



# Correlación de la corrosión del acero al carbono considerando diferentes concentraciones de dióxido de azufre y cloruros.

Castro, R., Menjívar, M., Menjívar, C.

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas"

cmenjivar@uca.edu.sv

**Abstract**—La corrosión atmosférica se define como el deterioro que sufren los materiales debido a su exposición a la atmósfera y sus contaminantes. La construcción de correlaciones de este fenómeno resulta importante debido a que implica un ahorro de esfuerzo, tiempo y dinero en el entendimiento de la corrosión de un sitio específico, puesto que predicen el daño que un material sufrirá basados en información atmosférica que suele ser registrada por las estaciones meteorológicas habituales.

El presente trabajo tiene por objetivo la creación de correlaciones matemáticas que predigan satisfactoriamente el deterioro sufrido por el acero al carbono en función de los parámetros ambientales dióxido de azufre y cloruros, a través de ensayos de laboratorio en condiciones controladas.

Entre los principales resultados de la investigación, se cuentan la construcción de dos correlaciones lineales de corrosión atmosférica generados a partir de datos de laboratorio: La primera correlación corresponde al comportamiento de la tasa de corrosión del acero al carbono respecto a la

concentración de cloruros y está representado satisfactoriamente por una línea recta con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.9071. La segunda correlación ofrece información acerca del comportamiento de la corrosión del acero al carbono expuesto a una mezcla de dióxido de azufre y cloruros. Se determinó que ante variaciones del primero, manteniendo el segundo en concentración constante, la tasa de corrosión se puede representar satisfactoriamente por una línea recta con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.9347.

**Palabras clave**—Corrosión, Acero al carbono, Correlación de corrosión, Modelación de la corrosión, Dióxido de azufre, Ion cloruro.

## I. INTRODUCCIÓN

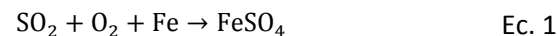
Los estudios de modelación de la corrosión atmosférica son de gran importancia, puesto que gracias a la construcción de correlaciones matemáticas entre el potencial de corrosión y parámetros atmosféricos, puede prescindirse de estudios en campo de mapeo de la corrosión atmosférica que suelen extenderse por varios años, y en su lugar obtenerse valores

aproximados de forma instantánea a partir de la información atmosférica que se monitorea en un sitio determinado, implicando un ahorro de tiempo y dinero.

El presente trabajo se realizó con el objetivo de construir correlaciones que predigan el potencial de corrosión del acero al carbono ante atmósferas contaminadas por dióxido de azufre y ion cloruro, a través de ensayos controlados de laboratorio. Se pretende además hacer un análisis estadístico simple de los resultados experimentales y una comparación con modelos de corrosión que han sido construidos en importantes estudios iberoamericanos.

La corrosión se define como el deterioro indeseable de un material al interactuar éste con su medio ambiente [1]. Ésta depende de las propiedades de la capa de electrolito que se forma en la superficie, y de la cantidad y tipo de partículas en la atmósfera, así como de la duración de la acción corrosiva sobre el metal [2]. Los principales agentes corrosivos son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), que proviene de quema de combustible, y el ion cloruro (Cl<sup>-</sup>), que proviene del spray marino [3].

Respecto al mecanismo de reacción del SO<sub>2</sub>, este gas es adsorbido fácilmente en la superficie metálica y absorbido en la película de agua formada en la misma, y tiende a formar iones sulfato debido a al agua y al oxígeno atmosférico. Los electrones necesarios para formar este ion pueden provenir de reacciones paralelas, como la disolución anódica del hierro o la oxidación de iones Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup> como se expresa en la Ec. 1 [4]:



La oxidación del azufre (IV) se amplifica por la presencia de hierro (III), por lo que aumenta la absorción del SO<sub>2</sub> atmosférico y la acidificación de la película húmeda gracias al equilibrio de la hidrólisis del FeSO<sub>4</sub> presentado en la Ec. 2:



Además, la acidificación del medio causada por la formación de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y la presencia del oxígeno ambiental causan la oxidación de más unidades de hierro metálico, de acuerdo a la Ec. 3:



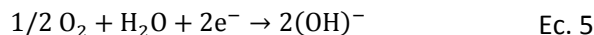
El ion sulfato no se consume en el proceso, actuando solo como catalizador y es detenido hasta que es removido por lixiviación o por desprendimiento de herrumbre [4].

En cuanto al mecanismo de reacción del ion Cl<sup>-</sup>, las sales MgCl<sub>2</sub> y NaCl provenientes del spray marino promueven la formación de una capa de humedad sobre la superficie metálica debido a que son higroscópicas [5]. El proceso inicia con la disolución anódica del hierro, según la Ec. 4:

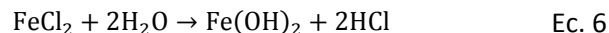




Los electrones liberados aquí reaccionan para formar el ion  $(\text{OH})^-$  según la Ec. 5 [6]:



Este anión entra en competencia con el ion  $\text{Cl}^-$  y el proceso se divide en dos vías. Al formarse el compuesto  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  se forma una capa sólida de herrumbre frenando la corrosión debido a la estabilidad del compuesto [5]. Pero al formar  $\text{FeCl}_2$  ocurre lo contrario debido a la solubilidad del compuesto presentando la reacción de hidrólisis en la Ec. 6:



Se observa que el ion  $\text{Cl}^-$  no se consume, actuando solo como catalizador [6].

Debido a la importancia del proceso de corrosión, se han realizado grandes esfuerzos para establecer expresiones analíticas que describan el comportamiento de los metales a la atmósfera en función de variables que pueden ser determinadas fácilmente [7]. Estos modelos son de utilidad y pueden responder a interrogantes acerca de la durabilidad de los materiales y los costos asociados a su deterioro, además de ofrecer información adicional acerca de la relación entre las variables ambientales en la cinética de la corrosión [8]. Sin embargo, se tienen dificultades debido a la complejidad de los procesos corrosivos y la no-linealidad de los datos obtenidos en

estudios [7]. Los factores que afectan el proceso son numerosos y variados, y sus interrelaciones complejas y difíciles de describir, lo que vuelve aún más difícil la creación de los modelos [9].

Los modelos dependen del tipo de regresión y del número de parámetros considerados en la correlación. Por ejemplo, se encuentran los modelos más simples que consideran el efecto de un solo parámetro en el potencial de corrosión. Chico, de la Fuente, Simancas, & Morcillo [10] reportan los modelos más representativos para el  $\text{SO}_2$  y  $\text{Cl}^-$  atmosféricos, utilizando los resultados del estudio MICAT e ISOCORRAG. Se determinó la existencia de una dependencia entre la concentración de los contaminantes atmosféricos y el potencial de corrosión, que resultó de la exposición de probetas de metales de referencia a atmósferas monocontaminadas por  $\text{SO}_2$  (atmósferas urbanas e industriales) o  $\text{Cl}^-$  (atmósferas marinas puras).

Para el caso del acero al carbono, Morcillo indica la existencia de una correlación lineal entre la velocidad de corrosión del acero y el contenido de  $\text{SO}_2$  en la atmósferas con un  $R = 0.89$  (ver la figura 1); mientras que en el caso del  $\text{Cl}^-$ , la relación lineal se mantiene siempre que la salinidad de la atmósfera sea mayor a  $50 \text{ mg Cl}^-/\text{m}^2 \text{ día}$  [10].

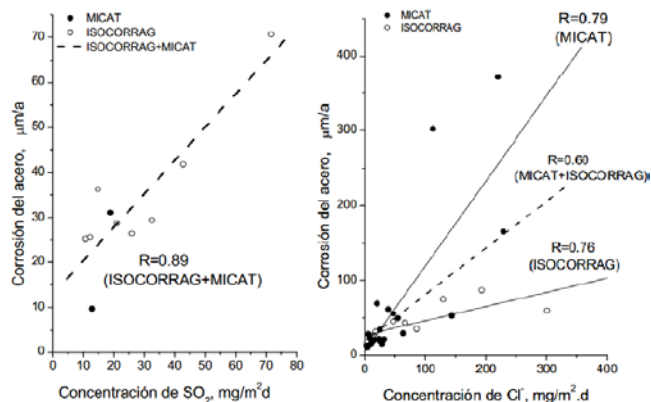


Fig. 1. Modelos simples de corrosión para un solo contaminante [10].

En El Salvador, no se ha realizado estudios grandes de corrosión atmosférica; lo que convierte a las investigaciones realizadas en la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA) a través del Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales en pioneras en el tema de corrosión y modelación del fenómeno. El presente trabajo presenta la base para la metodología de futuras investigaciones en modelación de la corrosión atmosférica en el país.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Selección de los tipos de ensayo

Los ensayos realizados consistieron en la exposición de diversas series de láminas de acero a atmósferas generadas con presencia de los agentes corrosivos  $\text{SO}_2$  y  $\text{Cl}^-$  en cantidades conocidas. Para ello, se seleccionaron cuatro condiciones distintas para determinar las relaciones entre la cantidad de los

agentes corrosivos y el potencial de corrosión: en el primer ensayo (ensayo A) se determinó la relación entre la cantidad del ion  $\text{Cl}^-$  y la velocidad de corrosión, en ausencia de  $\text{SO}_2$ . Para ello, se expusieron nueve pares de láminas a nueve atmósferas salinas generadas a partir de soluciones de  $\text{NaCl}$  con concentraciones de 0.00, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 1.50, 3.00, 4.50 y 6.00 % m/v; en el segundo ensayo (ensayo B) se determinó la corrosividad del  $\text{SO}_2$  en ausencia del ion  $\text{Cl}^-$  mediante la exposición de 10 láminas a atmósferas generadas a partir de la combustión de 0.1, 0.4, 0.7 y 1.0 g de azufre. En el tercer ensayo (ensayo C), se generó una atmósfera con concentración constante de  $\text{SO}_2$ , quemando 1.0 g de azufre en cada recipiente, pero haciendo variar la concentración del ion  $\text{Cl}^-$ , mediante soluciones de  $\text{NaCl}$  en concentración de 0.00, 0.15, 0.30, 0.45 y 0.60 % m/v; en el cuarto ensayo (ensayo D), de manera análoga, se mantuvo fija la concentración del ion  $\text{Cl}^-$ , utilizando una solución de 0.60 % m/v, y se hizo variar la concentración de  $\text{SO}_2$ , quemando cantidades de azufre de 0.0, 0.1, 0.4, 0.7 y 1.0 g.

### B. Metodología para determinar el potencial de corrosión

Para los ensayos se expusieron durante un periodo de 10 días cinco series de láminas de acero al carbono a atmósferas con presencia de  $\text{SO}_2$  y  $\text{Cl}^-$ . Las dimensiones de las láminas evaluadas fueron de 5 cm × 2 cm × 0.1 cm.

Los materiales y equipo necesarios para el montaje de los ensayos se muestran en la Tabla I:



TABLA I  
MATERIALES Y EQUIPO PARA ENSAYOS DE LABORATORIO.

Cantidad	Material/equipo
10 – 20	Recipientes plásticos de 3.785 L (1 galón) con tapa horadada
10 – 20	Tubos de vidrio con manguera de hule adaptada.
	Papel de lija de P320-granos.
1 L	Acetona grado industrial.
	Calibre o vernier (1/20 mm de precisión).
	Balanza analítica digital con precisión de 0.0001g

Fuente: Elaboración Propia

La preparación de los especímenes se llevó a cabo de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM G1. Cada espécimen se lijó hasta obtener un acabado uniforme. Posteriormente, se determinó las dimensiones de cada uno utilizando un vernier y se identificaron adecuadamente. Luego, se desengrasaron utilizando acetona y se registró su masa en la balanza analítica. Cada muestra se sujetó a un hilo de teflón debidamente identificado y se suspendieron en el interior de recipientes de plásticos de 3.785 L donde se procedió a crear las atmósferas corrosivas descritas anteriormente.

Para el retiro, los recipientes se abrieron dentro de la cámara extractora de gases, y se registró la masa de cada espécimen. El análisis se realizó de acuerdo a la norma ASTM G-116, el cual consiste en determinar la pérdida de masa de cada muestra luego de eliminar los productos de corrosión formados durante la exposición mediante un proceso de limpieza. Además, según la norma ASTM G-1 primero se eliminan mecánicamente los

productos de corrosión antes de realizar alguna limpieza química.

Los materiales para realizar la limpieza química se muestran en la Tabla II:

TABLA II  
REACTIVOS Y EQUIPO PARA REALIZAR LIMPIEZA QUÍMICA

Cantidad	Reactivo/equipo
100 mL	Ácido clorhídrico (HCl) 12 M (36 % m/m, densidad de 1.18 g/mL) grado reactivo.
2 g	Trióxido de antimonio ( $Sb_2O_3$ ) grado reactivo.
5 g	Cloruro de estaño ( $SnCl_2$ ) grado reactivo.
Suficiente	Agua destilada para limpieza.
1	Beaker de vidrio de 250 mL.
1	Balanza analítica digital con precisión de 0.0001 g.

Fuente: Elaboración Propia

Para la limpieza, se preparó una solución con 100 mL de HCl concentrado, 2 g de  $Sb_2O_3$  y 5 g de  $SnCl_2$ . Se sumergió cada muestra en la solución por un minuto a una temperatura ambiente dentro de una cámara extractora de gases. Luego, cada muestra se enjuagó con agua destilada y se secó con aire. Posteriormente se pesó cada muestra registrando el resultado y se repitió nuevamente el ciclo de lavado. El número de ciclos de lavado se realizó hasta observar que no ocurrieron cambios notables en los valores de masa de las muestras. Además, se prepararon dos especímenes como blanco que no fueron expuestos para corregir la pérdida de masa de metal base durante el proceso de limpieza.

Para el cálculo de la velocidad de corrosión, primero se determinó la pérdida de masa (en gramos) de las muestras, según la Ec. 7:

$$\text{masa}_0 - \text{masa}_f = \text{pérdida de masa} \quad \text{Ec. 7}$$

Luego, se determinó el área superficial de las muestras mediante la Ec. 8, donde Largo (L), ancho (A), espesor (E) y diámetro del agujero (D) (en metros). La última multiplicación del lado derecho representa el área superficial al interior del agujero perforado en cada lámina:

$$2LA + 2LE + 2AE + 2AE - 2\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \pi DE = A \text{ total} \quad \text{Ec. 8}$$

Con los valores obtenidos en ambas ecuaciones y junto con el valor del tiempo de exposición de las probetas en unidades de años, se calculó la velocidad de corrosión con la Ec. 9:

$$\frac{\text{pérdida de masa}}{\text{área} \times \text{tiempo}} = \text{velocidad de corrosión} \quad \text{Ec. 9}$$

### C. Creación de atmósferas corrosivas en el laboratorio

Para la atmósfera salina se vertió aproximadamente 500 mL de solución en cada recipiente. La atmósfera salina se crea al evaporarse esta solución.

Para preparar las atmósferas de SO<sub>2</sub> se pesó la cantidad requerida de azufre en polvo en la balanza analítica y luego de trasladarla a un crisol, se calentó hasta que empezó la

combustión y se introdujo en el recipiente correspondiente hasta que cesó la combustión y se extrajo el crisol.

El material y equipo para crear las atmósferas se muestra en la Tabla III.

TABLA III  
REACTIVO Y EQUIPO PARA CREAR ATMÓSFERAS CORROSIVAS

Cantidad	Reactivo/equipo
10 g	Azufre en polvo
2 L	Soluciones de NaCl de 1.5, 3.0, 4.5 y 6.0 % m/v
1	Crisol con extensión (cuchara deflagrante)
1	Mechero Tirril con manguera

Fuente: Elaboración Propia

### D. Análisis de datos

Las pruebas estadísticas utilizadas para el análisis de los datos fueron la Regresión lineal simple y el análisis de varianza ANOVA.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A. Resultados del Ensayo A (Cl<sup>-</sup> variable)

Los resultados del ensayo A, que fue realizado considerando concentraciones de Cl<sup>-</sup> variables, se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV  
CONCENTRACIONES DE NaCl Y TASA DE CORROSIÓN  
PROMEDIO PARA EL ENSAYO A

Probeta	Concentración de NaCl (% m/v)	Tasa de corrosión promedio (g/m <sup>2</sup> año)
A1	0.00	32.63
A2	0.15	29.18
A3	0.30	63.89
A4	0.45	73.50
A6	1.50	119.91
A7	3.00	140.04
A8	4.50	180.65
A9	6.00	190.32

Fuente: Elaboración Propia

En base a los datos anteriores, se realizó un análisis de regresión para observar el grado de ajuste de los datos en un modelo lineal y se construyó el gráfico presentado en la figura 2.

En el gráfico se puede apreciar una tendencia lineal muy marcada en el comportamiento de la serie de datos. El análisis indicó que los datos del experimento se ajustaban a una correlación lineal con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9084$ , lo que indica un alto grado de correlación entre la tasa de corrosión del acero al carbono ante las variaciones de

concentración del NaCl. Los datos fueron sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) con una confianza del 99.95%, del que se obtuvo como resultado un coeficiente  $F = 59.47654021$  y un coeficiente  $F_{\text{crítico}} = 0.00024921$ . De estos valores, se determinó que los datos analizados presentan significancia estadística, lo que significa que éstos no se comportan aleatoriamente.

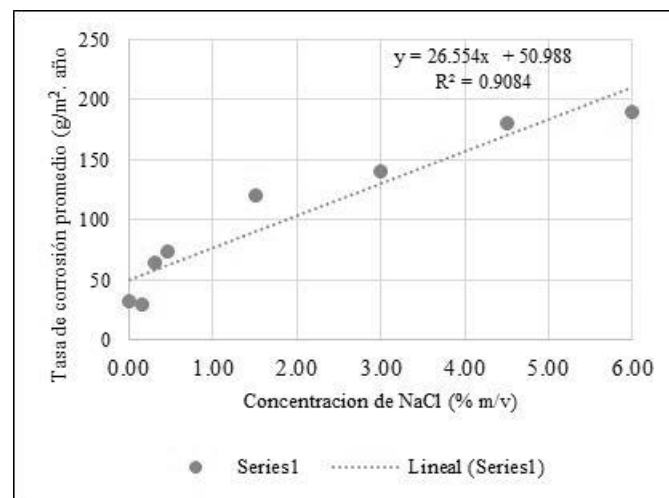


Fig. 2. Correlación de corrosión referida a la concentración de Cl.

De esta forma, se expresa la correlación construida a través de la Ec. 8, donde C representa la tasa de corrosión del acero al carbono en g/m<sup>2</sup> año y Cl representa la concentración de la solución NaCl a la que se exponen las probetas en % m/v.

$$C = 26.554Cl + 50.988 \quad \text{Ec. 10}$$

Es importante señalar que la correlación construida a través del experimento A se benefició de la gran cantidad de puntos medidos, y por ello muestra una tendencia muy específica que concuerda con los modelos lineales presentados por [10]. Además, la concentración de NaCl corresponde a la de la solución que genera la atmósfera de la prueba; aunque no es la concentración en el vapor, se espera que ésta sea proporcional al de la solución.

*B. Resultados del Ensayo B (SO<sub>2</sub> variable)*

Los resultados del ensayo B, que fue realizado considerando concentraciones de SO<sub>2</sub> variables, se muestran en la Tabla V.

TABLA V  
CONCENTRACIONES DE SO<sub>2</sub> Y TASA DE CORROSIÓN  
PROMEDIO PARA EL ENSAYO B

Probeta	Concentración de SO <sub>2</sub> (mg/L)	Tasa de corrosión promedio (g/m <sup>2</sup> año)
B1	0.0000	155.53
B3	211.14	325.68
B4	369.50	276.37
B5	527.85	281.08

Fuente: Elaboración Propia

En base a los datos anteriores, se realizó un análisis de regresión para observar el grado de ajuste de los datos en una correlación lineal y se construyó el gráfico presentado en la figura 3.

Como se puede apreciar en el gráfico, la serie de datos fue incapaz de indicar una tendencia específica en su comportamiento. El análisis de regresión indica un R<sup>2</sup> = 0.4059, lo que representa un ajuste pobre a la correlación lineal esperada. Los datos fueron sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) con una confianza de 99.95% y se obtuvo como resultado un coeficiente F = 1.36630688 y un coeficiente F<sub>crítico</sub> = 0.362915154, por lo que se determinó que los datos no se comportaron de manera aleatoria.

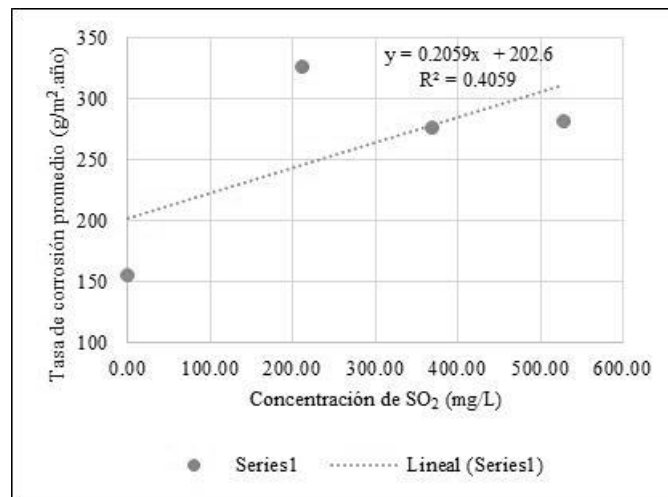


Fig. 3. Correlación de corrosión referida a la concentración de SO<sub>2</sub>.

Por tanto, no fue posible construir una correlación que describiera de forma efectiva la correlación entre la tasa de corrosión del acero al carbono y las variaciones en la concentración de SO<sub>2</sub>.



No obstante, es importante señalar que la poca cantidad de datos utilizables en el análisis pudo haber afectado los resultados, al ser insuficientes para poder evidenciar la verdadera tendencia de los datos. Por otra parte, este experimento (y en general, todos en los que se creó una atmósfera de SO<sub>2</sub>) pudieron haberse visto afectados por los escapes de gas SO<sub>2</sub> en las cámaras de exposición o durante el proceso de preparación del ensayo.

C. Resultados del Ensayo C (Cl<sup>-</sup> variable, SO<sub>2</sub> constante)

Los resultados del experimento C, que fue realizado considerando a una misma concentración de SO<sub>2</sub> y variando la concentración de NaCl, se muestran en la Tabla VI.

En base a los datos anteriores, se realizó un análisis de regresión para observar el grado de ajuste de los datos en una correlación lineal y se construyó el gráfico presentado en la figura 4.

TABLA VI  
CONCENTRACIONES DE SO<sub>2</sub> Y NaCl, Y TASA DE CORROSIÓN PROMEDIO PARA EL ENSAYO C

Probeta	Concentración de SO <sub>2</sub> (mg/L)	Concentración de NaCl (% m/v)	Tasa de corrosión promedio (g/m <sup>2</sup> año)
C2	527.85	0.1500	2563.35
C3	527.85	0.3000	6050.08
C4	527.85	0.4500	7564.37
C5	527.85	0.6000	5966.58

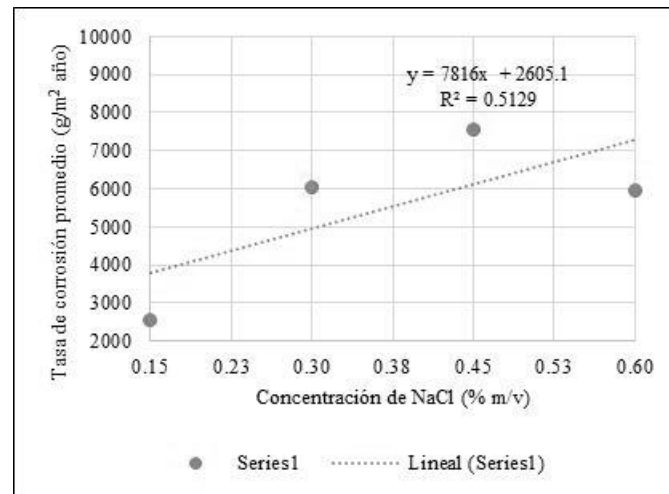


Fig. 4. Correlación de corrosión referida a la concentración de NaCl manteniendo la concentración de SO<sub>2</sub> constante.

Como se aprecia en el gráfico, la serie de datos no se ajustó satisfactoriamente a la correlación lineal, presentando un R<sup>2</sup> = 0.5129. Los datos fueron sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) con una confianza de 99.95% y se obtuvo como resultado un coeficiente F = 2.1055718 y un coeficiente F<sub>crítico</sub> = 0.283859552, por lo que se determinó que los datos no se comportaron de manera aleatoria.

Por tanto, no fue posible construir una correlación que describiera de forma efectiva la correlación entre la tasa de corrosión del acero al carbono y las variaciones en la concentración de NaCl manteniendo la concentración de SO<sub>2</sub> constante.

Es importante señalar que, como ocurre con el ensayo B, los resultados pudieron verse afectados por la cantidad insuficiente de datos para analizar. Además, pudieron existir variaciones en la concentración de  $\text{SO}_2$  de las cámaras de exposición debido a las características del método para producirlo. Otra característica resaltable de los resultados es el orden de magnitud en el que se encuentra toda la serie de datos, muy por encima del orden de magnitud de los ensayos A y B. Esto deja en evidencia la agresividad del efecto combinado del  $\text{SO}_2$  con la humedad proveniente de la solución salina, puesto que en el ensayo B ( $\text{SO}_2$  en seco), no se observó un ataque tan agresivo a las probetas. En este ensayo, el daño sufrido es de hasta diez veces el daño sufrido en el ensayo B.

*D. Resultados del Ensayo D (Cl<sup>-</sup> constante,  $\text{SO}_2$  variable)*

Los resultados del ensayo D, que fue realizado considerando una concentración de  $\text{Cl}^-$  constante y variando la concentración de  $\text{SO}_2$ , se muestran en la Tabla VII.

TABLA VII  
CONCENTRACIONES DE  $\text{NaCl}$  Y  $\text{SO}_2$  Y TASA DE CORROSIÓN  
PROMEDIO PARA EL ENSAYO D

Probeta	Concentración de $\text{SO}_2$ (mg/L)	Concentración de $\text{NaCl}$ (% m/v)	Tasa de corrosión promedio ( $\text{g}/\text{m}^2$ año)
D2	52.79	0.6000	5915.72
D3	211.14	0.6000	7394.60
D4	369.50	0.6000	7646.94
D5	527.85	0.6000	9447.96

En base a los datos anteriores, se realizó un análisis de regresión para observar el grado de ajuste de los datos en una correlación lineal y se construyó el gráfico presentado en la figura 5.

Como se puede apreciar, los datos siguen una marcada tendencia lineal en su comportamiento. Esto se ve corroborado por el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9347$  obtenido en la regresión, que indica un ajuste satisfactorio a la correlación lineal. Los datos también fueron sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) con una confianza del 99.95%, del que se obtuvo como resultado un coeficiente  $F = 28.6355159$  y un coeficiente  $F_{\text{crítico}} = 0.033192731$ . De estos valores, se determinó que los datos analizados presentan significancia estadística, lo que significa que éstos no se comportan aleatoriamente.

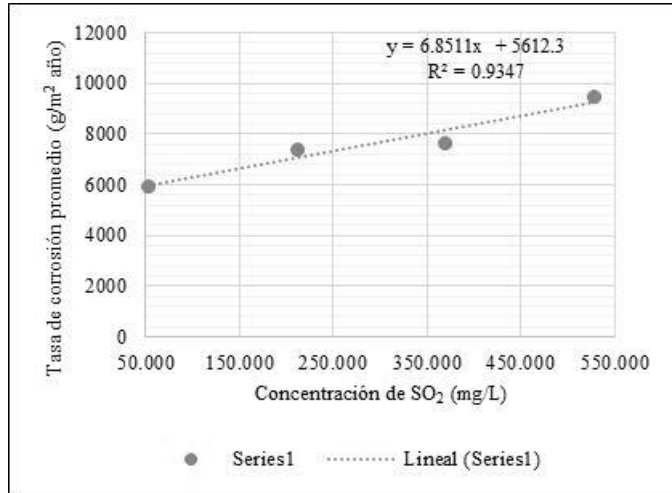


Fig. 5. Correlación de corrosión referida a la concentración de SO<sub>2</sub> manteniendo la concentración de NaCl constante.

De esta forma, se expresa la correlación construida a través de la Ec. 9, donde C representa la tasa de corrosión del acero al carbono en g/m<sup>2</sup> año y S representa la concentración de SO<sub>2</sub> presente en mg/L.

$$C = 6.8511S + 5612.3 \quad \text{Ec. 11}$$

Es notable la alta correlación encontrada a pesar del pequeño número de datos considerados, pues al igual que los ensayos B y C, los resultados del ensayo D sufrían el riesgo de no mostrar una tendencia por el pequeño número de datos analizados.

Nuevamente, se evidencia el aumento en el orden de magnitud del daño sufrido por las probetas debido al efecto combinado

del SO<sub>2</sub> con la humedad proveniente de la solución NaCl. Al igual que en el ensayo C, el daño es de hasta veinte veces el correspondiente al del ensayo B (SO<sub>2</sub> en seco).

#### IV. CONCLUSIONES

De acuerdo a las mediciones de corrosión obtenidas en el ensayo de laboratorio utilizando concentraciones de 0.0, 211, 370 y 528 mg SO<sub>2</sub>/L, no se observó una tendencia lineal en el comportamiento de la corrosión respecto a las concentraciones del agente corrosivo. Esto puede deberse al reducido número de puntos evaluados en el ensayo y a posibles escapes de gas durante la ejecución del experimento. No obstante, el análisis estadístico de los datos indicó con un 99.95% de confianza que las mediciones de corrosión presentaron significancia estadística, es decir, que no fueron valores aleatorios.

De acuerdo a las mediciones de corrosión obtenidas en el ensayo de laboratorio utilizando concentraciones de 0.0, 0.15, 0.3, 0.45, 1.5, 3.0, 4.5 y 6.0% m/v solución NaCl para recrear un ambiente salino, se observó una marcada tendencia lineal en el comportamiento de la corrosión respecto a las concentraciones del agente corrosivo, con un alto coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9084$ , que indica una alta calidad para predecir el comportamiento del fenómeno en un rango de concentraciones entre 0.0 – 6.0% m/v de NaCl. Además, el análisis de significancia de los datos obtenidos indicó con un 99.95% de confianza que éstos presentaron significancia estadística, es decir, que no fueron valores aleatorios.



Según las mediciones de corrosión obtenidas en el ensayo de laboratorio utilizando concentraciones 0.15, 0.30, 0.45 y 0.60% m/v de solución NaCl para recrear el ambiente salino en presencia de una cantidad constante de 528 mg SO<sub>2</sub>/L, no se observó una tendencia lineal en el comportamiento de la corrosión respecto a la concentración del agente corrosivo Cl<sup>-</sup>. No obstante, en el ensayo de laboratorio utilizando concentraciones de 53, 211, 370 y 528 mg SO<sub>2</sub>/L en presencia de una solución de concentración constante de 0.6% m/v de NaCl, se observó una marcada tendencia lineal en el comportamiento de la corrosión respecto a las concentraciones del agente corrosivo SO<sub>2</sub>, con un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> = 0.9347, que indica que la correlación puede predecir el comportamiento del fenómeno con una alta calidad en un rango de concentraciones entre 0.0 – 527.9 mg SO<sub>2</sub>/L. Además, el análisis estadístico de los datos obtenidos en ambos ensayos indicó con un 99.95% de confianza que éstos presentaron significancia estadística, es decir, que no fueron valores aleatorios.

#### V. REFERENCIAS

- [1] L. Shreir, R. Jarman y G. Burstein, «*Corrosion Metal/Environment Reactions*,» Butterworth Heinemann, London, 2000.
- [2] G. Fomin, *Encyclopaedia of International Corrosion Standards*, Londres: Maney, 2003.
- [3] *Engineering Design Handbook*, U.S. Army Materiel Command, 2011.
- [4] I. Cole, *Atmospheric Corrosion*, Victoria: Elsevier, 2010.
- [5] P. R. Roberge, «*Handbook of Corrosion Engineering*,» McGraw-Hill, New York, 2000.
- [6] N. Bensalah, *Pitting Corrosion*, Shanghai: InTech, 2012.
- [7] S. Pintos, N. Queipo, O. Troconis de Rincón, Á. Rincón y M. Morcillo, «*Artificial neural network modeling of atmospheric corrosion in the MICAT project*,» Pergamon, 2000.
- [8] S. Feliu, M. Morcillo y S. Feliu Jr., «*The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters I. Annual corrosion*,» Pergamon, Gran Bretaña, 1993.
- [9] J. Cai, R. Cottis y S. Lyon, «*Phenomenological modelling of atmospheric corrosion using an artificial neural network*,» Pergamon, Manchester, 1999.
- [10] B. Chico, D. de la Fuente, J. Simancas y M. Morcillo, «*Corrosión atmosférica de metales. Efecto de parámetros meteorológicos y de contaminación*,» Madrid.