

Corrosión atmosférica del acero en interiores. Sus particularidades en el clima tropical de Cuba^(*)

F. Corvo*, A. D. Torrens**, Y. Martín*, E. González*, J. Pérez*, C. Valdés*, A. Castañeda* y C. Portilla*

Resumen

En general, la corrosión y el deterioro de materiales en atmósferas interiores es notablemente inferior respecto a la intemperie. Sólo, a partir de 1960, debido a los problemas surgidos en los equipos e instrumentos eléctricos y electrónicos, añadidos, también, a la necesidad de conservar objetos con valor patrimonial en museos, se comienza a prestar atención a los problemas de corrosión y deterioro de materiales en atmósferas interiores. Una pequeña corrosión puede provocar un mal funcionamiento de equipos eléctricos y electrónicos por varias causas: variación de la resistencia de los contactos eléctricos, cambios en la conductividad, pérdida de las propiedades magnéticas, etc. En el trabajo, se clasifica la agresividad corrosiva interior en almacenes y armarios metálicos utilizando la nueva propuesta de Norma ISO para estas condiciones, exponiéndose la clasificación de esta agresividad para el acero, la cual se encuentra en los mayores niveles establecidos. Se propone un modelo del desarrollo de la corrosión con el tiempo de exposición, teniendo en consideración algunos contaminantes atmosféricos. El modelo se ajusta, aceptablemente, a los datos experimentales. Se observa que el polvo depositado es un factor importante en el proceso de corrosión del acero en interiores.

Palabras clave

Corrosión atmosférica. Interiores. Polvo. Contaminación. Acero.

Indoor atmospheric corrosion of steel. Its particularities in Cuban tropical climate

Abstract

Indoor atmospheric corrosion and deterioration of materials is significantly lower respecting outdoors. After 1960, because of the problems detected in electric and electronic equipment and to the requirements for conservation of valuable heritage objects in museums, attention was dedicated to corrosion problems in indoor atmospheres. A small corrosion may cause a bad performance of electric and electronic equipment due to different factors as: change in electrical resistance of contacts, change in conductivity, loss of magnetic properties and others. In the paper corrosion aggressivity of steel inside storehouses and metallic boxes is classified using the new ISO proposal for indoor conditions. Corrosion aggressivity is reported for steel. The levels of aggressivity are reported. They correspond to the higher levels established in the standard proposal. A model for corrosion of steel in function of time of exposure is proposed taking into consideration some atmospheric pollutants. The model has an acceptable fitness to experimental data. It is observed that deposited dust is an important factor in steel corrosion process indoor.

Keywords

Atmospheric corrosion. Indoor. Dust. Pollution. Steel.

1. INTRODUCCION

La corrosión atmosférica en interiores tiene lugar bajo los mismos principios que en atmósferas abiertas; sin embargo, su velocidad es, en general, considerablemente inferior. Las precipitaciones están ausentes (lluvia, nieve, etc.). La presencia de humedad por

condensación o formación de rocío se debe a la adsorción o absorción de la humedad del aire. La corrosión en interiores varía en función de la deposición en la superficie de gases y partículas^[1].

Los parámetros ambientales que determinan las características de la corrosión atmosférica (humedad relativa, temperatura, velocidades de deposición de

(-) Trabajo recibido el día 25 de mayo de 2006 y aceptado en su forma final el día 25 de junio de 2007

* Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE-ICTM), Universidad de La Habana, calle Zapata esquina G, Vedado, Plaza 10400, Ciudad de la Habana. e-mail: corvo@imre.oc.uh.cu.

** Grupo de Protección de Materiales y Corrosión, Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC), Ave. 25 y calle 158, Cubanacán, Playa, Ciudad de La Habana, e-mail: abel.castaneda@cnic.edu.cu.

gases y partículas) difieren, sustancialmente, para las condiciones interiores^[2]. La humedad relativa interior depende, en gran medida, de las condiciones de ventilación, de la existencia o no de aire acondicionado o calefacción, de la presencia de dehumificadores, del aislamiento térmico y otros factores. No existen contaminantes cuyo efecto pudiera considerarse tan general como el SO₂ y los cloruros a la intemperie. En estas condiciones, las paredes pueden convertirse en absorbentes de contaminantes. Se informa que, para Estados Unidos^[1], las concentraciones de SO₂ y NO₂ en interiores son alrededor de 2/3 las del exterior. El polvo disminuye a la cuarta parte y los cloruros a una séptima parte. El NH₃ es la única especie evaluada que aumenta en interiores (alrededor de una vez y media más). De igual forma, muchas especies orgánicas como aldehídos, ácidos orgánicos y compuestos orgánicos volátiles, como hexano y benceno, se han constatado, con mucha mayor frecuencia, en condiciones interiores.

Al no existir compuestos o parámetros cuyo papel sea predominante para definir la velocidad de corrosión, se hace más evidente la influencia de un mayor número de variables que en atmósfera abierta, donde las sales solubles en los productos de corrosión atmosférica tienen un papel muy importante^[3].

Los fallos por corrosión, en los equipos e instrumentos eléctricos y electrónicos ocurren, fundamentalmente, por cambios en las propiedades de las superficies; por ejemplo, la conductividad eléctrica cambia debido a la formación de productos de corrosión sobre la superficie metálica^[4]. Puede haber cambios, también, en las propiedades magnéticas, como ocurre en las memorias y discos duros de computadora, o cambios en la conductividad de circuitos impresos. Dado el amplio uso que tienen en la sociedad actual los equipos eléctricos y electrónicos, ha sido necesario estudiar las condiciones de agresividad corrosiva en ambientes interiores.

En estos momentos, se encuentra en proceso de informe final una propuesta de Norma ISO para la evaluación de la corrosión en interiores^[5]. De igual forma, se ha llevado a cabo un proyecto internacional CYTED denominado TROPICORR (Efectos del ambiente tropical en los equipos eléctricos y electrónicos) con la participación de ocho países iberoamericanos. Este último proyecto se dedica al estudio de la corrosión de los materiales metálicos más usados en la electrónica, en condiciones de efecto estufa, debido a que existe muy poca información sobre el desempeño de los materiales metálicos en estas condiciones particulares^[6].

El aerosol marino juega un importante papel en el proceso de aceleración de la corrosión en condiciones de intemperie, en las condiciones particulares

del archipiélago cubano. La corrosión atmosférica es a menudo muy alta^[7]. En el presente trabajo se realizan evaluaciones de la velocidad de deposición de los iones cloruro en condiciones interiores que muestran una sensible disminución con respecto a la intemperie. Es conocido que a un mismo nivel de contaminación pero en un clima diferente varía, sensiblemente, el grado de corrosión^[8].

Se comparan los valores de humedad relativa y temperatura, así como el cálculo del tiempo de humectación para condiciones de intemperie e interiores.

Se clasifica la agresividad corrosiva interior de almacenes y armarios metálicos utilizando la nueva propuesta de Norma ISO para estas condiciones, determinándose que se alcanzan los mayores grados de agresividad establecidos.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Se exponen resultados obtenidos durante un período de tiempo de, aproximadamente 10 años, por lo que existen cambios en la metodología utilizada con respecto a la determinación de la pérdida de peso y tamaño de las muestras de acero. Se presentan resultados de ensayos naturales de corrosión realizados en almacenes con diferente ubicación y características^[9] y en armarios metálicos expuestos a la intemperie. Los ensayos naturales en almacenes fueron realizados en el período 1995-99, mientras que los resultados de los armarios metálicos corresponden al período 2003-2004.

En el caso de los almacenes, se utilizaron probetas de 10 cm x 15 cm x 0,1 cm de acero de bajo carbono (SAE AISI C1019), que fueron desengrasadas con acetona y sumergidas por 3-5 min en ácido clorhídrico 35 %, lavadas rápidamente con agua corriente, secadas y colocadas en una desecadora con CaCl₂ anhidro durante un tiempo mínimo de 24 h. Las muestras fueron pesadas previamente a su exposición. Al ser retiradas de la exposición, fueron sumergidas en H₂SO₄ 20 %, conteniendo un inhibidor de la corrosión del acero de alta eficiencia, mezcla de tiourea con formaldehído, hasta completar la eliminación de los productos de corrosión, lavadas con agua corriente, secadas y colocadas de nuevo en una desecadora con CaCl₂ anhidro durante un tiempo mínimo de 24 h y pesadas. Para el transporte, cada muestra se introdujo en un sobre de polietileno y todas aquellas correspondientes a un punto de ensayo fueron introducidas en un sobre mayor de polietileno conteniendo sílica gel.

La evaluación de la pérdida de peso se realizó utilizando una balanza analítica con precisión de 0,0001 g. Se expusieron probetas en seis almacenes, todos

ubicados en la parte occidental de Cuba. Cinco de los almacenes eran cerrados, sin ventanas. Cuatro de ellos, estaban ubicados en zona rural, uno en zona urbana y otro en zona costera. Las características de los almacenes se muestran en la tabla I. En el almacén número 1 se aplicó ventilación forzada y dehumidificación automática, mientras que en el almacén 6 (único con ventanas) se colocaron dos puntos de ensayos con el objetivo de determinar la influencia del grado de intercambio con el medio exterior; de esa forma, se ubicó un punto cercano a la puerta de entrada, donde llegaba el aire externo con más frecuencia y, otro, fue ubicado bien alejado de la puerta, en un estante cercano a una de las paredes.

Las muestras fueron expuestas en dos posiciones: horizontal y vertical. De esta forma, el mismo tipo de muestra fue sometido a diferentes condiciones. El polvo depositado y otros contaminantes deben tener una menor influencia en las muestras colocadas en posición vertical y una mayor influencia en las colocadas en posición horizontal. La menor influencia del polvo y los contaminantes depositados debe ser en la cara hacia el suelo de las muestras horizontales.

Se determinó la velocidad de deposición de los cloruros y compuestos de azufre por las normas establecidas y tradicionalmente utilizadas en las investigaciones de corrosión atmosférica a la intemperie^[10 y 11].

El tiempo de exposición de los captadores se fijó en seis meses, dadas las bajas velocidades de deposición de contaminantes características de los ambientes interiores. La velocidad de deposición de cloruros se determinó utilizando el método conocido como bujía seca^[10] La velocidad de deposición de compuestos de azufre se determinó utilizando superficies alcalinas de papel de filtro saturado con carbonato de sodio^[11]. Todas las muestras y captadores de

contaminantes fueron expuestos en una mesa a, aproximadamente, 1 m sobre el nivel del suelo.

Para medir el polvo depositado se utilizó el método siguiente: Placas de Petri, de 10 cm de diámetro perfectamente limpias se llevaron al sitio de exposición, donde fueron destapadas y colocadas encima de una mesa a aproximadamente 1 m del suelo en el interior de los almacenes. De esta forma, el polvo se deposita libremente en su superficie de la misma forma que lo hace en las muestras de acero. Al final del período de exposición, se tapó la placa de Petri y se llevó al laboratorio. Utilizando agua destilada, se arrastró el polvo a una cápsula de porcelana, se evaporó el agua en un baño de agua y cuando se alcanzó la temperatura ambiente, la cápsula de porcelana se introdujo en una desecadora con cloruro de calcio anhidro. Se determinó la cantidad de polvo depositado por peso. Este no es un método estandarizado, pero se ha considerado que representa bastante fielmente la realidad.

Los valores de temperatura y humedad relativa fueron registrados en tres almacenes utilizando los instrumentos tradicionales (termógrafos e higrógrafos).

En este trabajo, también se presentan los resultados obtenidos hasta 18 meses de ensayo correspondientes al proyecto TROPICORR del CYTED. Se confeccionaron tres armarios que se colocaron en tres estaciones de ensayo de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana con diferentes tipos de atmósferas: costera (Cojimar), urbana (CNIC) y rural (Quivicán). Las características generales de las estaciones se muestran en la tabla II. Se colocaron probetas rectangulares de acero, plata, cobre, estaño y níquel de tamaño aproximado 10 mm x 50 mm x 0,5 mm. En el presente trabajo solo se presentan los resultados para acero. A cada periodo de evaluación

Tabla I. Principales características de los almacenes

Table I. Main characteristics of storehouses

No.	Ambiente externo	Tipo de almacén	Tipo de ventilación	Sitio de exposición en el almacén
1	Rural	Cerrado	Forzada con dehumidificación automática	— Interior del salón con condicionamiento del aire — Exterior del salón con condicionamiento del aire
2	Costero	Cerrado	Natural	Interior
3	Rural	Cerrado	Natural	Interior
4	Rural	Cerrado	Natural	Interior
5	Rural	Cerrado	Natural	Interior
6	Urbana	Con ventanas	Natural	— Cerca de la puerta de entrada — Lejos de la puerta de entrada

Tabla II. Características generales de las estaciones de ensayo en las que se situaron los armarios metálicos

Table II. General characteristics of the test stations where metallic boxes were exposed

Estaciones	Características generales
Cojimar	Estación costera ubicada a aproximadamente 150 m de la costa norte al este de la Ciudad de La Habana, relativamente cercana a la Boca de la Bahía de La Habana.
CNIC	Estación urbana ubicada al oeste de la Ciudad de La Habana a, aproximadamente, 2 km de la costa norte.
Quivicán	Estación rural ubicada a unos 30 km de la costa norte y 18 de la sur, en una zona eminentemente agrícola.

(1, 3 y 6, 12 y 18 meses hasta el momento) se retiraban tres probetas. Las probetas se pesaron en balanza con precisión de 0,00001 g.

Para la determinación de las condiciones ambientales en el interior de los armarios, se instalaron sensores electrónicos de temperatura y humedad relativa que registran automáticamente estos parámetros cada hora.

También se desarrolló un software que, con base en los datos almacenados por los sensores, permite calcular los diferentes tiempos durante los cuales la temperatura y la humedad relativa del aire se encuentran en determinados intervalos. Con estos resultados es posible calcular el tiempo de humectación de acuerdo a lo establecido en ISO 9223: 1992 [12].

Se instalaron captadores para la determinación de varios contaminantes:

- SO₂, por las placas alcalinas (Norma ISO 9225).
- NO₂, por captadores pasivos colocados en el interior de los armarios.
- Cloruros, por un método desarrollado particularmente para las condiciones interiores de los armarios.
- Polvo depositado, por el método descrito anteriormente.

En la figura 1 se presenta una vista del armario expuesto a la atmósfera, en la estación CNIC.

En el presente trabajo solo se presentan datos de SO₂, cloruros y polvo; no obstante, los primeros resultados para el NO₂ dan valores muy bajos, por lo que al parecer su influencia no es muy significativa.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de los valores medios, máximos y mínimos de humedad relativa y temperatura, correspondientes a tres de los almacenes de ensayo, se muestran



Figura 1. Armario colocado en la estación CNIC.

Figure 1. Metallic box exposed at CNIC's station.

en la tabla III junto al cálculo del tiempo de humectación de acuerdo a ISO 9223 (tiempo a humedad relativa mayor de 80 % y temperatura mayor de 0 °C).

Según Leygraf^[2], la humedad relativa en interiores oscila en un rango de 15 a 85 %, con un valor medio de 50 %. En este caso, se encuentran valores medios bastante superiores a 50 %, pues, en el interior de un almacén cerrado (No. 2), se alcanza durante un año un valor medio de 89 %, mientras que para un almacén con ventanas (No. 6) es de 79,5 %. Para un almacén con dehumificación del aire (No. 1) la media anual baja al 74,5 %, que, aún, resulta significativamente alta con respecto a lo hallado por Leygraf. En los dos almacenes sin climatización se alcanza como valor máximo el 100 % de humedad relativa, mientras que en el almacén climatizado la humedad relativa máxima es de 85 %.

En la tabla IV se muestran los valores de

Tabla III. Tiempos de humectación calculados para tres almacenes. La clasificación de acuerdo a ISO 9223 se muestra entre paréntesis. Se presentan igualmente los valores medios, máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa del aire

Table III. Time of wetness calculated for three storehouses. Classification according to ISO 9223 in brackets. Average, maximum and minimum values of air temperature and relative humidity are presented

Almacén	Tiempo de humectación (h/año)			Sitio de exposición	H. R.(%)			Temp(°C)		
	Primer año	Segundo año	Tercer año		Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.
1	370 (τ_3)	1.350 (τ_3)	—	Local con condicionamiento del aire	74,5	85,0	62,0	26,5	28,0	23,0
2	6.972 (τ_5)	7.298 (τ_5)	6.598 (τ_5)	Interior del almacén	89,4	100,0	55,0	23,8	29,0	18,0
6	3.342 (τ_4)	—	—	Interior del almacén	79,5	100,0	54,0	26,8	33,0	16,0

Tabla IV. Valores de datos meteorológicos y tiempos a diferentes intervalos de temperatura y humedad relativa determinados en el interior de los armarios ubicados en las tres estaciones de ensayo y datos reportados para la intemperie para períodos de seis meses (a excepción de la estación CNIC, no corresponden con el tiempo en el cual se realizaron las determinaciones en los armarios). T = temperatura (°C), t= tiempo (h), HR=Humedad relativa(%)

Table IV. Different meteorological values and times at different intervals of temperature and relative humidities determined inside the metallic boxes exposed in the three test stations and data reported for six months (excepting CNIC test station, data is not recorded in the same time period for metallic boxes). T= Temperature (°C), t= time (h), HR=Relative Humidity(%)

Datos meteorológicos y tiempos	ESTACIONES DE ENSAYO					
	CNIC		COJIMAR		QUIVICAN	
	Armario Intemp.	Armario Intemp.	Armario Intemp.	Armario Intemp.	Armario Intemp.	Armario Intemp.
T. media (°C)	24,4	24,1	25,5	23,3	24,3	23,1
T. max. med. (°C)	37,4	28,4	35,0	26,9	36,4	28,0
T. min. med. (°C)	18,6	20,8	19,8	20,0	16,2	18,4
HR med. (%)	73	72	68	76	74	77
HR max. med. (%)	94	87	91	89	99	94
HR min. med. (%)	39	57	40	60	37	56
T. min. (°C)	10,9	13,4	14,0	12,9	5,4	10
T. max. (°C)	46,0	34,3	43,1	33,6	44,2	33,4
HR min. (%)	23	34	24	23	23	23
HR max. (%)	100	98	100	100	100	100
T (5-10 °C); HR>80 % (h)	0	23	0	0	35	0
T (10-15 °C); HR>80 % (h)	81	151	11	0	220	108
T (15-20 °C); HR>80 % (h)	600	361	325	287	514	694
T (20-25 °C); HR>80 % (h)	1.104	1.526	1.039	1.331	521	1.110
T (25-30 °C); HR>80 % (h)	141	413	110	120	41	98
T (30-35 °C); HR>80 % (h)	0	42	58	1	0	0
T (35-40 °C); HR>80 % (h)	0	0	21	0	0	0

temperatura, humedad relativa y tiempos a diferentes intervalos de estos dos parámetros determinados en el interior de los armarios y su comparación con otros datos reportados para la intemperie. Es de notar que siempre los máximos de temperatura corresponden a los armarios. Para el caso de la humedad se obtiene el mismo valor máximo absoluto de 100 % para armarios e intemperie. La comparación no es enteramente fiable ya que, a excepción de las estación CNIC, los períodos de toma de datos no son los mismos. No obstante, es de esperar que el comportamiento de estos parámetros no tenga una variación sustancial.

La velocidad de deposición de compuestos de azufre y cloruros clasificada de acuerdo a ISO9223 cae en el menor rango (Po y So). En ISO 11844, la clasificación de la agresividad se basa en la determinación de la velocidad de corrosión; no obstante,

los valores de velocidad de deposición de contaminantes resultan muy útiles como una orientación con respecto a la agresividad del medio. Dada la gran cantidad de parámetros que influyen en la corrosión en interiores es mucho más válido el pronóstico de agresividad realizado en función de la velocidad de corrosión.

La composición del polvo no debe ser la misma en los armarios y en el interior de los almacenes, sobre todo en el caso de la estación de Cojimar por su carácter costero.

En la tabla V se presentan los valores medios de deposición de cloruros, compuestos de azufre y polvo determinados en los almacenes, mientras que, en la tabla VI se muestran los valores medidos de estos mismos factores en el interior de los armarios metálicos.

Tabla V. Deposición media de cloruros (Cl), compuestos de azufre (S) y polvodepositado (P) (todos en mg/m²d) determinada en los almacenes. La clasificación de Cl es So y de S es Po de acuerdo a ISO 9223. La clasificación del polvo no está incluida en esta última Norma

Table V. Average chloride deposition rate (Cl), sulphur compounds deposition rate (S) and deposited dust (P) (all in mg/m²d) determined in storehouses. Classification of Cl is So and S is Po according to ISO 9223. Dust is not included in the classification of this standard

Almacén	S	Cl	P	Sitio
1	1,27	0,25	1,92	Interior del local con control del aire
	1,60	0,47	22,2	Exterior del local con control del aire
2	1,93	0,23	15,39	Interior del almacén
3	1,34	0,33	21,33	Interior del almacén
4	4,67	1,15	21,00	Interior del almacén
5	1,09	0,12	18,58	Interior del almacén
6	6,20	0,40	53,60	Interior del almacén (cerca de la entrada)
	4,80	0,20	11,70	Interior del almacén (lejos de la entrada)

Tabla VI. Velocidad de deposición de contaminantes media anual (mg/m²d) determinados en el interior de los armarios en las tres estaciones de ensayo

Table VI. Yearly average pollutant deposition rate (mg/m²d) determined inside metallic boxes in the three test stations

Estaciones	Cloruros	Compuestos de azufre	Polvo
Cojimar	3,15 (So)	9,92 (Po)	27,4
CNIC	1,96 (So)	7,3 (Po)	9,2
Quivicán	1,84 (So)	8,8 (Po)	8,7

Nota: Clasificación entre paréntesis según ISO 9223. Esta Norma no incluye la clasificación del polvo, por lo que no se presenta en este caso.

Note: Classification between brackets according to ISO 9223. This standard do not include dust classification.

3.1. Papel de los parámetros ambientales en la corrosión en interiores

En la tabla VII se muestra la estadística descriptiva de los resultados de la corrosión de las muestras expuestas en las dos diferentes posiciones en los almacenes. Se determina una diferencia estadística significativa entre los dos conjuntos de datos. La media de la corrosión en posición horizontal es mayor de dos veces la media de la corrosión vertical. Esto, significa que la posición es importante en la determinación de la magnitud de la corrosión, en los almacenes donde se realizan los ensayos.

Se conoce ampliamente la ecuación bilogarítmica o función daño $K = a t^b [13]$, ya que la gran mayoría de los datos de corrosión a la intemperie para un punto de evaluación se ajustan aceptablemente bien; sin embargo, en condiciones interiores, el momento de alcanzar la velocidad de corrosión estacionaria, cuando la probeta se encuentra totalmente cubierta por productos de corrosión, puede tardar un tiempo bastante largo, mientras que la influencia del polvo y otros contaminantes, antes de que la placa se cubra totalmente de productos de corrosión, puede ejercer una influencia importante. La presencia de estos contaminantes puede provocar una aceleración del proceso de corrosión, por lo que se propone el siguiente modelo:

$$K = a t^b P^c [SO_2]^d [Cl]^e \quad (1)$$

Tabla VII. Estadística descriptiva de los dos conjuntos de datos de corrosión en almacenes: probetas en posición horizontal y probetas en posición vertical. Existe un 95 % de probabilidad estadística que los dos conjuntos de datos son diferentes

Table VII. Descriptive statistic of two corrosion set of data in storehouses: samples on horizontal position and samples in vertical position. There is a 95 % of statistical probability that the two data sets are different

	Posición Horizontal	Posición Vertical
Número de datos	27	29
Media	40,78	17,11
Varianza	2.584,3	151,6
Desviación standard	50,84	12,31
Mínimo	3,7	3,5
Máximo	263,2	57,8

que incluye la influencia de la deposición de polvo (P), la deposición de compuestos de azufre $[SO_2]$ y la deposición de cloruros $[Cl]$ en la aceleración de la corrosión con el tiempo, en condiciones interiores. Existen también otros contaminantes que pueden influir, pero no se han considerado en este experimento.

Se reunieron todos los datos correspondientes a las probetas en posición vertical para los seis almacenes y se llevó a cabo una regresión multilínea. Los resultados se presentan en la tabla VIII. El mismo procedimiento se realizó con los datos de las probetas en posición horizontal. Puede observarse que la significación de las ecuaciones de regresión se incrementa cuando se incluye la influencia de la deposición del polvo. En un menor nivel, la influencia del polvo con la deposición de los compuestos de azufre incrementa la significación de la ecuación de regresión; sin embargo, cuando la variable cloruros se incluye, la significación no aumenta apreciablemente y surge un coeficiente de regresión con signo negativo. Esto significa que, en estas condiciones, posiblemente por una baja deposición de cloruros, su influencia no resulta significativa. Otra posible explicación del signo negativo que afecta a los iones cloruros es la existencia de un efecto de adsorción competitiva con otros aniones. La significación estadística es mayor para la posición horizontal, muy posiblemente debido a una mayor influencia del polvo en esta posición. Se unieron los datos para probetas horizontales y verticales y se realizó una regresión multilínea, obteniéndose la siguiente ecuación de regresión:

$$K = 0,14 t^{0,81} P^{0,42} SO_2^{0,43} Cl^{-0,32} \quad (2)$$

$r^2 = 56,56 \%$ $P = 0,0000$

que muestra una buena significación estadística y un 56,56 % de variaciones explicadas.

Adicionalmente, una nueva variable fue incluida en este conjunto de datos, la variable posición (Pos), a la cual se le asignó el número 2 para la posición horizontal y el número 3 para la posición vertical. Se obtuvo la siguiente ecuación de regresión:

$$K = 10,55 t^{0,82} P^{0,43} SO_2^{0,41} Cl^{-0,29} Pos^{1,67} \quad (3)$$

$r^2 = 72,03$ $P = 0,0000$

que muestra un mejor ajuste. Esto significa que el polvo depositado puede afectar en diferente magnitud la corrosión de las muestras en dependencia de la posición.

El mismo modelo fue planteado para los datos del comportamiento del acero en los tres armarios

Tabla VIII. Resultados de la regresión multilínea de datos correspondientes a la corrosión en función del tiempo y otros parámetros en posiciones horizontal y vertical en almacenes de acuerdo al modelo propuesto: $K = a t^b P^c [SO_2]^d [Cl]^e$. Los términos $P^c [SO_2]^d [Cl]^e$ han sido considerados como X en la Tabla. Se presentan los casos donde $X = 1$, $X = P^c [SO_2]^d [Cl]^e$, $X = P^c$, $X = P^c [SO_2]^d$, $X = P^c [Cl]^e$

Table VIII. Multilinear regressions corresponding to data of corrosion as function of time and other parameters in horizontal and vertical positions according to the proposed model $K = a t^b P^c [SO_2]^d [Cl]^e$. Cases are presented where $X = 1$, $X = P^c [SO_2]^d [Cl]^e$, $X = P^c$, $X = P^c [SO_2]^d$, $X = P^c [Cl]^e$

Posición	a	b	X	r2	P
Vertical	4,469	0,46	=1	25,4	0,0002
Horizontal	4,436	0,74	=1	36,15	0,0000
Vertical	1,26	0,54	= P^c		
			c=0,40	53,44	0,0019
Horizontal	0,65	0,89	= P^c		
			c=0,59	70,60	0,0001
Vertical	0,639	0,64	$P^c [SO_2]^d$		
			c=0,33; d=0,28	57,78	0,0004
Horizontal	0,51	0,98	$P^c [SO_2]^d$		
			c=0,33; d=0,25	72,58	0,0001
Vertical	0,90	0,52	$P^c [Cl]^e$		
			c=0,43; e=-0,23	57,14	0,0013
Horizontal	0,65	0,89	$P^c [Cl]^e$		
			c=0,59; e=-0,002	70,60	0,0000
Vertical	2,25	0,67	$P^c [SO_2]^d [Cl]^e$		
			c=0,35; d=0,47; e=-0,41	67,29	0,0024
Horizontal	0,11	0,98	$P^c [SO_2]^d [Cl]^e$		
			C=0,53; d=0,32; e=-0,13	73,12	0,0000

metálicos colocados en las tres estaciones de ensayo. Los resultados fueron los siguientes:

$$K = 1,645 t^{1,28} P^{0,31} SO_2^{0,11} Cl^{0,02}$$

$$r^2=93,08 \quad P<0,01 \quad (4)$$

Como se observa, la ecuación obtenida tiene muy buena significación y el mayor coeficiente, después del tiempo de exposición, corresponde a la velocidad de deposición de polvo, coincidiendo con los resultados obtenidos para los almacenes, a excepción del coeficiente que afecta a los iones cloruros que en este caso resulta positivo.

3.2. Clasificación de la agresividad corrosiva

En la tabla IX se presenta la clasificación de la agresividad corrosiva para el acero en los seis almacenes y los tres armarios ensayados.

Es de notar que en el interior de los armarios se alcanzan mayores valores de velocidad de corrosión, muy posiblemente debido a que éstos tienen un volumen más pequeño, donde hay un mayor intercambio con el ambiente exterior, además de estar sometidos a cambios más drásticos de temperatura y humedad relativa. En el caso de los armarios, la mayor velocidad de corrosión corresponde a la estación de Cojimar, coincidente con una mayor velocidad de deposición de polvo, cloruros y compuestos de azufre con respecto a los restantes armarios.

Al comparar los armarios con los almacenes vemos que el intercambio con el exterior es mayor en los primeros, además de que las paredes metálicas provocan una mayor variación de temperatura y humedad relativa interior. Estas condiciones explican que el grado de agresividad corrosiva en los almacenes estudiados sea siempre menor que en los armarios. No obstante, es de destacar que el nivel de agresividad corrosiva con respecto al acero, tanto en los armarios como en los almacenes, se encuentra siempre en las categorías más altas, siendo la menor IC3.

Tabla IX. Valores medios de velocidad de corrosión anual ($\text{g/m}^2\text{a}$) para el acero en los seis almacenes (posición vertical) y los tres armarios ensayados con su clasificación correspondiente de acuerdo a ISO CD/11844. En el caso del almacén 4 no se tiene el valor de un año, se estima en base a datos de 6 y 18 meses que se encuentra en el intervalo mayor de 7,9 y menor de 9,3

Table IX. Average yearly corrosion rate data ($\text{g/m}^2\text{a}$) for steel in the six storehouses (vertical position) and the three metallic boxes and its classification according to ISO 11844. For storehouse No. 4 yearly value is estimated based on data for 6 and 18 months, it is in the range of higher than 7,9 and lower than 9,3.

Punto de evaluación	Velocidad de corrosión	Clasificación
Almacén 1 (interior)	5,8	IC 3
Almacén 1 (exterior)	13,2	IC 4
Almacén 2	9,0	IC 3
Almacén 3	14,0	IC 4
Almacén 4	7,9 > <9,3	IC 3-IC 4
Almacén 5	15,6	IC 4
Almacén 6 (cerca de la puerta)	57,8	IC 4
Almacén 6 (lejos de la puerta)	22,2	IC 4
Armario en CNIC	94,6	IC 5
Armario en Cojimar	157,1	IC 5
Armario en Quivicán	128,3	IC 5

4. CONCLUSIONES

- Se propone un nuevo y sencillo método para la determinación del polvo depositado en condiciones interiores.
- Se propone un modelo para explicar el desarrollo de la corrosión del acero en interiores que se ajusta adecuadamente a los datos experimentales.
- Se destaca la influencia del polvo depositado en el proceso de corrosión del acero en interiores.
- La agresividad corrosiva con respecto al acero, en condiciones interiores, es superior en armarios bajo efecto estufa en comparación con almacenes.
- La agresividad corrosiva interior con respecto al acero en las evaluaciones realizadas en Cuba se encuentra en los mayores niveles de la propuesta de norma ISO 11844.

REFERENCIAS

- [1] C. LEYGRAF Y T.E. GRAEDEL, *Electrochemical Society Series*, Wiley Intersciences, New York, 2000, pp. 95-97.
- [2] C. LEYGRAF, XV *Int. Corrosion Cong.*, Granada, Ed. CENIM, Madrid, España, 2002.
- [3] D. DE LA FUENTE, B. CHICO Y M. MORCILLO, *Rev. Metal. Madrid* vol. Extr. (2005) 438-442.
- [4] S. ROSSI, *Int. Sem. Equipment X Weathering*, Brasil, Ed. Fundación CPqD, Campinas, SP, Brasil, 2000.
- [5] ISO 11844-1:2000, *Corrosion of metals and alloys. Classification of low corrosivity of indoor atmospheres. Determination and estimation of indoor corrosivity*.
- [6] F. CORVO Y J. ROCHA-ANDRADE DA SILVA, XV *Int. Corrosion Cong. Granada*, Ed. CENIM, Madrid, España, 2002.
- [7] F. CORVO, N. BETANCOURT Y A. MENDOZA, *Corros. Sci.* 37 (1995) 1.889-1.901.
- [8] M. OHANIAN, R. CARABALLO, E.A. DALCHIELE, G. GUNIEO-COBS, V. MARTÍNEZ-LUACES Y E. QUAGLIATA, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 175-185.
- [9] F. CORVO, A.D. TORRENS, N. BETANCOURT, J. PÉREZ Y E. GONZÁLEZ, *Corros. Sci.* 49 (2007) 418-435.
- [10] NC-12-01-09, *Método de determinación de la deposición de cloruros en la atmósfera*.
- [11] ISO 9225:1992, *Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Measurement of pollution*.
- [12] ISO 9223: 1992, *Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification*.
- [13] F. CORVO, J. MINOTAS, J. DELGADO Y C. ARROYAVE, *Corros. Sci.* 47 (2005) 883-892.