

APLICACIÓN DE SOFTWARE ESTADÍSTICOS Y MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN EL ACERO

APPLICATION OF STATISTICAL SOFTWARE AND MATHEMATICAL MODELS FOR THE EVALUATION OF THE CORROSION RATE IN STEEL

Emilio Miguel Llueras Pérez¹, Jeyris Martínez Gutiérrez², Lilia del Carmen González Ortega³, Jorge Alipio Fundora Mirabal⁴

¹Ingeniero Mecánico, Laboratorio de Ensayos de Tropicalización, Carretera El Morro No. 7246 Km 2 ½, Reparto Cojímar, La Habana, Cuba, email: emilio@labet.ctec.cu; ²Ingeniera Química, Laboratorio de Ensayos de Tropicalización, Carretera El Morro No. 7246 Km 2 ½, Reparto Cojímar, La Habana, Cuba, email: jeyris@labet.ctec.cu; ³Ingeniera Química, Master, Laboratorio de Ensayos de Tropicalización, Carretera El Morro No. 7246 Km 2 ½, Reparto Cojímar, La Habana, Cuba, email: lilia@labet.ctec.cu; ⁴Ingeniero Mecánico, Laboratorio de Ensayos de Tropicalización, Carretera El Morro No. 7246 Km 2 ½, Reparto Cojímar, La Habana, Cuba, email: jorge@labet.ctec.cu

Rev. U.D.C.A Act.& Div. Cient. 21(1): 179-186, Enero-Junio 2018
<https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.676>

RESUMEN

La corrosión es un fenómeno que se presenta día a día, no solo en los procesos industriales sino en la propia naturaleza. Debido a que la corrosión tiene graves consecuencias, desde hace mucho tiempo, es considerada un problema de gran magnitud alrededor del mundo. En este trabajo, se aplican métodos estadísticos para el análisis de resultados experimentales. La aplicación del diseño de experimentos de bloques al azar permitió evaluar el comportamiento de la velocidad de corrosión del acero, a partir de software estadísticos y modelos matemáticos, teniendo en cuenta la influencia de la variable bloque: tiempo de exposición en la cámara de niebla salina neutra y el comportamiento del grado de oxidación. Se evidenció, que los factores tienen un efecto estadísticamente significativo en la velocidad de Corrosión, al nivel de confianza de 95,0%. El diseño de experimento garantiza minimizar la cantidad de recursos, la posibilidad del estudio de las variaciones de los factores durante el proceso y la selección de una estrategia sobre las decisiones a tomar en el futuro, con vistas a reducir la intensidad del fenómeno.

Palabras clave: Corrosión, diseño experimental, acero, variables.

SUMMARY

Corrosion is a phenomenon that occurs every day, not only in industrial processes but also in nature itself. Because corrosion has serious consequences, it has long been considered a problem of great magnitude around the world. Statistical

methods are applied in this work for the analysis of experimental results. The application of the randomized block experimental design allowed the evaluation of the behavior of the steel corrosion rate from statistical software and mathematical models, taking into account the influence of the block variable: exposure time in the neutral salt fog chamber and the behavior of the degree of oxidation. It was evidenced that the factors have a statistically significant effect on the corrosion rate at the confidence level of 95.0%. The design of the experiment guarantees to minimize the amount of resources, the possibility of studying the variations of the factors during the process and the selection of a strategy on the decisions to be made in the future, in order to reduce the intensity of the phenomenon.

Key words: Corrosion, experiment design, steel, variable.

INTRODUCCIÓN

La estadística experimental –en el mundo moderno- es una necesidad real, presente en todas las áreas del conocimiento humano, como una herramienta para auxiliar las decisiones a ser tomadas, permitiendo mayor seguridad a la investigación a ser transformada en tecnología y utilizada por la humanidad o por parte de ella (López & González, 2014).

En la actualidad, los investigadores realizan experimentos virtualmente en todos los campos del saber, por lo general, para descubrir algo acerca de un proceso o sistema en particular; literalmente, un experimento es una prueba o ensayo. Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas,

en las cuales, se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

El proceso o sistema bajo estudio, se puede representar por medio del modelo, que permita visualizar el proceso, como una combinación de máquinas, métodos, personas y otros recursos, que transforman alguna entrada (a menudo, un material) en una salida, que tiene una o más respuestas observables. Mediante un diseño adecuado del experimento, se pretende obtener la máxima información de un proceso de la forma más rápida, económica y simple posible.

En sentido general, cuando se habla de diseñar un experimento se debe entender todo aquello relacionado con la planificación, lo más racional posible del mismo, con vistas a su ejecución y un posterior análisis adecuado de sus resultados, que conduzcan a deducciones aceptables del problema (Montgomery, 1991).

Teniendo en cuenta la importancia del uso de las herramientas estadísticas para el análisis de resultados experimentales, se pretende realizar un estudio sobre la velocidad de corrosión del acero, puesto que existen multitudes de construcciones y de equipos metálicos expuestos a la atmósfera, tales como: marcos de ventanas, verjas, postes de alumbrado, maquinaria agrícola, tanques de almacenamiento, puentes, complejas instalaciones fabriles, entre otras estructuras. Se calcula, que un país presenta pérdidas entre un 2 y 5% del PIB, debido a la corrosión (Cadena *et al.* 2014).

La corrosión puede ser definida como una reacción irreversible de un material con el medio ambiente, lo que resulta en la degradación del material y la pérdida de sus propiedades (Cabrera, 2016).

Son variadas las formas existentes de expresar la velocidad de los procesos corrosivos, debido a la diversidad de formas en que se presenta la corrosión, lo que obliga a buscar la manera más adecuada de reflejar la intensidad del ataque. En este caso, se determina el índice gravimétrico negativo, más comúnmente conocido, como pérdida de peso (DP) (Domínguez & Castro, 1987).

Se debe tener en cuenta que Cuba presenta un clima caracterizado por tener más de la mitad del año temperaturas medias superiores a 25°C y humedad relativa media de alrededor del 80%. Dada la configuración y la ubicación geográfica del país, la influencia del aerosol marino llega a casi todo el territorio nacional. Estas condiciones favorecen notablemente el deterioro de diferentes materiales, en especial, los metálicos, específicamente, en zonas de agresividad corrosiva alta y extrema. La tendencia actual de los cam-

bios climáticos hace que la atmósfera se torne cada vez más agresiva en Cuba, en cuanto a las penetraciones del mar y el incremento en la fuerza de los vientos y las lluvias (Castañeda *et al.* 2012).

El Laboratorio de Ensayos de Tropicalización (LABET), se encuentra situado al este de La Habana, en la zona costera de Cojímar, que se caracteriza por poseer uno de los microclimas de mayor agresividad de la República de Cuba y del mundo, dado los altos valores de salinidad, humedad relativa, radiación solar y temperatura (Marrero & González, 2005).

Los ensayos climáticos naturales necesitan tiempos excesivamente largos de exposición, a menudo, varios años, lo que justifica el uso de métodos rápidos de valoración. La utilización de cámaras climáticas de niebla salina neutra con una salinidad de 5% y temperatura de 35°C, permite someter las muestras, a la acción de una niebla de sal, atomizada en condiciones prefijadas de precisión, de concentración y de temperatura (NC ISO 9227, 2014).

En este trabajo, se evalúa el comportamiento de la velocidad de corrosión del acero, a partir de software estadísticos y modelos matemáticos. Se estima y se compara los efectos de los tratamientos asignados a la variable independiente sobre la variable rendimiento, sin los efectos de los bloques.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo experimental de este trabajo, se efectuó en el Laboratorio de Ensayos de Corrosión del LABET. En este capítulo, se describen los materiales, la metodología seguida en el trabajo experimental y las condiciones en las que se realizaron las pruebas de los sistemas estudiados.

Diseño de experimentos: El diseño de los experimentos realizados en este trabajo pretende evaluar el comportamiento del factor grado de oxidación de las probetas de acero sobre la velocidad de la corrosión. Para ello, se ejecutó la planificación de la actividad de la forma más racional posible, con vistas a su ejecución y un posterior análisis adecuado de sus resultados, que conduzcan a deducciones aceptables del problema.

El trabajo permitirá el uso del diseño en bloques al azar, puesto que distribuye las unidades experimentales en grupos o bloques, de tal forma que, cada una de las unidades experimentales que lo conforman, sean lo más homogéneas posibles y su número igual a la cantidad de tratamientos que se comparan, distribuyéndose estos tratamientos al azar a las unidades experimentales, dentro de cada bloque.

El diseño en bloques completos al azar toma en cuenta los tres principios básicos de la experimentación: repetición,

aleatorización y control local. En este diseño, las unidades experimentales se distribuyen en grupos homogéneos. Cada uno de estos grupos es llamado bloque, siendo el tiempo de exposición en la cámara de niebla salina neutra. El número de unidades experimentales dentro de cada bloque es igual al número de tratamientos incluidos en el experimento. Un caso particular de diseño de bloques es el que aparece relacionado con la prueba de t de student, para muestras pareadas, aunque el número de tratamientos es solo dos. Los tratamientos son distribuidos en las unidades experimentales dentro de cada bloque aleatoriamente; así, cada bloque irá a constituir una repetición (Montgomery, 1991).

Variables de investigación:

Variable dependiente: velocidad de corrosión

$$DP = \frac{-\Delta \text{Peso}}{S \cdot t} = \frac{(p_i - p_f)}{S \cdot t} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

p_i y p_f : Peso inicial y final de la muestra metálica. (g)

S: Área de muestra expuesta al medio corrosivo. (m²)

t: Tiempo de exposición de la misma al medio corrosivo. (h)

Factores:

- Tiempo de exposición (h): Variable bloque 250 h, 500 horas, 750 h, 1000 h.
- Grado de oxidación de la probeta de acero (Grado A, B, C, D)

Grado A: Superficie de acero con la chapa de laminación intacta en toda la superficie y prácticamente sin corrosión.

Grado B: Superficie de acero con principio de corrosión y, de la cual, la chapa de laminación solo se encuentra parcialmente adherida.

Grado C: Superficie de acero, donde la chapa de laminación se ha perdido por efecto de la corrosión o es fácilmente eliminable por raspado, al encontrarse suelta. La corrosión es generalizada, pero no se han formado aún cavidades visibles.

Grado D: Superficie de acero con corrosión generalizada, exenta de chapa de laminación y gran cantidad de cavidades profundas (NORMA TÉCNICA ECUATORIANA, 2014, ISO 8501-1, 2007).

Teniendo en cuenta los factores y la variable dependiente considerados, se diseñó un plan experimental, con base en bloques al azar, lo que redujo el número total de probetas de ensayos.

Durante la realización del experimento, la temperatura, la salinidad, el pH y la humedad son consideradas constantes, puesto que la cámara está programada para no variar en ningún momento los valores de estos parámetros. El laboratorio se encuentra climatizado, lo que garantiza la temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y humedad relativa de $50 \pm 5\%$.

Descripción de la prueba: La metodología a seguir en la prueba de corrosión, se presenta en el siguiente diagrama, que muestra los pasos a seguir para la preparación, la limpieza y la evaluación de la velocidad de corrosión, por pérdida de masa del acero.

Pasos a seguir:

1. Selección de las probetas
2. Preparación de las probetas según el grado de oxidación
3. Determinación de dimensiones de las probetas
4. Pesado inicial de las probetas
5. Exposición de las probetas en cámara de niebla salina neutra
6. Tratamiento de las probetas posterior a las pruebas
7. Pesado final de las probetas
8. Cálculo de la velocidad de la corrosión

Preparación de las probetas según el grado de oxidación:

Para la preparación de las probetas de ensayo, se ha partido de chapas de acero de construcción, laminado en caliente y de bajo contenido de carbono, contenido de cobre de 0,03 a 0,10% y de fósforo menor que 0,07%. Las placas son rectangulares, con dimensiones de 100 x 150 mm y espesor de 1mm.

Las probetas fueron clasificadas (NORMA TÉCNICA ECUATORIANA, 2014, según ISO 8501-1, 2007) teniendo en cuenta el grado de oxidación (la cascarilla de laminación y el óxido, que se encuentran comúnmente en las superficies de acero, erigido sin recubrimiento y el acero en almacenamiento) (Figura 1).

Antes de la exposición en la cámara de ensayo, las probetas fueron desengrasadas con disolvente orgánico. No presentaban manchas de óxido visible o productos de corrosión en su superficie.

Determinación de las dimensiones de las probetas: Las probetas representan un ortoedro o paralelepípedo, puesto que todas sus caras son rectángulos y perpendiculares entre sí, por lo tanto, la siguiente ecuación permite determinar el área total de las mismas. Ancho: a (a) = 0,1 m, largo: L(b) = 0,15 m y espesor: e(c) = 0,001m.

$$A_{\text{total}} = 2(ab + ac + bc) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$A_{\text{total}} = 2(0,1 \cdot 0,15 + 0,1 \cdot 0,001 + 0,15 \cdot 0,001)$$

$$A_{\text{total}} = 0.0305 \text{ m}^2$$

Tratamiento de las probetas posterior a las pruebas: Al finalizar el período de ensayo, se sacaron las probetas de la cámara de niebla salina neutra y se dejaron secar por un tiempo, entre 0,5 h y 1 h antes de enjuagar, para reducir el riesgo de eliminar los productos de corrosión; después fueron examinadas, removiendo cuidadosamente los residuos

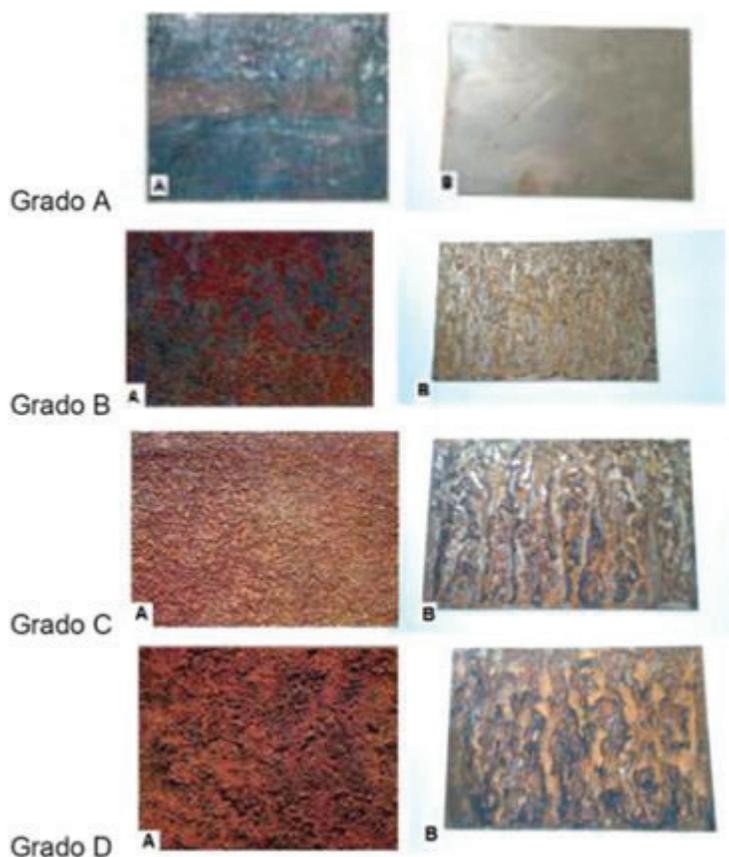


Figura 1. Imágenes de las probetas de acero. A) Imágenes referidas en la norma, B) Imágenes de las probetas para el ensayo de Niebla Salina.

de la solución de rociado de sus superficies. Las muestras se enjuagaron con agua corriente limpia, a una temperatura de $23 \pm 5^\circ\text{C}$.

Teniendo en cuenta el tiempo de exposición establecido en el diseño de experimentos, los productos de corrosión formados en las muestras fueron eliminados, de acuerdo con el procedimiento de limpieza química y se determinó el peso final de las probetas.

Descripción del equipamiento: La velocidad de corrosión en las probetas de acero, se determinó por el método gravimétrico de pérdida de peso, empleando la cámara climática de niebla salina neutra, que permite someter las muestras a la acción de una niebla de sal atomizada, en condiciones prefijadas de precisión, de concentración y de temperatura.

La niebla no incide directamente sobre los paneles (que se encuentran colocados en posición vertical o con un ángulo entre 10° y 30° con respecto a la vertical), sino que es recibida por un deflector acrílico. El condensado es reciclado, no así el que escurre de los paneles, que es eliminado por la parte inferior de la cámara.

La cámara climática presenta una capacidad de $1,1\text{m}^3$, empleándose una solución de cloruro de sodio p.a. $50 \pm 5\text{g/L}$, con pH entre 6,5 y 7,2, densidad de la solución entre $1,0255$ y $1,0400\text{g/cm}^3$ y una temperatura en el interior de la cámara de $35 \pm 2^\circ\text{C}$ (NC ISO 9227, 2014). Las mismas, se ubicaron en portamuestras resistentes a la acción de la solución de rociado, lo que descarta la influencia de la presencia de los portamuestras en los ensayos.

Materiales: Los materiales y equipos empleados en el desarrollo experimental de las pruebas de corrosión, se listan a continuación:

- Cámara de niebla salina neutra
- Balanza analítica digital
- Desecador
- Portamuestras
- Agitadores
- Vasos de precipitado de 500 mL
- Matraz Erlenmeyer de 1000 mL
- Reactivos químicos para limpieza y desengrase

Reactivos: Según la norma (NC ISO 9226, 2015), se realiza el proceso de decapado para el acero por inmersión durante

10 min, con una temperatura entre 20 a 25°C, utilizando las siguientes proporciones de los reactivos: 500mL de ácido clorhídrico (HCl, $\rho=1,19$ g/mL), 35g de hexametilentetramina y agua destilada para completar a 1000mL.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se introducen los datos en el STATGRAPHICS, según lo lo grado en todas las combinaciones posibles.

Resumen Multifactorial ANOVA - Velocidad de Corrosión

- Variable dependiente: velocidad de Corrosión
- Factores:
 - ✓ Grado de corrosión: Factor principal
 - ✓ Tiempo de exposición en cámara climática: Variable bloque
- Número de ensayos: 16

El análisis unifactorial de la varianza para la variable dependiente (velocidad de corrosión) permitirá:

- Realizar varias pruebas y gráficas, con el fin de determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo en la velocidad de corrosión.
- Las pruebas F de Fisher de la tabla ANOVA permitirá analizar si los diferentes niveles del factor A producen el mismo efecto en la característica observada o rendimiento en las diferentes unidades experimentales.
- El gráfico de medias permitirá la interpretación de los efectos significativos.
- Los gráficos de residuales ayudarán a juzgar si el método matemático es el idóneo.

Análisis de varianza para la Velocidad de Corrosión - Tipo III Suma de cuadrados:

La tabla 1 de ANOVA, descompone la variabilidad de la velocidad de corrosión en función de los factores evaluados. Las sumas de cuadrados Tipo III (el valor por defecto) mide la influencia de cada factor y elimina los efectos del resto. Los valores P_{value} indican la significación estadística de cada uno de los factores.

Este experimento evidencia que los factores (grado de corrosión y de tiempo de exposición en la cámara) poseen los valores de P_{value} inferiores a 0,05, por lo que se rechaza la hipótesis nula, es decir, se acepta la alternativa. Los factores tienen un efecto estadísticamente significativo en la velocidad de corrosión, al nivel de confianza de 95,0%.

Prueba de Rango Múltiple para la Velocidad de Corrosión (Grado de Corrosión). Método LSD: 95,0%:

La tabla 2 evidencia el procedimiento de comparación múltiple, para determinar las medias significativamente diferentes. En la parte superior de la misma, se identifican 2 grupos homogéneos, usando columnas de X. Dentro de cada columna, los niveles que contienen X forman un grupo de medias, dentro del cual, no hay diferencias estadísticamente significativas. El método actualmente utilizado para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima (LSD) de Fisher. Con este método, existe un riesgo del 5,0%, de llamar a cada par de medias significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Modelos matemáticos: A continuación, se presenta los modelos matemáticos que describen el comportamiento de la velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición en la cámara de niebla salina neutra, para cada grado de oxidación.

Grado A: Velocidad de corrosión = $9222,25 - 29,4608 * \text{tiempo} + 0,0485219 * \text{tiempo}^2 - 0,0000253615 * \text{tiempo}^3$
 $R^2 = 100\%$

Grado B: Velocidad de corrosión = $9509,81 - 28,5942 * \text{tiempo} + 0,046805 * \text{tiempo}^2 - 0,0000246464 * \text{tiempo}^3$
 $R^2 = 100\%$

Grado C: Velocidad de corrosión = $5760,08 + 3,84268 * \text{tiempo} + 0,0176292 * \text{tiempo}^2 - 0,0000111907 * \text{tiempo}^3$
 $R^2 = 100\%$

Tabla 1. ANOVA.

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de Libertad	Cuadrado Medio	Razón- F	Valor - P
Efectos principales					
A:Grado de Corrosión	1,61944E7	3	5,39815E6	4,76	0,0296
B:Tiempo en Cámara (h)	2,13978E7	3	7,1326E6	6,29	0,0137
Residual	1,01978E7	9	1,13309E6		
Total (Corregido)	4,77901E7	15			

Tabla 2. Procedimiento de comparación múltiple para las medias significativamente diferentes.

Grado de Corrosión	Cantidad	LS Medias	LS Sigma	Grupos Homogéneos
1	4	3647,05	532,234	X
2	4	3950,76	532,234	X
3	4	4269,44	532,234	X
4	4	6222,87	532,234	X

Grado D: Velocidad de corrosión = $18598,0 - 46,7994 * \text{tiempo} + 0,0576862 * \text{tiempo}^2 - 0,0000260247 * \text{tiempo}^3$
 $R^2 = 100\%$

Demstración de la idoneidad del modelo matemático escogido: El modelo matemático debe cumplir con dos premisas, para que se demuestre su idoneidad:

- Todas las observaciones Y_{ij} fueron descritas, según la ecuación del modelo matemático.
- Los errores e_{ij} son variables aleatorias independientes.
- e_{ij} presenta una distribución normal con media cero y varianza constante para todos los niveles del factor docimado.
- No existe interacción entre el factor analizado y el factor bloque.

Errores aleatorios: El gráfico 1 muestra la distribución de los errores de manera aleatoria, no presentando ningún patrón en su comportamiento.

Distribución normal: El gráfico 2 ilustra el comportamiento de la variable velocidad de corrosión en función de la distribución de probabilidad normal.

Análisis gráfico del comportamiento de los factores y la variable respuesta: En el gráfico 3a, se observa una disminución de la velocidad de corrosión, a medida que transcurre el tiempo de exposición en un mismo grado de oxidación en las muestras.

En el gráfico 3b, se observa una dispersión en los valores de la velocidad de la corrosión en las primeras 250 horas de ensayo, mientras que a las 1.000 presentaron un comportamiento inverso, es decir, se agruparon casi de manera puntual los valores.

Como conclusiones del estudio se destacan:

1. Se utilizó un diseño de bloques al azar, para la determinación de la influencia del grado de oxidación de las muestras de acero y el factor bloque: tiempo de exposición en la niebla salina neutra, sobre la velocidad de la corrosión, a partir del método gravimétrico.
2. Se evidencia que los factores (Grado de corrosión y tiempo de exposición en la cámara) poseen los valores de P_{value} inferiores a 0,05, por lo que se rechaza la Hipótesis nula, es decir, existen diferencias significativas entre

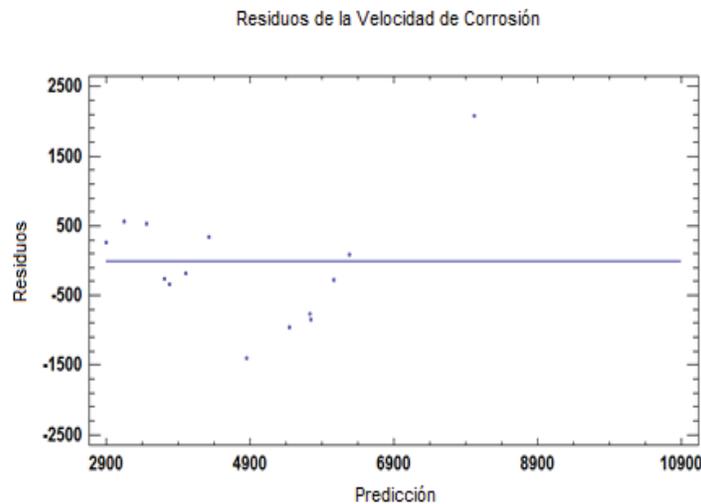


Gráfico 1. Distribución de los errores.

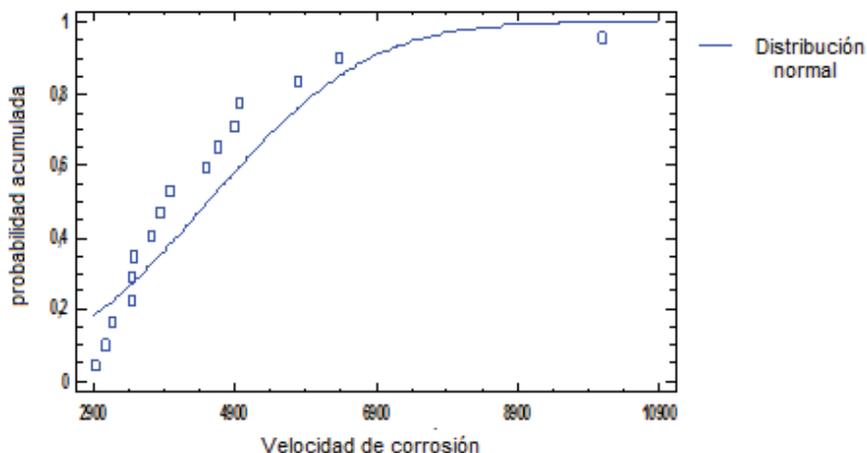


Gráfico 2. Comportamiento de la variable velocidad de corrosión en función de la distribución de probabilidad normal.

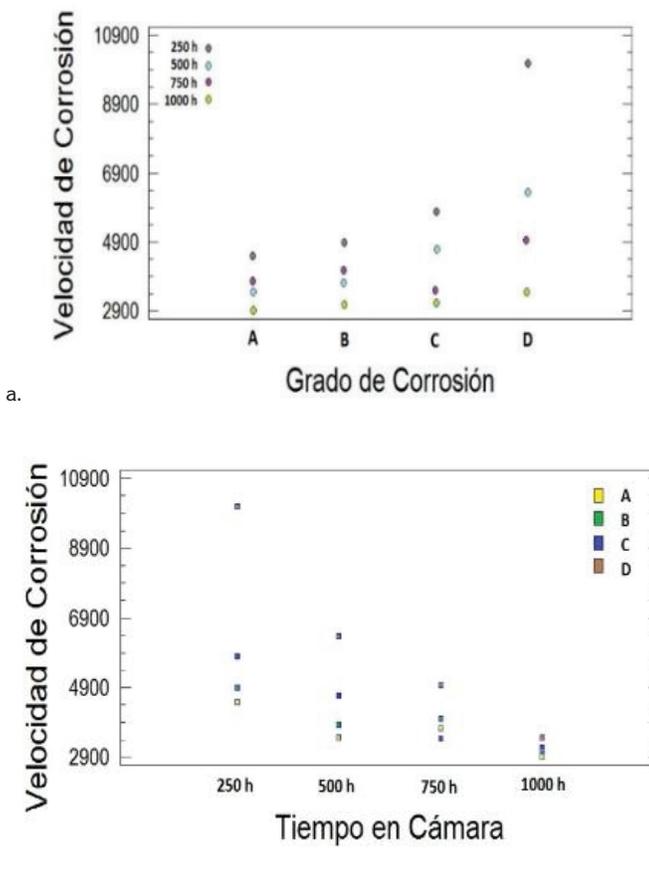


Gráfico 3. a. Comportamiento de la variable velocidad de corrosión en función del grado de corrosión y b. Comportamiento de la variable velocidad de corrosión en función del tiempo de exposición en cámara de niebla salina neutra. A: Grado de corrosión A; B: Grado de corrosión B; C: Grado de corrosión C; D: Grado de corrosión D.

- los tratamientos, lo que es equivalente a plantear que los efectos de los niveles del factor A difieren, con un nivel de significación de 0.05.
3. Se demostró la idoneidad del modelo matemático, puesto que los residuos cumplen con la condición de la linealidad; no existe una tendencia respecto a los factores en estudio. Se comprobó la condición de homoscedasticidad: varianza constante y la independencia de los errores, puesto que se encuentran normalmente distribuidos y que no presenten ninguna tendencia.
 4. Se observó una disminución de la velocidad de corrosión a medida que transcurrió el tiempo de exposición, para un mismo grado de oxidación en las muestras evaluadas.
 5. Se obtuvo una dispersión en los valores de la velocidad de la corrosión en las primeras horas de ensayo, mientras que a las 1.000 horas presentaron un comportamiento inverso, es decir, se agruparon casi de manera puntual.

Conflictos de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses, que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

BIBLIOGRAFÍA

1. CABRERA, J.J. 2016. Estudio de la corrosión de acero al carbono AISI 1020 en soluciones cloradas y su dependencia con la rugosidad del material. Tesis de Doctorado. Santiago de Chile. p.7.
2. CADENA, F.; QUIROZ, F.; ALDÁS, M.; LASCANO, L.; VALLE, V. 2014. Corrosión Metálica en Ambientes Exteriores e Interiores en las ciudades de Quito y Esmeraldas. Revista EPN. Ecuador. 33(2):1-5.
3. CASTAÑEDA, V.A.; RIVERO, C.; CORVO, F. 2012. Evaluación de sistemas de protección contra la corrosión en la rehabilitación de estructuras construidas en sitios de elevada agresividad corrosiva en Cuba. Revista de la Construcción. Cuba. 11(3):1-2.
4. DOMÍNGUEZ, J.A.; CASTRO, D.M. 1987. Introducción a la corrosión y protección de metales. Ed. ENPES (Habana). p.21-24; p.249.
5. LÓPEZ, E.A.; GONZÁLEZ, R.H. 2014. Diseño y análisis de experimentos, Fundamentos y aplicaciones en agronomía. Guatemala. 2ª. Edición Revisada y Ampliada: p.1, p.76-77; p.248).
6. MARRERO, A.R.; GONZÁLEZ, P.C. 2005. Factores ambientales y su influencia en la agresividad de la estación de ensayos de Cojímar. Comparación con otras estaciones. Revista CENIC Ciencias Químicas. Cuba. 36(3):182-183; 185.
7. MONTGOMERY, D.C. 1991. Diseño y Análisis de Experimentos. Ed. Grupo editorial Iberoamérica S.A de C.V. México. p.1; p.591.
8. NORMA CUBANA. 2015. Corrosión de metales y sus aleaciones -Corrosividad de atmósferas-Determinación de la velocidad de corrosión de muestras estándar para la evaluación de la corrosión. NC ISO 9226: 2015. La Habana. Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
9. NORMA CUBANA. 2014. Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales-Ensayos en rociado salino. NC ISO 9227: 2014. La Habana. Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
10. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. 2014. Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Evaluación visual de la limpieza de las superficies. Parte 1: Grados de óxido y de preparación de sustratos de acero no pintados después de eliminar totalmente los recubrimientos anteriores. ISO 8501-1: 2007. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

Recibido: Diciembre 12 de 2017

Aceptado: Mayo 14 de 2018

Cómo citar:

Lluveras Pérez, E.M.; Martínez Gutiérrez, J.; González Ortega, L. del C.; Fundora Mirabal, J.A. 2018. Aplicación de software estadísticos y modelos matemáticos para la evaluación de la velocidad de corrosión en el acero. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.21(1): 179-186.