

Evaluación de la corrosión-erosión en aceros austeníticos y martensíticos

Evaluation for Corrosion-Erosion in Austenitic and Martensitic Steels

W. Aperador Chaparro^{a,*}

J. Bautista-Ruiz^b

A. Vargas Uscátegui^c

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de evaluar la resistencia a la corrosión dinámica, la erosión y la corrosión-erosión, a ángulos de impacto de 30° y 90°, con respecto a la superficie de la muestra, en aceros ASTM 240 (A240) o AISI 304 y ASTM 576 (A576) o AISI 1045. La caracterización electroquímica se desarrolló mediante la técnica de curvas de polarización de Tafel, y la caracterización microestructural por microscopía electrónica de barrido. Se encontró una disminución notable en la velocidad de corrosión para los aceros A240 en comparación con el A576, bajo condiciones de corrosión dinámica y corrosión-erosión. El desgaste mecánico indicó que la condición de ángulo normal representa mayores pérdidas de espesor del material, en comparación con el ángulo rasante, para las dos clases de aceros. Al comparar los diferentes materiales de estudio, en condición de ángulo normal y rasante, se observó claramente que el acero A576 presenta los mayores valores de pérdida de volumen, en igualdad de condiciones (igual tiempo de exposición), en comparación con el acero A240. La aplicación de la técnica de microscopía electrónica de barrido permitió evaluar los mecanismos de daño dominantes y corroboraron los resultados obtenidos por las mediciones electroquímicas.

Palabras clave: Acero martensítico, Acero austenítico, Erosión, Corrosión, MEB.

Abstract

This paper presents the results of evaluating the dynamic corrosion resistance, the erosion and corrosion-erosion, to impact angles of 30° and 90°, with respect to the sample surface in steel ASTM 240 (A240) or AISI 304 and steel ASTM 576 (A576) or AISI 1045. The electrochemical characterization was developed by the Tafel polarization curves and the micro-structural characterization by the scanning electron microscopy. There was a marked decrease in the corrosion rate for steel A 240 compared with A576, under the erosion corrosion and corrosion dynamics conditions. Mechanical wear indicated that the normal angle condition represents higher losses in the material thickness, compared to the grazing angle for the two classes of steels. When comparing the different study materials in normal condition and grazing angle, it is clearly observed that the steel ASTM A576 has the highest loss values volume, in equal exposure time, in comparison with

^aUniversidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

* Autor de correspondencia: william.aperador@unimilitar.edu.co

^bUniversidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia.

^cUniversidad de Chile, Santiago de Chile.

the A240 steel. The scanning electron microscopy application techniques allowed to assess the dominant damage mechanisms and corroborated the results obtained by the electrochemical measurements.

Key words: Martensitic Steel, Carbon Steel, Austenitic Steel, Erosion, Corrosion, SEM.

1. Introducción

El acero es uno de los materiales más comunes en el uso diario, y ocupa una posición privilegiada entre los materiales de ingeniería más utilizados; esto se debe, básicamente, a su versatilidad, su resistencia y su fácil reciclaje. La versatilidad del acero es bien conocida, pues es utilizado en aplicaciones muy diversas y en gran variedad de entornos, incluso en condiciones extremas de carga y temperatura. Para aplicaciones en lugares donde se requiere que el material mantenga su integridad, aun bajo la acción de un medio agresivo que provoca desgaste y corrosión, se utilizan normalmente las aleaciones Fe-Ni-Cr, comúnmente llamadas Aceros Inoxidables; sin embargo, el empleo de estos acarrea, por lo general, un alto costo, además de que deben ser seleccionados adecuadamente [1].

En la mayor parte de los procesos industriales se involucra el contacto de los materiales con fluidos de diferente naturaleza; es así como piezas expuestas a la acción de estos fluidos pueden presentar procesos de corrosión por erosión, que disminuyen de manera acelerada su vida útil. La corrosión por efecto de la erosión es la aceleración de la velocidad de corrosión de un metal, debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo en contacto con la superficie metálica [2-4]; si además el fluido contiene partículas sólidas, en suspensión, se incrementa el efecto erosivo, causando el deterioro del metal. Actualmente, los recubrimientos duros, como los nitruros basados en metales de transición y aplicados mediante deposición física de vapor sobre sustratos de acero, se están convirtiendo en la solución al problema de la corrosión, debido a su inercia química [5, 6].

Las motobombas son dispositivos de gran importancia en el transporte y movimiento de fluidos en diferentes procesos productivos (pomadas, jarras, champú, alimentos, etc.), debido a su capacidad de producir vacío, permitiendo así empujar el fluido hacia donde se desee transportar. Las motobombas centrífugas son utilizadas, de manera generalizada, en el bombeo de líquidos con diferentes características y cierta cantidad de sólidos que se

desplazan a presión cerrada por el movimiento circular, de uno o varios impulsores, provistos de alabe dentro de una carcasa. A pesar del correcto diseño de estos dispositivos es inevitable la aparición en el interior de estas bombas de un desgaste (erosivo y corrosivo), que impide un adecuado funcionamiento y causa daños catastróficos a los componentes. Estos inconvenientes conllevan altos costos económicos por mantenimiento y tiempos muertos de producción [1].

En Colombia, la industria manufacturera utiliza motobombas que se desgastan y corroen rápidamente, debido a las condiciones propias de operación, originando altos costos económicos y disminución de la productividad. Para evitar el deterioro precario de los componentes de las motobombas, se ha optado por fabricar sus partes con una amplia gama de materiales, como aceros inoxidables, níquel y caucho, e, incluso, por usar recubrimientos duros [7-9]. Sin embargo, es de gran importancia evaluar los materiales utilizados comúnmente en las partes de las motobombas, en particular los aceros A576 y A240, debido al aspecto económico que ofrecen.

En este trabajo se estudió la sinergia entre la corrosión dinámica, la erosión y la corrosión-erosión de los aceros austenítico A 240 y el martensítico A 576, expuestos a un medio agresivo bajo condiciones dinámicas.

2. Procedimiento experimental

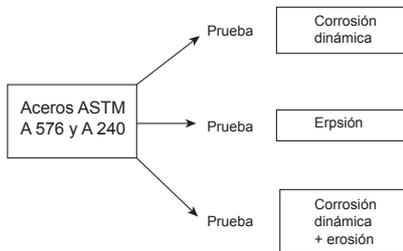
Para la presente investigación se emplearon dos materiales con diferente composición: un acero inoxidable austenítico, tipo ASTM A240, y un acero al carbono, tipo ASTM A576, con la composición química mostrada en la tabla 1.

Con el fin de estudiar la influencia de la sinergia entre la corrosión dinámica, la erosión y la corrosión-erosión, se planteó la metodología relacionada en la figura 1.

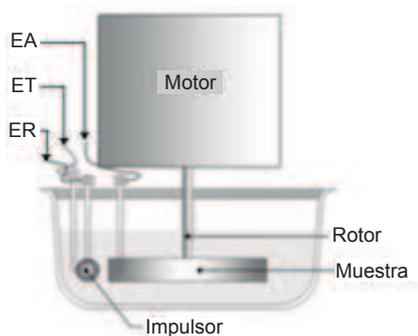
En cuanto a la evaluación de la resistencia a la corrosión-erosión, se empleó un equipo tipo cilindro rotatorio, que consta de un recipiente de vidrio, que contiene la solución (NaCl 0,5 M y partículas

Tabla 1. Composición química y densidad de los aceros A240 y A576.

Aleación	% Cr	% Ni	% Mn	% Si	% C	% Mo	% Fe	ρ (g/cm ³)
ASTM	-	-	0,07	0,30	0,45	-	99,18	7,80
A576	-	-	±0,01	±0,01	±0,01	-	±0,01	±0,01
ASTM	17,00	12,00	2,00	1,00	0,08	2,50	65,42	7,94
A240	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01

**Figura 1.** Metodología utilizada para evaluar la resistencia a la corrosión dinámica, la erosión y la corrosión-erosión de los aceros ASTM A576 y A 240.

de sílice), y una tapa de acrílico, donde se disponen el electrodo de referencia (SCE), el contraelectrodo (grafito) y la muestra, con área de exposición de 1 cm². Los ángulos de impacto del fluido fueron de 30° y 90°, medidos con respecto a la superficie de la muestra. Además, el equipo consta de un impulsor de HUMWPE (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular), ajustado al eje del motor, generando el movimiento de la solución y el impacto sobre la muestra (figura 2) [10-13]. La velocidad de giro fue de 1930 rpm, proporcionando a las partículas una velocidad lineal máxima de 11,12 m s⁻¹.

**Figura 2.** Diagrama esquemático del dispositivo empleado en las pruebas de desgaste por corrosión-erosión. EA: Electrodo auxiliar, ET: Electrodo de trabajo, ER: Electrodo de referencia.

Para la evaluación de la resistencia a la corrosión dinámica y corrosión-erosión se utilizó un potenciostato-galvanostato Gamry modelo PCI-4, empleando la técnica de curvas potenciodinámicas de Tafel. Las probetas se sumergieron en una

solución de NaCl 0,5 M, preparada con agua destilada y partículas de sílice (SiO₂), con tamaño de partícula entre 210 μm y 300 μm, y proporción del 20% en peso respecto al medio. Los diagramas de Tafel se obtuvieron en forma dinámica a una velocidad de barrido de 0,125 mV/s, con potenciales entre -0,25 V a 0,75 V y área expuesta de 1 cm². El comportamiento electroquímico fue evaluado luego de 45 minutos, permitiendo la estabilización del potencial de circuito abierto. Las normas aplicadas en los criterios de medición y cálculos correspondieron a las ASTM G 5 y G 59 [14, 15].

Las muestras fueron sometidas a desgaste por erosión durante un tiempo de exposición de 240 minutos (tiempo que tarda el ensayo Tafel), a una temperatura de 25°C. Con el propósito de determinar la pérdida de peso, debida a la erosión durante la inmersión en NaCl 0,5 M y partículas de sílice, las muestras se retiraron de la solución a intervalos de 15 minutos, se limpiaron con un chorro de agua, se secaron con aire caliente, y se midió la pérdida de masa en una balanza con precisión de 0,10 ±0,01 g. La evaluación del fenómeno erosivo se realizó utilizando protección catódica de 1 V catódico con respecto al potencial de circuito abierto del acero, y el recubrimiento, respectivamente, de acuerdo con la norma ASTM G 119-93 [16]; esta protección catódica garantizó daño superficial solo por efecto de las partículas erosivas. Las muestras de aceros austeníticos y martensíticos fueron preparadas metalográficamente, y se utilizó como reactivo agua regia, compuesta por metanol, ácido clorhídrico y ácido trioxonítrico; luego, las muestras fueron observadas por microscopía óptica. Para evaluar la huella y los productos de desgaste se utilizó un Microscopio de Barrido Electrónico JEOL JSM-649 OLV.

3. Resultados y discusión

El acero ASTM A576 se adquirió en forma de barra, en estado normalizado (su microestructura se presenta en la figura 3); posteriormente, se le aplicó

un tratamiento térmico de temple, después de austenizarlo a 850 °C durante 2 horas, con enfriamiento en agua; a continuación se sometió a un revenido, a una temperatura de 550 °C durante 2 horas, y posterior enfriamiento en aire. El tratamiento térmico fue aplicado con el propósito de aumentar la dureza, mejorando las propiedades mecánicas finales con las que normalmente se emplea en aplicaciones de ingeniería. Debido al tratamiento mencionado en el procedimiento experimental, se generó una microestructura que consiste en áreas ferríticas –claras– en una matriz martensítica –zonas oscuras– (figura 4); se debe explicar a que están asociadas y si se pueden comprar con lo reportado en la literatura

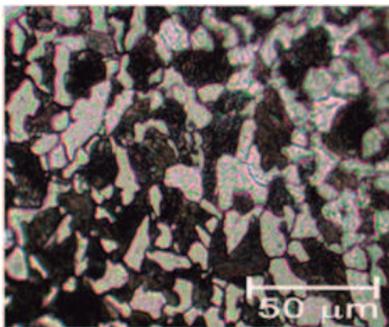


Figura 3. Microestructura acero ASTM A576 normalizado (197 HV 0,1). Ataque con nital 8% (Etanol + HNO₃).

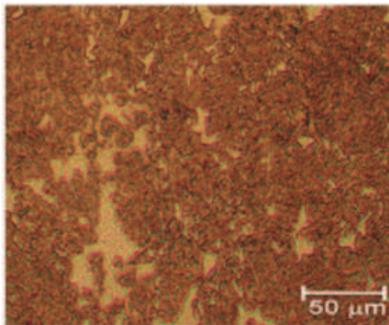


Figura 4. Microestructura del acero A576 bonificado (416 HV 0,1). Ataque con nital 8% (Etanol + HNO₃).

La muestra de acero ASTM A240 se adquirió en forma de barra calibrada comercialmente, es decir, sometido a un ligero paso de deformación en frío que le proporciona al material su dimensión final. Este acero se empleó para los ensayos en esta condición, ya que no son tratables térmicamente. Además, esta condición es la normalmente utilizada en la construcción de piezas mecánicas, como los impulsores de las bombas centrífugas. La microestructura del acero ASTM A240 consiste en granos poligonales y

presencia de maclas (figura 5). Igual comentario que para la figura anterior.

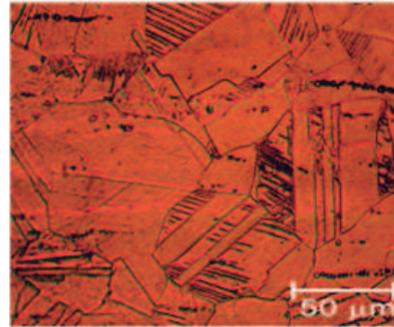


Figura 5. Microestructura del acero ASTM A240 (416 HV 0,1). Ataque con agua regia (1 HCl: 3 HNO₃).

3.1. Corrosión dinámica

En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos de las curvas potencio-dinámicas de corrosión en una solución de NaCl 0,5 M al comparar las aleaciones A576 y A240 para ángulos de impacto de 90° y 30°.

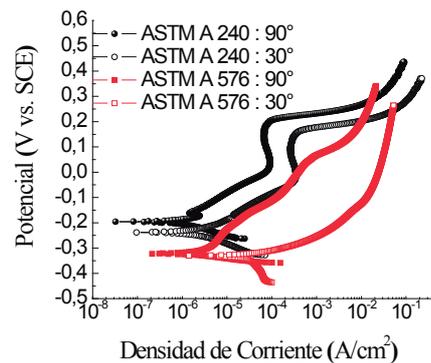


Figura 6. Curvas potencio-dinámicas de corrosión en una solución de NaCl 0,5 M.

Según el estudio, se observan mayores velocidades de corrosión para los aceros A576, bajo una condición de ángulo de impacto rasante; por lo tanto, la condición dinámica de ángulo rasante favorece, en alto grado, el proceso corrosivo, debido a mayores valores de densidad de corriente de corrosión; en cuanto a un ángulo normal, los valores de velocidad de corrosión son inferiores. Desde el punto de vista hidrodinámico es posible aseverar que esta condición se debe a la posibilidad del sistema, en ángulo rasante, de generar un menor espesor de película electrolítica, facilitando la difusión de iones hasta la superficie del material e intensificando el proceso anódico sobre él.

Es posible determinar el efecto de las variaciones en el sistema electroquímico sobre el comportamiento del material con respecto a las diferentes zonas de la curva de polarización. En primer lugar, se diferencia la acción del medio corrosivo a partir del tipo de polarización, brindando una aproximación al tipo de mecanismo que actúa superficialmente en cada caso. Desde la rama catódica se observa una polarización debida a la transferencia de carga; por tanto, una vez atravesada la barrera de potencial se dará inicio al proceso corrosivo generalizado; además, se observa la influencia en el ángulo de impacto debido al proceso de disolución anódica ininterrumpida. El ángulo influye en el cambio del potencial, densidad y velocidad de corrosión (tabla 2). Con respecto a la variación del ángulo de impacto, se observa que el sistema tiende a estabilizarse en ángulo normal, en comparación al ángulo rasante.

Tabla 2. Valores de los parámetros electroquímicos para los aceros A 576 y A 240 obtenidos por curvas de polarización.

Muestra	Potencial de corrosión (mV)	Corriente de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Velocidad de corrosión (μy)
ASTM A 576 30°	-345,0±0,1	59,0±0,1	1072,0±0,1
ASTM A 576 90°	-314,0±0,1	25,5±0,1	99,3±0,1
ASTM A 240 30°	-235,0±0,1	4,3±0,1	78,2±0,1
ASTM A 240 90°	-195,0±0,1	2,0±0,1	36,3±0,1

Para el acero A240, las curvas de polarización anódica y catódica generan los mismos mecanismos de polarización y desarrollo de las reacciones en la superficie del material; no obstante, también es posible observar una diferencia importante, que radica en los potenciales y densidades de corriente de corrosión, valores registrados en la tabla 2.

El sistema más estable y con menor cinética corrosiva corresponde a un ángulo de 30°, debido a la presencia, clara, de una zona de pasivación. La variación del ángulo de ataque influye notoriamente en el sistema pasivo más que en el sistema de corrosión generalizada; hecho explicable porque no se observan cambios de mayor magnitud en cuanto al potencial y densidad de corriente de corrosión para cada caso (tabla 2). Es importante notar que, bajo condiciones dinámicas, la pasivación del acero inoxidable (A240) se modifica debido a un fenómeno predominantemente difusivo.

3.2. Erosión

Para evaluar el fenómeno erosivo se aplicó protección catódica de 1 V catódico, con respecto al potencial de circuito abierto de los aceros, de acuerdo con la norma ASTM G 119-93 [16], esta protección catódica garantiza el daño superficial solo por efecto de las partículas erosivas.

En las figuras. 7 y 8 se evalúan la pérdida de material asociado a impactos repetidos de partículas sólidas, luego de 240 minutos de ensayo, para los dos tipos de aleaciones. Se diferencia con claridad la severidad en el desgaste con respecto a la variación del ángulo de impacto, en donde la condición de ángulo normal representa mayores pérdidas de masa del material en comparación al ángulo rasante. Este tipo de desgaste es resultado del impacto sucesivo de partículas abrasivas con una velocidad lineal máxima de $11,12 \text{ m s}^{-1}$ sobre la superficie del material. Existe una clara dependencia del ángulo de impacto debido a las condiciones energéticas presentes en la superficie del material; no obstante, los micromecanismos dominantes de desgaste en cada caso serán diferentes.

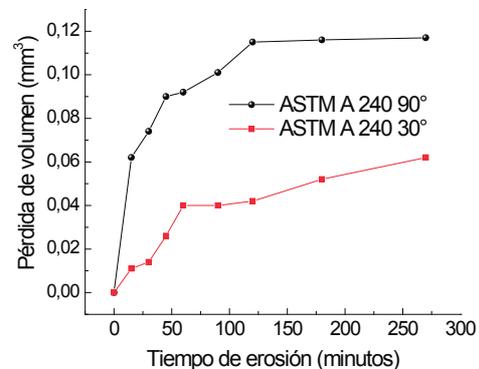


Figura 7. Pérdida de volumen para el acero ASTM A 240 en función del ángulo, sin efecto corrosivo.

En ángulo normal, la tasa de desgaste es mayor a la presentada en ángulo rasante, condición observada en la figura 7 para materiales como el acero A 240. Las curvas dinámicas de desgaste presentan un comportamiento similar, con tendencia amortiguada a tiempos mayores de exposición. La amortiguación se logra más rápido en ángulo normal; este desempeño se puede ver asociado a las formas de remoción del material en cada situación. En ángulo rasante existen fenómenos de microcorte y microarado; para ángulo normal el desgaste está influenciado por fenómenos de fatiga superficial.

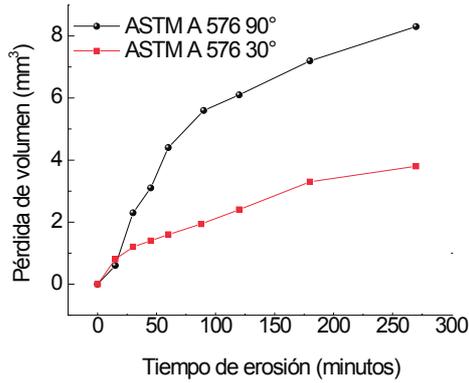


Figura 8. Pérdida de volumen para el acero ASTM A 576 en función del ángulo, sin efecto corrosivo.

En las aleaciones A 576 (figura 8) se observa gran pérdida de volumen, debido a una cinética de desgaste con tendencia lineal, tanto para condiciones de ángulo normal como de ángulo rasante: Para el acero A 240 no se observa pérdida de material a tiempos de exposición superiores a 120 minutos en ninguno de los ángulos de ataque.

3.3. Corrosión-erosión

Con relación a las curvas de polarización anódica mostradas en la figura 9, el comportamiento de este parámetro electroquímico indica que la velocidad de corrosión disminuye con el paso de ángulo rasante a ángulo normal en el medio de estudio.

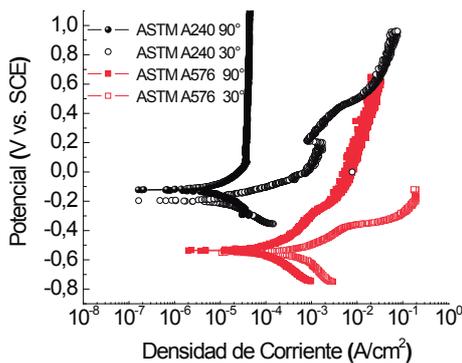


Figura 9. Curvas potenciodinámicas de corrosión-erosión en una solución de NaCl 0,5 M.

En términos de la sinergia corrosión-erosión, el medio agresivo es un factor determinante en la severidad del desgaste mecánico provocado; implica que el fenómeno pudiese llegar a ser aditivo, es decir, el fenómeno corrosivo electroquímico sería el dominante en el medio marino: este efecto agresivo del medio es atribuible a la acción del ión cloruro, que propicia

mayor corrosión por picado sobre la superficie de los materiales al propagarse por el incesante impacto de las partículas, cuyo tamaño oscila entre 210 μm y 300 μm , causando el desprendimiento de material en las zonas picadas y avanzando hacia el interior del material desplazando las capas endurecidas de la superficie. Este fenómeno es más notorio en materiales como el acero A 576, en donde se presentan los mayores valores de pérdida de volumen; esto se concluye, parcialmente, al comparar las diferencias en las escalas de la gráfica de las figura 9.

En función de la variación del ángulo de impacto se observa que el cambio de ángulo rasante a normal aumenta la pérdida de volumen en aceros como el A 576 y el A 240; esto se debe a que en ángulo rasante es más fácil la remoción de grandes porciones de material, debido a un intenso proceso de picado, mientras que en ángulo normal, con el subsiguiente endurecimiento por deformación, no se generan con mayor facilidad zonas de corrosión localizada. Los resultados anteriormente relacionados muestran el efecto dominante del desgaste mecánico sobre la superficie de los materiales, lo que lleva al aumento del desgaste electroquímico, como consecuencia de una mayor energía libre de superficie como efecto del desgaste por erosión.

Los datos registrados en la tabla 3 indican un bajo desempeño electroquímico frente a la corrosión dinámica (tabla 1), debido a que la corrosión-erosión genera disminución en los potenciales y densidad de corrosión. La figura 9 dan cuenta del proceso de remoción de material generado por las partículas de sílice. En general, los datos en la tabla 2 muestran un buen comportamiento de los aceros analizados y sometidos a fenómenos corrosivos; sin embargo, cuando las muestras de acero se someten al flujo corrosivo-erosivo, la película pasiva, formada en la superficie, es eliminada y removida por la acción de partículas duras; esto lleva a la pérdida de la protección anticorrosiva, reduciendo la resistencia superficial al ataque de las partículas de impacto, generando un aumento de la velocidad de corrosión en comparación con la corrosión dinámica (figura 9).

3.4. Evaluación microestructural

En las micrografías de la figura 10 se observan las características superficiales de los aceros A 576 y A 240 luego del proceso de corrosión-erosión a

Tabla 3. Valores de los parámetros electroquímicos para los aceros A 576 y A 240, obtenidos de las curvas de polarización en el sistema corrosión-erosión por variación de ángulo de ataque.

Muestra	Potencial de corrosión (mV)	Corriente de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Velocidad de corrosión ($\mu\text{m/y}$)
A576 90°	-548,2±0,1	721,0±0,1	17,2±0,1
A576 30°	-540,3±0,1	250,0±0,1	6.3±0,1
A240 90°	-191,1±0,1	25,1±0,1	637,3±0,1
A240 30°	-114,4±0,1	11,5±0,1	291,9±0,1

ángulos de impacto de 30° y 90°; según las figuras 10a y 10c, parte del sustrato ha sido deteriorado como consecuencia del efecto de la corrosión dinámica; adicionalmente, se visualiza el desgaste del óxido agrietado.

En las figuras 10b y 10d se distingue una zona central caracterizada por la acción de la corrosión y el agrietamiento del óxido generado por la energía de impacto de las partículas abrasivas de sílice (SiO_2); también se observan zonas grises en los extremos en donde el efecto protector ha generado mecanismos de defensa con zonas de bajo agrietamiento. Estas áreas muestran una superficie libre de fracturas, representando la acción protectora otorgada en el proceso de endurecimiento por deformación.

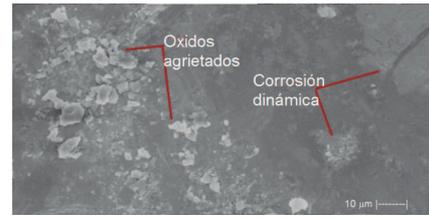
4. Conclusiones

Los resultados de las curvas potenciodinámicas anódicas muestran que los aceros de los sistemas austenítico y martensítico presentan un comportamiento electroquímico excelente para los aceros A240, y bueno para el A576 en condiciones dinámicas.

Bajo condiciones de ángulos de ataque rasante y normal se observó que las muestras de acero martensítico son más activas, mientras que las muestras de acero austenítico presentan un comportamiento noble. Para los dos tipos de aceros se deduce un comportamiento anódico, representado por un fenómeno de disolución anódica continua.

El efecto erosivo en los aceros permitió evaluar, indirectamente, buenas propiedades mecánicas generadas por la absorción y distribución de la energía de choque a medida que se aumenta el ángulo de impacto.

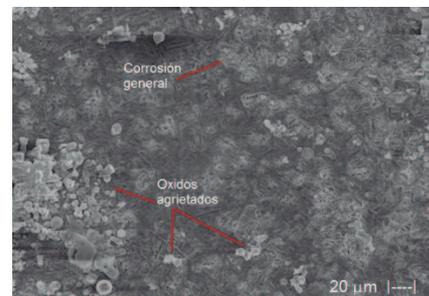
En el comportamiento de la sinergia de corrosión-erosión se evidenció que los materiales A576 y A240



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 10. Micrografías SEM para muestras sometidas a corrosión-erosión. (a) A 240 – 30°; (b) A 240 – 90°; (c) A 576 – 30°; (d) A 576 – 90°.

presentan un aumento de la actividad, en especial de la densidad de corriente de corrosión cuando son sometidos a condiciones dinámicas, en particular a la acción de partículas erosivas.

En el medio de exposición con una solución de NaCl 0,5 M se observó que la modificación de las condiciones mecánicas del medio, como el impacto del fluido y de partículas erosivas en ciertos ángulos de ataque, lleva a ligeros cambios del potencial de corrosión.

El desgaste mecánico indicó que la condición de ángulo normal representa mayores pérdidas de material en comparación con el ángulo rasante, para las dos clases de aceros.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, por la financiación del proyecto ING-1775-2015.

Referencias

- [1] M.C. Roco, "Wear Mechanisms in Centrifugal Slurry Pumps", *Corrosion*, vol. 46, no. 5, pp. 424-431, 1990.
- [2] H. Meng, X. Hu and A. Neville, "A systematic erosion-corrosion study of two stainless steels in marine conditions via experimental design", *Wear*, vol. 263, pp. 355-362, 2007.
- [3] L. Niu and Y.F. Cheng, "Synergistic effects of fluid flow and sand particles on erosion-corrosion of aluminum in ethylene glycol-water solutions" *Wear*, vol. 265, pp. 367-374, 2008.
- [4] J. L. Endrino, J. L. Fox-Rabinovich and C. Gey, "Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel". *Surface & Coatings Technology*, vol. 200, pp. 6840-6845, 2006.
- [5] R. M. Souto and H. Alanyalib, "Electrochemical characteristics of steel coated with TiN and TiAlN coatings", *Corrosion Science*, vol. 42, pp. 2201-2211, 2000.
- [6] I. Finnie, "Some reflections on the past and the future of Erosion", *Wear*, Vol. 186-187, pp. 1-10, 1995.
- [7] J. Cano, J. Congote and A. Toro, "Efecto de la velocidad y ángulo de impacto en la resistencia a corrosión-erosión de aceros inoxidable recubiertos con TiN", *DYNA*, vol. 71, No. 144, pp. 49-59, 2004.
- [8] H. Payán, W. Aperador and A. Vargas, "Estudio de la sinergia corrosión-erosión de recubrimientos duros de TiN y CrN obtenidos sobre acero AISI 1045", *Scientia et Technica*, vol. 38, pp.177-180, 2008.
- [9] W. Aperador, J.C. Caicedo, C. España, G. Cabrera and C. Amaya, "Bilayer period effect on corrosion-erosion resistance for [TiN/AlTiN]_n multilayered growth on AISI 1045 steel", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 71, pp. 1754-1759, 2010.
- [10] F. Correa, J. Caicedo, W. Aperador, C.A. Rincón and G. Bejarano, "Mejoramiento de la resistencia a la corrosión del acero AISI 4140 utilizando multicapas de titanio/nitruro de titanio", *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, vol. 46, pp. 7-14, 2008.
- [11] L. Yate, W. Aperador, J.C. Caicedo, F. Espinoza, G. Zambrano and J. Muñoz, "Efecto del Voltaje Bias D.C. en las propiedades electroquímicas de películas delgadas de AlN obtenidas por medio de la técnica magnetron sputtering R. F.". *Revista Colombiana de Física*, vol. 40, pp. 576-578, 2008.
- [12] W. Aperador, C. Ramírez-Martín and J. Bautista Ruiz, "Sinergia entre la corrosión-erosión del acero 1045 recubierto por multicapas de TiN/TiAlN", *Revista Mexicana de Física*, vol. 57, 4, pp. 350-355, 2011.
- [13] D. López, A.P. Tschiptschin and N. Alonso, "Sinergismo erosión-corrosión en un acero inoxidable martensítico AISI 410", *Dyna*, vol. 159, pp. 53-60, 2009.
- [14] ASTM G5, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 2003.
- [15] ASTM G59-04, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 2004.
- [16] ASTM 119(93), West Conshohocken, PA. American Society for Testing and Materials, 2009.