

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO AL CARBONO AISI-SAE 1020 IMPLANTADO CON IONES DE TITANIO

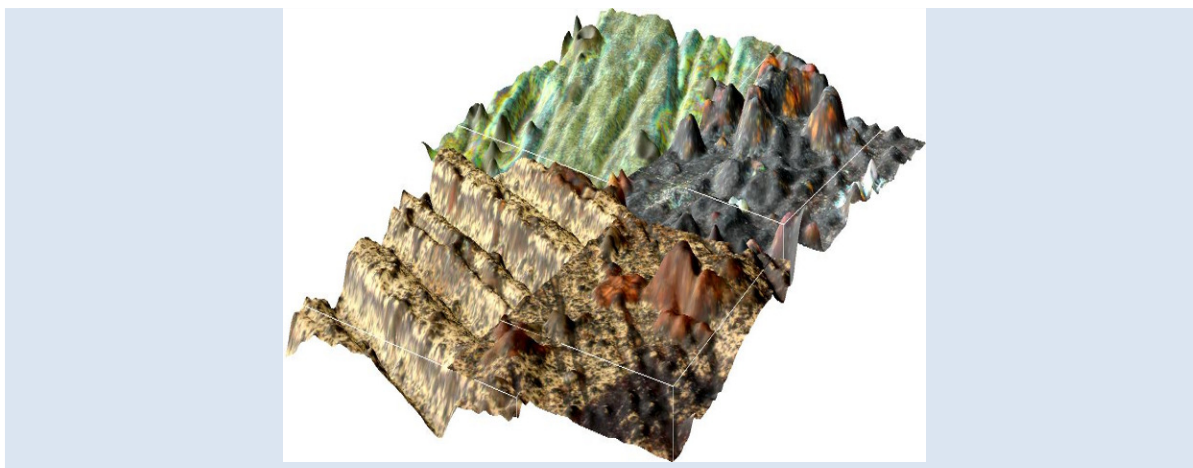
Ely Dannier V. Niño^{1,3*}, Darío Y. Peña B.², Martha S. Reyes C.², Valeriy Dugar-Zhabon³

1: Grupo de Investigación en Tecnología del Plasma – GINTEP, Universidad Pontificia Bolivariana, A.A. 2932, Bucaramanga, Santander, Colombia.

2: Grupo de Investigación en Corrosión – GIC, Universidad Industrial de Santander, A.A. 678, Bucaramanga, Santander, Colombia.

3: Grupo de Investigación en Física y Tecnología del Plasma – FITEK, Universidad Industrial de Santander, A.A. 678, Bucaramanga, Santander, Colombia.

* e-mail: ely.valbuena@upb.edu.co



RESUMEN

La implantación iónica tridimensional (3DII) [1] es una técnica alternativa para el tratamiento superficial de materiales y es utilizada para mitigar el efecto de la corrosión en aceros de bajo carbono expuestos a medios agresivos [2]. En el presente trabajo se analiza el comportamiento frente a la corrosión de la superficie de muestras de acero AISI SAE 1020 modificadas con iones Ti utilizando técnicas electroquímicas [3]. Los resultados muestran una disminución significativa de la velocidad de corrosión (V_{corr}) de las probetas implantadas respecto a las probetas sin implantar, llegando a establecer un método efectivo para la protección contra el deterioro a medios agresivos.

Palabras Claves: Implantación Iónica, Técnicas Electroquímicas, Inspección Visual, Microscopía Óptica.

EXPERIMENTAL STUDY OF CORROSION RESISTANCE OF AISI-SAE 1020 CARBON STEEL IMPLANTED BY TITANIUM IONS

ABSTRACT

The three-dimensional ion implantation technique (3DII) is an alternative to the material surface treatment which is used to mitigate the corrosion effect in low carbon steels exposed to aggressive media. In this work, the behavior of the surfaces of AISI SAE 1020 steel modified with titanium ions in respect to corrosion is studied by using electrochemical techniques. A considerable decrease in the corrosion rate of the implanted samples compared to the non-implanted samples is demonstrated. Thus an effective mechanism for the steel protection against deteriorations in aggressive media is found.

Keywords: Ion Implantation, Electrochemical techniques, Visual Inspection, Optic microscopy.

1. INTRODUCCIÓN

La implantación iónica es el proceso por el cual se introducen iones dopantes dentro de un sustrato sólido, haciéndolos incidir con suficiente energía para hacer que penetren más allá de la superficie, pero de tal manera que los iones sean distribuidos uniformemente en una delgada capa superficial. Dependiendo de la necesidad práctica; la energía de los iones puede variar en un rango de algunos electronvoltios a los mega-electronvoltios [4,5].

El método 3DII (Tree-Dimensional Ion Implantation), está basado en una descarga autosostenida de alto voltaje a bajas presiones que disminuye la posibilidad de contaminación de las muestras. El plasma generado en este tipo de descarga se comporta como una fuente de iones que adquiere una alta energía (decenas de keV), proporcional al potencial suministrado en la zona de caída catódica hacia la superficie de la muestra. De esta forma se tiene una implantación perpendicular a la superficie, con un flujo de iones cuasi-monoenergéticos. Esto resulta ser muy importante si se tiene en cuenta que la máxima dosis retenida por una muestra implantada está determinada por el ángulo de incidencia de los iones. Además el rango de bajas presiones (menos de 4 Pa) disminuye significativamente la posibilidad de contaminación de las muestras [6,7].

Al utilizar las tecnologías de la implantación iónica, los límites de las concentraciones de las sustancias que se van a insertar dentro del volumen de las muestras se determinan por la interacción cinética de iones de alta energía con la red cristalina y no a partir de las constantes de difusión de los procesos equilibrados de saturación de la superficie como se hace en los métodos tradicionales plasmotérmicos para el tratamiento superficial de materiales.

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo analiza mediante técnicas electroquímicas de Potencial de Circuito Abierto (OPC), Resistencia a la Polarización (R_p), Espectroscopia de la Impedancia Electroquímica (EIS) y Extrapolación de Tafel, el comportamiento de la resistencia a la corrosión en el acero AISI SAE 1020 expuesto a un tratamiento superficial con iones de Titanio mediante descargas pulsadas de alto voltaje y de arco eléctrico a bajas presiones [8], en el reactor JUPITER [9].

2. PARTE EXPERIMENTAL

Se diseñaron y elaboraron muestras (probetas), de acero AISI SAE 1020, con dimensiones 19.05 mm de ancho, 76.2 mm de largo y 3.18 mm de espesor, las cuales se prepararon superficialmente, por medio de limpieza mecánica (con papel abrasivo de carburo de silicio de grado 600 y 1200) y limpieza por ultrasonido. Tomando como referencia una de las probetas, se llevó a cabo un análisis metalográfico según la norma ASTM E3-01 [10]. Previo al tratamiento superficial se realizó una limpieza por bombardeo iónico (sputtering) con gas de argón en la cámara de descargas del reactor JUPITER, con la finalidad de eliminar la posible existencia de residuos sólidos y grasas superficiales. La modificación superficial con iones de Ti y N se llevó a cabo en el reactor JUPITER el cual se fundamenta en la técnica 3DII; el proceso se desarrolló a partir de un flujo de átomos ionizados que incidían sobre la superficie del blanco metálico con una energía establecida. Las probetas fueron implantadas con titanio a un tiempo de exposición a la dosis de implantación de 6 y 12 minutos a energías de implantación de 5 y 10 keV [11,12].

Las probetas implantadas y no implantadas se sumergieron en solución electrolítica de NaCl al 3 %wt. El tiempo total de inmersión fue de 28 días, dentro del cual se realizaron medidas electroquímicas de forma periódica a los 0, 7, 15, 21 y 28 días. Para el desarrollo de las pruebas con las cuales se buscó determinar la resistencia a la corrosión del acero AISI SAE 1020 en solución NaCl al 3 %, se empleó un puente salino con cloruro de potasio (KCl) y solución Agar-Agar. Los ensayos electroquímicos se realizaron en una celda plana de vidrio, utilizando como electrodo de referencia Ag/AgCl y como contra-electrodo una barra de grafito (altamente conductivo). El electrodo de trabajo fue el material en estudio con un área de exposición al electrolito de 0.785 cm². La celda plana se conectó al bipotenciostato Gill B1-STAT conectado a una computadora con software ACM versión 5.0 y secuenciador basado en la norma ASTM G-109 [13].

Las medidas electroquímicas y el cálculo de las velocidades de corrosión se efectuó cumpliendo con las normas: ASTM G102 [14], ASTM G1 [15], ASTM G5 [16], ASTM G59 [17] y ASTM G106 [18]. Para realizar las pruebas de resistencia a la

polarización R_p , se utilizó un potencial desde -25 mV hasta +25 mV a una velocidad de 0.20 mV/s. Para las pruebas de Tafel se realizaron barridos potenciodinámicos entre -250 mV y 250 mV con una tasa de barrido de 1 mV/s. Para las pruebas EIS, se usó una frecuencia inicial de 30000 Hz y una frecuencia final de 0.01 Hz.

Además de los ensayos realizados de caracterización por medio de medidas electroquímicas, se llevaron a cabo ensayos de inspección visual y nano metrología óptica, con el fin de verificar la efectividad del tratamiento empleado como método de protección superficial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el estudio experimental.

3.1 Ensayos Electroquímicos

Como se mencionó anteriormente se realizaron medidas electroquímicas de corriente directa (OPC, R_p y Tafel) y de Corriente alterna (EIS) para determinar la V_{corr} utilizando un bipotensiostato con una celda plana, como electrodo de referencia: Ag/AgCl, electrodo auxiliar de grafito y de trabajo el material objeto de ésta investigación.

Tabla 1. Medidas OPC para muestras de acero AISI SAE 1020 sin tratamiento superficial e implantadas con iones de Ti (electrodo de referencia Ag/AgCl).

<i>Tiempo de inmersión En solución de NaCl 3%wt</i>	<i>Delta voltaje ΔV (mV)</i>	<i>Delta corriente ΔI (mA/cm²)</i>	<i>Delta resistencia ΔR (ohm.cm²)</i>	<i>E_{corr} (mV vs. Ag/AgCl)</i>
Implantado 10kV 12min, 0 días	0.0141838	-1.274E+26	-1.113E-28	-491.34
Implantado 10kV 6min 0 días	0.0208063	-1.274E+26	-1.633E-28	-513.42
No Implantado 0 días	0.0036944	-1.274E+26	-2.900E-29	-588.09
Implantado 10kV 6min 7 días	0.0017363	-1.274E+26	-1.363E-29	-496.50
Implantado 5kV 6min 7 días	0.0004094	-1.274E+26	-3.214E-30	-541.36
No Implantado 7 días	0.0055168	-1.274E+26	-4.331E-29	-585.60
Implantado 10kV 6min 15 días	0.0104318	-1.274E+26	-8.189E-29	-429.21
Implantado 5kV 6min 15 días	0.0035866	-1.274E+26	-2.815E-29	-483.58
No Implantado 15 días	0.0078852	-1.274E+26	-6.190E-29	-532.81
Implantado 10kV 12min 21 días	0.0065877	-1.274E+26	-5.171E-29	-473.13
Implantado 5kV 12min 21 días	0.0051501	-1.274E+26	-4.043E-29	-485.90
No Implantado 21 días	0.0085443	-1.274E+26	-6.707E-29	-566.12
Implantado 10kV 12min 28 días	0.0064210	-1.274E+26	-5.040E-29	-498.78
Implantado 5kV 12min 28 días	0.0000906	-1.274E+26	-7.115E-31	-527.05
No Implantado 28 días	0.0037464	-1.274E+26	-2.941E-29	-563.44

3.1.1 Pruebas de potencial de circuito abierto (OPC).

Con la finalidad de garantizar la estabilización del sistema en estudio fue necesario realizar pruebas de potencial de circuito abierto OPC, con esta prueba se obtuvo el valor del potencial del circuito, el cual se aproxima al potencial de corrosión (E_{corr}) del sistema (ver Tabla 1). El análisis de las gráficas de potencial de circuito abierto obtenido se realizó de acuerdo con los criterios de evaluación de la norma ASTM C-876-91.

Los potenciales a circuito abierto utilizando como electrodo de referencia plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) en aceros AISI SAE 1020 con modificación superficial de iones de titanio a bajas presiones y altas energías se mantuvieron entre -429.21 y -535.44 mV durante los 28 días de inmersión en solución de NaCl al 3 %wt, el valor más noble entre los sistemas en estudio se registró en 429.21 mV para la probeta implantada con una energía de 10kV y tiempo de exposición a la dosis de 6 minutos a los quince días de inmersión, el

Ecorr más activo registrado fue para la muestra implantada a una energía de 5 keV y tiempo de exposición a la dosis de 6 minutos cuyo valor fue de -541.36 mV a los 7 días de inmersión. En las muestras sin tratamiento superficial los potenciales Ecorr estuvieron entre -532.81 mV (valor más noble) registrado a los quince días de exposición y el más activo de -592.56 mV tomado a los 21 días de exposición en la solución electrolítica. Las probetas sin tratamiento superficial presentan un comportamiento más estable respecto a aquellas modificadas con iones de titanio, dado que en estas últimas, las medidas dependen de todos los parámetros que involucran el experimento y del cambio estructural generado por la barrera protectora.

3.1.2 Ensayos de resistencia a la polarización lineal (R_p).

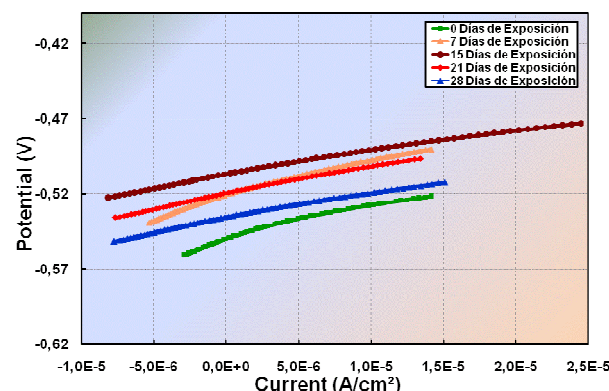
En el transcurso del tiempo de inmersión en la solución de NaCl, para las muestras sin tratamiento superficial las pendientes R_p obtenidas fueron bastante bajas con respecto a las muestras implantadas con iones Ti (ver Figura 1(a) y (b)), para las muestras no implantadas el material no encontró oposición alguna al paso de la corriente, lo que representa una vulnerabilidad de este frente a la corrosión; sin embargo para las muestras modificadas superficialmente con iones de Ti, el decrecimiento con el tiempo fue proporcional y no muy drástico con respecto a aquellos que no estuvieron expuestos a la solución de NaCl.

Tabla 2. Medidas R_p en muestras de acero AISI SAE 1020 sin tratamiento superficial e implantadas con iones de Ti a descargas de 5 y 10 keV y texp a la dosis de 6 min y 12 min.

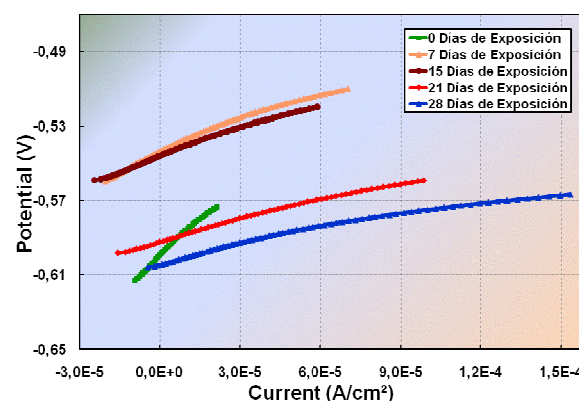
Condiciones de implantación de la muestra	Resistencia a la polarización Lineal (ohm.cm^2)				
	0 Días	7 Días	15 Días	21 Días	28 Días
Sin Modificación	1535.0	731.6	598.3	434.5	447.5
Implantada a 5keV durante 6min	-----	2857.6	1807.0	-----	-----
Implantada a 5keV durante 12 min	-----	-----	-----	2042.5	1914.0
Implantada a 10keV durante 6min	3371.0	2208.7	2133.0		
Implantada a 10keV durante 12 min	3908.0	-----	-----	1750.0	971.6

En la Tabla 2 se encuentran los valores de las pendientes R_p obtenidas en cada una de las curvas (ver Figura 1(a) y (b)), de los sistemas analizados correspondientes a las muestras no implantadas e implantadas con iones de Ti a 5 keV con tiempo de exposición a la dosis de 6 y 12 minutos que estuvieron inmersos en la solución de NaCl de 0 a 15 y de 0 a 28 días.

Tanto para las probetas sin tratamiento superficial como en las modificadas superficialmente con iones de Ti, la resistencia a la polarización va disminuyendo a medida que aumenta el tiempo de exposición al electrolito, pero es claro que en las implantadas la resistencia es mayor y el efecto corrosivo de la solución es bastante menor.



(a)



(b)

Figura 1. Curvas de R_p en muestras (a) implantadas con iones de Ti a 5 keV y (b) sin tratamiento superficial, inmersos en solución de NaCl al 3 %wt., de 0 a 672 horas.

3.1.3 Ensayos de extrapolación de Tafel.

En las figuras 2(a) y (b), se presentan las curvas Tafel, las cuales exhiben en general el mismo comportamiento, observando un desplazamiento de

la densidad de corriente hacia la izquierda y hacia abajo a medida que aumenta el tiempo de exposición, que demuestran que con el tiempo hay mayor transporte de masa, aumentando la densidad de corriente y por tanto la V_{corr} . Para las muestras implantadas los E_{corr} estuvieron en un rango de -600 a -500 mV, para aquellos sin tratamiento entre -850 y -700 mV.

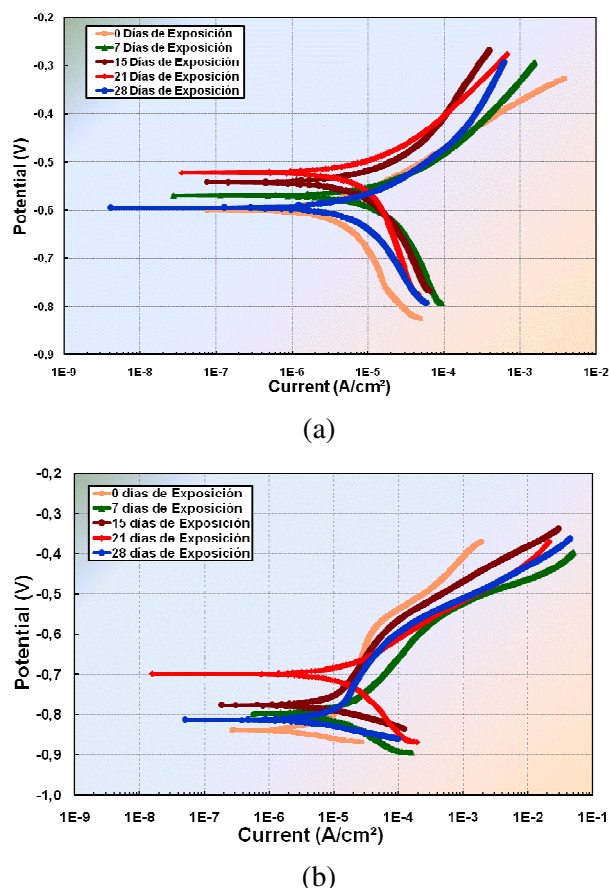


Figura 2. Curvas de extrapolación de Tafel en muestras (a) implantadas con iones de Ti a 5 keV y (b) sin tratamiento superficial, inmersos en solución de NaCl al 3 %wt., de 0 a 672 horas.

Trazadas las curvas de polarización, las pendientes de Tafel se determinaron por extrapolación de las zonas catódica y anódica de las curvas resultantes, con las pendientes de las rectas se obtuvieron los valores β_a y β_c , a partir de los cuales se obtiene el valor B de la constante de Stern-Geary necesaria para el cálculo de la corriente de corrosión I_{corr} , con el que se determinó posteriormente la velocidad de corrosión (ver Tabla 3) de acuerdo a la norma ASTM G 102.

Los muestras sin tratamiento superficial mostraron

una velocidad de corrosión bastante mayor comparada con aquellas muestras tratadas con iones Ti, superándola en algunos casos hasta aproximadamente un 85 %, como es el caso de las muestras expuestas durante 28 días a la solución de NaCl al 3 %wt., donde la muestra implantada con energía de 5 keV durante 12 minutos presentó una velocidad de corrosión de 10.947 mpy, mientras que la muestra sin tratamiento tuvo una V_{corr} de 71.783 mpy, que puntualiza el efecto favorable del tratamiento superficial en el control de la oxidación de aceros de bajo contenido de carbono expuestos a medios agresivos como la solución de NaCl al 3 %wt.

3.1.4 Ensayos de Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

La figura 3(a) muestra el diagrama Nyquist en probetas implantadas con iones de Ti con una descarga pulsada de 5 keV y tiempo de exposición a la dosis de 6 y 12 min; se puede observar que a cero y 15 días de inmersión en la solución de NaCl al 3 %wt., las curvas son muy similares, sin embargo, a los 7 días el domo aumenta su tamaño considerablemente, lo que indica que el material se corroe más lentamente debido a la formación de una capa oxidada.

El diagrama Nyquist para las probetas sin tratamiento superficial (ver Figura 3(b)) muestra la presencia de un domo que no se comporta como un círculo ideal, lo que indica que las capas de óxidos formadas en la superficie de la probeta no son completamente homogéneas, además se observa que a medida que incrementa el tiempo de exposición al electrolito el domo disminuye su diámetro, lo que se traduce en una menor resistencia con el tiempo que se corroe sin mayor esfuerzo.

Una condición para que exista corrosión por picadura es la existencia de una película conductora porosa en la superficie del acero, de acuerdo con los espectros de impedancia el material es susceptible a generar transferencia de carga cuando se encuentra en contacto con la solución electrolítica.

3.1.5 Circuitos equivalentes.

Los diagramas por si solos describen un comportamiento claro y diferente entre las probetas tratadas y aquellas no modificadas superficialmente, sin embargo los datos suministrados en esta prueba solo pueden ser confirmados al calcular la densidad de corriente de corrosión en cada sistema; para tal

fin se define un circuito equivalente que describa el comportamiento del material en la solución y que

nos permita determinar dicho valor después del ejercicio.

Tabla 3. Velocidad de corrosión en muestras sin tratamiento e implantadas, inmersos en NaCl 3%wt., de 0 a 28 días.

Tiempo de inmersión en NaCl 3%wt.	β_a (mV)	β_c (mV)	B (V/década)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	V_{corr} (mpy)
0 días No Implantada	945.51	201.16	0.0720	59.772	28.242
0 días Implantación 10kV 12min	92.12	412.32	0.0327	10.658	5.036
0 días Implantación 10kV 6min	96.36	257.05	0.0304	11.501	5.434
7 días No Implantada	101.28	201.16	0.0293	50.929	24.063
7 días Implantación 10kV 6min	557.07	32.47	0.0133	7.684	3.631
7 días Implantación 5kV 6min	129.57	367.96	0.0416	18.549	8.764
15 días No Implantada	232.45	201.16	0.0468	99.699	47.106
15 días Implantación 10kV 6min	145.07	595.44	0.0507	30.250	14.293
15 días Implantación 5kV 6min	233.34	354.76	0.0611	43.087	20.358
21 días No Implantada	103.64	203.81	0.0298	87.463	41.325
21 días Implantación 10kV 12min	152.85	365.47	0.0468	34.066	16.096
21 días Implantación 5kV 12min	146.00	462.89	0.0482	30.066	14.206
28 días No Implantada	309.65	203.81	0.0534	151.926	71.783
28 días Implantación 10kV 12min	140.58	408.47	0.0454	59.542	28.133
28 días Implantación 5kV 12min	115.50	262.06	0.0348	23.168	10.947

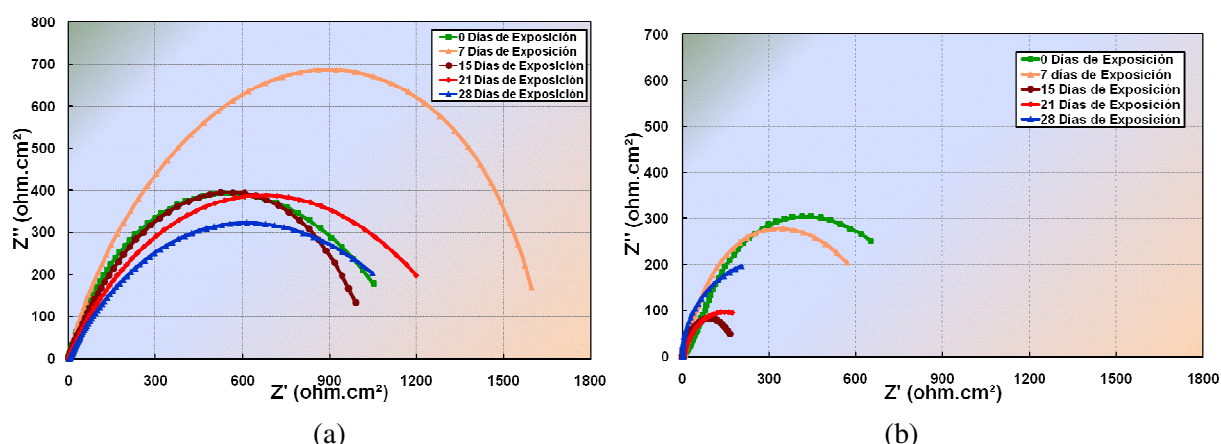


Figura 3. Diagramas Nyquist en muestras (a) implantadas con iones de Ti a 5 keV y (b) sin tratamiento superficial, inmersos en una solución de NaCl al 3 %wt., de 0 a 672 horas.

En la figura 4 se describe el modelo propuesto para las muestras implantadas y sin tratamiento superficial; para las muestras implantadas se define en primera instancia y como se demuestra en la figura 4(a), una resistencia R1 correspondiente a la solución electrolítica, que está en serie con un elemento de fase constante C1 que equivale a la interface existente entre el electrolito y los productos de corrosión; una resistencia R2 que representa la capa de iones Ti implantados en paralelo con un elemento CPE1 que corresponde a la interface entre los productos de corrosión y la primera capa de iones Ti; una resistencia R3 que

equivale a la capa de iones nitrógeno implantados previamente a la capa de iones Ti, en paralelo con un elemento CPE2 que corresponde a la interface de la capa de iones Ti con la capa nitrurada y por último una resistencia R4 que equivale al material base. El comportamiento capacitivo aumenta con el tiempo de exposición a la solución electrolítica, por ende el comportamiento resistivo disminuye. Esto indica el paso de agentes agresivos (O_2 , Cl^- , y H_2O), desde la solución a la superficie del material.

El modelo aplicado en las probetas sin tratamiento superficial se muestra en la figura 4(b), el cual consta de una resistencia R1 correspondiente a la

solución electrolítica que se encuentra en serie con un conjunto de elementos RC compuesto por una resistencia R2 (productos de corrosión) en paralelo con un elemento complejo CPE1 que corresponde a la interface solución – productos de corrosión y un segundo conjunto compuesto por una resistencia R3 correspondiente al metal base en paralelo con un elemento complejo CPE2 que equivale a la interface entre la capa formada por los productos de corrosión y el sustrato.

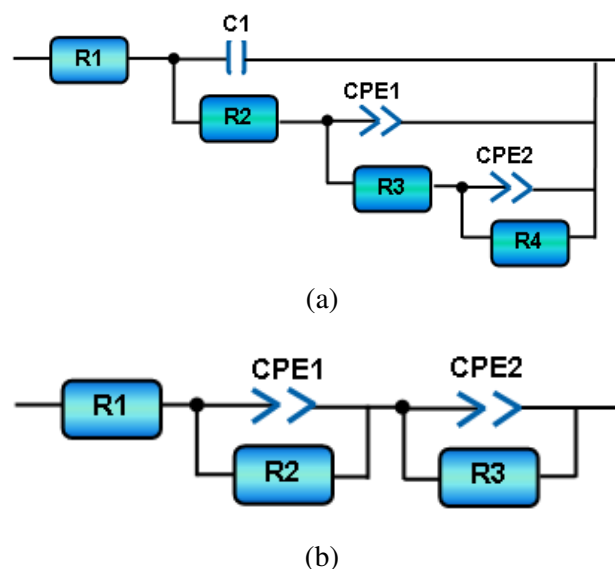


Figura 4. Circuitos equivalentes en muestras de acero AISI SAE 1020 (a) tratadas con descargas de 5 y 10 kV y tiempo de exposición a la dosis de 6 y 12 minutos. (b) sin tratamiento superficial.

3.2 Microscopía Óptica

Los registros adquiridos para la textura y la topografía de la superficie en las muestras implantadas y no implantadas corresponden a la región cercana a la zona más afectada, donde se visualiza deterioro por picadura no influenciado por el efecto de las medidas electroquímicas.

En la figura 5 se aprecian las micrografía de textura y topografía de las muestras sin tratamiento superficial no inmerso (cero días) e inmerso en la solución electrolítica durante 28 días. En la figura 5(a) se evidencia la formación de picaduras en la superficie ocasionadas por el efecto del ambiente y en la figura 5(b) se observa un alto grado de deterioro y presencia de corrosión por picaduras y corrosión uniforme.

En las topografías de las probetas (Ver Figuras 5(b)

y (d)) se observa una rugosidad irregular y alto grado de picadura con profundidad considerable en la muestra inmersa 28 días respecto al de cero días; lo que significa que la corrosión no afectó solamente la superficie más externa de la probeta sino también la subsuperficie.

En la figura 6 se aprecian las micrografías de texturas y topografías de una superficie modificada con iones de titanio durante 12 minutos con energías de 5 keV (ver Figuras 6(a) y (b)) y 10 keV (ver Figuras 6(c) y (d)) y expuestas en solución de NaCl durante 28 días. En la figura 6(a) se observa una mínima cantidad de trazas de óxido en forma de picado distribuidas uniformemente en la superficie, siendo estas menos significativas si se comparan con los resultados obtenidos para las superficies no modificadas y las modificadas con energía de 10 keV. En la figura 6(b) Se observa que los productos de corrosión y picado son mínimos en las probetas implantadas a energías de 5 keV, donde se evidencia unos picos de profundidad ocasionados por el rallado generado en el momento de la preparación superficial y no por el picado producido por los productos de corrosión debido al efecto de la solución de NaCl al 3 %wt.

Entre tanto, en la micrografía de textura de la probeta implantada con una energía de 10 keV (ver Figura 6(c)), se observa la efectividad de la implantación de iones de titanio, con un comportamiento favorable frente al efecto de la solución sobre el material que se resiste al efecto corrosivo de la misma, con tan solo unas trazas de corrosión localizada. Y en la figura 6(d) se evidencia que la corrosión presente afecta muy poco al sustrato (material base), pues la profundidad del óxido presente es bastante menor con respecto a las probetas sin tratamiento.

La menor cantidad de productos de corrosión presentes en las probetas modificadas superficialmente con iones de titanio a 5 keV, puede estar dada por la mayor estabilidad de la descarga durante la implantación, generando un mejor comportamiento de los iones de titanio en comparación con las probetas implantadas a 10 keV.

4. CONCLUSIONES

La implantación iónica tridimensional (3DII) en descargas a baja presión y alto voltaje modifica la superficie del acero AISI SAE 1020, y como resultado su comportamiento electroquímico,

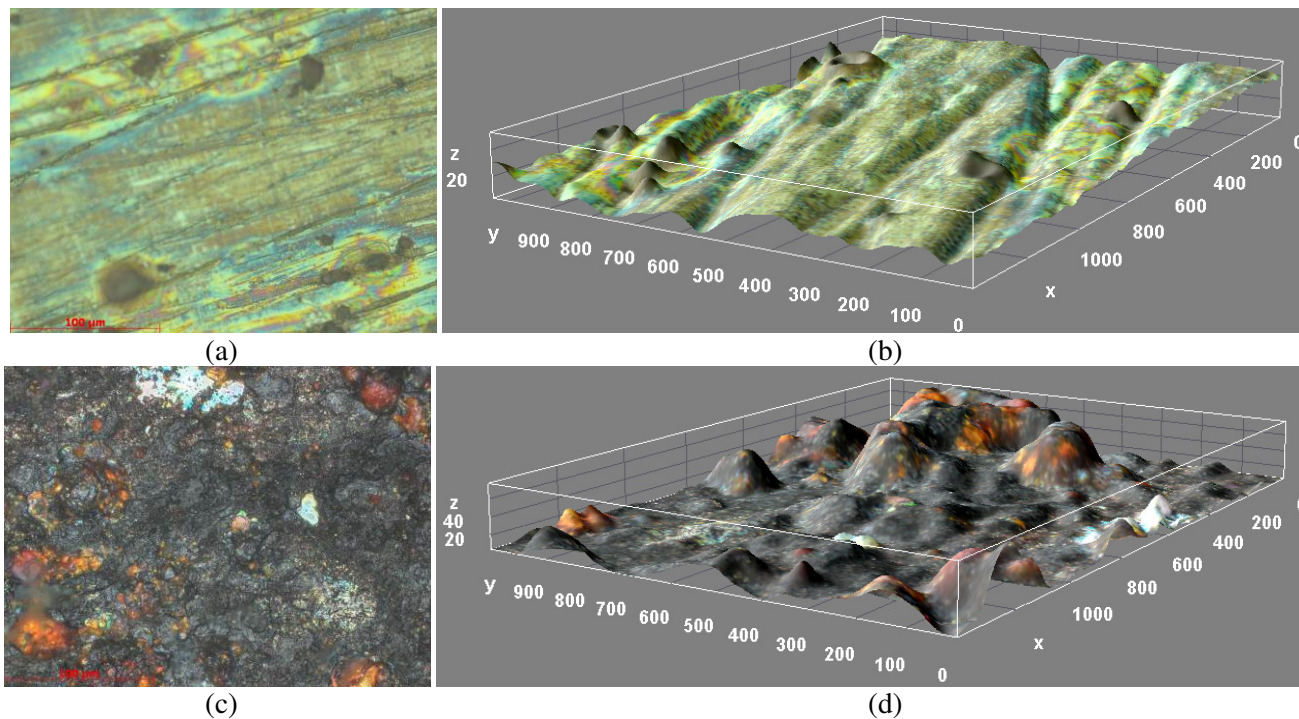


Figura 5. Textura y topografías de las muestras sin tratamiento superficial a 0 (a y b) y (c y d) a 28 días de inmersión en solución de NaCl al 3 %wt.

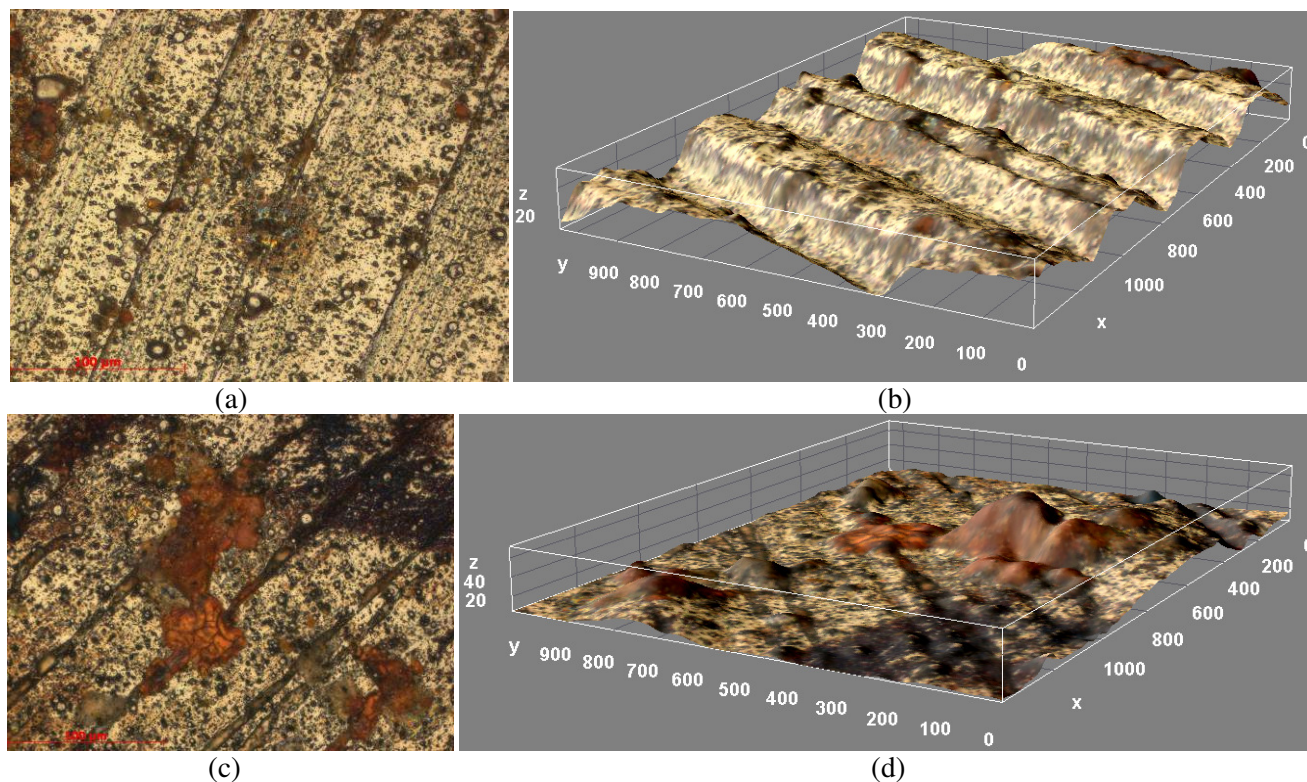


Figura 6. Textura y topografías de las muestras implantadas con iones de Ti a 5 keV (a y b) y a 10keV (c y d) después de 28 días de inmersión en solución de NaCl al 3 %wt.

favoreciendo su comportamiento frente a la corrosión en ambientes agresivos.

A descargas de 5 keV se presenta mayor estabilidad del pulso de corriente y voltaje durante el proceso de implantación que a 10 keV, lo que disminuye el efecto corrosivo de la solución sobre la superficie del material quedando demostrado en las V_{corr} determinadas valores menores; caso que se confirmó durante la inspección topográfica, en las cuales las muestras implantadas a 5keV de energía presentan escasos puntos o corrosión por picadura producto del ataque de la solución de NaCl al compararse con las de 10 keV.

De acuerdo con los diagramas de extrapolación de Tafel obtenidos, las curvas de polarización catódica presentan una aproximación de la corriente de corrosión con la corriente límite, así mismo, en las pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica, para los diagramas Nyquist/Bode se representan espectros de impedancia cuando la reacción catódica es controlada por difusión, lo que indica que la etapa controlante del sistema es la transferencia de masa.

5. AGRADECIMENTOS

A Colciencias por la financiación parcial del proyecto MOSTET código: 1102-06-17823.

6. REFERENCIAS

- [1]. Khvesyuk V. I. and Tsygankov, P. A. The Use of a High-Voltage Discharge at Low Pressure for 3D Ion Implantation. In: Surface and Coatings Technology. 1997; 96: 68-74.
- [2]. Rueda, A., Dulce, H., Peña, G. and Torres, P. Estudio del Comportamiento de la Corrosión Nitrógeno. In: Revista Colombiana de Física. 2006; 38 (2): 894-897.
- [3]. Kelly R. G., Scully J. R., Shoesmith D. W., Buchheit R. G., Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering. Marcel Dekker: USA, 2002.
- [4]. Peña D., Fontalvo P., Estupiñán H., E. Dannier V. Niño, Vesga W. Experimental Evaluation of Corrosion Resistance of an AISI-SAE 4140 Steel Implanted With Nitrogen Ions. In: Revista Dyna. 2009; 76 (159): 43-52.
- [5]. Valbuena Niño E. D., Dulcé H. J. and Dugar-Zhabon V. Characterization of AISI 4140 Steel Implanted by Nitrogen Ions. In: Revista Colombiana de Física. 2010; 42 (3): 387-392.
- [6]. Dougar-Jabon V D, Dulce Moreno J. and Tsygankov, P. A. High Voltage Pulse Discharge for ion Treatment of Metals. In: Review of Scientific Instruments. 2002; 73: 828-830.
- [7]. J. H. Dulce Moreno, P. A. Tsygankov, V. D. Dugar-Zhabon, E. D. V. Niño, F. F. Parada, Estudio de los Haces Electrónicos en la Descarga Eléctrica de Alto Voltaje a Bajas Presiones. In: Puente Revista Científica. 2011, 5 (2): 21-26.
- [8]. Ely D. V. Niño, P. Tsygankov, A. Plata, C. Ochoa, F. Parada, C. Chacón, V. Dugar-Zhabon. Study of Volt-Ampere Characteristics and Functioning Peculiarities of a Vacuum Arc Sprayer. In: Revista Colombiana de Física. 2011; 43 (2): 458-462.
- [9]. Dougar-Jabon V D, Dulce Moreno and Tsygankov P. Device JÚPITER for Ion Implantation. In: Revista Colombiana de Física. 1998; 30: 181-184.
- [10]. ASTM E3-01. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens; 2001.
- [11]. Valbuena Niño E. D., Garnica H., Dugar-Zhabon V., Martínez D., Duran F. Characterization of API 5LX 65 Steel Gravimetric Coupons Implanted by Nitrogen and Titanium Ions. In: Revista Colombiana de Física. 2011; 43 (1): 134-137.
- [12]. Valbuena Niño E. D., Peña D., Salinas D. V., Chinchilla L. F. Modificación Superficial de un Acero AISI SAE 1045 Mediante la Implantación de Iones de Nitrógeno y Titanio. In: Revista Iteckne. 2011; 8 (1): 31-36.
- [13]. ASTM G109-07. Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments; 2007.
- [14]. ASTM G102-89. Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements; 2010.
- [15]. ASTM G1-03. Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens; 2003.
- [16]. ASTM G5-94. Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potenciodynamic Anodic Polarization Measurements; 2004.
- [17]. ASTM G59-97. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements; 2009.
- [18]. ASTM G106-89. Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements; 2010.
- [19]. ASTM C876-91. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete (Withdrawn 2008); 1999.