

ENSAYOS PARA DETERMINACIÓN DE LA CORROSION DE METALES EN DIFERENTES AMBIENTES DE LIMA Y CALLAO

R. Pizarro-Cabrera*, A. Anaya-Pajuelo

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química
Av. Venezuela s/n Lima-Perú

Abstract. The corrosion effect on two samples of steel alloys widely used in Lima and Callao have been studied. Low alloy steel grade API-SLX-42 manufactured by Sider Perú S.A. and galvanized steel manufactured by Ferrum Perú S.A. are exposed to different local atmospheric environments such as urban, industrial and marine. As a result it was found that galvanized steel is more resistant than low alloy steel. The author propose mathematical models that describes in each case the behavior of the metals under the above mentioned environmental conditions.

Key words: Corrosion, atmospheric corrosion, galvanized steel.

Resumen. Se ha estudiado el efecto de la corrosión en dos muestras de aleaciones de acero ampliamente usados en Lima y Callao. Acero de baja aleación grado API-SLX-42 fabricado por Sider Peru S.A. y acero galvanizado fabricado por Ferrum Perú S.A. son expuestos a diferentes ambientes atmosféricos locales tales como urbano, industrial y marino. Como resultado se encontró que el acero galvanizado es más resistente a la corrosión que el acero de baja aleación. El autor propone modelos matemáticos que describen en cada caso el comportamiento de los metales bajo las condiciones ambientales estudiadas.

Palabras clave: Corrosión, Corrosión atmosférica, acero galvanizado.

I. INTRODUCCION

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de la destrucción de metales y aleaciones. La gran mayoría de las construcciones y piezas metálicas opera bajo la acción del medio ambiente, habiéndose calculado que aproximadamente el 80% del metal producido queda expuesto a él. Es posible que la agresividad atmosférica sea culpable, por sí sola, de más del 50% de las pérdidas totales debido a la corrosión metálica. Si se tiene en cuenta el amplio uso del acero se comprenderá que uno de los mayores problemas en corrosión sea el evitar la formación de herrumbre. Realmente, las medidas encaminadas a la protección del acero así como de otros metales en la atmósfera constituyen uno de los principales rubros de cualquier cálculo de gastos imputables a la corrosión. A temperatura ambiente, y en una atmósfera perfectamente seca la corrosión puede ser ignorada, pero en ambientes tan especiales como el ambiente de Lima y Callao con altas humedades relativas, cuyo rango de va-

riación se encuentra entre 83-92% HR, durante el año, sumado a la creciente contaminación ambiental paralelo al continuo avance de la civilización generan las condiciones propicias para la corrosión de los metales.

Actualmente no existe en el país un estudio específico sobre el comportamiento de los metales en los diferentes ambientes naturales de Lima Metropolitana, que permita determinar la agresividad de estos sobre los metales de uso industrial; existen estudios aislados al respecto, realizados por diferentes instituciones académicas o industriales. Esta información es sin embargo muy restringida o aún no está completa. La difusión de este tipo de información es muy importante para la industria en general, puesto que permitiría realizar los respectivos estudios preventivos, que contribuirían a disminuir las pérdidas ocasionadas por corrosión en las instalaciones industriales en contacto con los diferentes ambientes naturales locales. De ahí se podría también estudiar los efectos de los diferentes contaminantes de la atmósfera sobre una determinada superficie metálica[1].

*E-mail : d160054@unmsm.edu.pe

INFLUENCIA DE LA CAPA DE HUMEDAD EN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

Esta suficientemente probado que la corrosión atmosférica depende esencialmente de la presencia de capas de electrolito sobre la superficie metálica, hay cierta escasez de datos al respecto a las propiedades específicas de estas capas.

Se ha encontrado que el espesor de las capas formadas por condensación de humedad sobre las superficies verticales oscila entre unos 10 a 50 μm , y que las capas más gruesas tienden a escurrirse. Sobre las superficies horizontales son posibles espesores de 50 a 100 μm y en casos excepcionales de más de 200 μm .

La figura 1 representa la dependencia entre la corrosión atmosférica y el espesor de capa de electrolito sobre la superficie metálica[2].

POSIBILIDADES DE PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES EN LA ATMÓSFERA

La magnitud de la corrosión va a depender del tiempo durante el cual la película de humedad permanece sobre la superficie metálica, ya que la naturaleza electroquímica del proceso exige que las superficies metálicas estén humedecidas. En conclusión, la corrosión atmosférica es un proceso discontinuo que progresa cuando las capas superficiales de electrolitos hacen posibles las semi-reacciones anódica y

catódica, pudiendo expresarse la corrosión total C , como la suma de la ocurrida durante los periodos i en la que la superficie metálica aparece humedecida:

$$C = \tau_1 V_{c1} + \tau_2 V_{c2} + \dots + \tau_n V_{cn}$$

Donde V_{ci} = la velocidad media de corrosión durante el periodo de humectación, puede calcularse en función de las variables climatológicas propias de cada lugar de ensayo.

τ_i = Tiempos parciales de humectación

Considerando tiempos totales de humectación y velocidad media de corrosión el modelo se reduce a:

$$C = \tau(\text{global}) \cdot V(\text{media})$$

Si no se quiere, o no se puede realizar ensayos de exposiciones naturales y se conocen las características meteorológicas y de contaminación del lugar existen distintos estudios que intentan expresar matemáticamente la corrosión en función de tales datos, de entre los que cabe destacar los de Haynie Upham para el acero dulce, conseguidos tras realizar un cuidadoso análisis estadístico en 57 ciudades de EE.UU., según ellos la corrosión del acero dulce durante el primer año de exposición estaría dada por:

$$C = 325 e^{(2.75 S - 163.2/H)}$$

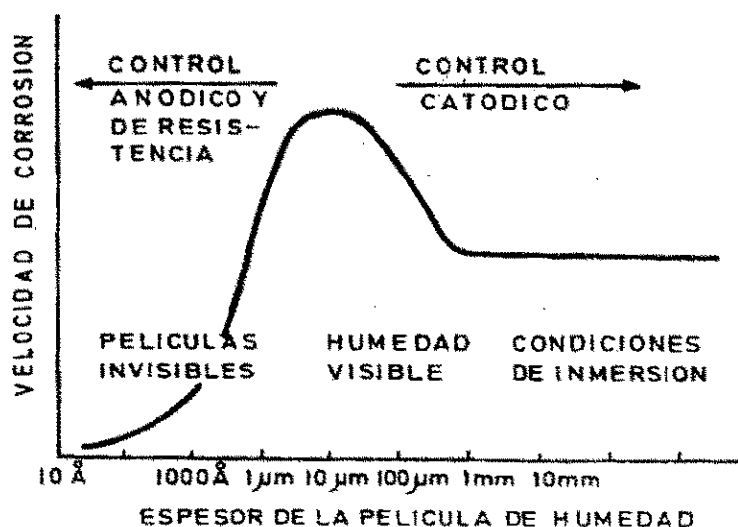


Fig.1. El espesor de la película de humedad, condensada sobre la superficie metálica influye grandemente en la velocidad de corrosión

S = Concentración media anual de SO_2 en la atmósfera en mg/m^3

H = Humedad relativa media anual

Un estudio similar para el Zinc, arrojó el siguiente resultado

$$C = 1.028 (H - 48.8) S$$

La utilidad de estas formulas para realizar predicciones de corrosión en la atmósfera de Madrid a quedado demostrada.

En el caso del acero dulce, parece dudoso que el progreso de la corrosión tienda a amortiguarse con el tiempo, asimilándose con bastante aproximación a leyes del tipo:

$$C = A t^n$$

Siendo n el exponente inferior a la unidad, tratándose del acero dulce los valores de n son cercanos a 0.5.

Esto brinda un método aproximado de predecir la velocidad de corrosión a largo plazo, siempre claro esta, que se haya determinado el dato para el primer año en el lugar de estudio [3].

Existen otras leyes que gobiernan la velocidad de corrosión de los metales, pero estos dependen del lugar donde se realizan los estu-

dios, en otras palabras los resultados que se obtienen de estos ensayos, en exposiciones naturales son de utilidad local, como lo demuestra los estudios realizados en España [4], y Estados Unidos [5]. Es lógico pensar que las condiciones atmosféricas son variables según la posición de la localidad en estudio y según las estaciones del año. Así como acero es atacado por estas atmósferas también atacan a otros metales expuestos al medio tales como: Aluminio, cobre y Zinc [6, 7].

Considerando estos factores, la presente investigación pretende dar a conocer los modelos matemáticos que gobiernan la velocidad corrosión en Lima y Callao.

ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

Los ensayos para la determinación de la corrosión atmosférica se clasifican de la siguiente manera:

1. Ensayos Acelerados para de determinación de la Corrosión Atmosférica
2. Ensayos de exposición en Atmósferas Naturales

- Cámaras climáticas
- Método propuesto por CEBELCOR [8]
- Ensayos Electroquímicos [9]

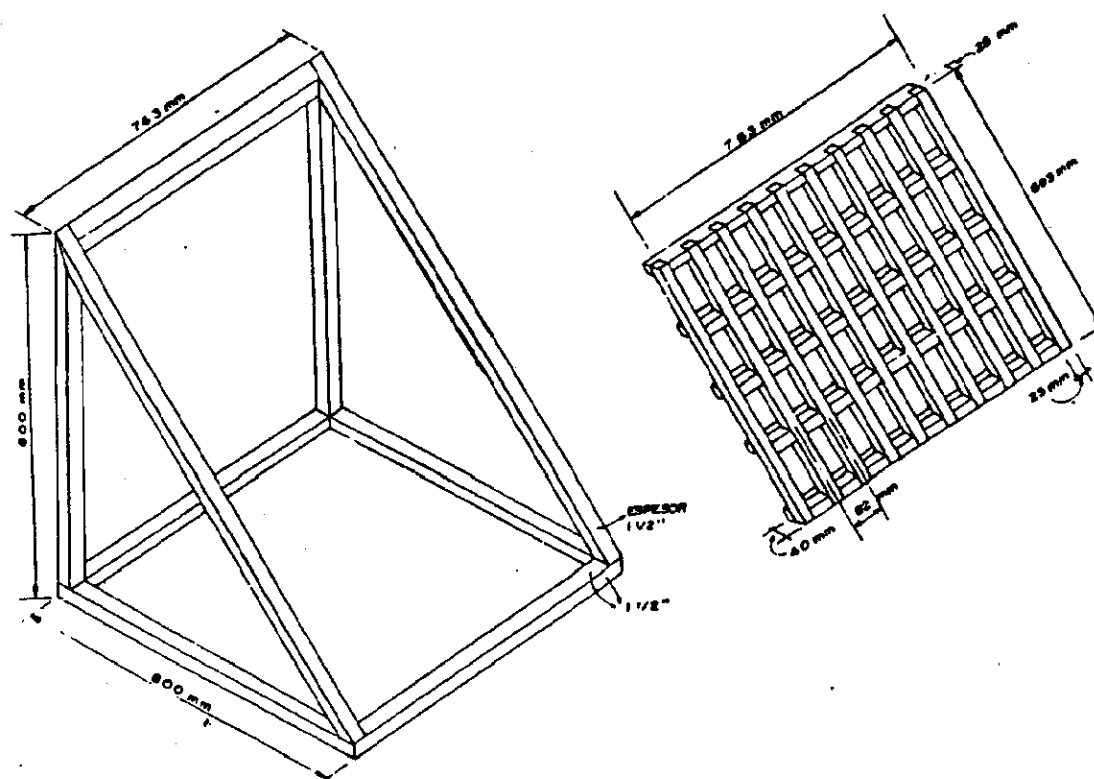


Fig.2. Esquema de los paneles de exposición

Los ensayos de corrosión atmosférica, también denominados ensayos "in situ" o no acelerados consisten en la exposición sistemática y observaciones periódicas de probetas sin revestimiento o revertidas en un ambiente natural. Los ensayos deben obedecer a determinadas normas a fin de obtener datos comparativos que permitan evaluar el comportamiento de diferentes materiales los factores climatológicos de cada región. Asimismo, una estación de ensayo de corrosión atmosférica consta de un conjunto de probetas soportables en un panel de exposición (Fig.2), según una inclinación y una orientación. Una estación debe disponer de un local con equipos de ensayo para medir los parámetros ambientales (temperatura, humedad relativa, velocidad de vientos, etc.), o de servirse de datos ofrecidos por una estación meteorológica de localización próxima.

II.PARTE EXPERIMENTAL

Actualmente, no se tiene una idea clara de cómo influyen las condiciones ambientales de Lima y Callao en el comportamiento de los metales sometidos a ciertas características del medio ambiente.

2.1 MATERIALES

Para hacer efectivo este estudio se eligió como etapa inicial dos metales de uso industrial por excelencia:

- Acero de baja aleación: Planchas de acero de baja aleación grado API-SLX-42, fabricado por Sider Perú S.A., de 150mmX64.5mm y 2.3mm de espesor.
- Acero Galvanizado: Acero de las mismas características anteriores, galvanizado en caliente, en la Cía Ferrum Perú S.A., con 2.6-3.1 unidades promedio de espesor de capa de galvanizado.

2.2 ATMÓSFERAS DE ESTUDIO

Estos metales están sometidos al ataque continuo de la agresividad de los diferentes ambientes de Lima y Callao, respondiendo a su vez de diferente manera. De allí, la importancia de evaluar en forma cuantitativa el efecto de estos ambientes sobre los meta-

les en estudio. Para lo cual se eligieron los siguientes ambientes atmosféricos:

- Ambiente Urbano: San Borja, Av. Guardia Civil N° 400 (Torres de San Borja)
- Ambiente Industrial: Cercado de Lima, Compañía Ferrum Perú S.A., Av. Argentina Cuadra 12.
- Ambiente Marino: La Punta Callao, Instituto del Mar del Perú, Av. Gamarra s/n.

2.3 EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS

Para la etapa inicial se consideraron tiempos de exposición de 03, 06, 12 y 24 meses, las condiciones de exposición se lograron de acuerdo a la Norma ASTM 60-1960 [10], considerando:

- Panel construido de madera
- Angulo de exposición 45°
- Aisladores de PVC
- 36 Probetas (18 de acero de baja aleación y 18 galvanizadas).

PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Los aceros de baja aleación para exposición en los ambientes naturales se les sometió al siguiente tratamiento:

- Desengrase : Detergente
- Enjuague : Agua destilada
- Decapado : Solución de ácido clorhídrico al 20%
- Enjuague : Agua destilada
- Enjuague : con alcohol industrial
- Secado

Preparación de las probetas de acero galvanizado:

Posterior a la galvanización únicamente un enjuague con alcohol industrial y secado.

2.4 EVALUACIONES DE LAS PROBETAS

La evaluación de las probetas, luego de retiradas de los paneles de exposición se realizó según Norma ASTM G1 1981, para el Acero y el Acero Galvanizado[11].

Tabla N° 1

Tiempo	0	3	6	12	24
Ambiente					
Urbano	0	104	177	205	280
Industrial	0	148	336	530	860
Marino	0	261	565	1470	3460

Tabla N° 2

Tiempo	0	3	6	12	24
Ambiente					
Urbano	0	2,4	3,5	5,6	8,8
Industrial	0	6,3	10	16,8	29,8
Marino	0	11,4	23	34,8	53,2

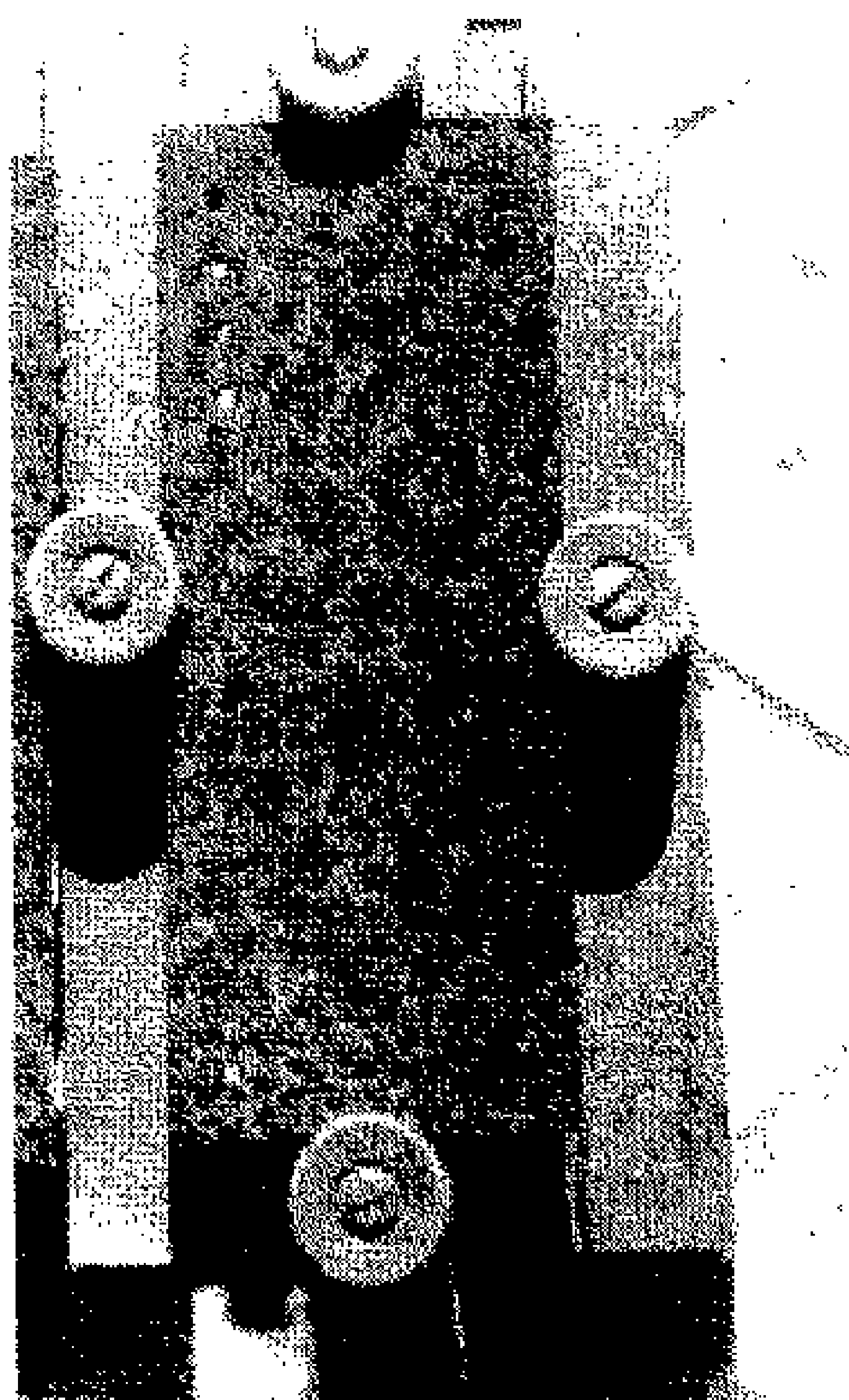
III . RESULTADOS

Después de 03, 06, 12 y 24 meses de exposición de las probetas en los diferentes ambientes de Lima y Callao se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en las **tablas 1 y 2**, Pérdida de Peso (g de Fe/m²)Vs Tiempo de Exposición (Meses).

PROBETAS DE ACERO

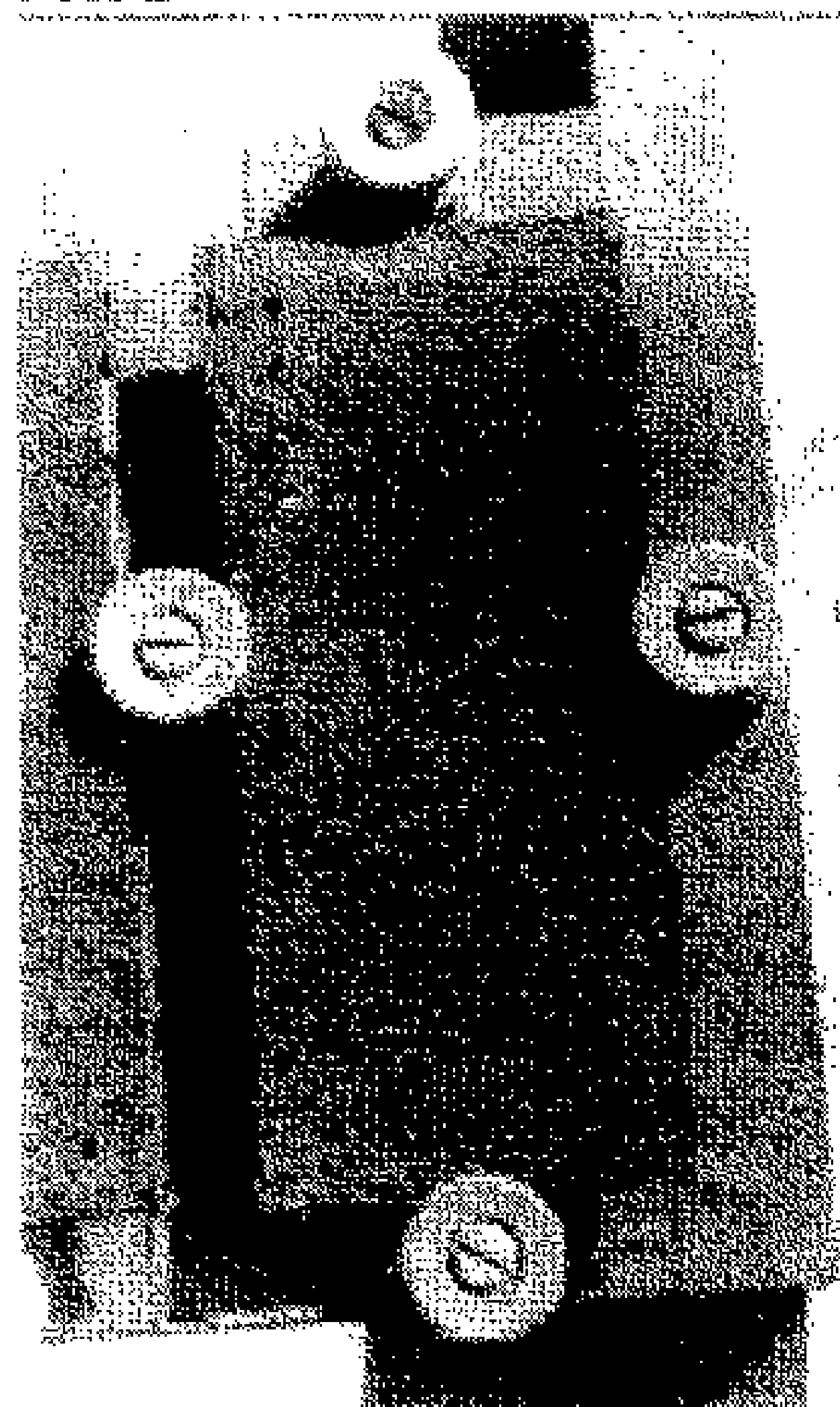
Las probetas de acero de baja aleación después de los 24 meses de exposición presentaron un aspecto de avanzado deterioro por corrosión, como se puede apreciar en las **fotografías 1, 2, 4**.

Ambiente Urbano :
Acero de baja aleación
Foto 1

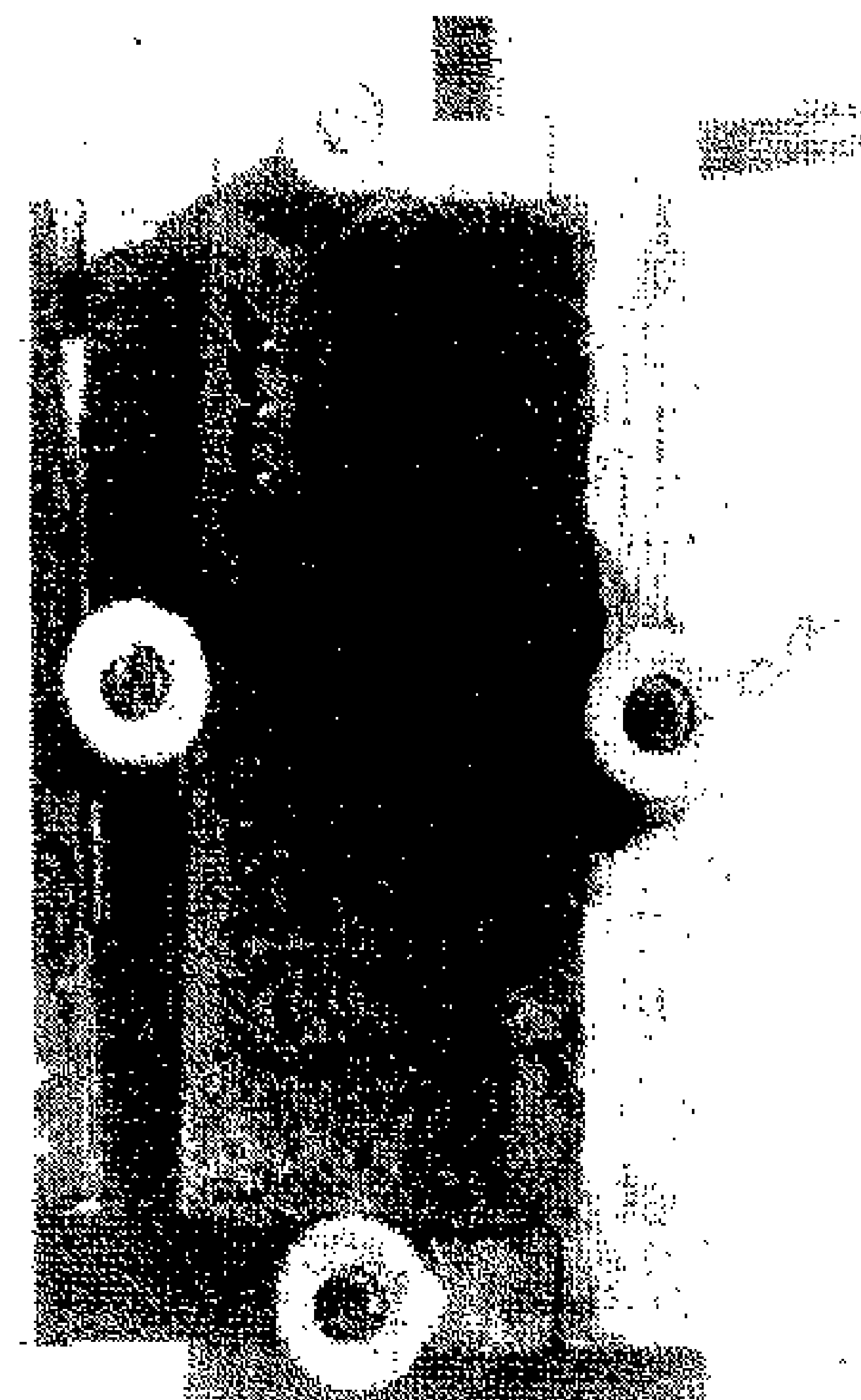


es de corrosión severa, aspecto que no presenta la estructura en ambiente urbano (**foto 1**) ni industrial (**foto 2**).

Ambiente Industrial
Acero de Baja aleación
Foto 2



Ambiente Marino
Acero de baja aleación
Foto 3



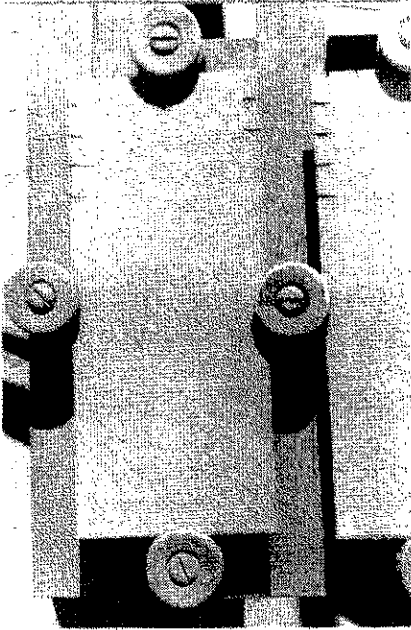
Comparación de los resultados

Después de 24 meses de exposición, el aspecto que presenta la estructura de acero de baja aleación en ambiente marino (**foto 3**)

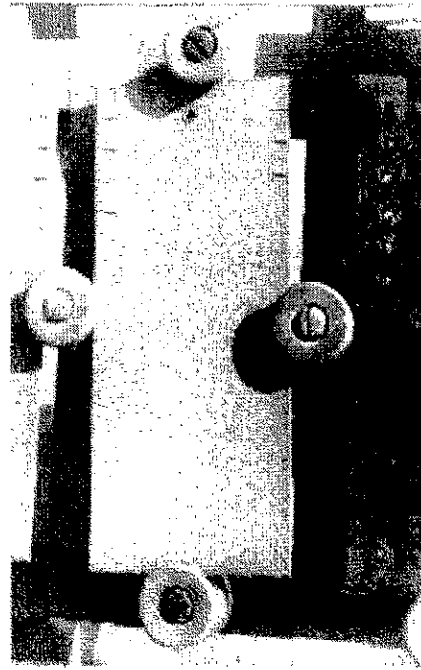
Comparación de los resultados

Después de 24 meses de exposición, se observa que existe ataque a la superficie metálica pero esta no es tan severa, situación que se repite en ambiente urbano (foto 4) y en ambiente industrial (foto 5).

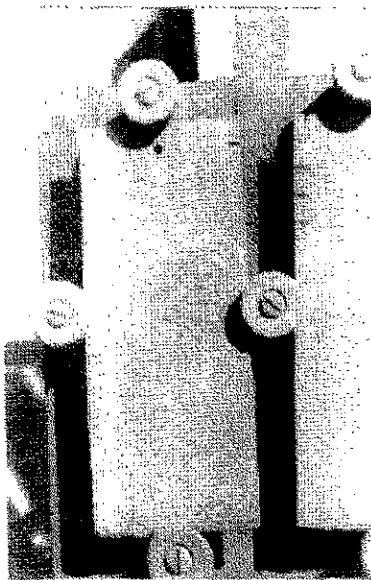
Ambiente Urbano
Acero Galvanizado
Foto 4



Ambiente Marino
Acero Galvanizado
Foto 6



Ambiente Industrial
Acero Galvanizado
Foto 5



Si se compara los resultados después de dos años de exposición, el ambiente marino (foto 6) resulta el más agresivo a diferencia del ambiente urbano. De las dos superficies metálicas expuestas, el acero de baja aleación quedó completamente deteriorado por efecto de los cloruros presente en el ambiente marino.

Si se grafican los resultados de la **Tabla 1** y **2**, se obtiene el **gráfico 1**:

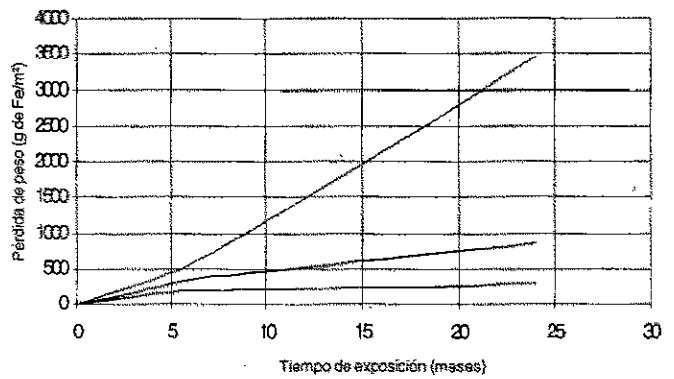
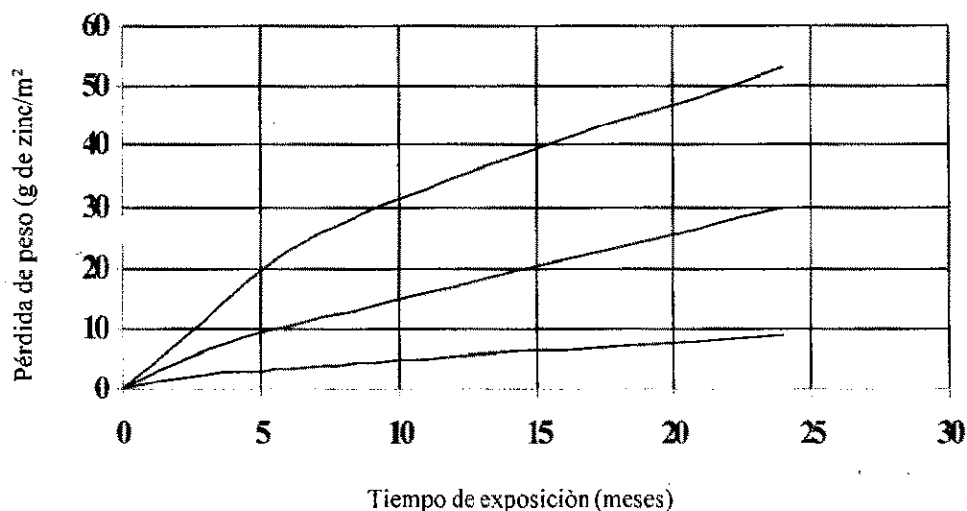


Gráfico 1

El acero de baja aleación, en el **gráfico 1** muestra el comportamiento no lineal del acero en los diferentes ambientes evaluados.

Gráfico 2



El comportamiento del acero galvanizado muestra en el **gráfico 2**, en ambos metales se observa que la pérdida de peso no es de comportamiento lineal.

Pero si intentamos graficar \log (Tiempo de Exposición) Vs \log (Pérdida de Peso de Fe), tendríamos los siguientes resultados mostrados en los **gráfico 3**.

Se observa que el comportamiento del acero de baja aleación en ambientes marinos es lineal comparado con los otros medios.

Se observa en el **gráfico 4**, que el acero galvanizado en los tres ambientes naturales evaluados tiende hacia un comportamiento lineal.

Se observa que el comportamiento del acero de baja aleación en ambiente marino tiene una tendencia lineal que responde al siguiente modelo matemático:

$$\log (\text{Pérd. de Peso de Fe/m}^2) = a \log (\text{T.de Exp.})$$

$$\log C_{Fe} = a \log t + b$$

Sin embargo las otras probetas en ambiente Industrial y Urbano no cumplen con esta tendencia es muy probable que con mayor información se pueda lograr precisar la tendencia de la pérdida de peso en función del tiempo de exposición.

Para el caso del acero galvanizado se puede considerar que la agresividad de los ambientes evaluados tiene la misma tendencia en todos los casos.

Gráfico 3

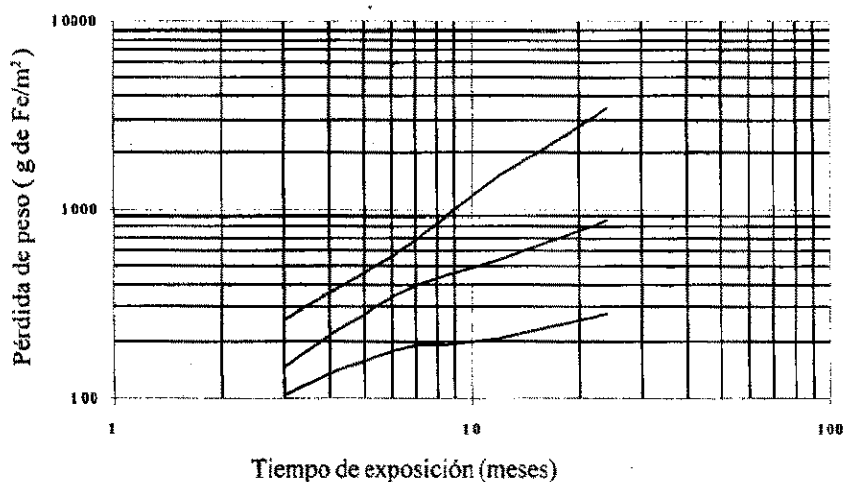
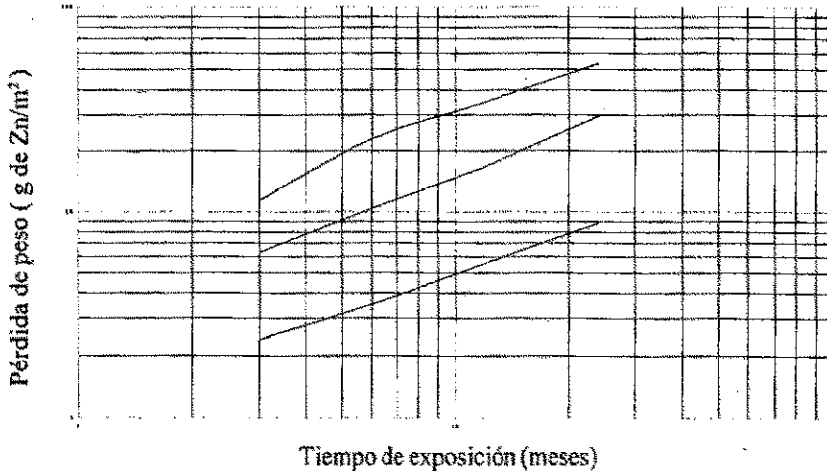


Gráfico 4



IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La corrosión del acero de baja aleación en ambiente marino y la corrosión del zinc en los diferentes ambientes respondieron al trazado típico de las leyes parabólicas o funciones de potencia.
- De la representación de los resultados obtenidos en las diferentes estaciones a lo largo de 03, 06, 12 y 24 meses en un sistema logarítmico, se concluye que las series de puntos de la diversas estaciones se ajustan con muy pequeño error a lo largo de líneas rectas, entonces los modelos resultantes para t =meses son los siguientes:

$$C_{\text{metal}} = \text{pérdida de peso} = \text{g de metal}/\text{m}^2$$

Acero de baja aleación :

Ambiente Marino:

$$\log C_{\text{Fe}} = 1,2565 \log t + 1,8019$$

El coeficiente de regresión lineal de los mínimos cuadrados es $R^2 = 0,9985$

Ambiente Industrial:

$$\log C_{\text{Fe}} = 0,8274 \log t + 1,8205$$

$$R^2 = 0,9786$$

Ambiente Urbano:

$$\log C_{\text{Fe}} = 0,4459 \log t + 1,8389$$

$$R^2 = 0,9423$$

Acero galvanizado:

Ambiente Marino:

$$\log C_{\text{Zn}} = 0,7277 \log t + 0,7448$$

$$R^2 = 0,9832$$

Ambiente Industrial:

$$\log C_{\text{Zn}} = 0,7418 \log t + 0,4401$$

$$R^2 = 0,9985$$

Ambiente Urbano:

$$\log C_{\text{Zn}} = 0,6301 \log t + 0,0690$$

$$R^2 = 0,9979$$

- Las velocidades de corrosión del acero de baja aleación en ambientes naturales industriales y urbanos no se ajustan a una recta, cuando se aplicó sistema doble logarítmico. Es muy probable que considerando mayores tiempos de exposición estas se ajusten a una recta. De igual modo, estos resultados ayudarían a comprobar la validez de los modelos matemáticos propuestos en el presente estudio.
- Buena resistencia a la corrosión atmosférica del acero galvanizado con respecto a las de acero de baja aleación sin galvanizar. Resultado que permite recomendar su uso en cualquiera de los ambientes naturales.
- La corrosión de ambos metales es alta en ambientes marinos con respecto a los otros ambientes naturales locales, esto permite concluir el efecto de los Cl^- presente en la brisa marina de las costas, intervienen en forma directa incrementando la corrosividad del medio ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Herbert H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons Inc., p 165, New York, 1971
- [2] José A. Gonzales Fernandez, Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión, Consejo Superior de Investigaciones Metalúrgicas, p 86, Madrid España, 1984.
- [3] Sebastián Feliú y Manuel Morcillo, Corrosión y Protección de los Metales en la Atmósfera, Ediciones Bellaterra S.A., p 77, Madrid España, 1982.
- [4] Feliu S. et al., Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, **15** (3), 11(1984)
- [5] Mars G. Fontana and Norbert D. Greene, Corrosion Engineering, McGraw-Hill Book Company, p 266, New York - London, 1978.
- [6] Granese S.L., Rosales B.M., Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, **16**(3), 142(1985)
- [7] Cpoun K., Cepero A., Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, **17**(3), 197(1986)
- [8] M. Pourbaix and A. Pourbaix, Corrosion'87, Paper Number 408, "Recent Progress in Atmospheric Corrosion", Belgian Center for Corrosion Study (CEBELCOR),
- [9] Pourbaix M., Pourbaix A., Prediction of the Atmospheric Corrosion behavior of Steel and Non ferrous Metals and Alloys, R.T., 30 (1987).
- [10] ASTM Special Technical Publication 646, Atmosphere factors affecting the corrosion of engineering metals, ASTM, 1978, U.S.A.
- [11] Normas ASTM, G-1-81, Preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens practices for, ASTM, 1981, U.S.A.