

Evaluación del comportamiento sinérgico de la erosión-corrosión sobre un acero AISI-SAE 1020 en un medio multifásico salmuera-CO₂-arena por técnicas electroquímicas

Evaluation of the synergistic behavior of erosion-corrosion on steel AISI-SAE 1020 in a multiphase flow brine-CO₂-sand by electrochemical techniques

Jesús Machuca, Darío Peña, Humberto Escalante*

Grupo de Investigaciones en Corrosión. Universidad Industrial de Santander, UIS, Apartado Aéreo 678, Bucaramanga, Santander, Colombia

(Recibido el 14 de Septiembre de 2009. Aceptado el 25 de febrero de 2010)

Resumen

La pérdida de peso causada por el fenómeno de erosión-corrosión no es igual a la suma de pérdida de peso de erosión y corrosión cuando los dos procesos actúan separadamente, la sinergia entre los procesos contribuye hasta en un 50%, en algunos casos como lo muestra la presente investigación. Los ensayos se realizaron en una celda de erosión-corrosión donde el sistema dinámico fue controlado por el electrodo de cilindro rotatorio (ECR) a velocidades entre 1.000 y 3.000 rpm, variando el tamaño de partícula de SiO₂ entre 50 µm y 150 µm y su concentración entre 10 y 30% donde se definieron 2 regímenes de erosión-corrosión: a bajas velocidades la contribución de la corrosión es la que controla el fenómeno, y a altas velocidades la erosión controla la degradación del sistema.

----- *Palabras clave:* Erosión-corrosión, fluido multifásico, CO₂ erosión

Abstract

The weight loss caused by the phenomenon of erosion-corrosion is not equal to the amount of weight loss of erosion and corrosion when two processes act separately; the synergy between the processes contributes as much as 50% in some cases as it is shown in this research. The tests were conducted in a

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 7 + 634 40 00 - ext. 2420, fax: + 57 + 7 + 632 04 71, correo electrónico: dypena@uis.edu.co (D. Peña).

cell of erosion-corrosion where the dynamic was controlled by the rotating cylinder electrode at speeds between 1.000 and 3.000 rpm, the particle size of SiO₂ ranging between 50 and 150 μm, and their concentration between 10 and 30% which defined two regimes of erosion-corrosion: at low rotations, the contribution of the corrosion controlled the degradation phenomenon, and at high rotation, the erosion controlled the degradation of the system.

----- *Keywords:* Erosion-corrosion, multiphase system, CO₂ corrosion, erosion

Introducción

La corrosión es un proceso de degradación del material debido a la acción química o electroquímica del medio, mientras que la erosión es un proceso de remoción mecánica acelerada del material como resultado del impacto de sólidos, líquidos, vapores o cualquier combinación de éstos sobre la superficie del material. Cuando estos dos procesos actúan juntos, la degradación del material se conoce como erosión-corrosión [1, 2]. Este fenómeno se caracteriza en su apariencia por la presencia de crestas, ondas, canales, huecos redondeados y generalmente por la existencia de una tendencia direccional [2]. La erosión-corrosión puede producir mayores velocidades de penetración en las paredes de las tuberías que la erosión o la corrosión sola. A bajas velocidades de flujo, la capa de óxido formada por la corrosión por CO₂ sirve de protección, haciendo que la velocidad de corrosión sea baja. A altas velocidades de flujo, las partículas de arena evitan la formación de la capa, ocasionando una alta velocidad de penetración de la pared debido al impacto de las partículas sobre las paredes de la tubería [3]. Por mucho tiempo se ha venido utilizando una guía conocida como el API RP 14E, para estimar la velocidad máxima bajo la cual no se esperaría la erosión [4]: Existe cierta discusión en cuanto a las limitaciones de esta norma, ya que es una relación completamente empírica. La fórmula del API RP-14 se realizó como inicio en la predicción de la erosión-corrosión en flujo multifásico de una tubería de acero al carbono

sin inhibir. Debido a la carencia de modelos alternativos, se ha utilizado para una variedad de sistemas tales como sistemas anticorrosivos, sistemas monofásicos, y aleaciones resistentes a la corrosión.

Ahora, la erosión puede incrementar la velocidad de corrosión debido a la remoción de la película protectora, o la corrosión puede alternadamente inhibir la erosión si la película es lo suficientemente dúctil para adsorber el impacto de las partículas, o mejorar la erosión por la disolución preferencial de algunas fases del material (sinergia) [5]. Es importante conocer cuál es la pérdida de material causada por cada uno de los fenómenos independientes y su incremento por la influencia del otro para poder clarificar cual es el límite de transición del fenómeno combinado. Dichas relaciones indicará si la erosión o corrosión es el proceso de desgaste dominante y suministraría una información útil en la selección de materiales y prevención del fenómeno erosión-corrosión [6].

La velocidad de corrosión puede ser determinada usando métodos electroquímicos, y en presencia de erosión también pueden ser calculada usando los métodos mencionados sin embargo, las velocidades de erosión-corrosión medidas por estos métodos pueden ser inexactos porque requieren medidas de pérdidas de peso en periodos de tiempo muy cortos, y estos métodos pueden ser válidos solamente para sistemas con formación lenta de película y no bajo condiciones de pasivación [7]. La velocidad de erosión-corrosión se puede expresar así:

$$K_{e-c} = K_e + K_c \quad (1)$$

$$K_e = K_{e0} + \Delta K_e \quad (2)$$

$$K_c = K_{c0} + \Delta K_c \quad (3)$$

Donde: K_{e-c} = Velocidad total de erosión corrosión, K_e = Velocidad de erosión total en presencia de corrosión, K_c = Velocidad de corrosión total en presencia de erosión, K_{e0} = Velocidad de erosión en ausencia de corrosión, K_{c0} = Velocidad de corrosión en ausencia de partículas, ΔK_e = es el cambio en la velocidad de erosión afectado por corrosión, ΔK_c = es el cambio en la velocidad de corrosión afectado por erosión. Sustituyendo las ecuaciones 2 y 3 en la 1 se tiene:

$$K_{e-c} = K_{e0} + K_{c0} + \Delta K_c + \Delta K_e \quad (4) \text{ ó}$$

$$K_{e-c} = K_{e0} + \Delta K_{c0} + \Delta K_{e-c} \quad (5)$$

Donde: ΔK_{e-c} = es el efecto sinérgico de erosión en la velocidad de corrosión y corrosión en la velocidad de erosión. Conociendo los valores de velocidad de corrosión y erosión se puede establecer una relación para determinar los regímenes de erosión-corrosión para condiciones acuosas así [6, 8]: $K_c/K_e < 0,1$ es dominada por erosión; $1 \geq K_c/K_e \geq 0,1$ es erosión-corrosión; $10 > K_c/K_e \geq 1$ es corrosión-erosión, y si es $K_c/K_e \geq 10$ es dominada por erosión.

Factores críticos de la Erosión-Corrosión [2]. En la mayoría de los casos, la corrosión desempeña un papel importante de modo que muy pocas veces se presenta erosión pura. Por tal razón es crítico considerar la contribución que hace la corrosión al proceso de deterioro de un material. La velocidad de pérdida de metal dependen de la velocidad y de la concentración del medio (es decir, partículas, líquidos, gotitas, mezclas, flujo bifásico), el tamaño, densidad y la dureza de partículas del medio, la dureza y resistencia a la corrosión del material sujeto a erosión, y el ángulo de impacto. El aumento de dureza del metal no siempre mejora la resistencia a la erosión, especialmente donde la corrosión desempeña un

papel significativo. Para cada combinación de ambiente-material, hay a menudo una velocidad máxima por encima de la cual el impacto de las partículas puede producir pérdida del metal.

El aumento de la corrosividad del ambiente puede reducir la estabilidad de las películas superficiales protectoras y aumentar la susceptibilidad a la pérdida del metal. El metal se puede eliminar de la superficie como iones disueltos, o como productos sólidos de la corrosión que se retiran mecánicamente de la superficie del metal. Los factores que contribuyen a un aumento en la corrosividad del ambiente (temperatura, pH, etc); pueden aumentar la susceptibilidad a la pérdida del metal. La complejidad del proceso de erosión-corrosión además depende de algunos factores como son [5]: (1) material (dureza, elementos aleantes, modulo de elasticidad, microestructura, tratamiento térmico); (2) partículas (velocidad, tamaño, forma, densidad, ángulo de impacto, dureza, modulo elástico); (3) Condiciones de flujo (velocidad, número de Reynolds); (4) ambientes corrosivos (pH, potencial electroquímico, presencia de iones, viscosidad, presión y temperatura). Por consiguiente, la interpretación del comportamiento combinado de erosión-corrosión requiere de un conocimiento detallado de los fenómenos de erosión y corrosión. Si hay un efecto sinérgico, es importante aclarar: si el fenómeno de erosión es afectado por corrosión, el fenómeno de corrosión es afectado por erosión ó es una combinación de ambos.

Experimentación

Se construyó una celda que consta de tres partes principales: el cuerpo, los baffles y el eje. El cuerpo está fabricado de acrílico con capacidad de 200 ml y contiene un acople en la sección media donde se puede articular el electrodo de referencia, en su parte inferior se encuentran dos entradas para el suministro de gas. Los baffles están ubicados en la tapa del cuerpo, donde está el contraelectrodo de platino para protegerlo de las partículas erosivas. La disposición de estos cuatro baffles es concéntrica a lo largo de la celda y su función es garantizar el

flujo turbulento y minimizar el efecto de vórtice producido por el giro de la probeta, además de orientar las partículas hacia el centro donde está ubicada la muestra o probeta de trabajo. El eje está fabricado en acero inoxidable y recubierto con teflón, en el cual se ajusta el espécimen de trabajo. En la base del eje se encuentran una serie de aspas con el propósito de evitar la sedimentación de las partículas de arena durante el ensayo. Este conjunto fue ensamblado y montado en el electrodo de cilindro rotatorio con base en estudios realizados anteriormente [7, 8, 9].

Las muestras de trabajo fueron probetas cilíndricas de acero AISI SAE 102, 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-corrosivo. Se llevó a cabo un tratamiento superficial sobre las muestras con papel de carburo de silicio N° 600, después se lavaron con agua y detergente, se realizó un desengrase con etanol y por último una limpieza en un baño ultrasónico. Se caracterizó el acero en estudio a través de un análisis químico por Espectroscopia de Emisión Óptica – EEO de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E-415, concluyéndose que la muestra se encontraba dentro de las especificaciones para este tipo de acero y se puede considerar como un acero limpio debido al porcentaje mínimo de elementos aleantes los cuales no tienen efecto significativo en la investigación.

La microestructura del acero fue uniforme en toda la sección transversal compuesta principalmente por granos de ferrita y perlita con un tamaño de grano ferrítico N° 8. De acuerdo con la norma ASTM E-112 esta estructura es característica de aceros de bajo contenido de carbono. Sobre la sección transversal de la muestra se realizó la toma de dureza por medio de un medidor de dureza en la escala Rockwell A y Vickers, con 60 Kg. de carga aplicada y punta de diamante. El promedio de la dureza fue de $51,33 \pm 1,437$ Rockwell A, ó 158 en Vickers.

Para la ejecución de las pruebas de laboratorio se realizaron tres soluciones con reactivos de

grado analítico. En las pruebas de erosión pura se empleó una suspensión de partículas de SiO₂ en agua desionizada purgada con nitrógeno con un flujo de 150 ml/min por treinta minutos antes de la inmersión de la muestra para reducir el nivel de corrosividad, según lo especifica la norma ASTM G-59, lográndose una concentración final de oxígeno de 0,1 ppm. El caudal de nitrógeno se mantuvo durante el ensayo. Para las pruebas de corrosión pura, se empleó una solución de NaCl 3% y CO₂ 5% v/v (balance nitrógeno) en agua desionizada. Como en el caso anterior, la solución fue purgada con 150 ml/min de nitrógeno por treinta minutos según ASTM G59, y posteriormente se inyectó el gas con CO₂ durante una hora y durante el tiempo de ensayo. En los ensayos de corrosión asistida por erosión y erosión-corrosión, se empleó una salmuera al 3% de NaCl con partículas de SiO₂ en agua desionizada burbujeada CO₂ 5% v/v (balance nitrógeno) siguiendo el mismo procedimiento anterior.

El tipo de arena utilizada como agente erosivo procede del municipio de Sabana de torres de forma angular con una dureza según la escala de Mohs de 7. La composición química de la arena fue realizada por medio de la técnica Espectroscopia de Absorción Atómica de llama. Los resultados obtenidos garantizaron el empleo de una arena de alta pureza con un 99,651 % de SiO₂. El resto de los contaminantes fueron CaO, Na₂O, K₂O, MgO, Fe₂O₃ y Al₂O₃.

Los ensayos de erosión pura, erosión-corrosión y corrosión asistida por erosión se desarrollaron en el ECR con velocidades de rotación de 1000, 2000 y 3000 rpm; concentración de partículas de arena (%W) 10, 20 y 30 y el tamaño de partícula de 50 y 150 μm. Para la determinación de las pruebas de erosión pura y erosión-corrosión se utilizó la técnica de gravimetría. En la determinación de las velocidades de corrosión y corrosión asistida por erosión se utilizaron las técnicas electroquímicas curvas de Tafel y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Se realizaron pruebas adicionales en el microscopio óptico y análisis SEM para determinar los productos de corrosión generados y el tipo de daño producido.

Resultados y discusión

En los ensayos para la determinación de la velocidad de erosión pura – Keo (Etapa I), pudo observarse que los valores bajos de la concentración del oxígeno menores a 0,1 ppm y de hierro en disuelto menor a 2 ppm, indican que no existe una tendencia a la formación de películas de óxidos de hierro o de algún otro compuesto; condición que se confirmó con un análisis metalográfico que reveló la ausencia de películas de corrosión en la superficie del material. Los resultados totales obtenidos en esta primera etapa, se refieren a las medidas de las velocidades de erosión en ausencia de corrosión del electrodo de acero al carbono AISI SAE 1020 expuesto al fluido, por el método de gravimetría durante 10 horas a 1.000, 2.000 y 3.000 rpm con diferentes tamaños y concentraciones de partículas.

En la figura 1 se muestran los resultados de velocidad de erosión con la variación del tamaño de partícula de 50 y 150 μm y su concentración en la solución de 10 y 30% en peso. Se observa que para el mismo tamaño de partícula se obtienen valores de velocidad de erosión muy cercanos, a las diferentes concentraciones. El aumento en el deterioro por la variación del tamaño de partícula, puede atribuirse al incremento en la energía cinética de las partículas que golpean la superficie debido al aumento de su tamaño. Además se observa que después de transcurridas 6 h, la velocidad de deterioro presenta una tendencia constante, posiblemente debido al impacto constante de las partículas sobre la superficie del acero, haciendo que sus bordes pierdan angularidad y que tomen una forma redondeada, disminuyendo así su capacidad de corte como lo explica Clark en su publicación [10].

En la figura 2 se observa la superficie del material después de la prueba (50 μm -10%-1.000 rpm) donde se evidencia la ausencia de una capa corrosiva. La muestra presenta un mínimo deterioro sobre la superficie del material en el cual sólo se aprecia la formación inicial de algunas colinas y valles característico del proceso erosivo para materiales dúctiles.

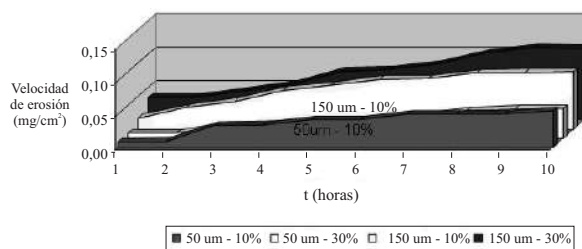


Figura 1 Velocidad de erosión a 1000 rpm con diferentes tamaños de partículas y concentraciones

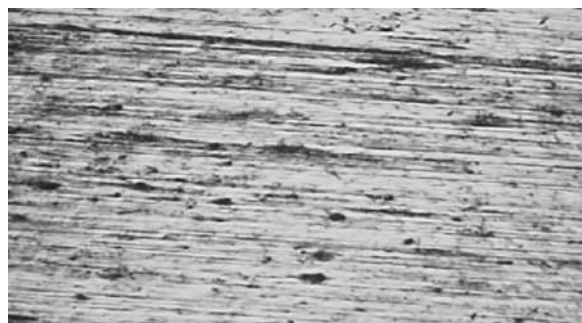


Figura 2 Superficie del acero después del ensayo (10%W, 50 μm , 1.000 rpm)

En los ensayos realizados a 3000 rpm se observa que al aumentar la velocidad de rotación se incrementa las velocidades de deterioro como se puede observar en las escalas del eje de las ordenadas de la figura 3 comparada con la figura 2, lo que quiere decir que la velocidad de erosión es proporcional a la velocidad del fluido multifásico. En la figura 3 se puede observar que, para porcentajes bajos de partículas la velocidad de erosión después de cierto tiempo, se mantiene casi constante y es muy similar al deterioro presentado a altos porcentajes de partículas hasta un tiempo límite (4h), pero para tiempos mayores a éste y altos porcentajes de partículas, hay una mayor velocidad de desgaste, esto puede ser atribuido al hecho de que una mayor cantidad de partículas facilita la remoción de material a pesar de la pérdida de la angularidad en los bordes de las partículas; este fenómeno es más acentuado a altas velocidades [11]. A 3.000 rpm y 150 μm se obtuvo la mayor velocidad de erosión del sistema debido al efecto combinado del tamaño y concentración de partículas.

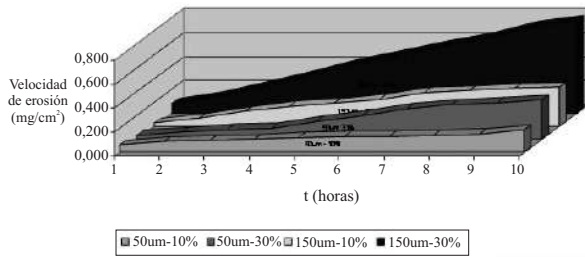


Figura 3 Velocidad de erosión a 3000 rpm con diferentes tamaños de partículas y concentración

A estas condiciones el deterioro del material es mayor, ya que se observan ondulaciones que demuestran que el material fue expuesto a un proceso de desgaste mecánico por partículas abrasivas, esta morfología es típica de materiales dúctiles y concuerda con el mecanismo de daño observado por otro investigador [12], como se muestra en la fotografía de la figura 4 después de diez horas de ensayo. La velocidad de erosión puede ser expresada en gramos por milímetro cuadrado por minuto ($\text{gr}/\text{mm}^2\text{-min}$), así como en miligramos por centímetro cuadrado por hora ($\text{mg}/\text{cm}^2\text{-h}$) definiendo la pérdida de masa del material por las partículas que golpean la superficie en una unidad de tiempo.

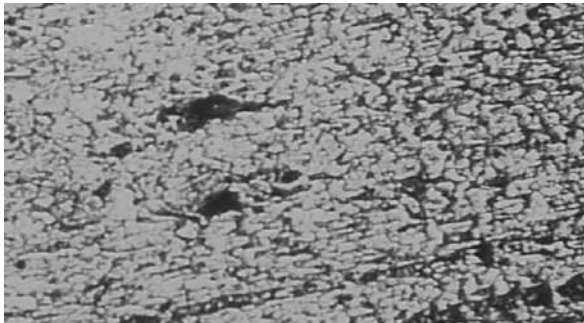


Figura 4 Superficie del acero después del ensayo (30 % W, 150 μm , 3.000 rpm)

De los valores de las velocidades de erosión a 10 horas de exposición se deduce que a velocidades bajas, la concentración de partículas no tiene un efecto marcado, contrario a lo que ocurre a velocidades altas.

En los ensayos para la determinación de la velocidad de corrosión en ausencia de erosión

(corrosión pura – K_{co} – Etapa II), se observa una tendencia a la formación de películas de óxidos de hierro diferentes a los producida por la acción del flujo multifásico, que se comprueba por las curvas Tafel y los diagramas de Nyquist. Las velocidades de corrosión fueron determinadas con base en la norma ASTM G-102, empleándose un electrodo de Ag/AgCl como referencia.

En las curvas Tafel de la figura 5 se puede observar que al aumentar la velocidad de rotación, se aumenta la velocidad de corrosión debido al desplazamiento de las curvas hacia la derecha a medida que aumenta la velocidad del sistema indicando un aumento en la corriente de corrosión. Un análisis de la curva muestra que la etapa controlante en este sistema es la difusión debido a que la corriente catódica se acerca a la corriente límite de difusión, además se observa que la pendiente catódica se desplaza a la derecha a medida que aumenta la velocidad de rotación, esto se debe a la presencia de mas especies en el seno de la solución como HCO_3 y HCO_2 .

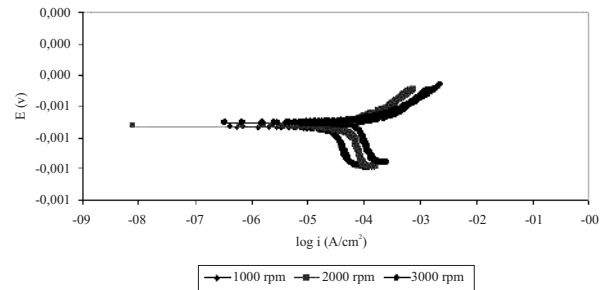


Figura 5 Curvas Tafel a diferentes velocidades de rotación

Los resultados con EIS se muestran la figura 6, donde se observa un aumento en la resistencia a la polarización a medida que disminuye la velocidad de rotación. El comportamiento de la resistencia a la polarización es muy similar a los calculados por la técnica de corriente directa.

Los diagramas de Nyquist muestran semicírculos capacitivos a altas frecuencias, y la tendencia de arcos inductivos en la parte inferior a más bajas frecuencias. El semicírculo capacitivo muestra la influencia de las propiedades dieléctricas de

la doble capa electroquímica. El arco inductivo puede ser explicado por la disminución de la concentración en la superficie de una especie intermedia adsorbida involucrada en el mecanismo de disolución posiblemente por la adsorción de ácido carbónico sobre el sustrato metálico [13]. Este comportamiento se presenta en todas las pruebas de corrosión por CO₂ realizadas en el presente trabajo. Las velocidades de corrosión para 1.000 rpm fue de 0,0044, para 2.000 de 0,0088 y para 3.000 de 0,0133 mg/cm²h.

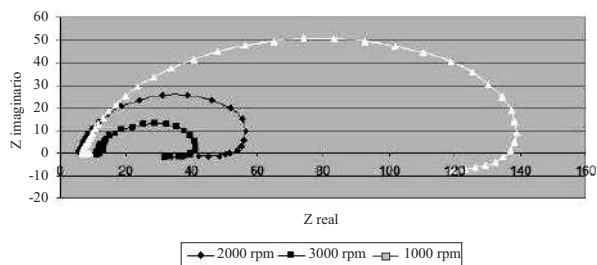


Figura 6 Diagramas de Nyquist a diferentes velocidades de rotación

Resultados de la Etapa III: Velocidad de corrosión total en presencia de erosión – Kc. En cuanto a la determinación de la velocidad de corrosión evaluada a 1000 rpm en presencia de erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula se observa en la figura 7(a) que la mayor resistencia a la polarización (Rp) corresponde a las obtenidas con un tamaño de partícula de 50 µm, y por ende equivale a bajas velocidades de corrosión.

En estos diagramas se observa la formación de un segundo semicírculo o lazo inductivo a bajas frecuencias mostrado de igual forma en la segunda etapa de experimentación debido a la acción del CO₂ en el sistema. Nuevamente se puede observar que a velocidades bajas (1.000 rpm) la concentración de partículas no tiene un efecto tan marcado en el fenómeno de corrosión, así como sucede en el fenómeno erosivo a 1.000 rpm; y el efecto del tamaño de partículas en la velocidad de corrosión,

presenta el mismo comportamiento estudiado en la etapa 1 de la experimentación. En la figura 7 (b) se muestran las curvas Tafel donde se puede observar una corriente límite que indica que la etapa controlante de la corrosión es la transferencia de masa, debido a que la corriente catódica se acerca a la corriente límite de difusión; para 150 micras se observa la mayor densidad de corriente. En cuanto a las pendientes anódicas no se observó una variación significativa en sus pendientes al cambiar la concentración de partículas.

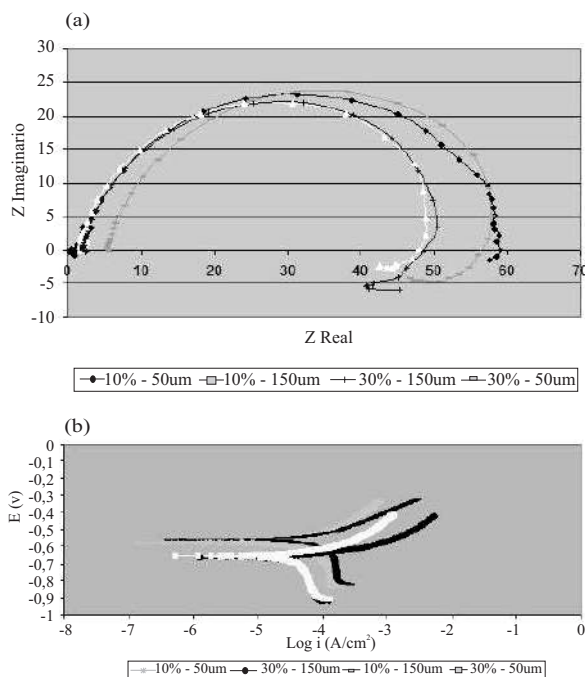


Figura 7 (a) Diagramas de Nyquist a 1.000 rpm. (b) Curvas Tafel a 1.000 rpm

A bajas velocidades de rotación el efecto de la concentración de partículas es mínimo, comportamiento similar al registrado en las pruebas de erosión pura. Con los valores de las pendientes anódicas, el de la constante de Stern Geary ($B = \beta_a / 2.3$) y los valores calculados de Rp, se definen los valores de la corriente de corrosión (Icorr) que se listan en la tabla 1.

Tabla 1 Velocidad de corrosión del sistema CO₂-Salmuera-Arena a 1.000 rpm

Condiciones	Rp (Ω.cm ²)	Rtc (Ω.cm ²)	i _{corros} (μA/cm ²)	Velocidad de corrosión mg/cm ² -h
1.000 rpm, 50 μm, 10% W	703	661	39,00	0,0114
1.000 rpm, 50 μm, 30% W	645	576	45,54	0,0134
1.000 rpm, 150 μm, 10% W	376	364	65,24	0,0191
1.000 rpm, 150 μm, 30% W	393	396	62,58	0,0184

Al analizar los diagramas de Nyquist de la figura 8 (a), para una velocidad de rotación de 3.000 rpm, al igual que en los demás sistemas, se observa la presencia de lazos inductivos posiblemente debido a la absorción de especies intermedias involucradas en el mecanismo de disolución ó debido a la topografía y defectos de la superficie del acero expuesto a las partículas. Estos diagramas no muestran semicírculos perfectos, se observa una forma ovalada sobre el eje real principalmente a bajas frecuencias, debido a las perturbaciones en la superficie ocasionadas por la arena [14]. Las curvas Tafel (figura 8 (b)) a una velocidad de rotación de 3.000, evidencian una corriente límite en el sistema que indica que el proceso está controlado por difusión o transferencia de masa, también se observa un desplazamiento hacia la derecha de las curvas Tafel que tienen un porcentaje mayor de partículas, donde la mayor densidad de corriente fue para el ensayo con 150 micras con una concentración de 30%, indicando la condición más agresiva con la mayor velocidad de deterioro en todo el sistema, como se indica en los resultados de la tabla 2.

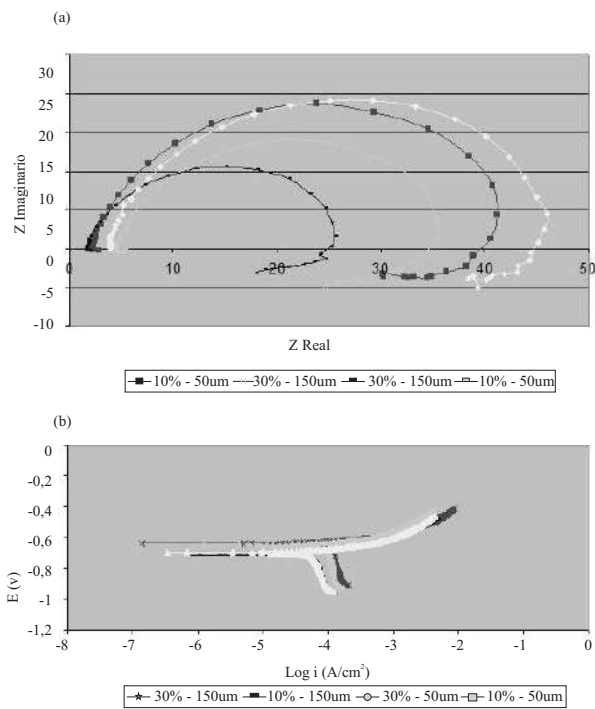


Figura 8 (a) Diagrama de Nyquist para 3.000 rpm. (b) Curvas de Tafel a una velocidad de rotación de 3.000 rpm

Tabla 2 Velocidad de corrosión del sistema CO₂-Salmuera-Arena a 3.000 rpm

Condiciones	Rp (Ω.cm ²)	Rtc (Ω.cm ²)	i _{corros} (μA/cm ²)	Velocidad de corrosión mg/cm ² -h
3.000 rpm, 50 μm, 10% W	430	367	60,69	0,0178
3.000 rpm, 50 μm, 30% W	376	267	79,22	0,0233
3.000 rpm, 150 μm, 10% W	433	399	63,52	0,0186
3.000 rpm, 150 μm, 30% W	331	228	83,96	0,0246

Los resultados correspondientes a la etapa IV: Velocidad de erosión – corrosión total – Ke-c se refieren a las medidas de las velocidades de erosión-corrosión total del electrodo de acero al carbono 1020, por el método de gravimetría realizada según la norma ASTM G1, a diferentes velocidades de rotación con un tiempo promedio para cada una de los ensayos de seis horas. En la determinación de la velocidad de erosión-corrosión a 1.000 y 3.000 rpm con tamaño de partícula de 50 y 150 µm y concentraciones de porcentaje de partículas entre 10 y 30% en peso, se observó que a velocidades bajas y a 150 µm (0,03121 mg/cm²-h), la concentración de partículas no tiene un efecto significativo en el sistema.

Cálculo del efecto sinérgico del sistema salmuera – CO₂ – arena

Para realizar el cálculo del efecto sinérgico se utilizó la ecuación 5 y para conocer el efecto de cada uno de los factores se usaron las ecuaciones 3 y 4. En las etapas realizadas anteriormente se obtuvo información de los valores de Keo, Kco, Kc y Ke-c y la velocidad de erosión en presencia de corrosión, se puede deducir reemplazando en la ecuación 2. Los cálculos de cada uno de los componentes de la velocidad de erosión-corrosión se muestran en la tabla 3, de cuyos datos se pueden extraer las relaciones que indican cual es el fenómeno predominante en el sistema.

Tabla 3 Componentes de la velocidad de erosión-corrosión total

Condiciones	Keo	Kco	Kc	Ke-c	Ke	ΔKc	ΔKe	ΔKe-c
1.000 rpm, 50 µm, 10%W	0,058	0,0044	0,0114	0,01892	0,00752	0,007	0,00172	0,00872
1.000 rpm, 50 µm, 30%W	0,0052	0,0044	0,0134	0,02027	0,00687	0,009	0,00167	0,01067
1.000 rpm, 150 µm, 10%W	0,0093	0,0044	0,0191	0,03121	0,01211	0,015	0,00281	0,01751
1.000 rpm, 150 µm, 30%W	0,0116	0,0044	0,0184	0,03261	0,01421	0,014	0,00261	0,01661
2.000 rpm, 100 µm, 20%W	0,0346	0,0088	0,0209	0,05881	0,03791	0,012	0,00331	0,01541
2.000 rpm, 100 µm, 20%W	0,0325	0,0088	0,0215	0,05886	0,03736	0,013	0,00486	0,01756
3.000 rpm, 50 µm, 10%W	0,0222	0,0133	0,0178	0,04408	0,02628	0,005	0,00408	0,00858
3.000 rpm, 50 µm, 30%W	0,0324	0,0133	0,0233	0,06015	0,03685	0,010	0,00445	0,01445
3.000 rpm, 150 µm, 10%W	0,0368	0,0133	0,0186	0,06038	0,04178	0,005	0,00498	0,01028
3.000 rpm, 150 µm, 30%W	0,0780	0,0133	0,0246	0,11180	0,08720	0,011	0,00920	0,02050

Se puede observar que la erosión-corrosión es la sinergia del fenómeno tiene una gran contribución al deterioro del material. (Ke-c = Keo + Kco + ΔKe-c). Se analizó cada una de las relaciones para determinar cuál es el fenómeno que tiene una contribución mayor; los resultados se pueden observar en la tabla 4.

De acuerdo con la tabla 4, comparando los dos fenómenos, de manera independiente, se

encuentra que la erosión “pura” es más agresiva que la corrosión “pura”, a las mismas velocidades; inclusive hasta en un 400%. Al analizar la erosión y corrosión total se encuentra que ambas tienen la misma influencia en el mecanismo de daño, un mecanismo relacionado con las altas velocidades del sistema el cual es gobernado por la erosión-corrosión, y uno a bajas velocidades, regido por corrosión erosión.

Tabla 4 Relación de las diferentes velocidades de deterioro

Condiciones	K_c/K_e	K_{co}/K_{eo}	K_e/K_{e-c}	K_c/K_{e-c}	$\Delta K_e/K_e$	$\Delta K_c/K_c$	$\Delta K_{e-c}/K_{e-c}$
1.000 rpm, 50 μ m, 10%W	1,52	1,32	0,40	0,60	0,23	0,61	0,46
1.000 rpm, 50 μ m, 30%W	1,95	1,18	0,34	0,66	0,24	0,67	0,53
1.000 rpm, 150 μ m, 10%W	1,58	2,11	0,39	0,61	0,23	0,79	0,56
1.000 rpm, 150 μ m, 30%W	1,29	2,64	0,44	0,56	0,18	0,76	0,51
2.000 rpm, 100 μ m, 20%W	0,55	3,93	0,64	0,36	0,09	0,57	0,26
2.000 rpm, 100 μ m, 20%W	0,58	3,69	0,63	0,37	0,13	0,60	0,30
3.000 rpm, 50 μ m, 10%W	0,68	1,67	0,60	0,40	0,16	0,28	0,19
3.000 rpm, 50 μ m, 30%W	0,63	2,44	0,61	0,39	0,12	0,43	0,24
3.000 rpm, 150 μ m, 10%W	0,45	2,77	0,69	0,31	0,12	0,27	0,17
3.000 rpm, 150 μ m, 30%W	0,28	5,86	0,78	0,22	0,11	0,45	0,18

En la velocidad de erosión total (K_e) el efecto de la corrosión (ΔK_e) es menor al 15% en la mayoría de los casos, y el mayor aporte lo realiza el K_{eo} . Para la velocidad de corrosión total (K_c), el efecto de la erosión en la velocidad de corrosión (ΔK_c), es superior al 50%. La contribución del efecto sinérgico total (ΔK_{e-c}) sobre el deterioro total (K_{e-c}) es del 50% en promedio para velocidades bajas, y del 20% en promedio, para velocidades mayores de rotación.

Comparando la tabla 4 y las micrografías obtenidas (figuras 9 y 10), se puede decir que el mecanismo propuesto de daño para el acero y las condiciones utilizadas es el siguiente: a bajas velocidades se tiene que el régimen que predomina es corrosión-erosión, que es una corrosión asistida por erosión, es por eso que en este rango la concentración de partículas no tiene gran influencia como si ocurre a altas velocidades; donde el régimen predominante es erosión-corrosión, y la característica del fenómeno erosivo tiene una gran importancia.

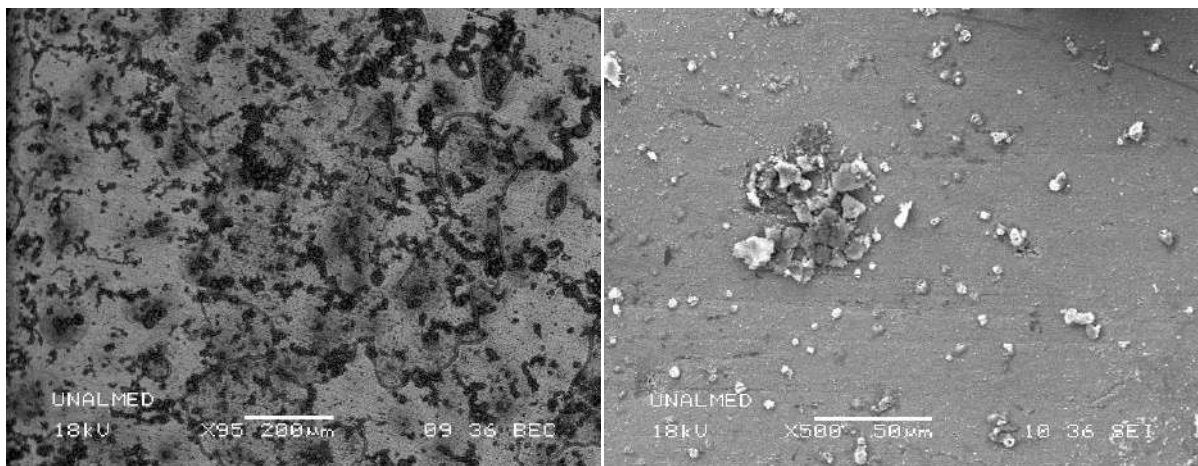


Figura 9 (a) y (b) Micrografías que muestran el fenómeno de corrosión en ausencia de erosión 100X y 200X

En las micrografía de la figura 9(a) se describe el proceso de corrosión en ausencia de erosión y se observa las capas de siderita distribuidas en la superficie del material (compuesto formado según la termodinámica para las condiciones del ensayo), cuando se adiciona partículas erosivas esta capas se forman de manera discontinua o dispersa ya que las partículas destruyen e inhiben la formación de las mismas como se puede observar en las micrografías de la figura 9(b), en donde el régimen está dado por corrosión-erosión a bajas velocidades de rotación.

A altas velocidades de rotación y con partículas erosivas se puede observar un deterioro mayor dado por el régimen de erosión-corrosión, en donde se aprecian las zonas del desgaste producido por el fenómeno corrosivo, tal como se muestra en las micrografías de la figura 10. Además se observa la formación de una película de siderita constantemente destruida por los impactos de las partículas sobre la superficie expuesta por el fenómeno de erosión.

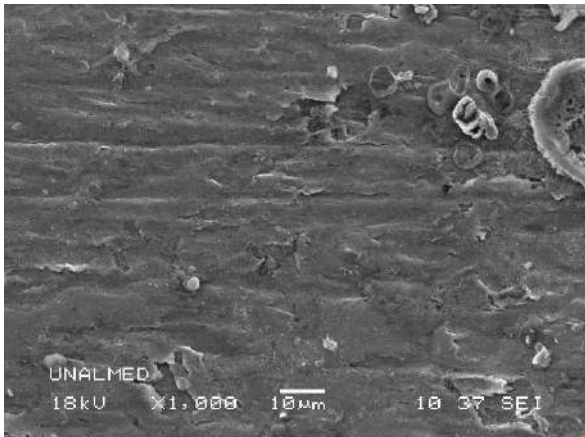


Figura 10 Micrografía que muestra el fenómeno de erosión-corrosión a altas velocidades de rotación. 200X

Conclusiones

En el sistema de estudio con adición de diferentes porcentajes de arena, la velocidad de deterioro del acero AISI SAE 1020, está influenciada principalmente por la velocidad de rotación

del fluido, y con una contribución menor por el tamaño de partícula y porcentaje de la misma.

La velocidad del fluido y el choque de las partículas contra la superficie del acero remueven la capa de siderita formada a estas condiciones, dejando la superficie del acero nuevamente expuesta al ambiente corrosivo, de modo que la velocidad de corrosión aumenta con respecto al sistema sin partículas. La concentración de partículas, en el rango utilizado, no presentó un efecto considerable en la velocidad de deterioro a velocidades bajas

Se determinó la combinación de dos regímenes erosivos-corrosivos para este sistema; uno a bajas velocidades en las cuales el deterioro es causado principalmente por corrosión-erosión, y otro a velocidades mayores, que se presenta un régimen de erosión-corrosión. El fenómeno de erosión-corrosión no es aditivo donde cada uno de los fenómenos individuales, contribuyen al daño superficial, y la sinergia del fenómeno tiene una gran contribución al deterioro del material.

Referencias

1. M. Ramakrishna, S. Nestic, D. Gulino. "Erosion Corrosion And Synergistic Effects In Disturbed Liquid-Particle Flow". *Corrosion NACEExpo*. Paper 06594. San Diego (CA). 2006. pp. 1-20.
2. API RP 571. "Damage Mechanisms Affecting fixed Equipment in the Refining Industry". *American Petroleum Institute*. Washington. 2003. pp. 30-53.
3. J. R. Shadjei, S. A. Shirazi, E. Dayalan, A.E.F. Rybicki. "Prediction erosion-corrosion penetration rate in a carbon dioxide environment with sand". *Corrosion Science*. Vol. 54. 1998. pp. 4-73.
4. M. Vera, N. Ragua. "Efecto de la concentración de partículas erosivas en la corrosión de un acero AISI-SAE 1020 en un sistema salmuera-CO₂-arena". *Trabajo de Grado Ingeniería Metalúrgica*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2007. pp. 21-58.
5. M. Stack, N. Corlett, S. Turgoose. "Some thoughts on modeling the effects of oxygen and a Particle concentration on the erosion-corrosion of steels in aqueous slurries". *Wear*. N.º. 255. 2003. pp. 225-236.

6. B. Jana, M. Stack. "Modeling impact angle affects on erosion-corrosion of pure metals: construction of materials performance maps". *Wear*. N°. 259. 2005. pp. 243-255
7. S. Zhou, M. M. Stack, R. C. Newman. "Characterization of synergistic effects between erosion and corrosion in an aqueous environment using electrochemical techniques". *Corrosion Science*. Vol 52. 1996. pp. 934-946.
8. D. He, X. Jiang, S. Li. "Erosion-corrosion of stainless steels in aqueous slurries – a quantitative estimation of synergistic effects". *Corrosion Science*. Vol. 61. 2005. pp 30-36.
9. M. M. Stack, J. S. James, Q. Lu. "Erosion-corrosion of chromium steel in a rotating cylinder electrode system: some comments of particle size effects". *Wear*. Vol. 256. 2004. pp. 557-564.
10. H. Clark. "A comparison of the erosion resistance of casing steels by sand-oil suspensions". *Wear*. Vol. 150. 1991. pp. 217-230.
11. H. Clark. "Particle Velocity and Size Effects in Laboratory Slurry Erosion Measurements or...do you know what your particles are doing". *Tribology International*. Vol. 35. 2002. pp. 617- 624.
12. A. Levy. "The Platelet Mechanism of Erosion of Ductile Metals". *Wear*. Vol. 108. 1986. pp. 1-21.
13. S. Nestic, B. Brown. "CO₂/H₂S corrosion under scale forming conditions". *Corrosion NACE International*. Paper No. 05625. Houston. 2005. pp. 1-29.
14. R. Cottis, S. Turgoose. *Electrochemical Impedance and Noise*. Ed. B. C. Syrett. NACE international. Houston. (USA). 1999. pp 1-48.