

Título: Corrosión atmosférica en obras de alta protección en Matanzas.

Autores: Idaelsys López Arias; Carlos Echeverría Lage

1 Análisis Bibliográfico.

1.1 Agresividad Corrosiva Bajo Soterramiento.

La corrosión atmosférica interior ha sido menos estudiada que la corrosión atmosférica exterior. No obstante, los efectos que causa la corrosión atmosférica en condiciones soterradas cobra importancia debido a que es esta una de las formas empleadas para el almacenamiento y protección de las reservas de equipos y materiales en algunos sectores. Las investigaciones demuestran la influencia que ejerce la atmósfera exterior en las condiciones atmosféricas interiores.

El estudio simultáneo de las condiciones atmosféricas interiores y exteriores raramente se realizaba, hasta hace algunos años, en que los fracasos obtenidos sobre todo en equipos electrónicos guardados o en uso, propiciaron que se tomara más en serio el problema de la corrosión en interiores. Esto lo corroboran los resultados alcanzados por científicos del CINC, quienes plantean, después de más de veinte años de estudios, que a pesar del conocimiento acumulado, todavía quedan lagunas, acerca del mecanismo de corrosión atmosférica y la influencia de parámetros medioambientales en él.(15).

1.2.1 Influencia de las condiciones de agresividad en exteriores sobre las condiciones interiores

La ubicación geográfica del archipiélago cubano, trae aparejada la influencia de masas de aire polar y ártico en el invierno y el anticiclón del Atlántico y las lluvias tropicales durante el verano. En la zona en que nos encontramos, estos penetran desde la costa norte hacia el sur. La forma alargada y estrecha de nuestra isla, favorece el efecto de estos fenómenos meteorológicos, a lo largo y ancho del territorio nacional, siempre con mayor incidencia en la costa norte occidental. Las masas de aire frío pocas veces llegan a la zona más oriental del país. Estas participan directa e indirectamente en la formación y transportación del aerosol marino y las bajas temperaturas del aire, lo favorecen. Es por ello que en el período de invierno, es mayor el nivel de contaminantes atmosféricos y la agresividad corrosiva.(4, 5, 6, 8, 9, 15).

Los niveles de contaminantes en exteriores, así como la agresividad corrosiva que estos suponen, pueden influir en mayor o menor grado, en las condiciones de interiores, incluidas las obras soterradas. Esto depende, fundamentalmente, de cuán eficaces sean los métodos escogidos para el aislamiento de la zona interior. Aunque, es válido señalar que en condiciones soterradas, las características del suelo, el tipo de recubrimiento interior de las paredes, tipo de ventilación, entre otros parámetros, coadyuvan a la particularización del medio circundante.

Una de las ventajas principales que ofrecen las atmósferas interiores es que pueden ser manipuladas y controladas, reduciendo al mínimo los efectos de la contaminación .

En estudios recientes, se corrobora que la influencia de la corrosión atmosférica en interiores es menor que a la intemperie y los niveles más bajos se alcanzan en condiciones soterradas; pero aún en estas condiciones, no se puede negar la penetración de agentes corrosivos desde el exterior, transportados por corrientes de aire y su influencia en la

agresividad del medio interior, incluso en obras soterradas muy alejadas de las costas. La humedad en estos locales es muy alta y su variación es menor(14). Esto se debe, entre otras cosas, a que en interiores la evaporación es menor, como también lo es la temperatura del aire.

En la provincia de Matanzas se comprueba que en condiciones soterradas hay presencia de cloruros y sulfatos, incluso en zonas muy alejadas de las costas y que los niveles en interiores son mucho menores que en los exteriores. Según la norma ISO 11844 para interiores, las zonas estudiadas en Matanzas, se clasifican de agresividad media interior. No obstante, se estima que existen otras zonas donde los niveles de agresividad corrosiva son más elevados y que pueden superar los reportados hasta el momento para este tipo de atmósfera.

Se plantea que para el acero, cuanto mayor es el nivel de agresividad corrosiva en exterior, mayor es la diferencia de proporcionalidad entre los niveles de agresividad corrosiva en el interior con respecto al exterior. (14) En las investigaciones realizadas en Matanzas se observó que en el período de invierno, cuando los niveles de agresividad corrosiva son mayores, esta diferencia de proporcionalidad es mayor que en el período de verano. Es válido señalar que los niveles de agresividad corrosiva en interiores permanecen prácticamente invariables de un período a otro en las zonas estudiadas, según los resultados alcanzados hasta el momento.

En atmósferas urbanas- industriales, según Corvo y col. esta relación disminuye con el tiempo, debido quizás, a una mejora en las propiedades proteccionistas de los productos de corrosión.(14).

Los niveles de contaminación por cloruro son extremos, a 150m de la costa norte y se observa una disminución apreciable a medida que nos alejamos de esta. También se reportan grandes diferencias en las concentraciones de cloruro y sulfato, en dependencia de la zona en que se realiza el estudio. Según Corvo, Betancourt y col. queda de la siguiente forma:

Concentraciones de cloruro

Terreno llano costero hasta 250m de la costa norte>terreno llano costero a más de 250m de a costa norte y terreno llano costero sur> zona urbana industrial>terreno llano interno(centro)>zonas montañosas.

Concentraciones de sulfatos:

Terreno llano costero hasta 250m de la costa norte>zona urbana industrial >terreno llano costero a más de 250m de a costa norte y terreno llano costero sur>terreno llano interno(centro)>zonas montañosas.

Pérdidas de peso en el acero:

Terreno llano costero hasta 250m de la costa norte>zona urbana industrial >terreno llano costero a más de 250m de a costa norte y terreno llano costero sur>terreno llano interno(centro)>zonas montañosas.

En trabajo realizado por Echeverría, los datos obtenidos para el terreno llano costero sur, son menores que los alcanzados para el terreno llano costero a más de 250m de la costa norte. Por lo que no coincide del todo con este planteamiento.

Un análisis general demuestra que existe influencia de cloruros y sulfatos en la velocidad de corrosión del acero, durante los primeros 6 meses de exposición y después en exteriores. Durante ese tiempo, una capa de productos de corrosión se forma sobre la superficie metálica. (14).

En condiciones soterradas, la capa de óxido que se forma es mucho más delgada, incluso, puede ser menor que la que se forma en probetas expuestas por un período de 30 días en exteriores, en las estaciones rurales, cercanas y muy alejadas de la costa norte occidental.

En todos los casos (interior y exterior) la influencia del Ion cloruro es significativa, en la agresividad corrosiva de la atmósfera. Y en las regiones costeras, hay un incremento en la concentración de este contaminante y existe una disminución del mismo en la medida que nos alejamos de la costa norte. La acción de los compuestos sulfurados ocurre a través de la interacción con los iones cloruro. Se plantea la posibilidad de existencia de un mecanismo de adsorción competitiva, aunque hasta el momento no se ha demostrado.

En los niveles de sulfato, no se observa el mismo comportamiento que en el caso del cloruro. Según Corvo, Betancourt y col.(14) el decrecimiento en los niveles de compuestos sulfurados, no es tan significativo en la medida que nos alejamos de la costa norte. No obstante, en atmósferas interiores (soterradas), la velocidad de deposición del sulfato, disminuye a más de la mitad con respecto a la intemperie, en zonas costeras y hasta la tercera parte en zonas rurales.(15). Estos resultados alcanzados en la zona occidental de Cuba, serán comprobados en los estudios realizados en la zona central, donde se estima que la contaminación por compuestos sulfurados proviene fundamentalmente del aerosol marino, según Echeverría, aunque en la actualidad, en determinadas zonas pueden haberse sumado otras fuentes, entre ellas los pozos de extracción de petróleo.

Con respecto al cobre, zinc y aluminio, la velocidad de corrosión más alta se registra a la intemperie y es mayor en las zonas costeras. Probablemente, debido a la acumulación de contaminantes sobre la superficie sin lavar.

Entre los factores meteorológicos, las horas de humectación es un factor de importancia, ya que se logra mayor influencia corrosiva de los contaminantes en el acero, cuando la temperatura es menor que 25°C (presencia de rocío), que cuando está por encima de ese valor (mayor evaporación).(14)

En el caso de los metales no férreos, el tiempo de lluvias es más significativo que el tiempo de humedad (5-25°C) en atmósferas exteriores, con respecto a la incidencia de los niveles de contaminación por Ion cloruro. Esto puede ser debido a que los compuestos de cloruro y sulfato de metales no férreos son menos solubles que los del acero.(14).

La determinación de los tiempos de humectación y lluvias, es importante para la caracterización de la atmósfera y la diferencia de corrosividad entre el interior y el exterior. Se han obtenido los valores más significativos de influencia del ión cloruro, en la correlación con el tiempo de lluvia en exteriores y con el tiempo de humectación en interiores. Así como, el tiempo de humectación (5-25°C) arrojó los valores más significativos respecto a la influencia del sulfato en interiores.(14).

En un trabajo conjunto entre Cuba y Colombia, se consideró que el efecto de lavado o limpiado de los productos de corrosión puede ser determinado por la proporción W/D (cantidad de lluvia / frecuencia de lluvia). Este efecto de lavado podría afectar la proporcionalidad de la contaminación por cloruro y su influencia en los niveles de corrosión. De hecho se comprueba en dicho trabajo (para la Habana y Medellín), que la proporción de aceleración causada por Ion cloruro en la corrosión atmosférica de acero y cobre depende de las características del régimen de lluvia. De acuerdo con esto, para una zona donde el tiempo y la cantidad de lluvia es mayor, debe esperarse una menor aceleración de la velocidad de corrosión, para una proporción de cloruro dada.(14).

Las condiciones de humedad y temperatura en interiores, fundamentalmente en locales soterrados, son propicias para la proliferación de microorganismos y esto representa un elemento más en la contaminación del medio y puede influir en la agresividad corrosiva interior.

Otro factor que incide en la corrosividad es el polvo. En atmósferas interiores, hay una tendencia a ser mayor la pérdida de peso en las probetas expuestas horizontalmente respecto a las expuestas en posición vertical. Aunque cuando la velocidad de corrosión es muy baja, no hay una diferencia definida entre la posición horizontal y la vertical. En esto juega un papel importante el tipo de ventilación. Cuando la humedad es controlada (cuarto cerrado) la velocidad de deposición del polvo es menor que en aquellos casos en que las muestras son alcanzadas por ráfagas de viento desde el exterior de vez en cuando.

2 Corrosión en zonas de la provincia de Matanzas a la intemperie y bajo soterramiento simultáneamente.

2.1 Ensayos de corrosión a la atmósfera y bajo soterramiento.

2.1.1 Corrosión Atmosférica.

El estudio de corrosión atmosférica, tanto en interiores como en exteriores, se realiza a partir de un diseño experimental donde se exponen probetas de acero de bajo contenido de carbono.

2.1.1.1 Ubicación del ensayo.

El ensayo se ubicó en una zona representativa, que facilita el estudio del comportamiento del material lo más fielmente posible, tanto en interiores como en exteriores.

Exteriores (ensayo a la intemperie): El material queda expuesto a todas las condiciones atmosféricas y a los contaminantes.

Interiores (ensayo bajo soterramiento): El material queda protegido de las precipitaciones atmosféricas y las radiaciones solares, en túneles.

2.1.1.2 Soporte para probetas.

El soporte para probetas depende del tipo de ensayo, ya sea en exteriores o bajo soterramiento.

Soporte para exteriores: El más usado es una especie de panelario metálico en forma de mesa o banco, cuya parte más baja se levanta a 1m del suelo, con un ángulo de inclinación de 45°, formada por barras separadas entre sí; de forma tal que permita colocar las probetas totalmente. Para colocar las probetas se usan separadores de material inerte, que estarán acoplados a las piezas del panelario y sujetarán las probetas por sus bordes. En estos casos se utilizan frecuentemente aisladores de cerámica atornillados.

Soporte para interiores: Se utiliza la forma de porta platos, donde las probetas se colocan en forma vertical a 90°.

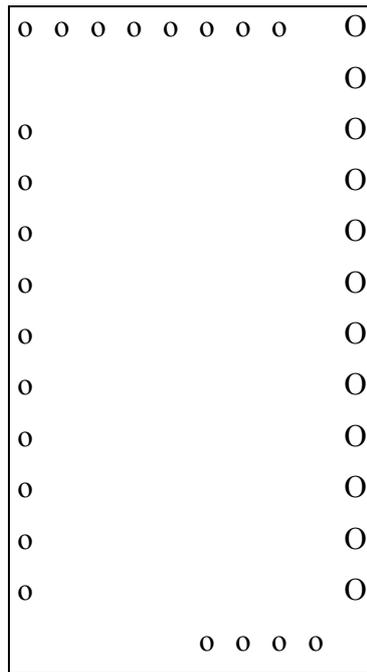
2.1.1.3 Probetas.

Las probetas rectangulares son las que se prefieren para este tipo de ensayo. Las normas internacionales establecen que las dimensiones recomendables son de 100x150mm, que se

considera buen tamaño para que el error por determinación superficial sea mínimo. El espesor de la chapa debe garantizar la resistencia del material bajo las condiciones de exposición, durante todo el período que se evalúa. Se recomiendan espesores de chapa entre 1 y 3 mm. En este proyecto se emplearon probetas de 0.8 y 1 mm de espesor.

Las probetas, antes de ser expuestas en el ensayo deben ser correctamente preparadas. Dicha preparación incluye la limpieza superficial, medición del área, peso de la probeta e identificación de la misma, que se realiza del modo siguiente:

- Muestra del marcado de las probetas.



Donde:

1.Los agujeros en la parte superior indican, el tiempo de exposición de las probetas, de izquierda a derecha la numeración responde a: 2 meses, 3 meses, 6 meses, 12 meses, 24 meses. La probeta que se cambia mensualmente no se marca en la parte superior.

2.Los agujeros en la parte inferior indican, número de réplicas de las probetas (1,2,3, 4).

3.Los agujeros a la izquierda: de arriba hacia abajo, los 6 primeros indican el punto de ubicación de la muestra; el resto de los orificios se emplean para hacer otras especificaciones, por ejemplo, para denotar un producto de conservación que se desee estudiar (grasas que en nuestro caso se han evaluado).

4.Los agujeros a la derecha son los meses del año en que son expuestas las probetas, de arriba hacia abajo, comienza Enero hasta Diciembre.

2.1.1.4. Recepción y entrega de probetas de ensayo.

Las probetas de ensayo se colocan por estación y ubicación en bolsas de polietileno bien herméticas y con control de la humedad relativa a niveles en los cuales la corrosión

atmosférica no tiene lugar, de esta forma pueden permanecer almacenadas por muchos días sin afectaciones.

Por lo antes expuesto las bolsas no pueden sufrir daños que permitan la penetración del aire húmedo ni tampoco deben ser abiertas días antes de la fecha de colocación del experimento.

Las probetas que se retiran del experimento una vez cumplido su período de exposición, tienen que de igual forma cubrirse con el papel en el cual fue enviada al área de ensayo y colocada nuevamente en su bolsa de polietileno. Cuidar en este caso que debe ser extraída la humedad y quedar completamente sellada. El cumplimiento de lo anterior se comprueba al producirse la recepción de las probetas ya ensayadas, y la entrega de las nuevas probetas que se colocan en el próximo mes. Es decir, esta operación se realiza días antes de ser montado el próximo experimento mensual al que se ejecuta y días después de ser desmontado el experimento anterior.

Conjuntamente con la recepción y entrega de probetas, se realiza la recepción y entrega del resto de los ensayos que componen el experimento, además se hace entrega del cuaderno de incidencias que correspondió al período ensayado, para con ello comprobar durante la evaluación cualquier alteración de los resultados del experimento.

La recepción y entrega con tiempo, garantiza que se cumpla en todos los períodos con el montaje en la fecha fijada, que tiene que corresponderse con el 1ero de cada mes. Cuando esto no ocurra hay que informar esta situación.

2.1.1.5. Montaje de las probetas

Las probetas una vez preparadas se envían a las estaciones de ensayo donde serán expuestas. Se colocan en los soportes con ayuda de los separadores. Ninguna porción del área de una debe quedar encima de otra. En el caso de los soportes para interiores, por ser de acrílico, no es necesario utilizar separadores, basta con que la probeta quede en la posición que establecen las Normas Internacionales.

El montaje se inicia con el cambio de estación, o sea, al comienzo de la temporada de invierno (Octubre–Noviembre) o de verano (Abril-Mayo), que son las que se definen claramente en nuestro país.

El presente resultado del proyecto se inició en el mes de mayo del 2000.

Es de vital importancia el estricto cumplimiento de lo antes señalado, para asegurar la exactitud y precisión de los resultados finales.

2.3 Determinación de Cloruros(Cl^-) y compuestos de azufre(SO_4^{2-}).

Para determinar el nivel de contaminación atmosférica se aplican varios métodos cuyos resultados finales arrojan los valores de velocidades de deposición de cloruros y compuestos de azufre. Los métodos más empleados son:

- Tela seca, para determinación de cloruros.
- Bujía húmeda, para determinación de cloruros
- Filtracita, para la determinación de compuestos de azufre (SO_2 , SO_3 , SH_2 , SO_4^{2-} , etc.).

- Polvos sedimentables y determinación de la presencia y cantidad de cloruros y sulfatos.

2.3.1 Ubicación del ensayo.

El ensayo debe estar ubicado en una zona representativa, que facilite la determinación exacta del comportamiento de los niveles de contaminantes en la atmósfera durante los períodos que se evalúan.

2.3.2 Soportes.

El soporte para estas muestras lo constituye una caseta con techo de dos aguas, con piso intermedio a la altura de 1m desde el piso .

2.3.3 Captadores.

- Tela seca, para determinación de cloruros: consiste en un lienzo rectangular de un área aproximada de 22x32cm, en los extremos de sus partes más estrechas tiene un dobladillo que permite pasar una varilla con la que distiende y se sujeta el lienzo. Forma un ángulo de 45° con la horizontal.
- Bujía húmeda, para determinación de cloruros: consiste en un frasco de boca ancha que tiene acoplado un cilindro de material inerte envuelto en gasa, con un área aproximada de 100 cm². El área de la gasa debe ser suficiente para envolver el cilindro y que su extremo inferior quede sumergido en el agua destilada, que se almacena en el interior del frasco.
- Filtracita, para la determinación de sulfatos: se corta el papel de filtro grueso en forma cilíndrica y se sujeta con aros de acrílico en sus extremos.
- Polvos sedimentables: para la determinación de la velocidad de deposición de polvo sedimentable y su composición en cloruros y sulfatos se utilizan placas petri que se limpian perfectamente, se llevan al lugar donde se van a exponer, se les quita la tapa, se dejan expuestas durante el tiempo que se ha determinado, al final del cual se tapan nuevamente y se llevan al laboratorio para su evaluación.

2.3.4 Montaje de los Captadores.

- Tela seca, para determinación de cloruros: se sujeta por medio de cables o soportes móviles colocados sobre el piso intermedio de la caseta, cuidando siempre que la tela quede inclinada en ángulo de 45 grados respecto a la horizontal.
- Bujía húmeda, para determinación de cloruros: se coloca sobre la superficie del piso intermedio de la caseta, lo más al centro posible, del frente hacia el fondo.
- Filtracita, para la determinación de sulfatos: se sostiene mediante un cable, en posición vertical, que pende del techo de la caseta.
- Polvos sedimentables, para la determinación de cloruros y sulfatos: las placas petri se fijan a la superficie del piso intermedio de la caseta, lo más al centro posible, del frente hacia el fondo.

2.4 Cuidado del ensayo de cloruros por el método de la bujía húmeda.

Este ensayo es muy preciso, pero requiere de un cuidado extremo, para garantizar los resultados, para ello hay que chequear frecuentemente que no falte el agua dentro del frasco y por ello, hay que mantener el nivel fijado. Si por alguna causa falta el agua, durante ese tiempo la tela que no esta húmeda no capta los contaminantes en la misma magnitud y por tanto se alteran los resultados.

Si se observa el crecimiento de algún microorganismo en el interior del frasco, algas, hongos, etc. se debe de informar inmediatamente para proceder a tomar las medidas oportunas, antes que la presencia de esos microorganismos puedan afectar el ensayo. Ello se observa por una simple tonalidad verde, negra o cambio en la coloración del agua o la gasa.

Al culminar el ensayo, la gasa se introduce en el frasco, se tapa bien con un tapón de goma y ya se encuentra listo para enviar. No se puede derramar ni una gota del líquido, el cual contiene los contaminantes.

El tubo plástico puede quedarse en la zona de ensayo y antes de colocar la nueva gasa, hay que lavarlo bien con la misma agua destilada que se tiene para rellenar el frasco durante el experimento, de esta forma se evita la transportación innecesaria.

2.5 Ensayo de la velocidad de deposición de compuestos de azufre por el método de la filtracita y de la velocidad de deposición de cloruros por el método de la tela seca.

En ambos casos las muestras llegan al experimento dentro de un sobre de polietileno bien sellado para que no se pongan en contacto con los contaminantes de la atmósfera, por tanto de igual forma, al culminar el experimento, hay que colocar las muestras dentro del polietileno y proceder al sellaje correspondiente.

Durante el experimento, hay que observar que tanto la tela seca como la filtracita se encuentren en posición de frente a la dirección norte, de forma tal que la totalidad del área se oponga al paso de los vientos que provienen de esa dirección.

El cambio de muestras se realiza en los período en que corresponda, conjuntamente con las probetas de ensayo de corrosión.

2.5 Agresividad corrosiva a la intemperie y bajo soterramiento

Después de la exposición, los productos de corrosión formados son separados del anverso y reverso de las probetas para la posterior determinación de los contaminantes, cumpliendo con los requisitos de la Norma ISO 8407(12). Posteriormente son sometidas a un proceso de desoxidación, realizando una limpieza química, la cual consiste en sumergir la probeta en una solución química para extraer los productos de corrosión, sin que se disuelva el metal base, para con ello determinar las pérdidas por corrosión.

Previamente mediante un estudio, se determinaron las pérdidas en baño.

Solución química:

1. 500 ml de ácido clorhídrico (densidad=1,19 g/ml).
2. 3,5 g de hexametileno tetramina.
3. Agua destilada hasta completar 1000 ml.

Tiempo de duración: 10 minutos.

Temperatura: (20 – 25) °C.

Las pérdidas por corrosión fueron determinadas, por el método gravimétrico, en correspondencia con la Norma ISO 9226 (1), el cual consiste en determinar la masa de las probetas antes y después de realizado el ensayo de resistencia a la corrosión.

$$V_c = \Delta P / A$$

Donde:

V_c : pérdidas por corrosión (g/m²).

ΔP : variación en el peso de la probeta antes y después del ensayo de corrosión atmosférica (g)

A: área de la probeta (m²)

El cálculo del área se realizó teniendo en cuenta el número de agujeros de las probetas, utilizando la siguiente expresión:

$$A = 2 * (L * a + L * e + a * e) + 2 * \pi * r * e * k - 2 * \pi * r^2 * k$$

Donde :

L: largo de las probetas(m)

a: ancho de las probetas (m)

e: espesor de las probetas (m)

r: radio de los agujeros de las probetas (m)

k: número de agujeros (m)

Las dimensiones de las probetas se determinan usando un pie de rey.

Para el cálculo de las pérdidas por corrosión se tuvo en cuenta que la desviación del promedio aritmético no excediera el 10 % de la media aritmética (2). La clasificación de la corrosión se realiza en base a lo estipulado en la Norma ISO 9223 (3).

2.5.1 Evaluación del nivel de contaminantes.

Para la evaluación de los contaminantes se determinó el cloruro por los métodos de la bujía húmeda y la tela seca, el polvo sedimentable mediante placas de Petri y los compuestos de azufre por el método de la filtracita. El método de la filtracita (conocido también como superficie alcalina) es específico para compuestos de azufre, tal y como establece la Norma ISO: 9225.1992.(11)

La técnica analítica de determinación de compuestos de azufre se realiza a partir de la NC: NC 12-01-08: 1982.(13)

Ensayo de sulfato (filtracita)

1. Cuando llega la filtracita de la estación, se desmenuza, se identifica el beaker (estación, condición de exposición, fecha de inicio y fecha de retirada).

Se le añaden 400 ml de agua. Se deja en maceración 24 horas.

2. Pasadas las 24 horas se trituran con un policía.

3. Filtrar al vacío.
4. El filtrado se vierte en un matraz de 500 ml y se enrasa. (el matraz debe tener todos los datos de la muestra: estación, fecha de inicio y final).
5. Se toma una alícuota de 100 ml y se le vierte en el beaker inicial. Se le añade 5 ml de ácido nítrico 1:1 (para acidular la solución). Se le añade 1 ml de H₂O₂ (30 volúmenes.) (El HNO₃ y el H₂O₂ tienen la función de eliminar los carbonatos).
6. Se coloca en una plancha se calientan a ebullición tapado con papel de aluminio.
7. Cuando esté ebullendo, sin bajar de la plancha, se le añaden 5 ml de cloruro de bario(10% en peso) para que todos los sulfatos solubles precipiten.
8. Se baja y se deja reposar 24 horas.
9. Después se filtra con un papel sin ceniza.
10. Se toma un crisol previamente, se incinera, secado media hora a 750° (en mufla) y se pone en desecadora, 5 min aproximadamente, y cuando esté a temperatura ambiente, se toma el peso inicial. Se anota en una libreta de trabajo el numero del crisol con los datos del beaker inicial.
11. El papel de filtro con la muestra se coloca en un crisol. Se pone en la mufla a 750°, 1 hora. Se saca y se pone en desecadora. Luego se pesa y se anota el peso, se repite varias veces este paso hasta lograr peso constante.
12. cálculos.

El sulfato se calcula a través de la siguiente expresión:

$$m = ((m_2 - m_1) * V_1 * 0.274 * 1.5 * 1000) / V_2$$

Donde:

m: Masa de SO₄²⁻ (mg).

m₂: Masa de crisol más precipitado de sulfato de bario.

m₁: Masa inicial del crisol.

V₁: Volumen de la solución de prueba (500 mL).

V₂: Volumen de la alícuota tomada de la solución de prueba.

0.274: Factor de cambio de la masa de sulfato de bario (BaSO₄) a dióxido de azufre (SO₂).

1.5 : Factor de cambio de dióxido de azufre(SO₂) a sulfato (SO₄²⁻).

1000: Factor para pasar de g a mg.

Después:

$$X = (m - m_0) / (A * t), \quad [mg/m^2 * d]$$

X: Velocidad de deposición.

m₀: Masa del blanco. (m₀=0.09)

A: Area de la filtrasisita. (A_{filtrasisita}= 0.024 m²)

t: tiempo.

Esta técnica analítica se emplea en la determinación de sulfato tanto en filtracita como en el polvo sedimentable.

La técnica analítica de determinación de cloruro la establece la norma ISO 9225.1992 a través de una técnica de titración.

Técnica de determinación de cloruro por análisis químico (ISO 9225.1992).

La cantidad de cloruro en una muestra se determina por titración (valoración) mercurimétrica en presencia de un indicador mixto (bromofenol azul-difenilcarbazona). El punto final de la titración está indicado por la formación de un complejo azul violeta de mercurio-difenil-carbazona en el intervalo de $\text{pH}(2,3-2,8)$.

Reactivos:

Se utilizará siempre agua destilada o desionizada, libre de Cl^- .

- Solución del indicador mixto.

Disuelva 0.5g de difenil carbazona y 0.5g de bromofenol azul en 75 ml de etanol, guárdelo en frasco oscuro en el refrigerador.

- Solución de HNO_3 (0.05M).

Diluya 3ml de HNO_3 (densidad=1.42) hasta 1000ml.

- Solución de NaOH de 0.25 M

Disuelva 10g de NaOH en agua y dilúyalo hasta 1L.

- Solución standard de NaCl 0.025 M

Seque el NaCl durante 1h a 300° , disuelva 1,4613g en 1L.

- Solución standard de $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ 0.012 M

Disuelva 4.2830g de $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en 50 ml de agua acidificada con 0.5 ml de HNO_3 (d=1,42) y diluya en 1L.

Filtre si es necesario y determine la concentración exacta por titración standard de NaCl.(se toma 5 ml de muestra de NaCl y se enrasa a 50 ml)

- Solución standard de $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ 0.000705 M (fotosensible guardar en frasco ámbar)

Disuelva 2,4200g de $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en 25 ml de agua acidificada con 25 ml de HNO_3 (d=1,42). Diluya a 1L. Filtre si es necesario y determine la concentración exacta por titración con NaCl.

Procedimiento analítico.

Tome una alícuota de la muestra que contiene Cl^- , esta alícuota no debe contener más de 20 mg de Cl^- .

Si la alícuota de la muestra de Cl^- contiene menos de 2.5 mg/dm^3 de Cl^- la titración debe llevarse a cabo utilizando solución $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ 0.00705 y una microbureta.

En este caso debe hacerse un blanco con 50 ml de agua. Si la alícuota contiene menos de 0.1 mg de Cl^- por dm^3 se enrasa hasta 50ml. Añada gotas de HNO_3 0.05 M hasta que el

color cambie a amarillo y luego añada 1 ml en exceso de HNO₃. Si se forma un color amarillo o naranja al añadir el indicador, desarrolle el color azul-violeta añadiendo gotas de NaOH 0.25 M y proceda con la acidificación. Títre la solución amarilla acidificada con solución de Hg(NO₃)₂ hasta que persista el color azul-violeta. El volumen de la solución de Hg(NO₃)₂ consumida, se anota.

Interferencias.

- Br⁻, I⁻, CN⁻, SCN⁻, SO₃⁻ y S²⁻, interfieren porque reaccionan con el Hg³⁺.
- Los iones férricos y cromatos interfieren en concentraciones superiores a 0.01 g/L.
- Los iones cúpricos no interfieren por debajo de 0.05 g/L. El Zn²⁺, Pb²⁺, Cr³⁺ no interfieren por debajo de 0.1 g/L. Los SO₄²⁻, PO₄³⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, Al³⁺ no interfieren por debajo de 1 g/L.
- El NaNO₃, KNO₃ no interfieren por debajo de 200 g/L.

Los cálculos se realizan de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V(Cl) = (2 \cdot (a-b) \cdot m \cdot 35.5 \cdot V_T) / (V_a \cdot S \cdot t) \quad [mg/m^2 \cdot d]$$

Donde:

a: Volumen de solución de mercurio en ml, utilizado para la titración de la muestra.

b: Volumen de solución de Hg(NO₃)₂ en ml, utilizado para la valoración del blanco.

m: Concentración de la solución de Hg(NO₃)₂ en mol/L.

35,5: Peso atómico del Cl⁻ (masa molar).

V_T: Volumen total de la muestra (250 o 500) ml.

V_a: Volumen de la alícuota en ml.

S: Área de la gasa en m².

t: tiempo de exposición en días.

También puede realizarse la determinación de cloruros por un método potenciométrico utilizando un electrodo de Plata y solución de Nitrato de Plata. Los análisis de cloruro realizados en el CNIC fueron llevados a cabo por este método.

Para la determinación de los contaminantes en los polvos sedimentables .

- Se lava la cápsula y se vierte el contenido a un beaker, arrastrando todo el contenido de la cápsula.
- Tomar matraz de 250 ml y filtrar con embudo y papel de filtro normal, del beaker al matraz y se enrasa con agua destilada.
- Se toman 100 ml para determinación de sulfato por la misma técnica de la norma cubana.
- Se toman 150 ml para la determinación de cloruros por la misma técnica de análisis químico establecida por la (ISO 9225.1992).

Técnica analítica de determinación del polvo sedimentable.

Se exponen en el lugar de interés dos placas Petri destapadas, durante el tiempo establecido en la referencia. Se recogen las placas, se les coloca sus respectivas tapas y se llevan al laboratorio. En caso de que se vaya a determinar cloruros y sulfatos se colocan tres placas Petri, una de las cuales se utiliza para esta última determinación.

En el laboratorio se retiran las tapas de las placas Petri y se lavan las placas con agua destilada, vertiendo la misma por los bordes interiores. Esta agua, que contiene el polvo se vierte en cápsulas de porcelana previamente taradas. Posteriormente estas se colocan en la plancha de calentamiento hasta obtener una evaporación del agua, quedando solamente el polvo.

Las cápsulas son llevadas a una estufa regulada a 150° donde permanecen por espacio de una hora, después se sacan y se colocan en una desecadora de vidrio con cloruro de calcio o sílica gel hasta que alcancen la temperatura ambiente, para posteriormente pesarlas y determinar la velocidad de deposición del polvo según:

$$E_t = (p_s - p_i) / A * t \text{ [mg/m}^2\text{d]}$$

Donde:

p_s = peso promedio de la muestra con polvo.

p_i = peso de la cápsula tarada.

A = área interior de la placa Petri.

t = tiempo de exposición

Materia Orgánica e Inorgánica.

Se colocan las cápsulas con el polvo recolectado en lugar de interés en una mufla a 750° durante 1 hora. Posteriormente se colocan en una desecadora con CaCl_2 o sílica gel hasta que se enfríe y se pesan. Se repite la operación hasta obtener un peso constante.

El cálculo de la materia orgánica se realiza según la fórmula:

$$M_o = [(p_s - p_i) - (p_f - p_i)] / a * t \text{ [mg/m}^2\text{d]}$$

Donde:

p_s = peso promedio de la cápsula después de colocada en la estufa.

p_2 = peso de la cápsula después de colocada en la mufla.

A = área interior de la placa Petri.

t = tiempo de exposición

El cálculo de la materia inorgánica se realiza según la fórmula siguiente:

$$M_E = (p_f - p_i) / A * t \text{ [mg/m}^2\text{d]}$$

Cloruros y sulfatos en el polvo

Se toma una placa de Petri, a la cual se le añade agua destilada por los bordes para arrastrar el polvo. Esta agua se echa en un beaker de 250 ml. Se lava todo el polvo y la solución que se obtiene, como un precipitado, se deja reposar por un periodo no menor de 24 horas.

Posteriormente se filtra la solución y se lleva a un volumen de 250 ml, de los cuales se destinan 150ml, a la determinación de cloruros y 100 ml para la determinación de los sulfatos.

Medidas de protección y Control del experimento en la estación de ensayo y en la transportación.

Registro de incidencias

En cada estación de ensayo se elaboró un cuaderno o registro de incidencias donde se recogen todos los incidentes que ocurren y que pueden introducir errores en los cálculos posteriores.

Un ejemplo de estas incidencias aparecen en la tabla siguiente:

Fecha	Tipo de muestra	Fecha de inicio	No de muestra	Ubicación.	Observaciones
25/05/00	Polvos	01/05/00	1	exterior	Fue arrastrada por el viento y cayó en un depósito con agua
18/08/00	filtracita	01/08/00	2	exterior	El soporte fue derrumbado por un viento fuerte.

Los datos sobre las probetas se pueden conocer, superponiendo a las mismas la plantilla de acrílico que posee cada ensayo, con lo cual se pueden precisar todos los datos. Ver Fig. No 1 y explicación anexa.

Datos Meteorológicos.

- Complejo humedad – temperatura del aire:
- Horas de humectación (horas): tiempo en el día en que la humedad relativa supera el 70% y el 80% y la temperatura del aire es mayor que 0°C. Los resultados se expresan mensuales y anuales. Con esta información se obtiene el Complejo Humedad – Temperatura.
- Vientos: Se reporta las horas viento de las direcciones predominantes para velocidades superiores a 15 km/ h, que no son vientos locales y se obtienen por direcciones las horas promedio mensuales.
- Radiación Solar: Intensidad de las radiaciones solares (horas de radiación) durante el día, promedio mensual y el promedio anual.
- Pluviosidad o Precipitaciones (mm/d y mm/año): se registra mensualmente y los resultados se expresan en mm de lluvia por meses y años.

Nota: Todos estos datos, deben ser procesados de ser posible diariamente y se recogen mensualmente, en la fecha fijada del mes siguiente en que se hace la recepción y entrega de las probetas de ensayos.

3 Agresividad corrosiva de la atmósfera a la intemperie y bajo soterramiento. Relación.

3.1 Resultados alcanzados.

Resultados de pérdidas por corrosión a la intemperie y bajo soterramiento.

En la Tabla No 1 siguiente se muestran los resultados de las pérdidas por corrosión a la intemperie en períodos de 6 meses y un año.

Tabla No 1. Pérdidas por corrosión para períodos de 6 meses y un año en las Estaciones de Ensayo 1 y 2. Clasificación de la Agresividad Corrosiva a la intemperie.			
Estación de Ensayo	Período Exposición	DP (g/m²)	Clasificación según ISO 9223
No 1	Mayo – Nov. 2000	134.67	Agresividad Media
No 1	Nov. – Abril 2000	209.24	Agresividad Media
No 1	Mayo – Abril 2000	299.96	Agresividad Media
No 2	Mayo – Nov. 2000	103.16	Agresividad Baja
No 2	Nov. – Abril 2000	116.44	Agresividad Baja
No 2	Mayo – Abril 2000	164.31	Agresividad Baja

Los resultados de baja agresividad corrosiva, no son los que predominan en Cuba, precisamente dado por la influencia del aerosol marino, pero el efecto del apantallamiento disminuye la acción directa de los contaminantes y con ello la velocidad de corrosión.

Observando los resultados del estudio de la corrosión atmosférica en Iberoamérica (7), podemos constatar que estos bajos niveles de agresividad corrosiva, son los que precisamente predominan en la mayoría de estos países, en zonas alejadas de las costas y por ello se habla de atmósferas rurales, no así en el caso de Cuba, donde se demuestra el carácter estacional de la influencia del aerosol marino.

En la Tabla No 2 se muestran los resultados a la intemperie y bajo soterramiento en las dos Estaciones de Ensayo y la relación Intemperie/ Bajo Soterramiento.

En la Estación No 1 se mantienen los niveles de agresividad bajo soterramiento en los dos períodos del año, lo que da la medida de la existencia de niveles estables de la agresividad, con independencia del comportamiento exterior en el año de ensayos. En la Estación No 2 no se observa el mismo resultado, aunque debe analizarse si las diferencias en la variación de la corrosión son realmente significativas

Tabla No 2. Pérdidas por corrosión para períodos de 6 meses y un año en las Estaciones de Ensayo 1 y 2. A la intemperie y bajo soterramiento y su relación.				
Estación de Ensayo	Período Exposición	DP (g/m²) Intemperie (I)	DP (g/m²) Bajo Soterramiento (S)	Relación DP(I)/DP(S)
No 1	Mayo–Nov/00	134.67	3.39	39.67
No 1	Nov–Abril/01	209.24	3.32	62.95
No 1	Mayo –Abril/01	299.96	5.42	55.36
No 2	Mayo–Nov/00	103.16	3.55	29.09
No 2	Nov –Abril/01	116.44	5.91	19.70
No 2	Mayo –Abril/01	164.31	7.01	23.44

Tabla 3.-Pérdidas por corrosión anuales para atmósferas interiores de las estaciones No. 1 y 2 y clasificación de acuerdo a ISO/TC 156/WG4 - N338Rev			
Estación de Ensayo	Período Exposición	DP (mg/m²/año)	Clasificación
No 1	Mayo –Abril/01	5420.00	IC3 (Media interior)
No 2	Mayo –Abril/01	7010.00	IC3 (Media interior)

En la Tabla 3 se observa que la agresividad corrosiva anual para las estaciones 1 y 2 bajo soterramiento cae dentro de la misma clasificación propuesta por la ISO para interiores.

3.2Influencia del aerosol marino. Resultados alcanzados.

En las Tablas No 4 ,5, 6 y 7 aparecen las velocidades de deposición de cloruros, para las dos estaciones de ensayo y las relaciones invierno/ verano, para los dos métodos de captación. En todos los casos las relaciones son mayores que la unidad, lo que indica la influencia del aerosol marino y su carácter estacional.

Tabla No 4. Estación de Ensayo No1. Ubicada mas proxima a la costa norte. Bujía Húmeda					
Invierno	Vcl (mg/m2.d)	Vcl (promedio)	Verano	Vcl (mg/m2.d)	Vcl (promedio)
Octub.(00)	8.6	39.61	Mayo(00)	15.6	11.48
Noviemb.(00)	36.8		Junio(00)	12.8	
Diciemb.(00)	55.42		Julio(00)	7.58	Relación Inv/Ver
Enero(01)	36.31		Agosto(00)	13.48	3.45
Febr,(01)	42.71		Sept.(00)	9.78	
Marzo(01)	58.03				

Tabla No 5. Estación de Ensayo No1. Ubicada mas proxima a la costa norte. Tela Seca.					
Invierno	Vcl (mg/m2.d)	Vcl (promedio)	Verano	Vcl (mg/m2.d)	Vcl (promedio)
Octub.(00)	17.20	18.13	Mayo(00)	2.27	4.48
Noviemb.(00)	13.05		Junio(00)	4.51	
Diciemb.(00)	24.34		Julio(00)	1.72	Rel. Inv/Ver
Enero(01)	11.01		Agosto(00)	8.78	4.05
Febr,(01)	29.79		Sept.(00)	5.12	
Marzo(01)	13.41				

Tabla No 6. Estación de Ensayo No2. Ubicada mas alejada de la costa norte. Bujía Humeda					
Invierno	Vcl (mg/m2.d)	Vcl (promedio)	Verano	Vcl (mg/m2.d)	Vcl (promedio)
Octub.(00)	7.05	23.78	Mayo(00)	9.40	6.75
Noviemb.(00)	21.35		Junio(00)	6.88	
Diciemb.(00)	29.60		Julio(00)	4.34	Rel. Inv/Ver
Enero(01)	24.21		Agost(00)	4.37	3.52
Febr,(01)	39.90		Sept.(00)	8.74	
Marzo(01)	20.06				

Tabla No 7. Estación de Ensayo No2. Ubicada mas alejada de la costa norte. Tela Seca					
Invierno	Vcl (mg/m2.d)	Vcl (promedio)	Verano	Vcl (mg/m2.d)	Vcl (promedio)
Octub.(00)	6.93	5.28	Mayo(00)	2.90	2.78
Noviemb.(00)	5.05		Junio(00)	1.47	
Diciemb.(00)	4.89		Julio(00)	2.81	Relacion Inv/Ver
Enero(01)	4.75		Agosto(00)	1.45	1.9
Febr,(01)	6.02		Sept.(00)	5.27	
Marzo(01)	4.07				

En las Tablas No 8 y 9 se muestran las pérdidas por corrosión para períodos mensuales y las relaciones invierno/ verano correspondientes, mayores en ambos casos a la unidad.

Como se observa , la relación invierno/ verano en todos los casos es mayor que la unidad, lo que indica la influencia estacional del aerosol marino, que penetra desde la costa norte y que va disminuyendo su acción a medida que nos aproximamos a la Costa Sur, atendiendo a que la dirección predominante de los vientos en los períodos más prolongados del año son de componente Norte, tal y como se demuestra en diferentes trabajos (4,5,6, 8,9).

Tabla No 8. Pérdidas por corrosión en período de invierno y verano y relación (Invierno/Verano) en la Estación de Ensayo No 1.					
Invierno	DP (g/m²)	DPprom. (g/cm²)	Verano	DP (g/m²)	DPprom. (g/cm²)
Octub.(00)	46.20	46.12	Mayo(00)	28.30	17.16
Noviemb.(00)	38.69		Junio(00)	22.10	Relacion: Invierno/verano
Diciemb.(00)	59.30		Julio(00)	11.7	2.69
Enero(01)	42.36		Agosto(00)	17.40	
Febr,(01)	40.38		Sept.(00)	6.32	
Marzo(01)	49.78				

Tabla No 9. Pérdidas por corrosión en período de invierno y verano y relación (Invierno/Verano) en la Estación de Ensayo No 2.					
Invierno	DP (g/m²)	DPprom. (g/m²)	Verano	DP (g/m²)	DPprom. (g/cm²)
Octub.(00)	60.28	29.27	Mayo(00)	11.50	10.54
Noviemb.(00)	14.90		Junio(00)	5.96	Relacion: Invierno/verano
Diciemb.(00)	23.80		Julio(00)	23.30	2.77
Enero(01)	30.67		Agosto(00)	5.11	
Febr,(01)	22.40		Sept.(00)	6.92	
Marzo(01)	23.70				

En las Figuras No 1 y 2, aparecen las correlaciones matemáticas entre la velocidad de corrosión y la velocidad de deposición de cloruros. En ambos casos se obtienen correlaciones, siendo el coeficiente de correlación, para las dos estaciones, bajo. Esto puede estar determinado por el efecto de las lluvias y el viento, tal como plantea Gómez (16) y la distancia a la costa norte. También en la estación No2 existe apantallamiento por las elevaciones que se encuentran al norte de la misma. Esto también coincide con lo planteado por Corvo y col. acerca de las lagunas que existen en cuanto a los mecanismos de corrosión atmosférica y la influencia de parámetros meteorológicos en ellos.

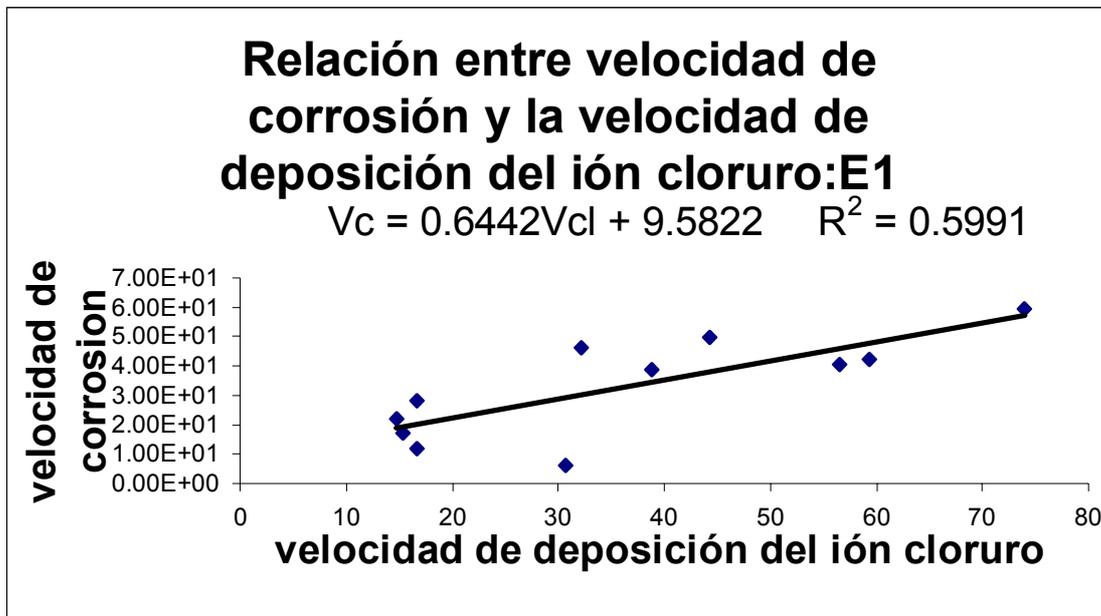
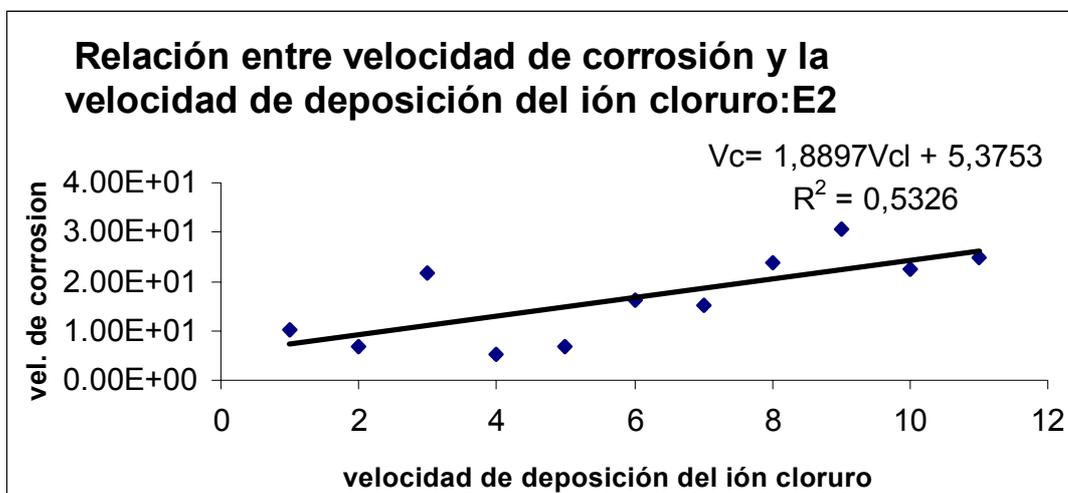


Fig. No 2



Se demuestra claramente, aunque a partir de resultados preliminares la influencia del aerosol marino en la corrosión del acero en las dos Estaciones de Ensayo y en zonas alejadas de las costas en condiciones de intemperie.

3.3 Variaciones de la corrosión en dependencia del tipo de Obra.

Teniendo en consideración que en la región central solamente se evaluaron dos obras del mismo tipo (túneles), se realiza una comparación con obras de la región occidental.

En la siguiente tabla se presentan las características de las obras evaluadas:

TABLA No 1: Características generales de cada almacén soterrado de las regiones central y occidental.

Zona y región	CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS			UBICACION DE LOS PUNTOS DE ENSAYO
	Tipo de soterramiento	Revestimiento de las paredes	Ventilación	
Rural (Bejucal)/ Occidental	Almacén con local interior	Revestimiento de hormigón	-Forzada (almacén) -Sistema de S.D.A. (local)	<ul style="list-style-type: none"> • Interior de local • Exterior de local • Intemperie
Costera (Bacuranao)/ Occidental	Almacén	Revestimiento de gunitaje	Natural con calas	<ul style="list-style-type: none"> • Interior del almacén.
Rural (San José)/ Occidental	Almacén Natural	Abrigo natural (sin revestimiento)	Natural	<ul style="list-style-type: none"> • Interior del almacén. • Intemperie.
Rural (Managua)/ Occidental	Almacén	Revestimiento de gunitaje	Natural	<ul style="list-style-type: none"> • Interior del almacén • Intemperie.
Rural (Stgo de las Vegas)/ Occidental	Almacén	Revestimiento de gunitaje	Natural	<ul style="list-style-type: none"> • Interior del almacén • Intemperie
Rural (Almacén No.1)	Almacén	Revestimiento de hormigón	Natural	<ul style="list-style-type: none"> • Interior del almacén • Intemperie
Rural (Almacén No.2)	Almacén	Revestimiento de hormigón	Natural	<ul style="list-style-type: none"> • Interior del almacén • Intemperie

Nota: S.D.A.: Secado dinámico del aire

TABLA No 2: Valores de la corrosión de placas de acero en posición vertical para cada almacén soterrado de las regiones central y occidental y su clasificación.

Zona y región	Tipo de soterramiento	Ventilación	DP anual (mg/m ²)	Clasificación según ISO/NP 11844
Rural (Bejucal)/ Occidental	Almacén con local interior	-Forzada (almacén) -Sistema de S.D.A. (local)	5770	IC3 (Alta Interior)
Costera (Bacuranao)/ Occidental	Almacén	Natural con calas	9010	IC3 (Media indoor)
Rural (San José)/ Occidental	Almacén Natural	Natural	13970	IC4 (Alta interior)
Rural (Managua)/ Occidental	Almacén	Natural	Aprox.8000	IC3 (Media interior)
Rural (Stgo de las Vegas)/ Occidental	Almacén	Natural	15640	IC4 (Alta interior)
Rural (Almacén No.1)	Almacén	Natural	5420	IC3 (Media interior)
Rural (Almacén No.2)	Almacén	Natural	7010	IC3 (Media interior)

Nota: S.D.A.: Secado dinámico del aire

Como se puede observar, la agresividad corrosiva en las obras evaluadas en Matanzas no resulta alta con respecto a las de la zona occidental. Siguen manteniéndose los almacenes con ventilación natural entre los más corrosivos. La obra No. 1 de la región central presenta un valor de pérdida por corrosión similar a la obra de menor corrosión en la región occidental en la cual se utiliza secado dinámico del aire.

Es de notar que la agresividad corrosiva en interiores se encuentra clasificada en Media y Alta de acuerdo a ISO/ NP 11844.

Conclusiones y Recomendaciones

La bibliografía reporta que los análisis realizados acerca del comportamiento de la atmósfera y su relación con los parámetros meteorológicos tanto en condiciones exteriores como interiores, no son suficientes y que existen lagunas en cuanto a los mecanismos de corrosión atmosférica y su relación con dichos parámetros meteorológicos.

Se demuestra la influencia estacional del aerosol marino, en las estaciones de ensayo estudiadas en Matanzas, alejadas de las costas, por lo que no es posible clasificar ambas atmósferas como rurales puras.

El nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera a la intemperie en la Estación No 1 se clasifica de medio y en la Estación No 2 de bajo de acuerdo a la Norma ISO 9223. Los bajos niveles para la Estación No 2, están relacionados con el apantallamiento de las elevaciones al norte y de este a oeste de la instalación.

La agresividad corrosiva en condiciones de soterramiento de las obras 1 y 2, clasificada de acuerdo a ISO/ NP 11844 es de IC3 (Media interior).

Se confirma la disminución apreciable de la corrosión al pasar de las condiciones de intemperie a soterramiento.

Con respecto al tipo de obra, al comparar con la zona occidental, se observa que las dos obras evaluadas reportan valores entre los mas bajos determinados.

La agresividad corrosiva bajo soterramiento de todas las obras evaluadas se encuentra clasificada entre Media y Alta Interior.

Referencias

1. ISO 9226. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Determination of corrosion rate of standard specimens for evaluation of corrosivity, 1992.
2. ISO 8565. Metals and alloys – Atmospheric corrosion testing – General requirements for field tests, 1992.
3. ISO 9223. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, 1992.
4. Echeverría C. La corrosión atmosférica del acero y la protección temporal de los centrales azucareros en la provincia de Matanzas. Tesis para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. 1991.
5. Echeverría, C. y otros. El aerosol marino y el ión sulfato en las condiciones climáticas de Cuba. II Conferencia Científica del CUM, julio, 1985.
6. Mertell, J. Tesis para optar por el grado de Dr .En Ciencias Técnicas,1985.
7. Morcillo M. y otros: Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica. Parte I. Mapas de Iberoamérica de corrosividad atmosférica. (Proyecto MICAT). Editor Programa CYTED 1998. Págs. 787.

8. Corvo, F. Y otros. Influencia de la salinidad de la atmósfera sobre la corrosión del acero. Presentado en el XII Seminario Científico CNIC. Corrosión'95. Encuentro Nacional del Área de Investigación, Desarrollo y Lucha contra la Corrosión. C. Habana, 1995.
9. Corvo F, Betancourt N., Mendoza A.; The influence of airborne salinity on the atmospheric corrosion of steel. Corrosion Science. Vol 37 No. 12. Pág. 1889 – 1901. 1995.
10. ISO/NP 11844. Corrosion of metals and alloys. Classification of corrosivity of indoor atmospheres.
11. ISO 9225. Corrosion of metals and alloys. Corrosividad of atmospheres. Measurement of pollution.
12. ISO 8407: 1991. Corrosion of metals and alloys. Removal of corrosion products from corrosion test specimens.
13. NC 12 – 02 – 08: 1982. SNPCC: Determinación del contenido del dióxido de azufre en la atmósfera. Método de análisis químico.
14. F. Corvo, N. Betancourt, A.D. Torrens. ATMOSPHERIC CORROSION IN THE TROPICS. EXPERIENCES OBTAINED AFTER MORE THAN 20 YEARS OF RESEARCH IN CUBA. Corrosion Department, National Centre for Scientific Research, P.O. Box 6412, Havana City, Cuba.
15. Francisco Corvo, Ana D. Torrens, Antonio R. Mendoza. PERFORMANCE OF METALLIC MATERIALS IN TROPICAL CLIMATE. INFLUENCE OF EXPOSURE CONDITIONS. Corrosion Department, National Centre for Scientific Research (CNIC),P.O. Box 6880, Havana City, Cuba
16. Gómez Lorenzo, J. 1999. Estudio corrosivo sobre cuatro metales en estaciones cubanas del proyecto MICAT. 183h. Tesis (para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Ministerio de Industria Básica.