

## RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO-CORROSIVO DE ACEROS AUSTENÍTICOS FERMANAL

WILLIAN APERADOR\*  
JORGE HERNANDO BAUTISTA\*\*  
JUAN DAVID BETANCUR\*\*\*

### RESUMEN

Se obtuvieron aleaciones austeníticas del sistema Fe-Mn-Al, en el intervalo Fe-(4,9~11,0 wt% de Al)-(17,49~34,3 wt% de Mn)-(0,43~1,25 wt% de C), las cuales fueron fundidas en un horno de inducción a partir de materiales de alta pureza. Las aleaciones se evaluaron con respecto a fenómenos de corrosión, erosión en medio húmedo y corrosión-erosión, a un ángulo de impacto de 90°. Para la evaluación de la corrosión se empleó una solución compuesta por 0,5 M de NaCl y partículas de sílice con tamaño entre 210 y 300  $\mu\text{m}$ , con el fin de analizar el efecto del contenido de manganeso y aluminio en la resistencia a la erosión y a la corrosión-erosión de estas aleaciones. Para la caracterización de la respuesta corrosiva se usó la técnica con curvas de polarización potenciodinámicas y la extrapolación de Tafel, la caracterización microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y los productos de corrosión a través de difracción de rayos X (DRX).

PALABRAS CLAVE: corrosión; erosión en medio húmedo; corrosión-erosión; sinergia; fermanal.

---

\* Físico y Magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Doctor en Ingeniería, Universidad del Valle. Profesor Asistente, Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. [g.ing.materiales@gmail.com](mailto:g.ing.materiales@gmail.com)

\*\* Licenciado en Física y Matemáticas y Magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Profesor Asistente, Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia. [jorgebautista@ufps.edu.co](mailto:jorgebautista@ufps.edu.co)

\*\*\* Físico y Magíster en Física, Universidad de Antioquia; Doctor en Física, Universidad del Valle. Líder de Incorporación de Tecnologías de Integridad. Programa de Integridad VIT, SNC-Lavalin Itansuca Proyectos de Ingeniería S. A. Bogotá, Colombia. [juan.betancur@ecopetrol.com.co](mailto:juan.betancur@ecopetrol.com.co)

## EROSIVE-CORROSIVE WEAR RESISTANCE OF FERMANAL AUSTENITIC STEELS

### ABSTRACT

We obtained austenitic alloys of the Fe-Mn-Al, Fe in the range (4.9~11.0 wt% Al) - (17.49~34.3 wt% Mn) - (0, 43 ~ 1.25 wt% C), which were melted in an induction furnace from high purity materials. The alloys were evaluated with respect to corrosion, wet erosion and corrosion-erosion at an impact angle of 90°. For the evaluation of corrosion a solution composed of 0.5 M NaCl and silica particles with size between 210 to 300 microns was used in order to analyze the effect of aluminum and manganese content in the resistance to erosion and corrosion-erosion of these alloys. To characterize the corrosion, response technique was used by potentiodynamic polarization curves and using the same technique as Tafel extrapolation, the microstructural characterization by scanning electron microscopy (SEM), and the composition of corrosion products were analyzed using diffraction of X-rays (XRD).

KEY WORDS: corrosion; wet erosion; corrosion-erosion; synergy; fermanal.

## RESISTÊNCIA AO DESGASTE EROSIVO-CORROSIVO DE AÇOS AUSTENÍTICOS FERMANAL

### RESUMO

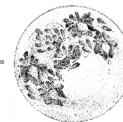
Obtiveram-se ligas austeníticas do sistema Fe-Mn-Al, no intervalo Fe-(4,9 ~ 11.0 wt% de Al)-(17,49 ~ 34.3 wt% de Mn)-(0, 43 ~ 1.25 wt% de C), as quais foram fundidas em um forno de indução a partir de materiais de alta pureza. As ligas avaliaram-se com respeito a fenômenos de corrosão, erosão em médio úmido e corrosão-erosão, a um ângulo de impacto de 90°. Para a avaliação da corrosão empregou-se uma solução composta por 0,5 M de NaCl e partículas de sílice com tamanho entre 210 e 300  $\mu\text{m}$ , com o fim de analisar o efeito do conteúdo de manganês e alumínio na resistência à erosão e à corrosão-erosão destas ligas. Para a caracterização da resposta corrosiva usou-se a técnica com curvas de polarização potenciodinâmicas, a extrapolação de Tafel, a caracterização microestrutural mediante microscopia eletrônica de varredura (MEV) e os produtos de corrosão através de difração de raios X (DRX).

PALAVRAS-CÓDIGO: corrosão; erosão em médio úmido; corrosão-erosão; sinergia; fermanal.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones conocidas como Fe-Mn-Al han tenido en los últimos años enorme interés, principalmente desde el punto de vista tecnológico, por su gran similitud con los aceros inoxidable convencionales, producidos con base en la aleación ternaria Fe-Ni-Cr. En estos aceros, el cromo estabiliza la fase ferrítica y le da el carácter inoxidable al producir una capa superficial muy fina de óxido de cromo, que protege el acero de futura oxidación, ya que es una película pasivante (Bialoń *et al.*, 1983; Tjong, 1990,

y Aperador, Vargas y Betancur, 2012). Este mismo papel lo desempeña el aluminio en las diferentes aleaciones tipo FeMnAl. El níquel estabiliza la fase austenítica, la cual tiene mejores propiedades mecánicas que los aceros que contienen FeCr. La misma función la cumple el manganeso en diferentes aleaciones fermanal (Pérez Alcázar, 2004; Lins, Freitas y Silva, 2005). Una ventaja de los aceros a base de Fe-Mn-Al, en relación con los aceros convencionales, es que tienen menor costo y peso y, además, presentan excelentes propiedades mecánicas y buena resistencia a la oxidación (Wang y Chang, 2005). Este



tipo de características los hace aptos para diversas aplicaciones, desde biomédicas hasta la fabricación de recipientes para el manejo de sustancias a temperaturas criogénicas (Zhang *et al.*, 2002).

En la mayor parte de los procesos industriales interviene el contacto con fluidos de diferente naturaleza. Es así como las piezas expuestas a la acción de estos pueden presentar procesos de corrosión por erosión, lo que disminuye de manera acelerada su vida útil. La corrosión por erosión implica el aumento en la velocidad de corrosión de un metal, debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo en contacto con la superficie metálica (Meng, Xu y Neville, 2007; Niu y Cheng, 2008). Si además el fluido contiene partículas sólidas en suspensión, se tiende a incrementar el efecto erosivo, lo que causa deterioro del metal (Aperador, Ramírez-Martín y Bautista, 2011).

Por ejemplo, las motobombas son dispositivos relevantes en el transporte y movimiento de fluidos en diferentes procesos productivos (pomadas, jarabes, champús, alimentos, minerales, etc.), debido a su capacidad de producir vacío y permitir que se empuje el fluido hacia donde se desee transportar. Las motobombas centrífugas, en general, 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 álabes dentro de una carcasa. A pesar del correcto diseño de estos dispositivos, es inevitable en estas bombas la actuación de desgaste, tanto erosivo como corrosivo, que impide un adecuado funcionamiento y causa daños catastróficos a los componentes. Estos inconvenientes conllevan altos costos económicos en mantenimiento y tiempos muertos de producción (Finnie, 1995). Por ejemplo, en Colombia, la industria manufacturera emplea herramientas o dispositivos como las motobombas, que se desgastan y corroyen rápido debido a las condiciones de operación. Para evitar el pronto deterioro de estos componentes, se ha optado por fabricar sus partes con una amplia

gama de materiales como aceros inoxidables, níquel, caucho e incluso se han usado recubrimientos duros (Cano, Congote y Toro, 2004; Correa *et al.*, 2008; Aperador *et al.*, 2010). Sin embargo, es de gran importancia evaluar los nuevos materiales metálicos, en particular los aceros ferrosos. A pesar de las importantes investigaciones desarrolladas, aún no se encuentra en la literatura información suficiente que incluya los mecanismos de corrosión y erosión y su comportamiento en diferentes medios agresivos de dicha serie de aleaciones, mientras que sí se ha probado con amplitud en condiciones de corrosión bajo tensión y oxidación a alta temperatura (Tjong, 1990; Zhang *et al.*, 2002).

El propósito de esta investigación fue evaluar la naturaleza electroquímica de aleaciones Fe-Mn-Al, con el fin de analizar su respuesta química, en medios agresivos, además de evaluar el fenómeno de erosión y el sinergismo corrosión-erosión. El estudio permitió recopilar información suficiente del manganeso y el aluminio, con el objetivo de determinar su influencia como elementos aleantes en las aleaciones ferrosas.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

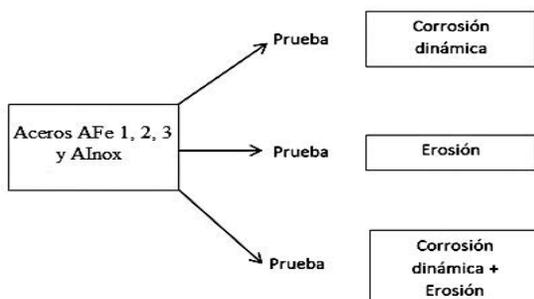
La composición química de las aleaciones empleadas en esta investigación y obtenidas mediante análisis químico por espectrometría de emisión óptica (o de chispa) se registra en la tabla 1. Estas aleaciones fueron preparadas a partir de materiales de alta pureza en un horno de inducción. Debido a que la materia prima se proporcionó en bloques, fue necesario aplicar un proceso de laminado, con el fin de obtener el material con espesor de 2,5 mm. El área de las probetas fue de 1 cm<sup>2</sup>. Las muestras, con las dimensiones ya especificadas, se llevaron a un proceso de homogeneización a 1100 °C por una hora en un horno tubular con flujo de argón. Este proceso buscó aliviar de tensiones internas del material que pueden presentarse en el proceso de laminación.

Para el desarrollo del estudio, las muestras así obtenidas se llevaron a un proceso de limpieza ultrasónica e inmersión en acetona. Por fin, se seccionaron con aire caliente. A modo de comparación, se utilizaron muestras de acero inoxidable austenítico AISI 316, ya que este acero es el empleado en la construcción de componentes de bombas.

**Tabla 1.** Composición química de las aleaciones.

Elemento	Identificación de las muestras			
	(AFe3)	(AFe2)	(AFe1)	(A Inox)
Ni	0,039	0,022	0,026	12,0
Al	4,9	6,13	11,0	--
Mn	17,49	28,21	34,3	2,0
C	0,43	0,49	1,25	0,08
Cr	6,68	6,17	6,69	17,0
Si	0,079	0,412	0,538	1,0
Mo	0,045	0,045	1,096	2,5
P	0,019	0,020	0,046	--
Nb	0,005	0,0041	0,097	--
V	0,009	0,028	0,073	--
Sn	0,015	0,014	0,021	--
Fe	Balance	Balance	Balance	Balance

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

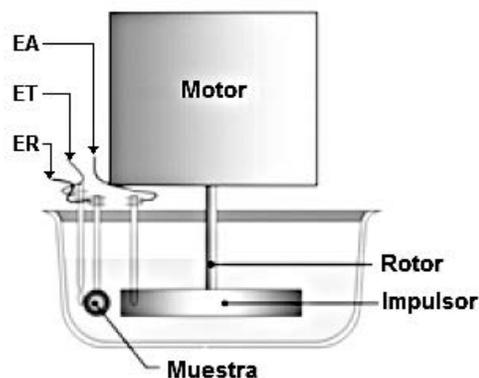


**Figura 1.** Metodología utilizada para evaluar la resistencia a la corrosión dinámica, la erosión y la corrosión-erosión de los aceros fermanal 1, 2, 3 y acero inoxidable 316L.

## 2.2 Métodos y equipos

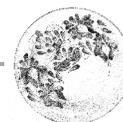
En cuanto a la evaluación de la resistencia a la corrosión-erosión, se empleó un equipo tipo cilindro rotatorio (figura 2) que consta de un recipiente de vidrio que contiene la solución (0,5 M de NaCl preparada con agua destilada, y partículas de sílice con tamaño entre  $210 \mu\text{m}$  y  $300 \mu\text{m}$  y proporción del 20 %wt con respecto al medio), una tapa de acrílico, donde se disponen el electrodo de referencia ER de Ag/AgCl, el contraelectrodo EA de platino y la muestra por analizar como electrodo de trabajo ET. La orientación entre la superficie de la muestra y la línea de impacto del fluido fue de  $90^\circ$ .

Adicionalmente, el equipo consta de un impulsor de UHMWPE (polietileno de ultraalto peso molecular) ajustado al eje del motor que genera el movimiento de la solución y el impacto sobre la muestra (figura 2) (Aperador *et al.*, 2010; Aperador, Ramírez-Martín y Bautista, 2011; Aperador, Vargas y Betancur, 2012). La velocidad de giro fue de 1930 rpm, proporcionando a las partículas una velocidad lineal máxima de  $11,12 \text{ m s}^{-1}$ .



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

En la evaluación de la resistencia a la corrosión dinámica y corrosión-erosión se utilizó un potencióstato-galvanostato de marca Gamry, modelo PCI-4, usando la técnica de curvas potenciodinámicas-extrapolación de Tafel, en forma dinámica con



velocidad de barrido de 0,125 mV/s en intervalo de potencial de -0,25V a 0,75V y área de 1 cm<sup>2</sup>. El comportamiento electroquímico fue evaluado después de 45 minutos, tiempo necesario para la estabilización del potencial de circuito abierto. La norma aplicada en los criterios de medición y cálculos fue la ASTM G5-94.

Para evaluar el fenómeno erosivo se aplicó protección catódica de 1 V con respecto al potencial de circuito abierto del acero y el recubrimiento, respectivamente, de acuerdo con la norma ASTM G 119-09. Esta protección catódica garantizó el daño superficial sólo por efecto de las partículas erosivas. Las muestras fueron sometidas a desgaste por erosión durante un tiempo total de exposición de 240 minutos (acorde al ensayo de las curvas potenciodinámicas), a una temperatura de 25 °C. Con el propósito de determinar la pérdida de peso debida a la erosión durante la inmersión en la solución de trabajo, las muestras se retiraron de la solución con intervalos de 15 minutos, se limpiaron con agua, se secaron con aire caliente y se evaluaron en una balanza con precisión de 0,1 mg.

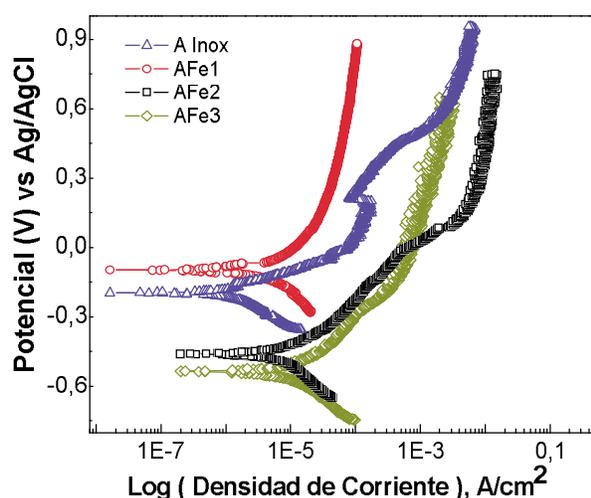
La técnica de microscopía electrónica de barrido con resolución de 1 nm a 30 kV permitió el estudio microestructural. La identificación de los productos de corrosión generados en la superficie de los aceros se hizo mediante difracción de rayos X (DRX). El arreglo experimental en DRX corresponde a goniómetro PW3050/60 ( $\theta/\theta$ ), manejado bajo un sistema X'Pert-PRO usando una radiación monocromática de Cu K $\alpha$  = 1,54 Å, operado a 40 kV y 40 mA con temperatura a 25 °C. El barrido sobre la superficie fue realizado desde  $2\theta = 20,01^\circ$  hasta  $2\theta = 99,99^\circ$  con un paso  $2\theta = 0,02^\circ$  a un tiempo de barrido de un segundo.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Corrosión dinámica

En la figura 3 se observa el efecto de las variaciones en el sistema electroquímico sobre el compor-

tamiento del material con respecto a las diferentes zonas de la curva de polarización. En primer lugar, es posible diferenciar la acción del medio corrosivo a partir del tipo de polarización predominante que se presenta en cada acero, ya que brinda una aproximación a la clase de mecanismo superficial que actúa en cada caso. En medio salino se observa, desde el tramo anódico, un tipo de polarización por transferencia de carga; por lo tanto, una vez atravesada la barrera de potencial, se dará inicio al proceso corrosivo de tipo generalizado.



**Figura 3.** Curvas potenciodinámicas del comportamiento frente a corrosión dinámica de los aceros inoxidable y fermanal en una solución 0,5 M de NaCl

Del estudio se obtuvo que el acero inoxidable AISI 316L muestra un amplio desplazamiento hacia menores densidades de corriente de corrosión, lo que indica menor susceptibilidad a la corrosión en la solución analizada. Dicho comportamiento es atribuible al grado de protección de este tipo de material, lo cual puede generar trayectorias de mayor resistencia para el paso del ion cloruro. Un comportamiento análogo es observado para la aleación AF1, ya que sus valores de densidad y velocidad de corrosión son equivalentes al acero inoxidable. El desplazamiento de las curvas potenciodinámicas hacia potenciales negativos, conforme disminuyen los elementos aleantes

principales (Mo, Mn, Al, Cr), radica en la naturaleza de la formación de la capa de protección (capa pasiva), la cual actúa como punto de dispersión, dificultando la migración del ion cloruro desde la superficie hacia el sustrato metálico y retrasando el comienzo de los procesos corrosivos (Lins, Freitas y Silva, 2005). Esto ocasiona que la energía requerida para que los iones de la solución migren libremente, desde la superficie hacia la interfase capa pasiva/sustrato, sea mayor con el aumento de los elementos molibdeno, aluminio y cromo. En el caso del molibdeno, su efecto positivo se asocia a la estabilización de la película pasiva o a la formación de molibdatos y óxidos de molibdeno, lo que se refleja en la disminución de la densidad de corriente de corrosión y la velocidad de corrosión (tabla 2) (Lins, Freitas y Silva, 2005). En tales circunstancias, es oportuno afirmar que el acero fermanal AFe1 es un material con un comportamiento electroquímico muy similar al que presenta el acero inoxidable 316L, lo cual se puede atribuir al efecto del dopaje del material con molibdeno.

**Tabla 2.** Valores de los parámetros electroquímicos para el acero inoxidable 316L y las aleaciones fermanal, obtenidos de las curvas de polarización en el sistema de corrosión dinámica

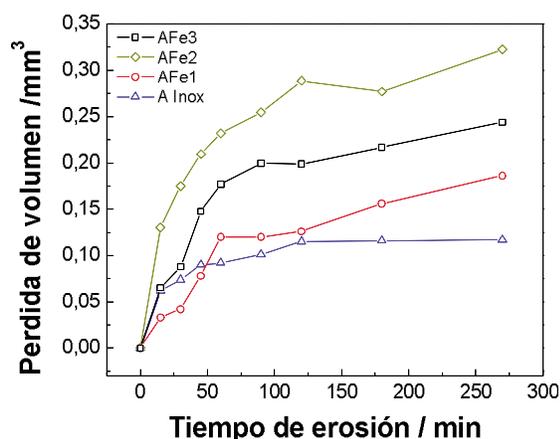
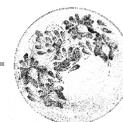
Muestra	Potencial de corrosión (mV)	Corriente de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Velocidad de corrosión ( $10^{-3}$ mm/año)
Acero inoxidable	-196	2,33	1,54
A Fe1	-98	5,08	3,30
A Fe2	-462	9,63	6,34
A Fe3	-535	14,72	9,64

### 3.2 Evaluación de la erosión

En la figura 4 se muestra la pérdida de material asociado a impactos repetidos de partículas sólidas, luego de 240 minutos de ensayo para los dos tipos de

aleaciones. Se distingue con claridad la seriedad en el desgaste con respecto a la variación de la aleación fermanal, en la condición de ángulo normal. Este tipo de desgaste resulta del impacto sucesivo de partículas abrasivas, con una velocidad lineal máxima de  $11,12 \text{ m s}^{-1}$  sobre la superficie del material.

En el desgaste por erosión se genera un fenómeno de transferencia de energía en el que interviene la energía cinética de la partícula, con un máximo de 5,466 mJ, sobre toda la superficie, en acción de choque sobre una superficie metálica que responde absorbiendo dicha cantidad de energía. En términos de su resiliencia y tenacidad, es posible entender cómo el acero inoxidable no se afecta en mayor magnitud por tal ataque. En esta condición se observa que las pérdidas por erosión en el acero fermanal AFe3 disminuyen con respecto al acero AFe2, teniendo en cuenta la tendencia mostrada para ángulo normal, en el que las curvas dinámicas de desgaste presentaron valores muy cercanos. Este efecto presume que el acero fermanal, dopado con silicio, niobio y vanadio (elementos de transición) es fuerte formador de carburos. Estos elementos se adicionan a las aleaciones fermanal, con el fin de reducir el efecto perjudicial de la precipitación de carburos de cromo y la consiguiente sensibilización a la corrosión intergranular y aumento del endurecimiento superficial. En el caso del acero AFe1 se puede determinar con claridad que la cinética de desgaste es análoga a la mostrada por el acero inoxidable; ello permite establecer que el acero fermanal dopado con molibdeno es un material suficientemente tenaz para aplicaciones similares a las simuladas en la configuración de cilindro rotatorio en ángulo normal bajo un mecanismo de desgaste enteramente mecánico, a pesar de que el mecanismo de falla en estos casos sea por fatiga de bajo ciclo en la superficie, dado que la fuerza de impacto de las partículas se aplica de forma normal entregando toda la energía cinética a la superficie.

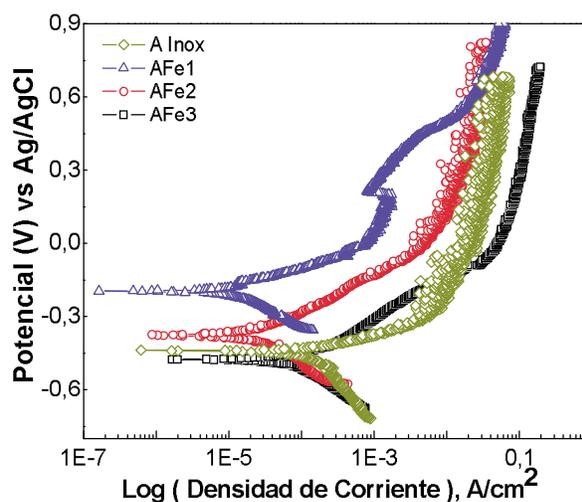


**Figura 4.** Pérdida de volumen para el acero inoxidable y las aleaciones fermanal, sin efecto corrosivo

### 3.3 Evaluación de la corrosión-erosión

En relación con las curvas potenciodinámicas mostradas en la figura 5, la sinergia es un factor determinante en la seriedad del desgaste mecánico provocado. Implica que el fenómeno puede llegar a ser aditivo, es decir, el fenómeno corrosivo sería dominante en la solución de NaCl. Este efecto agresivo del medio es atribuible a la acción del ion cloruro, el cual propicia mayor corrosión por picadura sobre la superficie de los materiales al propagarse por el incesante impacto de las partículas (tamaño entre 210 y 300  $\mu\text{m}$ ). Esto causa el desprendimiento de material en las zonas despasivadas y avanza hacia el interior del material desplazando las capas endurecidas de la superficie. Este fenómeno es más notorio en materiales como el AFe2 y AFe3. En general, y como era de esperarse, los materiales objeto de estudio presentaron un aumento de la actividad, en especial de la densidad de corriente de corrosión, al ser sometidos a un medio en condiciones dinámicas, en particular por la acción de partículas erosivas. Se observa que la modificación de las restricciones mecánicas del medio, tales como el impacto del fluido y de partículas erosivas en el ángulo de ataque, llevan a un ligero cambio del potencial de corrosión para el acero AFe1. Al mismo tiempo se

nota un aumento de la densidad de corriente de corrosión, producto del ataque de las partículas y la subsecuente generación de puntos de corrosión generalizada. Es necesario mencionar que el acero inoxidable se destaca por presentar potenciales de corrosión muy estables conforme se modifican las condiciones del medio, efecto que no es aparente en las aleaciones fermanal, las cuales muestran un aumento termodinámico notorio de la actividad en los medios dinámicos. No obstante, el acero fermanal AFe1 genera una densidad y una velocidad de corrosión en intervalos estrechos similares a las mostradas por el acero inoxidable, lo cual representa un aspecto importante en aplicaciones de ingeniería en las que las condiciones cambiantes del medio de trabajo requieren un material termodinámicamente estable. Esto permite compensar dichos cambios sin incurrir en pérdida de área resistente del material íntimamente relacionada con el esfuerzo aplicado.



**Figura 5.** Curvas potenciodinámicas de los aceros inoxidable y fermanal correspondientes al efecto de corrosión-erosión en una solución 0,5 M de NaCl

Los datos registrados en la tabla 3 indican de hecho un bajo desempeño electroquímico frente a la corrosión dinámica (tabla 2), debido a que la corrosión-erosión genera disminución en los potenciales y en la densidad de corriente de corrosión. En la figura 6 se indica cómo el metal se remueve de la superficie debido a las partículas abrasivas de

sílice, lo que genera un tipo de desgaste mediante remoción del material por efecto corrosivo en forma iónica o de productos de corrosión sólidos. En general, los datos registrados en la tabla 2 muestran un buen comportamiento de todos los aceros analizados en comparación con el acero inoxidable, cuando se someten a fenómenos corrosivos. Sin embargo, cuando se someten al flujo corrosivo-erosivo, la película pasiva superficial es eliminada y removida por la acción de partículas duras, lo que lleva a la pérdida de la protección a la corrosión. Esta, por su parte, reduce la resistencia de estos aceros en la superficie para el ataque de las partículas que favorecen, por tanto, el aumento en la velocidad de corrosión en comparación con la corrosión dinámica (figura 3).

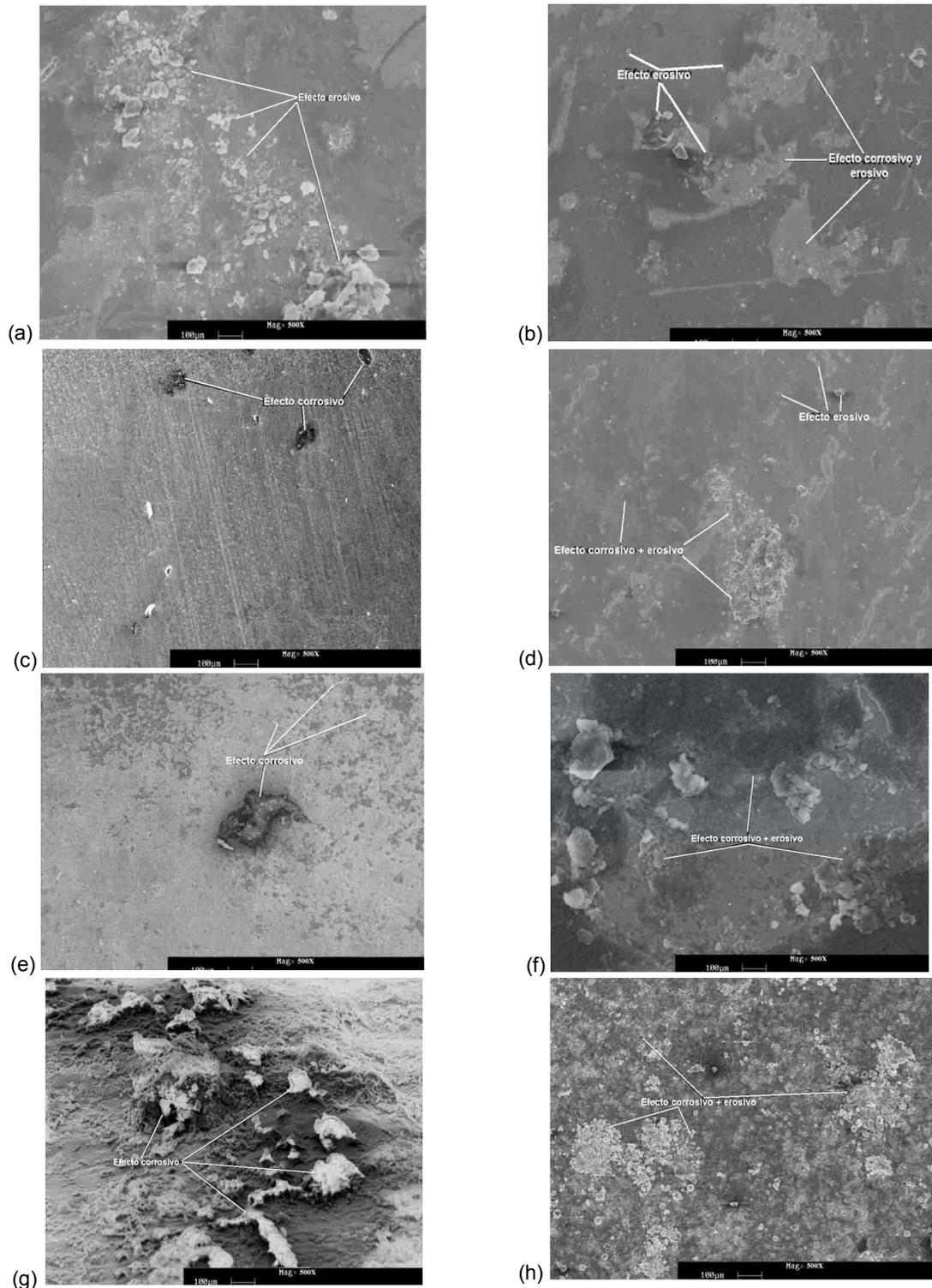
**Tabla 3.** Valores de los parámetros electroquímicos para los aceros tipo fermanal obtenidos de las curvas de polarización

Muestra	Potencial de corrosión mV y Ag/AgCl	Corriente de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Velocidad de corrosión ( $10^{-3}$ mm/año)
Acero inoxidable	-198	18	11,14
A Fe1	-376	29	19,16
A Fe2	-440	106	66,34
A Fe3	-481	186	122,94

### 3.4 Evaluación microestructural

En las micrografías presentadas en las figuras 6a a 6h, se observan características superficiales de los aceros fermanal y del acero inoxidable AISI 316L luego del proceso de erosión, corrosión y corrosión-erosión a ángulo de impacto de  $90^\circ$ ; para el acero inoxidable se muestra el daño generado por el efecto erosivo, ya que el corrosivo no se evidenció (figura 6a). Según las figuras 6c, 6e y 6g, parte del sustrato ha sido deteriorado como consecuencia del efecto

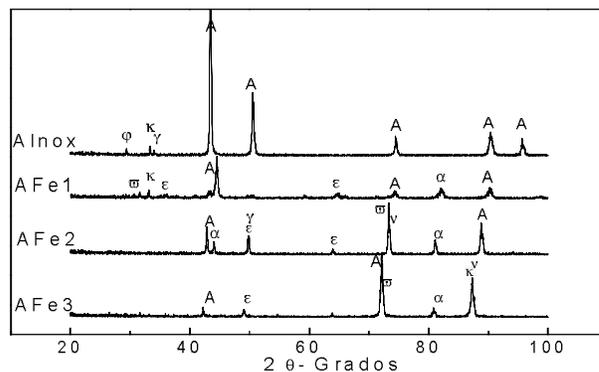
de la corrosión dinámica. Además en las figuras 6b, 6d, 6f y 6h se visualiza el desgaste y agrietamiento superficial; en estas mismas figuras se distingue una zona central caracterizada por la acción de la corrosión y el agrietamiento superficial generado por la energía de impacto de las partículas abrasivas de sílice. También se observan zonas grises en los extremos, donde el efecto protector ha generado mecanismos de defensa con zonas de bajo agrietamiento. Al someter la superficie de los aceros fermanal e inoxidable a la acción conjunta corrosión-erosión, es notable la modificación de la superficie, y se observan leves huellas sobre la superficie. En la figura 6c se aprecia la superficie con un resultado de la acción del fenómeno corrosivo en NaCl, consecuencia de la formación de corrosión localizada que comienza a extenderse sobre gran parte de la superficie. Para el caso del acero inoxidable AISI 316L y la aleación AFe1, las superficies desgastadas por el efecto erosivo y corrosivo son muy similares entre sí. Para el caso del acero AFe2 (figura 6e), sujeto a la acción de la solución de NaCl, se observa que la superficie presenta zonas de corrosión generalizada que se distribuyen en la mayor parte de ella, mientras que al estar sometido a erosión se observa un daño significativo en la condición de ángulo normal, lo que origina una morfología rugosa. Ambos mecanismos en sinergia son responsables por la formación de una superficie con deterioro evidente de material, como sucede en el caso del ángulo de  $90^\circ$  en el que se observan huellas de remoción mecánica del material (figura 6f). El acero AFe3 muestra un fenómeno corrosivo mayor que en los casos anteriores, que se refleja en una superficie rugosa y una leve textura elevada (figura 6g). El desgaste triboquímico del material trae consigo una superficie con claros signos de desgaste mecánico, en la cual se observan huellas más profundas y mayor rugosidad (figura 6h).



**Figura 6.** Micrografías de MEB a) acero inoxidable 316L evaluada a erosión; b) acero inoxidable 316L sometida a corrosión erosión: c) ferrenal AFe1 expuesta a corrosión dinámica; d) ferrenal AFe1 ensayada en corrosión erosión e) ferrenal AFe2 expuesta a corrosión dinámica f) ferrenal AFe2 ensayada en corrosión erosión: g) ferrenal AFe3 expuesta a corrosión dinámica; h) ferrenal AFe3 ensayada en corrosión erosión.

### 3.5 Identificación de productos de corrosión

La figura 7 muestra los productos de corrosión del acero inoxidable 316L. Se observan algunos picos característicos que, por lo general, se pueden encontrar sobre la superficie de este material, como el óxido de cromo, óxido de hierro y espinela de hierro-silicio. Dado que el acero inoxidable presenta dos características importantes desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión, como lo son la capacidad de pasivación y la estabilidad termodinámica, es necesario mencionar que en condiciones dinámicas y en corrosivas-erosivas, el níquel desempeña un papel importante en la estabilidad del material, lo cual se ha corroborado con los valores más bien bajos de sinergia y efecto aditivo calculados en la sección de evaluación de la corrosión-erosión (sección 3.3). Para el caso del acero fermanal AFe1 se presentan picos característicos de los óxidos convencionales de los principales productos de corrosión: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ferrita de manganeso ( $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ), silicato ferroso ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), óxido de manganeso ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ); estos compuestos sobre la superficie del material son los responsables de las pérdidas por corrosión-erosión, ya que su baja estabilidad permite su remoción tanto por efecto hidrodinámico como por impacto de las partículas de silicio. Los espectros de las aleaciones AFe2 y AFe3 muestran una mayor formación de los óxidos primarios, más que todo de los óxidos de manganeso, debido a la mayor proporción de este elemento de aleación en el material con respecto al acero fermanal AFe1. De igual forma, se observa que la acción del medio ha posibilitado la formación de espinelas de compuestos cristalinos como  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ , las cuales por su estructura compacta y estable pueden generar protección de la superficie ante el fenómeno de deterioro electroquímico cuando se combina con el fenómeno erosivo. Al igual que para el acero fermanal AFe1, la fuerte presencia de óxidos de hierro y manganeso es responsable de las pérdidas significativas por corrosión-erosión de este material en medio salino, ya que el manganeso presenta un bajo coeficiente de pasivación y da lugar a la formación de una película de óxido inestable.



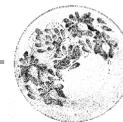
**Figura 7.** Difractogramas de las muestras de las aleaciones fermanal y acero inoxidable 316L. A=austenita;  $\alpha$ = ferrita;  $\phi$ =  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ;  $\kappa$ =  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ;  $\gamma$ =  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\omega$ =  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ;  $\epsilon$ =  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ;  $\nu$ =  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ .

## 4. CONCLUSIONES

Los resultados de las curvas potenciodinámicas anódicas muestran que los aceros de los sistemas austenítico, acero inoxidable y AFe1 presentan un comportamiento electroquímico adecuado y para los aceros AFe2 y AFe3 es bueno en circunstancias de corrosión dinámica. En condiciones de ángulo de ataque normal, se observa que las muestras de acero AFe2 y AFe3 son más activas, mientras que las de AFe1 experimentan un comportamiento noble. Para los tipos de aceros evaluados se deduce un desempeño 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. En el mecanismo de sinergia de corrosión-erosión se evidenció que los aceros AFe2 y AFe3 tienen un aumento de la actividad, en especial de la densidad de corriente de corrosión, cuando son sometidos a condiciones dinámicas en particular y además a la acción de partículas erosivas.

De acuerdo con las micrográficas MEB, los aceros fermanal AFe3 y AFe2 exhiben una mayor formación de los óxidos primarios, ante todo de los de manganeso, debido a la menor proporción de este elemento de aleación en el material con respecto al acero fermanal AFe1. La fuerte presencia



de óxidos de hierro y manganeso es responsable de las pérdidas significativas por corrosión-erosión de este material en medio salino, ya que el manganeso posee un bajo coeficiente de pasivación, lo que da lugar a la formación de una película de óxido inestable. Su contenido en las aleaciones AFe<sub>2</sub> y AFe<sub>3</sub> ha disminuido en comparación con la aleación AFe<sub>1</sub>. De igual forma, con DRX se observa que la acción del medio ha posibilitado la formación de algunas espinelas de Mn-Fe y Fe-Al que, a causa de su estructura compacta y estable, pueden generar protección de la superficie ante el fenómeno de deterioro electroquímico cuando se combina con el fenómeno erosivo, efecto acompañado de la presencia de alúmina en la superficie. El contenido de manganeso y aluminio en la aleación AFe<sub>1</sub> es alto y a este efecto se debe el comportamiento protector a fenómenos corrosivos, erosivos y su sinergia corrosivo-erosivo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada por la financiación del proyecto ING 728.

## REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials. ASTM G5 - 94(2011)e1. *Standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2003.
- American Society for Testing and Materials. ASTM G119-09. *Standard guide for determining synergism between wear and corrosion*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2009.
- Aperador, W.; Caicedo, J. C.; España, C.; Cabrera, G. and Amaya, C. (2010). "Bilayer period effect on corrosion-erosion resistance for [TiN/AlTiN]<sub>n</sub> multilayered growth on AISI 1045 steel". *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 71, No. 12 (December), pp. 1754-1759.
- Aperador, W.; Ramírez-Martín, C. y Bautista, J. (2011). "Sinergia entre la corrosión-erosión del acero 1045 recubierto por multicapas de TiN/TiAlN". *Revista Mexicana de Física*, vol. 57, No. 4 (agosto), pp. 350-355.
- Aperador, W.; Vargas, A. and Betancur J. (2012). "Evaluation of passivation of the austenitic FeMnAl alloy". *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 32, No. 2 (July), pp. 236-243.
- Bialoń, J.; Dudek, D.; Kobyłańska-Szkaradek, K. and Zastawny, A. (1983). "The influence of nuclear radiation on some physical properties of Fermanal steel". *Materials Science and Engineering*, vol. 59, No. 2 (May), pp. 217-222.
- Cano, J.; Congote, J. y Toro, A. (2004). "Efecto de la velocidad y ángulo de impacto en la resistencia a corrosión-erosión de aceros inoxidables recubiertos con TiN". *Dyna*, vol. 71, No. 144 (noviembre), pp. 49-59.
- Correa, F.; Caicedo, J. C.; Aperador, W.; Rincón, C. A. y Bejarano, G. (2008). "Mejoramiento de la resistencia a la corrosión del acero AISI 4140 utilizando multicapas de titanio/nitruro de titanio". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. 46, (diciembre), pp. 7-14.
- Finnie, I. (1995). "Some reflections on the past and the future of erosion". *Wear*, 186-187, Part 1 (July), pp. 1-10.
- Lins, V. F. C.; Freitas, M. A. and Silva, E. M. P. (2005). "Corrosion resistance study of Fe-Mn-Al-C alloys using immersion and potentiostatic tests". *Applied Surface Science*, vol. 250, No. 1-4 (August), pp. 124-134.
- Meng, H.; Hu, X. and Neville, A. (2007). "A systematic erosion-corrosion study of two stainless steels in marine conditions via experimental design". *Wear*, vol. 263, No. 1-6 (September), pp. 355-362.
- Niu, L. and Cheng, Y. F. (2008). "Synergistic effects of fluid flow and sand particles on erosion-corrosion of aluminum in ethylene glycol-water solutions". *Wear*, vol. 265, No. 3-4 (July), pp. 367-374.
- Pérez Alcázar, G. A. (2004). "Propiedades estructurales y magnéticas de aceros Fe-Mn-Al, fermanal". *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 28, No. 107, pp. 265-274.
- Tjong, S. C. (1990). "Electron microscope observations of phase decompositions in an austenitic Fe-8.7Al-29.7Mn-1.04C alloy". *Materials Characterization*, vol. 24, No. 3 (April), pp. 275-292.
- Wang, C. J. and Chang, Y. C. (2005). "NaCl-induced hot corrosion of Fe-Mn-Al-C alloys". *Materials Chemistry and Physics*, vol. 76, No. 2 (August), pp. 151-161.
- Zhang, Y. S.; Lu, X.; Tian, X. and Qin, Z. (2002). "Compositional dependence of the Néel transition, structural stability, magnetic properties and electrical resistivity in Fe-Mn-Al-Cr-Si alloys". *Materials Science and Engineering*, vol. 334, No. 1-2 (September), pp. 19-27.