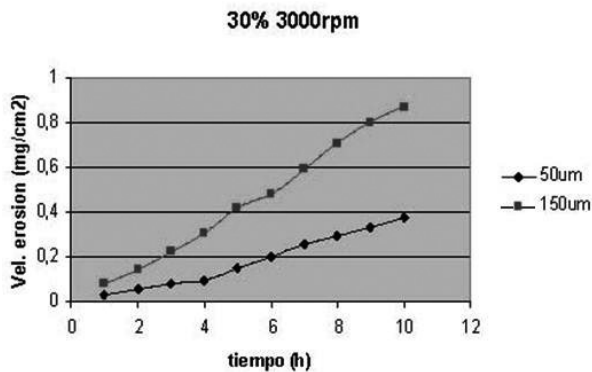


Figura 10. Curvas de erosión del acero AISI-SAE 1020 a 30% en peso y 3000 rpm.

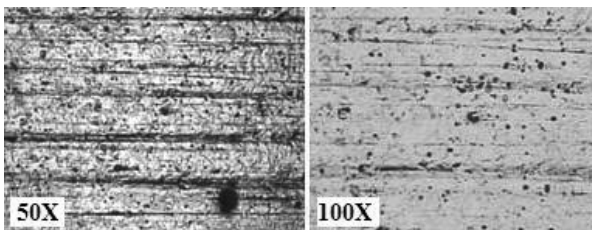


Figura 11. Microfotografía de la superficie del acero después del ensayo (10%W, 50 μm , 3000 rpm).

Los ensayos llevados a cabo a 10%W, 3000rpm y 30%W, 3000rpm, variando el tamaño de partícula presentan un comportamiento muy similar y se muestran en las figuras 9 y 10. Se observa un mayor deterioro de material para tamaños de 150 μm como se pueden apreciar en las microfotografías de las figuras 11 a la 15. La forma de daño es típica de un material dúctil ya que se deforma con el impacto de las partículas.

Además, puede deducirse que al extrapolar los datos de la variación con la concentración de partículas, se observa que con el tiempo, aumenta la velocidad de deterioro debido a la linealidad en las curvas de erosión. Este comportamiento se presenta en la figura 10.

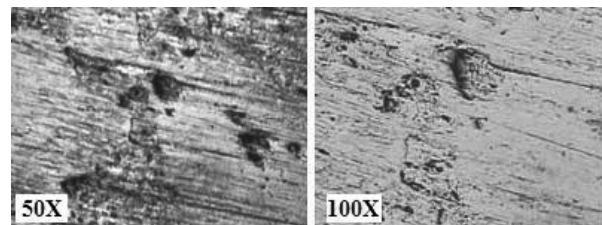


Figura 12. Microfotografía de la superficie del acero después del ensayo (30%W, 50 μm , 3000 rpm).

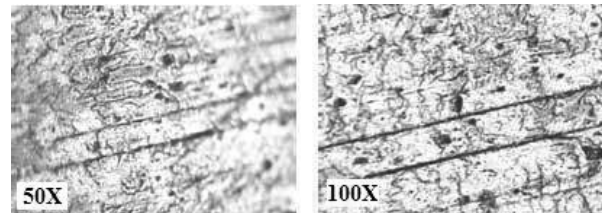


Figura 13. Microfotografía de la superficie del acero después del ensayo (10%W, 150 μm , 3000 rpm).

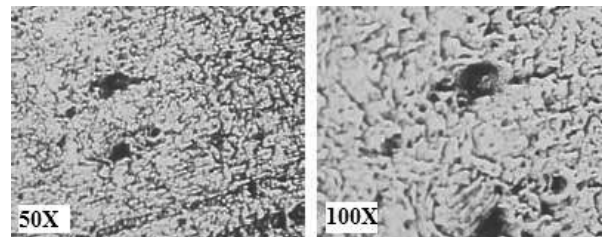


Figura 14. Microfotografía de la superficie del acero después del ensayo (30%W, 150 μm , 3000 rpm)

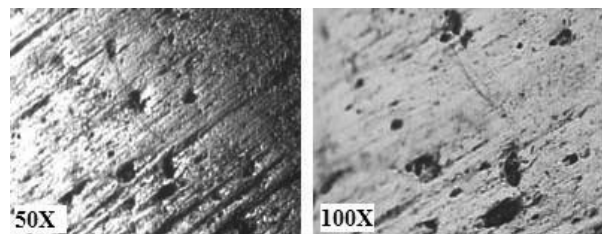


Figura 15. Microfotografía de la superficie del acero después del ensayo 9 (20%W, 100 μm , 2000 rpm).

CONCLUSIONES

El comportamiento erosivo del acero se puede decir que fue dúctil debido a la forma de daño observada ya que los impactos aleatorios fueron los esperados conforme con las condiciones y variables de operación.

La velocidad de las partículas es la variable más significativa del sistema; grandes diferencias en las velocidades de erosión se observaron con el aumento de la velocidad de rotación del sistema, esto se puede explicar ya que la energía cinética de las partículas es lo suficientemente alta para producir las deformaciones plásticas y el deterioro del material.

Se encontró que existe una relación directa entre los tamaños de partículas estudiados, lo que quiere decir que al aumentar el tamaño de partícula aumenta la velocidad de erosión.

Se estableció que la concentración de partícula tiene un efecto leve en el fenómeno erosivo, con lo que podemos concluir que no es una variable significativa para este fenómeno.

REFERENCIAS

1. VINCENT, MICHAEL et al. (2004) Erosion by Proppant: A Comparison of the Erosivity of Sand and Ceramic Proppants during Slurry Injection and Flowback of Proppant. En: SPE Annual Technical Conference.
2. PEÑA, DARÍO (2001) Introducción a la Erosión de Materiales. En: Revista ION. Vol. 17, No 1.
3. RAO, P. VEERABHADRAYBUCKLEY, DONALD. H. (1985) Characterization of solid particle erosion resistance of ductile metals based in their properties. En: Journal of engineering for gas turbines and power. Elsevier. Vol. 107, No3, pp. 669-678
4. LEVY, ALAN V. (1986) The platelet mechanism of erosion of ductile metals. En: Wear. Elsevier. Vol 108, pp. 1 - 21
5. FINNIE, IAIN (1960) Erosion of surfaces by solid particles. En: Wear, Vol 3. pp. 87 - 103.
6. GOODWIN, J.E., SAGE, W. Y TILLY, G.P. (1970) Study of erosion by Solid Particles. En: Proceedings of the Institution of Mechanical. Vol 184, pp. 279 - 292

7. BITTER, J. G. A. (1963) A Study of Erosion Phenomena. Part I and Part II En: Wear. Elsevier. Vol 6, Issue 1, pp. 5 – 21 and Vol 6, Issue 3, pp. 169 - 190.
8. STACK, M. M, JAMES J. S. Y LU, Q. (2003) Erosion-corrosion of chromium steel in a rotating cylinder electrode system: some comments of particle size effects. En: Wear. Elsevier. Vol 256, Issue 5, pp. 557 - 564.
9. CLARK, H. M. (1991) A comparison of the erosion resistance of casing steels by sand-oil suspensions. En: Wear. Elsevier. Vol. 150, Issues 1-2, pp. 217–230
10. CLARK, H. M. (2002) Particle Velocity and Size Effects in Laboratory Slurry Erosion Measurements or...do you know what your particles are doing?. En: Tribology International. Elsevier. Vol. 35, Issue 10, pp. 617 - 624.

Fecha de recepción: Febrero del 2010

Fecha de aceptación: Mayo de 2010