

74
29

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE QUIMICA

CORROSION ATMOSFERICA DEL Fe, Zn, Al. y Cu.
ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO EN ATMOSFERAS
CONTROLADAS A PARTIR DE DATOS GRAVIMETRICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A ;

ALFREDO PEREZ HERNANDEZ

MEXICO, D. F. TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1989



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

- I. I N T R O D U C C I O N .
- II. G E N E R A L I D A D E S S O B R E L A C O R R O S I O N A T M O S F E R I C A .
- III. D E S A R R O L L O E X P E R I M E N T A L .
- IV. R E S U L T A D O S E X P E R I M E N T A L E S .
- V. D I S C U S I O N D E L O S R E S U L T A D O S .
- VI. C O N C L U S I O N E S .
- VII. B I B L I O G R A F I A .
- VIII. A P E N D I C E .

CAPITULO I.

I N T R O D U C C I O N

Por Corrosión Atmosférica de los metales puede entenderse el ataque que estos sufren en su exposición al aire a temperatura ambiente.

A tales condiciones están sometidas aproximadamente el 80% de las estructuras metálicas y en oponerse a dicho ataque, se consume el 50% de los costos totales dedicados a luchar contra la corrosión (1,2).

Los ensayos aquí descritos encajan en una investigación más amplia en la que se pretende confeccionar el mapa de corrosión atmosférica de México, en base a la exposición en condiciones naturales de probetas metálicas de Fe, Cu, Zn y Al, y por otra parte caracterizar el efecto de la contaminación sobre acero estructural pintado, antes y después de la aplicación del recubrimiento y sobre acero galvanizado. En estos últimos casos se está estudiando la posibilidad de aplicación de métodos electroquímicos rápidos y cuantitativos, en un esfuerzo por superar la desesperante lentitud de los ensayos de exposición natural, sin pérdida de fiabilidad.

Dado que la fiabilidad de los métodos electroquímicos ha de garantizarse por medidas directas de la corrosión, se han aplicado los métodos gravimétricos clásicos a la determinación de la velocidad de corrosión en condiciones bien definidas en el laboratorio, persiguiendo un conocimiento preciso de la dependencia de la velocidad de corrosión con la humedad, la naturaleza del metal y la concentración de los estimuladores más importantes de la corrosión en la atmósfera, (SO_2 y Cl^-) cuya concentración se seleccionó en función de los datos de contaminación usuales en los ambientes naturales.

Se eligieron condiciones poco estudiadas como:

- a) el efecto de la combinación de contaminantes.
- b) la importancia de las capas de productos de corrosión.

Con este trabajo se pretende pues contribuir al mejor conocimiento de la corrosión atmosférica mediante ensayos en atmósferas controladas en el laboratorio, como paso previo y alternativo a los ensayos en condiciones naturales.

CAPITULO II.**GENERALIDADES SOBRE LA CORROSION
ATMOSFERICA**

II.1 La Atmósfera.

Los metales están expuestos con más frecuencia a la atmósfera que a cualquiera de los otros medios corrosivos.

La corrosión atmosférica es uno de los problemas más antiguos de corrosión conocidos por la humanidad. Sin embargo, todavía no está completamente entendida. La principal razón de esta paradoja yace en la complejidad de las variables que determinan la cinética de las reacciones de corrosión; así, la velocidad de corrosión varía del medio y lugar a lugar, de hora en hora y de estación en estación.

II.2 Clasificación de la Corrosión Atmosférica.

La corrosión atmosférica puede ser convenientemente clasificada - como sigue:

- a) Oxidación seca.
- b) Corrosión húmeda.
- c) Corrosión por mojado.

II.2.1 Oxidación Seca.

Esta se lleva a cabo en la atmósfera con todos los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa. Aquí el vapor de agua atmosférico está virtualmente ausente. En ausencia de contaminantes atmosféricos, todos los metales comunes desarrollan películas de óxido que son invisibles a temperatura ambiente, aunque puede ser notables a temperatura elevada. El oro no se oxida y sus propiedades son útiles en el recubrimiento de componentes electrónicos donde las capas delgadas de productos de corrosión no pueden ser toleradas. Para metales que forman óxidos no porosos, las películas rápidamente alcanzan un espesor límite, ya que la difusión de ión en la red de óxido es extremadamente lento a temperatura ambiente. El deslustre del cobre y la plata en aire seco con

teniendo trazas de sulfuro de hidrógeno, Tabla I, es un ejemplo de películas que crecen por difusión del ión a través de la red del óxido a temperatura ambiente.

II.2.2 Corrosión Húmeda.

Requiere de la humedad atmosférica, llegando a ser más seria cuando la humedad excede a un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%.

Se favorece por la presencia de sustancias ácidas volátiles en el aire y, particularmente, en el caso del hierro y del acero, por la presencia de ciertas partículas sólidas dispersas. La corrosión es más agresiva en aquellos casos donde una sustancia higroscópica está presente sobre la superficie del metal; ésta es algunas veces un producto de corrosión.

II.2.3 Corrosión por Mojado.

Para que tenga lugar este tipo de corrosión se necesita la exposición del metal a la lluvia u otras fuentes de agua (rocío, neblina, nieve, etc). En estas condiciones el mecanismo de ataque llega a ser casi igual a aquel desarrollado bajo condiciones de inmersión. Los productos de corrosión pueden ser solubles e insolubles.

Si son insolubles generalmente reducen la velocidad de corrosión por aislamiento del metal del medio corrosivo. Los productos de corrosión solubles incrementan la velocidad de corrosión de dos formas. Principalmente incrementan la conductividad del electrolito y así disminuye la resistencia interna de la celda de corrosión; en segundo lugar, éstos actúan higroscópicamente y retienen más humedad en contacto con la superficie metálica.

Tabla I.
CONCENTRACION TIPICA DE IMPUREZAS EN LA ATMOSFERA.

IMPUREZAS	CONCENTRACION	(mg/m ³)	
DIOXIDO DE AZUFRE (SO ₂)	REGION INDUSTRIAL	INVIERNO	350
		VERANO	100
	REGION RURAL	INVIERNO	100
		VERANO	40
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO ₃)	APROXIMADAMENTE 1% DEL CONTENIDO DE DIOXIDO DE AZUFRE.		
SULFURO DE HIDROGENO (H ₂ S)	REGION INDUSTRIAL	1.5 - 90	VALORES MEDIDOS EN PRIMAVERA.
	REGION URBANA	0.5 - 1.7	
	REGION RURAL.	0.15- 04	
AMONIACO (NH ₃)	REGION INDUSTRIAL	4.8	
	REGION RURAL	2.1	
CLORUROS (MUESTREADOS EN LLUVIA)	REGION INDUSTRIAL	INVIERNO	7.9
		VERANO	5.3
	COSTA RURAL.	PROMEDIO A NIVEL.	5.4
PARTICULAS DE HUMO	REGION INDUSTRIAL	INVIERNO	250
		VERANO	100
	REGION RURAL	INVIERNO	60
		VERANO	15

II.3 Composición de la Atmósfera.

La composición dada en la Tabla II, es global y, para la mayoría de los componentes es razonablemente constante para todas las localidades, pero el contenido de vapor de agua varía de acuerdo a la región climática, estación del año, etc. Sin embargo, solamente el oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua son considerados en la corrosión atmosférica.

El vapor de agua es esencial en la formación de un electrolito que interviene en las reacciones de corrosión electroquímica y su concentración en la atmósfera se expresa generalmente en términos de humedad relativa (H.R.).

Esta se define como al relación entre la presión de vapor de agua en la atmósfera, comparada con aquella que saturaría la atmósfera a la misma temperatura. Alternativamente, la diferencia de temperatura entre la ambiental y aquella a la cual tendría que enfriarse la atmósfera antes de que condensara la humedad de ellas, se utiliza también como una medida del contenido de humedad; esta diferencia de temperatura es llamada la depresión del punto de rocío.

La temperatura a la cual tiene lugar la condensación se conoce como el punto de rocío. La humedad relativa se expresa como:

$$\% \text{ H.R.} = \frac{\text{Presión de vapor saturado de H}_2\text{O en el punto de rocío}}{\text{Presión de vapor saturado de H}_2\text{O a temperatura ambiente.}}$$

El oxígeno atmosférico disuelto en el electrolito provoca la reacción catódica en los procesos de corrosión. Ya que el electrolito está en la forma de película delgada o gotas, la difusión del oxígeno en la interfase atmósfera-electrolito hacia la interfase solución-metal es rápida. El oxígeno puede también oxidar productos de corrosión soluble a unos menos solubles que forman barreras protectoras o pasivadoras, por ejemplo, la oxidación de especies ferrosas a férricas menos solubles, en la oxidación del hierro y el acero.

Tabla II.
 COMPOSICION APROXIMADA DE LA ATMOSFERA A 10°C y 100 Kg/m²
 (EXCLUYENDO IMPUREZAS)

CONSTITUYENTES	gm/m ³	PESO (%)
AIRE	1172	100
NITROGENO	879	75
OXIGENO	269	23
ARGON	15	1.26
VAPOR DE AGUA	8	0.26
DIOXIDO DE CARBONO	0.5	0.04
CONSTITUYENTES	mgr/m ³	p.p.m
NEON	14	12
CRIPTON	4	3
HELIO	0.8	0.7
XENON	0.5	0.4
HIDROGENO	0.05	0.04

II.4 Contaminantes Atmosféricos.

Intentar una subdivisión de la composición de la atmósfera en función de los contaminantes presentes es arbitraria, ya que algunos de los llamados contaminantes provienen principalmente de fuentes naturales. Sin embargo, su concentración varía apreciablemente de acuerdo al lugar geográfico. Alguno de estos contaminantes y su composición aproximada referida a 10°C, se presentan en la Tabla II. En la Tabla I, se presentan aquellos contaminantes que son importantes desde el punto de vista de que provocan corrosión excluyendo los contaminantes que puedan encontrarse en lugares muy específicos, por ejemplo, en la cercanía de plantas químicas. Las concentraciones proporcionadas son solamente un parámetro para indicar los niveles generales en la clasificación usual y no definen un caso particular.

II.4.1 Óxidos de Azufre.

Uno de los contaminantes más frecuentemente encontrados en la atmósfera es el SO_2 , fuertemente estimulador de la corrosión atmosférica y particularmente para el acero y el Cinc.

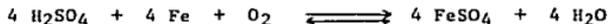
La correlación entre los niveles de contaminación de SO_2 y la velocidad de corrosión es alta. Sin embargo, en medios marinos y notablemente en el caso de Cinc, la contaminación por iones cloruros tiene un mejor coeficiente de correlación que con el contenido de SO_2 .

El SO_2 de la atmósfera proviene de dos fuentes principalmente: de la oxidación en el aire del H_2S producido por la industria química y de la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre. En países industriales, la segunda fuente predomina, pero en escala total, la mitad de la contaminación por derivados gaseosos del azufre es ocasionada por la actividad humana. El dióxido de azufre juega un papel importante en la corrosión de metales en la atmósfera de países industrializados. Para todos los metales, el SO_2 es absorbido de la atmósfera (en el caso del aluminio me-

nos que para otros metales). Para la oxidación del acero, la absorción es cuantitativa en condiciones de aire seco a 0°C. Bajo condiciones de humedad se forma ácido sulfúrico (H₂SO₄), por oxidación del SO₂ y SO₃, siendo la reacción anterior catalizada por metales y óxidos metálicos.

Para algunos metales no ferrosos (cobre, níquel, plomo), el ataque con ácido sulfúrico es directo con la formación de sulfatos. El sulfato de plomo es casi insoluble o apenas soluble y da buena protección; los sulfatos de cobre y níquel son solubles pero son gradualmente convertidos en sulfatos básicos insolubles, por ejemplo (Cu(OH)₂3CuSO₄), después de un período de corrosión activa. Los sulfatos de Zinc y Cadmio se forman en invierno en una atmósfera contaminada, mientras que en las atmósferas puras del verano los productos de corrosión implican considerables cantidades de óxidos y carbonatos básicos. Así para metales no ferrosos, el SO₂ es consumido en las reacciones de corrosión, mientras que en la oxidación del hierro y acero los sulfatos ferrosos son hidrolizados formando óxidos y generando el ácido sulfúrico.

Las reacciones que tienen lugar son las siguientes;



Aquí el SO₂ puede actuar como despolarizador del proceso catódico.

II.4.2 Sulfuro de Hidrógeno.

Este es producido por la putrefacción de compuestos orgánicos de azufre o por la acción de bacterias sulfato reductoras en condiciones anaeróbicas. Es el responsable del deslustre del cobre y plata y otros metales no ferrosos en concentraciones atmosféricas normales.

II.4.3 Compuestos Nitrogenados.

Los compuestos nitrogenados provienen de dos fuentes: naturales y artificiales. El amoníaco que se encuentra íntimamente relacionado con compuestos nitrogenados, se forma durante las tormentas eléctricas y provoca un incremento de los productos de corrosión: la presencia de iones amoníaco en el agua de lluvia es atribuido al uso de fertilizantes. Los derivados del amoníaco en solución incrementan la humedad en la superficie de los metales.

II.4.4 Partículas Salinas.

Existen dos tipos principales de partículas salinas: la primera es el sulfato de amonio presente en las áreas industrializadas donde existen concentraciones apreciables de amoníaco y trióxido de azufre (SO_3) o H_2SO_4 que coexisten en aerosol, e inciden fuertemente en el inicio de los procesos de corrosión por su naturaleza higroscópica y acidificadora, la segunda son las sales marinas, principalmente cloruro de sodio, pero con cantidades apreciables de iones de potasio, magnesio, calcio, etc. Las cuales han sido detectadas en el agua de lluvia. Los cloruros pueden producirse también en las áreas industriales, son higroscópicos y altamente agresivos para algunos metales, especialmente los pasivables, por ejemplo el acero inoxidable.

II.4.5 Otras partículas llevadas por el aire.

- a) Partículas inertes no absorbentes, generalmente silicio, que tiene efectos de corrosión solamente por procesos de aereación diferencial en el punto de contacto.
- b) Partículas absorbentes, tales como carbón de leña el hollín que son intrínsecamente inertes, pero por su gran superficie específica pueden absorber SO_2 , por coadsorción de vapor de agua o condensación de agua en la estructura, catalizan la formación de un electrolito ácido corrosivo.

II.5 Formación de la Solución de Electrolito.

II.5.1 Humectación de la superficie de un metal.

El tiempo de humectación de la superficie de un metal es una composición de variables complejas, pero es el factor más importante, ya que determina la duración del proceso de corrosión electroquímico. En primer lugar, hay que considerar todos los medios por los cuales puede formarse un electrolito en contacto con la superficie metálica. En segundo lugar, deben tenerse en cuenta las condiciones bajo las cuales ésta solución es estable con respecto al ambiente atmosférico y finalmente la velocidad de evaporación de la solución cuando los cambios en las condiciones atmosféricas hacen que su existencia sea inestable. Se ha encontrado que la humectación es la causa principal para que un metal se corroa; entonces, dependiendo de que un material se encuentre o no mojado va a sufrir corrosión o no, y de aquí la importancia de medir el tiempo de humectación de los materiales a la intemperie. Debido a esto, el trabajo de un gran número de investigadores se ha orientado a diseñar sensores electroquímicos como un método alternativo a los ensayos gravimétricos clásicos de estudio de la corrosión atmosférica.

La humectación de materiales a la intemperie es causada en parte por la condensación del agua de la atmósfera, proceso que se llama rocío. La lluvia es también origen de la humectación, así como la nieve y la niebla. Aunque la humedad relativa es un parámetro importante en la condensación del vapor de agua del aire en la superficie metálica, es importante destacar que la humedad relativa por sí sola no promueve la condensación. Es necesario que exista un intercambio de calor entre la superficie expuesta a la intemperie y el medio atmosférico. Para demostrar esto, se puede hacer un experimento, en el cual se compara la alta humedad relativa sin flujo de calor, con humedad y flujo de calor.

II.5.2 Humedad relativa crítica.

El valor primario de la humedad relativa crítica denota aquella - humedad abajo de la cual un metal en cuestión no se corroe. Sin embargo, es importante saber si ésta se refiere a la superficie de un metal limpio o uno cubierto con un producto de corrosión. En este caso se puede encontrar una humedad crítica secundaria en la cual la velocidad de corrosión se incrementa considerablemente. Esto es atribuido a la naturaleza higróscopica de los compuestos de corrosión. En el caso del hierro y el acero - puede considerarse una humedad crítica terciaria. Así, para una humedad relativa del 60%, la oxidación comienza a una velocidad muy lenta (valor - primario); para humedades relativas del 75-80% hay un incremento en la velocidad de corrosión, atribuible a la condensación capilar en el óxido. Para una humedad relativa del 90% existe un fuerte incremento en la velocidad de oxidación correspondiendo a la presión de vapor de solución de - saturación de sulfato ferroso; el sulfato ferroso es identificado como - componente de la herrumbre en óxidos cristalinos. La humedad relativa crítica primaria para superficies metálicas sin productos de corrosión es semejante para todos los metales, pero el valor secundario varía ampliamente.

II.5.3 Precipitación de humedad.

Aparte de la humectación por la brisa del mar, la humedad es depositada sobre una superficie metálica por la acción de la formación de rocío. El último caso de formación de electrolito es aquel en el cual - existen un equilibrio con el aire en una humedad relativa abajo de 100%.

II.5.4 Condensación por capilaridad.

Esta sucede cuando la presión de vapor arriba de un menisco cóncavo de agua es menor que aquella en equilibrio con la superficie de - agua plana.

Es por tanto posible condensar humedad en capilares angostos en una atmósfera de menos de 100% de humedad relativa.

II.5.5 Condensación química.

Esta ocurre cuando los productos de corrosión solubles o contaminantes atmosféricos están presentes sobre la superficie del metal. Cuando la humedad excede la de equilibrio con una solución saturada de las especies solubles, una solución inicial saturada se forma hasta establecerse el equilibrio con la humedad ambiental. Los contaminantes ya han sido detallados anteriormente y los productos de corrosión como sulfatos, cloruros y carbonatos son de importancia para este contexto. Sin embargo existe en algunos casos una carencia del dato de confiabilidad sobre la presión de vapor ejercida por soluciones saturadas de probables productos de corrosión. En la práctica, sin embargo, los componentes solubles son frecuentemente contenidos en un producto insoluble y la formación del electrolito por ambas, capilar y condensación química, puede ocurrir en el mismo intervalo de humedad.

II.6 Naturaleza electroquímica de la corrosión atmosférica.

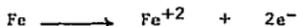
Investigadores rusos han (4,11) examinado extensamente en varios trabajos relacionados con la electroquímica de la corrosión atmosférica en películas delgadas de humedad, que se encuentran reportadas en los trabajos de Rosenfel'd, Tomashov, Klark y colaboradores (4,11, - 25,26).

Se ha encontrado que la velocidad de corrosión alcanza un máximo cuando la película de humedad tiene un espesor alrededor de 150μ m

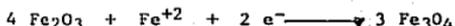
El proceso catódico en corrosión atmosférica es frecuentemente la reducción de oxígeno.



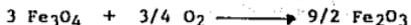
La reducción del protón puede también jugar un papel importante en un medio contaminado donde el pH del electrolito es bajo; sin embargo, se ha probado que la despolarización por oxígeno es mucho más eficiente en películas de humedad que en solución, por lo tanto la reducción del protón no es importante en la velocidad de corrosión. En la oxidación del hierro y el acero la reacción anódica es:



La cual es balanceada por la reducción catódica de óxido férrico hematita a magnetita en condiciones húmedas, cuando el acceso de oxígeno es limitado;



A medida que el óxido se seca y es penetrado por el oxígeno, la magnetita es reoxidada a óxido con una ganancia neta de $\frac{1}{4}$ de Fe_2O_3 .



II.7 Efecto de los productos de corrosión sobre la velocidad de corrosión.

El cambio en la velocidad de corrosión con el tiempo varía para los diferentes metales, debido a la diferencia en el grado de protección proporcionado por los productos de corrosión. El plomo, aluminio y el cobre se corroen inicialmente, pero forman una película completamente protectora. El níquel en atmósferas urbanas no forma una película protectora; la curva de corrosión vs tiempo es casi parabólica.

La velocidad de corrosión del cinc llega a ser lineal después de un período inicial de disminución de la velocidad de corrosión.

El comportamiento del acero depende mucho de los elementos aleantes presentes para un medio dado. Así, la disminución en la velocidad de corrosión con el tiempo para aceros de bajo carbono es mucho más lenta que para acero de baja aleación. Este puede ser atribuido a la naturaleza mucho más compacta del óxido formado sobre este tipo de acero.

En esta primera parte se ha analizado con detalle la corrosión atmosférica y su trascendencia. Recuerdese, que por corrosión atmosférica puede entenderse el ataque que los materiales metálicos sufren en su exposición al aire a temperatura ambiente.

A tales condiciones están sometidas aproximadamente el 80% de las estructuras metálicas y en oponerse a dicho ataque, se consume el 50% de los costos totales, dedicados a luchar contra la corrosión.

Los ensayos aquí descritos encajan en una investigación más amplia en que se pretende estudiar la posibilidad de aplicación de un método electroquímico rápido y cuantitativo de estudio de la corrosión atmosférica, en un esfuerzo por superar la desesperante lentitud de los ensayos de exposición natural sin pérdida de fiabilidad.

Dado que la fiabilidad de los métodos electroquímicos ha de garantizarse por medidas de la corrosión, se aplicaron los métodos gravimétricos clásicos a la determinación de la cinética de la corrosión atmosférica en condiciones bien definidas en el laboratorio, persiguiendo un conocimiento preciso de la dependencia de la velocidad de corrosión con la humedad, la naturaleza del metal y la concentración de los estimuladores más importantes de la corrosión en la atmósfera (SO_2 y cloruros), cuya proporción se seleccionó en función de las concentraciones de contaminación usuales en los ambientes naturales.

Se eligieron condiciones poco estudiadas aún o no estudiadas precedentemente como:

- a) El efecto de la combinación de contaminantes, y
- b) La importancia de las capas de los productos de corrosión sobre la cinética de ataque.

puntos que constituyen en la realidad una fijación de nuevas metas, pues apenas existen datos cuantitativos sobre ellos, de forma que el contraste del procedimiento electroquímico representa, al mismo tiempo, un avance, por la novedad de los resultados aportados.

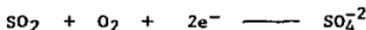
CAPITULO III.**DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Además del acero, el material estructural por excelencia, se sometieron a estudio los siguientes metales: Cinc (Zn), Aluminio (Al) y Cobre (Cu), de pureza comercial, metales todos ellos de amplio uso industrial, que a diferencia del acero, se suelen exponer desnudos a la atmósfera.

Se usaron probetas de 3x3x0.2 cm de cada metal, las cuales se expusieron en recipientes de vidrio (desecador), de fondo falso, a 18°C y con una humedad relativa de 80 y 100% y contaminaciones controladas de iones (SO_4^{2-} y Cl^-), o formando todas las combinaciones posibles. También se realizó a H.R. = 100% una serie de ensayos con adiciones sobre las superficies metálicas de agua suficiente para formar capas de electrolyto de 100 μ m de espesor, que simularán las condiciones de lluvia o rocío.

La humedad relativa en el interior de los recipientes se imponía con soluciones de ácido sulfúrico según norma ASTM E-104-5L y la contaminación se adicionaba directamente sobre la superficie metálica mediante soluciones de cloruro sódico o sulfatos de los metales correspondientes.

Los iones cloruros actúan así idénticamente que en la naturaleza y el SO_2 atmosférico se sustituye por el ión SO_4^{2-} , debido a que los productos de corrosión del Hierro (Fe), Cinc (Zn) y el Cobre (Cu), favorecen la rápida oxidación del anhídrido sulfuroso según la reacción:



de tal forma que el agente estimulador de la corrosión en atmósferas contaminadas es el ión sulfato y no el anhídrido sulfuroso.

Las atmósferas con diferentes grados de humedad relativa (H.R.), se prepararon de la siguiente forma y de acuerdo a la norma ASTM E-104-5L.

- a) 80% de humedad relativa (H.R.); solución de ácido sulfúrico 8.098 N y con una densidad de 1.30 g/cm³ (H_2SO_4)

- b) 100% de humedad relativa (H.R.); solución de ácido sulfúrico 0.053 N y con una densidad de 0.9971 gm/cm^3 (H_2SO_4).

La contaminación se añadía, como se ha señalado, en forma de soluciones de sulfato de hierro, sulfato de aluminio, sulfato de cinc y sulfato de cobre y cloruro sódico, con las siguientes concentraciones:

- a) El sulfato de hierro esta preparada al 10%, con una molaridad décimo molar, FeSO_4 10% (0.1M).
- b) El sulfato de cinc, aluminio, y el cobre se encuentran con las mismas indicaciones del inciso (a).

A los recipientes (desecadores), se le adaptaron rejillas de plástico como se muestra en las figuras No. 1 y NO. 2, y sobre ellas, se colocaron las diferentes probetas metálicas.

La contaminación se añadió dos veces por semana.

Antes de añadir los correspondientes contaminantes, las probetas se secaban y pesaban. De esta forma se logró un seguimiento de la evolución de la corrosión con el tiempo por el aumento de peso debido a la acumulación de productos de corrosión, durante los 30 días a que se extendieron los ensayos. Al término de este tiempo se evaluaba el ataque por la pérdida de peso, una vez decapadas las probetas metálicas de los correspondientes productos de corrosión.

En la figura No. 1 y 2, se presenta un esquema del dispositivo experimental utilizado, para obtener atmósferas con un grado de H.R. controlado. Consiste en un desecador en cuyo fondo se colocaba el electrolito y una rejilla de material plástico para sostener las probetas metálicas.

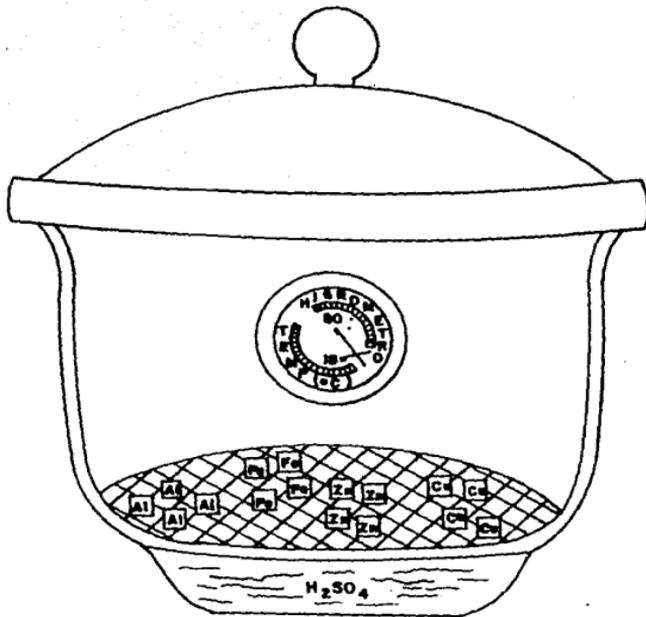


Fig. 1

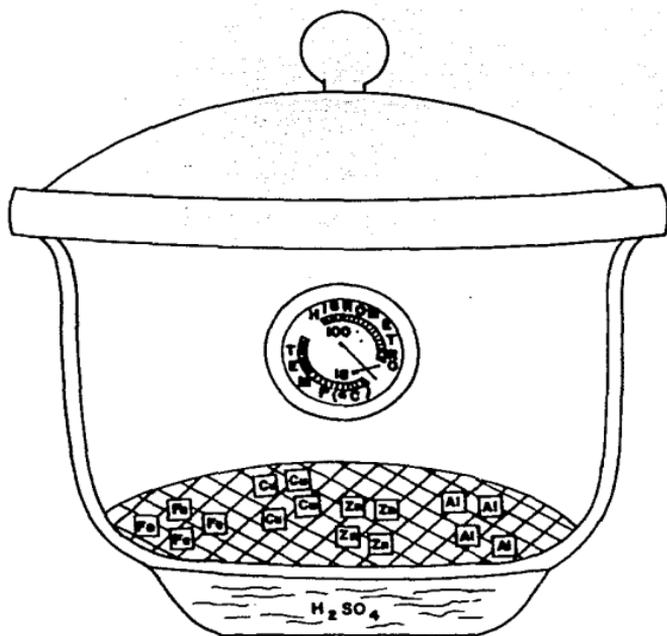


Fig. 11

'cerrado herméticamente'

Se utilizó un higrómetro para medir el valor de la humedad relativa obtenida.

En la Tabla No. III, obtenidas de la norma A.S.T.M. E-104-5L, se presentan las densidades del ácido sulfúrico para obtener determinadas - humedades relativas a diversas temperaturas. Con esta información se pue de graficar los valores de las densidades vs humedades relativas, con el propósito de obtener valores intermedios si así se requiere.

Tabla No. III.
 Humedad Relativa y Solución de Acido Sulfúrico.

Densidad 25°C, g/cm ³	% Humedad Relativa			
	0°C	25°C	50°C	75°C
0.9971	100.0	100.0	100.0	100.0
1.0300	98.4	98.5	98.5	98.6
1.0641	95.9	96.1	96.3	96.5
1.0997	92.4	92.6	93.4	93.8
1.1368	87.8	88.5	89.3	90.0
1.1755	81.7	82.9	84.0	85.0
1.2164	73.8	75.6	77.2	78.6
1.2567	64.6	66.8	68.9	70.8
1.2993	54.2	56.8	59.3	61.8
1.3439	44.0	46.8	49.5	52.0
1.4412	33.6	36.8	39.5	42.8
1.4944	23.5	26.8	30.0	33.0
1.5489	14.6	17.2	20.0	22.8
1.5903	7.8	9.8	12.0	14.2
1.6059	3.9	5.2	6.7	8.3
1.6644	1.6	2.3	3.2	4.4
1.7224	0.5	0.8	1.2	1.8

Como se puede observar a medida que aumenta la densidad de la solución del ácido sulfúrico disminuye la humedad relativa, influyendo relativamente la temperatura.

CAPITULO IV.**RESULTADOS EXPERIMENTALES**

IV.1 Efecto de los productos de corrosión.

En las figuras IV.1 a IV.8, se presentan las curvas de ganancia de peso en función del tiempo para las probetas metálicas ensayadas. Las gráficas deben de tomarse como indicativas de tendencias y no como reflejo de unos valores exactos.

Análisis de los productos de corrosión.

En las figuras IV-9 a IV-15 se presentan los difractogramas correspondientes a las muestras de Fe, Zn, Cu y Al sometidas a condiciones de HR constante de 80% y 100%, en ausencia de contaminación.

Como se puede observar en los correspondientes difractogramas, -- únicamente en el caso del Cu y el Zn se ha podido determinar la evidencia de la formación de los productos de corrosión.

Lo anterior es sorprendente pues por las curvas de ganancia de peso, se hace evidente la formación de productos de corrosión. El que no se hayan podido identificar por difracción de rayos-X (DRX), puede atribuirse únicamente al poco espesor de las películas formadas, lo cual haría que la técnica de DRX fuera poco sensible para detectar dichas películas formadas.

V.2 Efecto de la contaminación sobre los metales ensayados.

Acero.- En la figura IV-16, se comprueba que la mayor agresividad corresponde siempre a una atmósfera saturada de humedad. Es significativo señalar que la mezcla de contaminantes presenta menor agresividad que los contaminantes individuales, así como que la mayor velocidad de corrosión -- se obtiene en una atmósfera saturada de humedad y con cloruros.

Cinc.- En este caso y como lo señala la figura IV-17, la mayor -- agresividad se tendría en atmósfera con 80% de Humedad Relativa (H.R.), --

con una influencia no demasiado significativa de los contaminantes.

Aluminio.- A diferencia de los otros metales ensayados, la mezcla de contaminantes, casi independientemente de que la atmósfera esté saturada (100% H.R.), o no de humedad (80% HR) parece determinante. Por lo que respecta a los contaminantes, parece más decisiva la influencia del ión Cl^- que la del SO_4^{2-} , como se indica en la figura IV-18.

Cobre.- En la figura IV-19, se puede observar que las condiciones de mayor agresividad corresponde a atmósferas saturadas de humedad, independientemente del tipo de contaminante y de que se encuentren juntos.

V.3 Efecto de la combinación de contaminantes.

El efecto conjunto de los contaminantes se presenta en la Figura IV-20, lo primero que resulta es el ataque del Zn, que es aproximadamente 5 veces mayor que el del acero, y 100 veces más (veanse las unidades en las gráficas), que en el caso del Al y Cu.

Para el caso del Fe Figura IV-21 tanto en atmósferas con el 80% H.R., como saturadas de humedad, se pone de manifiesto una cierta aditividad de efectos de los contaminantes, que se manifiesta a sí mismo en el caso del aluminio, Figura IV-22, aunque con velocidades de corrosión mucho menores y ligeramente en el caso del cobre, Figura IV-23. En el del cinc, Figura IV-24, se presenta una tendencia contraria, lo cual resultaría beneficioso, dado que es el metal con mayor velocidad de corrosión.

mg
▲

150

100

50

0

- SIN CONTAM.
- CONTAM. CON A
- CONTAM. CON E
- CONTAM. CON A+E

80% de H. R.

$t = 18^{\circ}C$

Fe

30

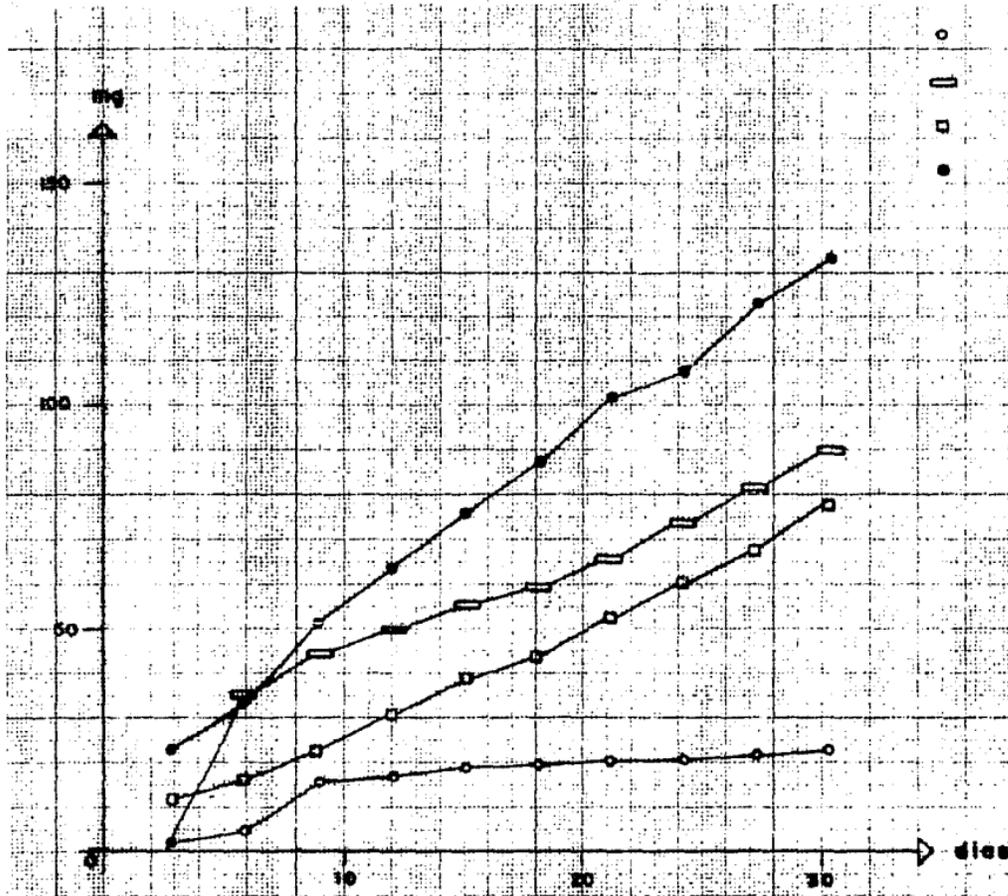
Fig. IV N° 1

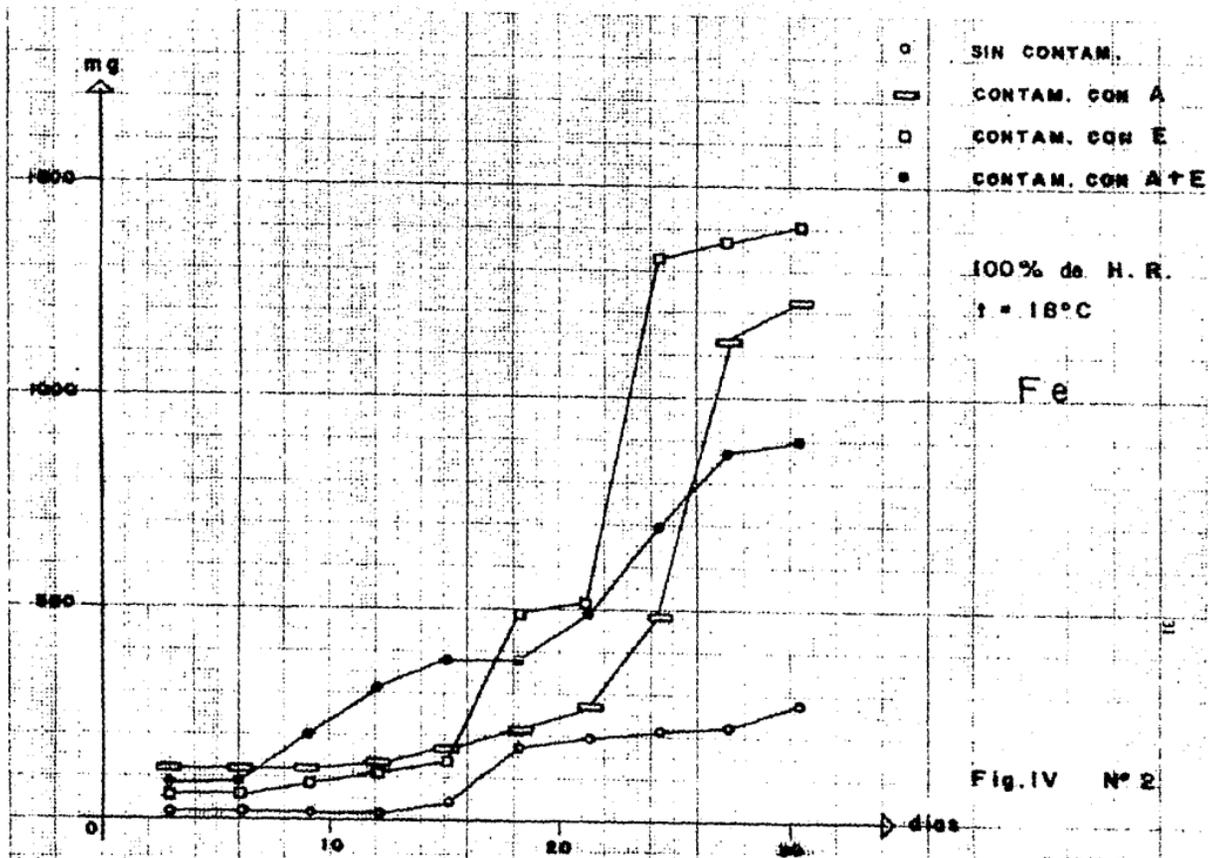
▲ dias

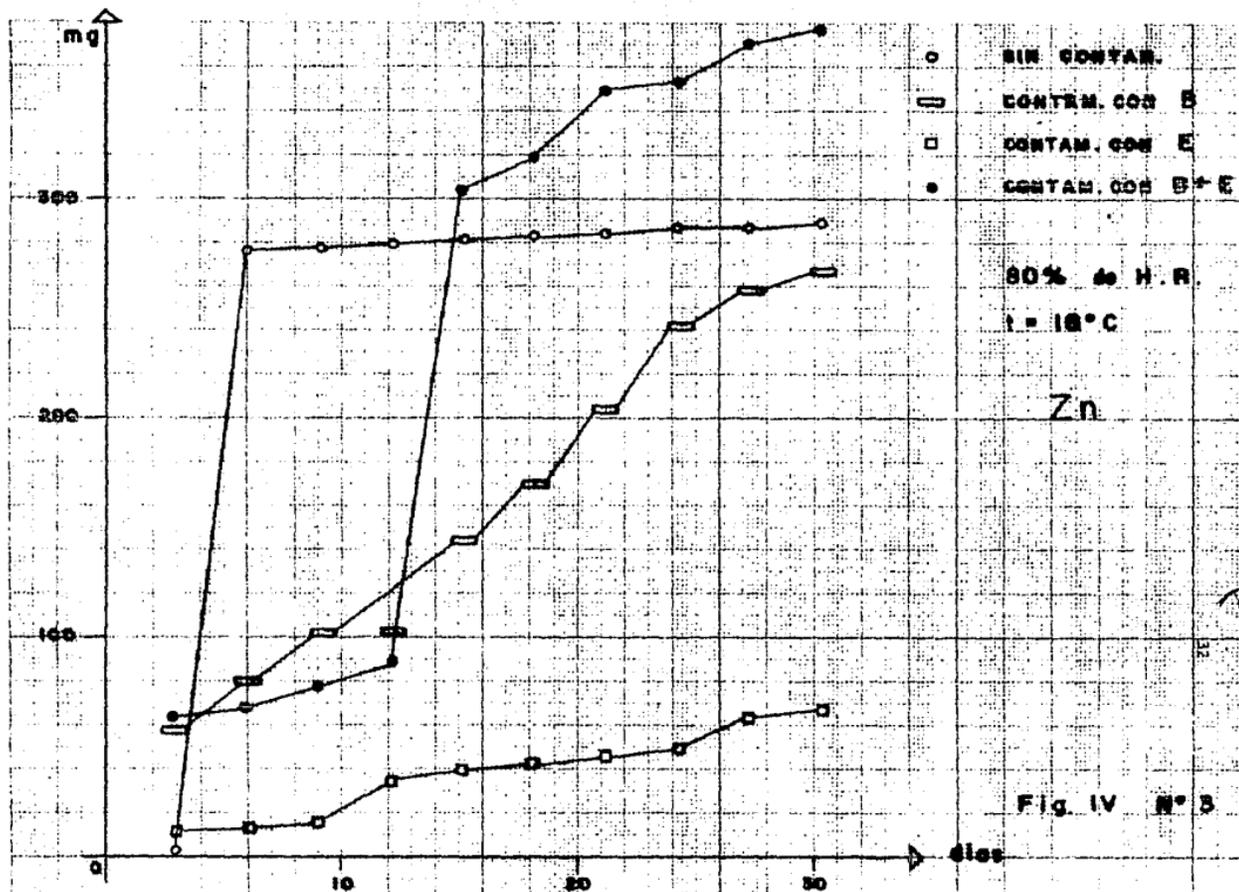
10

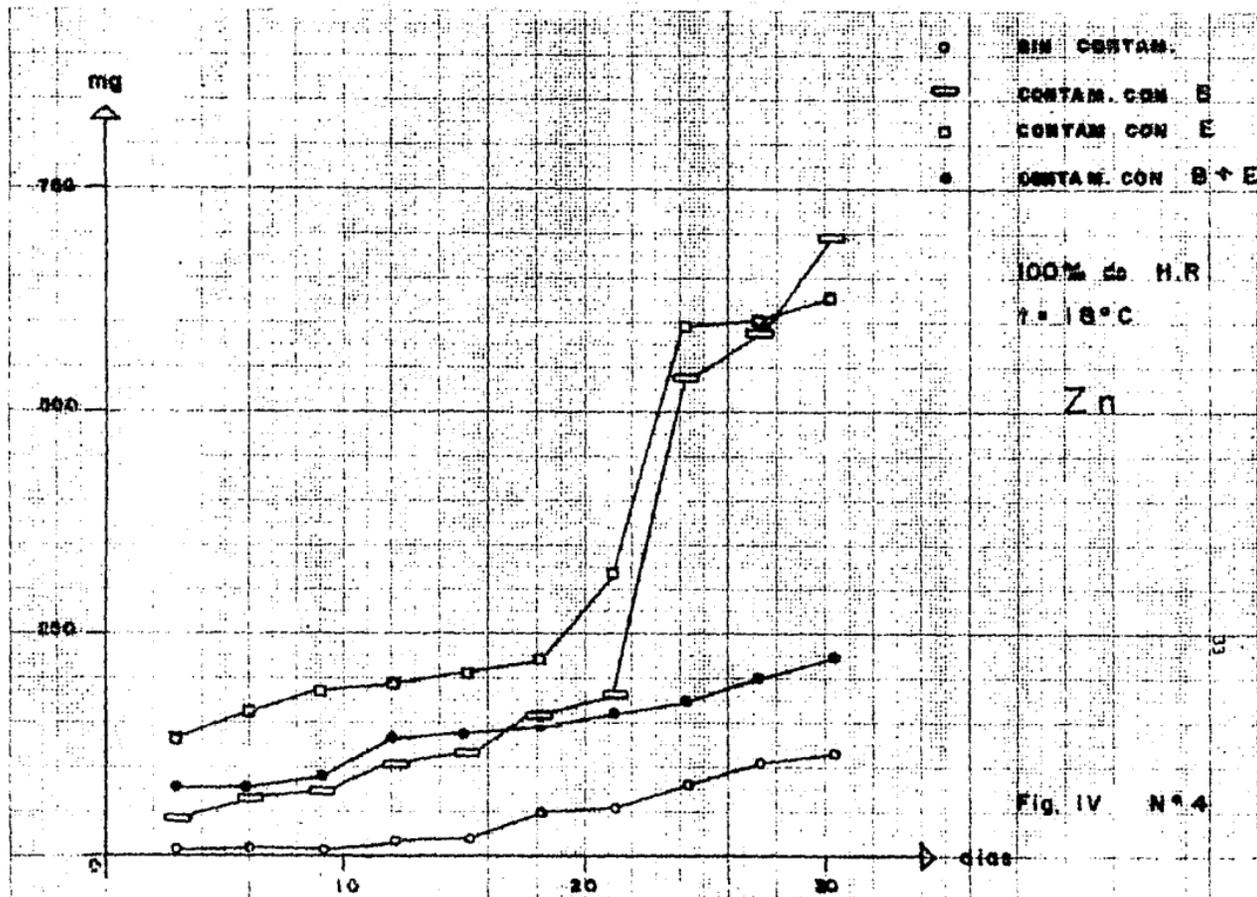
20

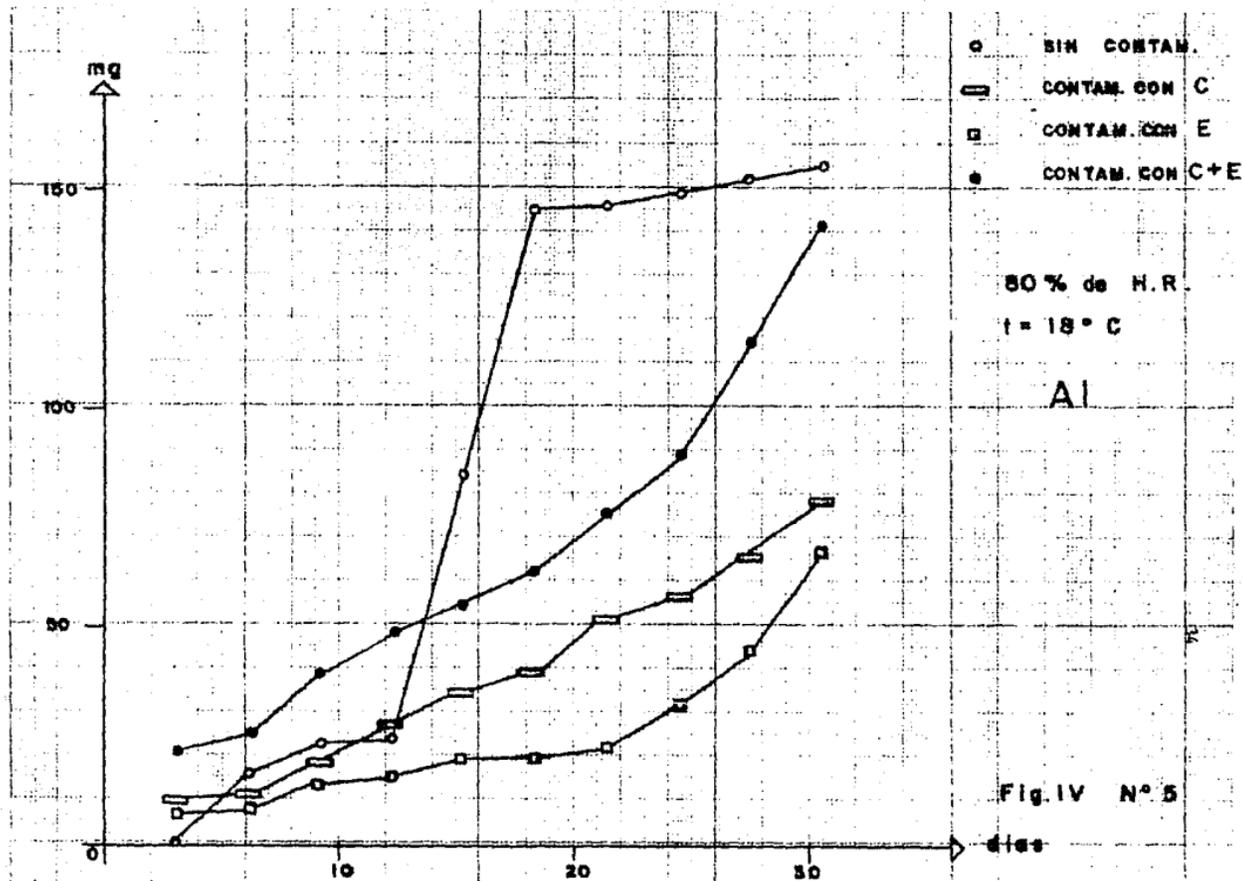
30











- SIN CONTAM.
- CONTAM. CON C
- CONTAM. CON E
- CONTAM. CON C + E

100% Δ H. R.

$\uparrow = 10^{\circ}\text{C}$

Al

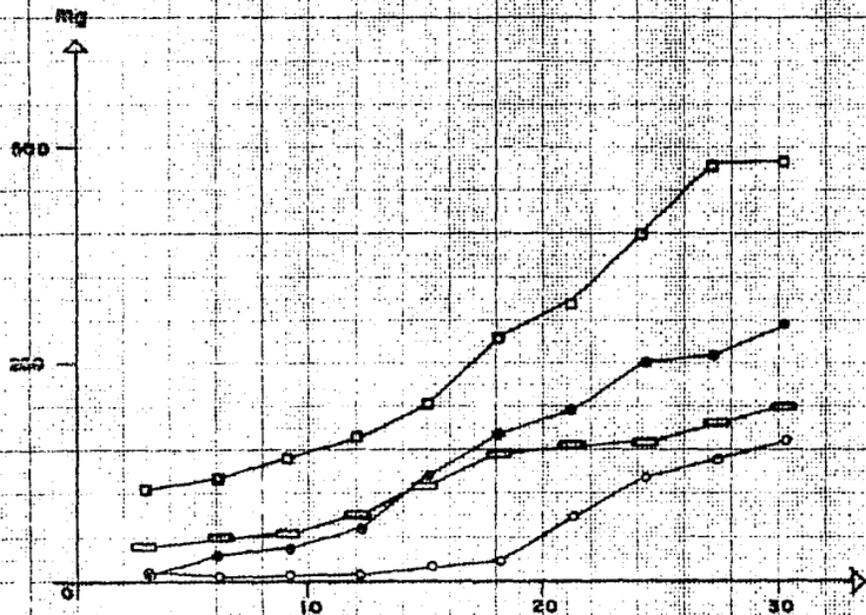


FIG. IV N° 5

- SIN CONTAM.
- CONTAM. CON D
- ◻ CONTAM. CON E
- CONTAM. CON D+E

80% de H.R.

t = 18° C

Cu

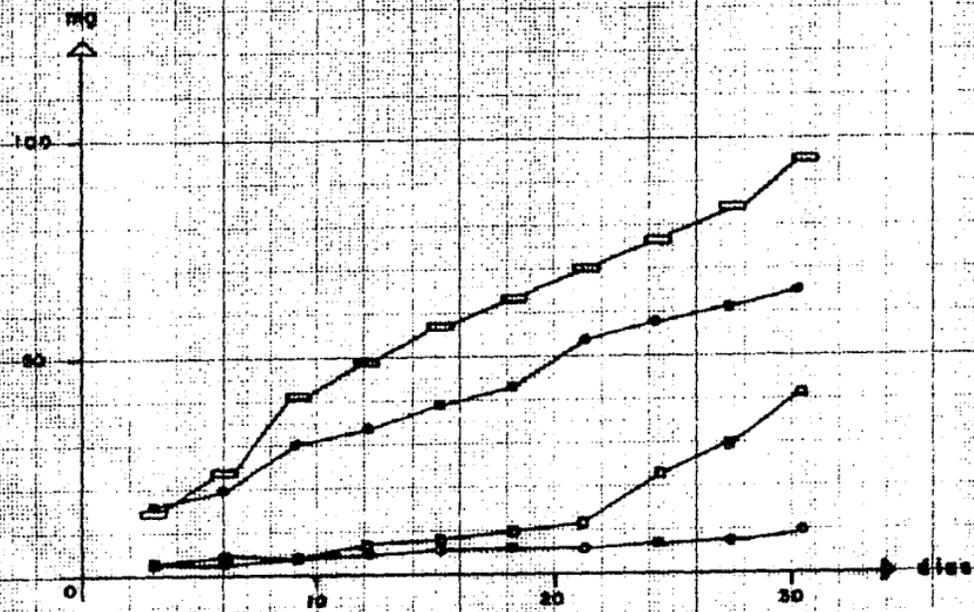
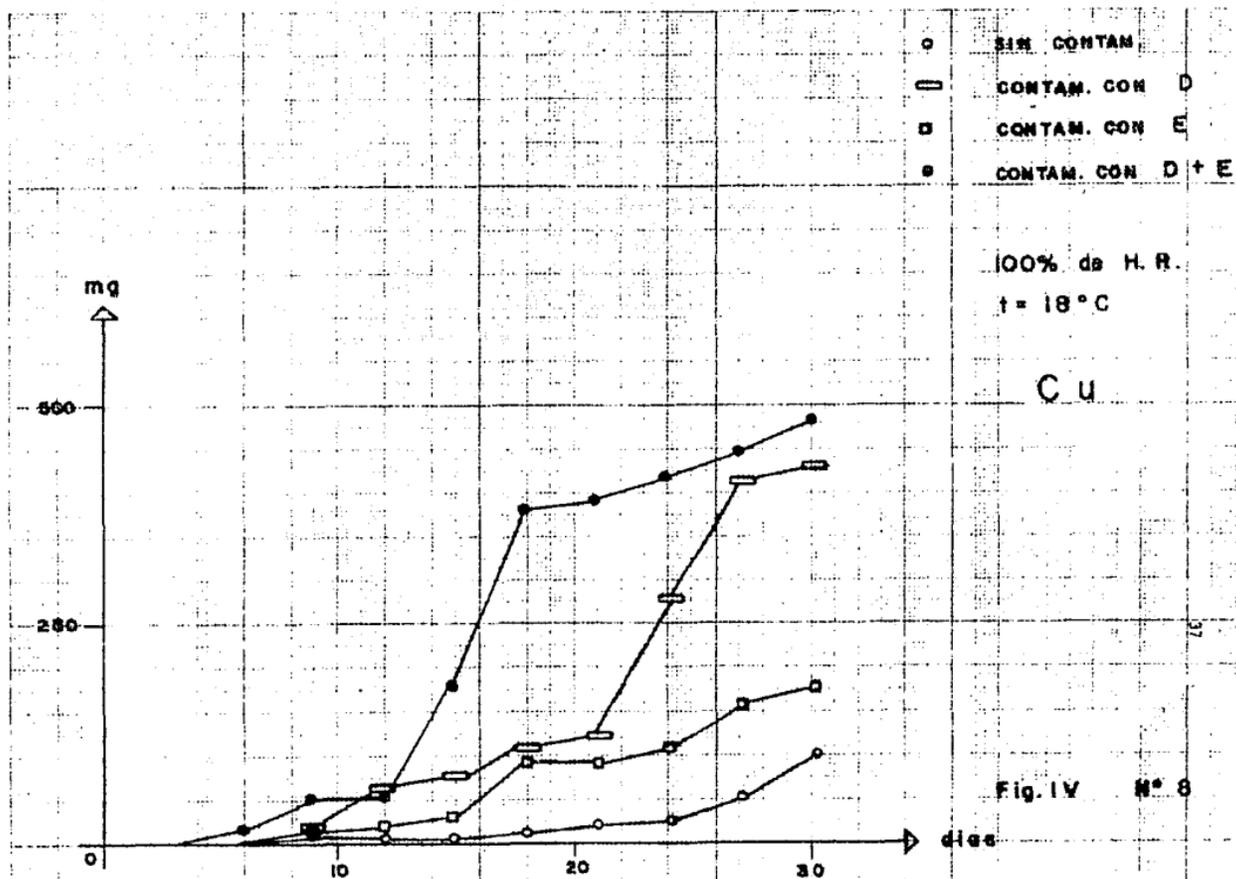
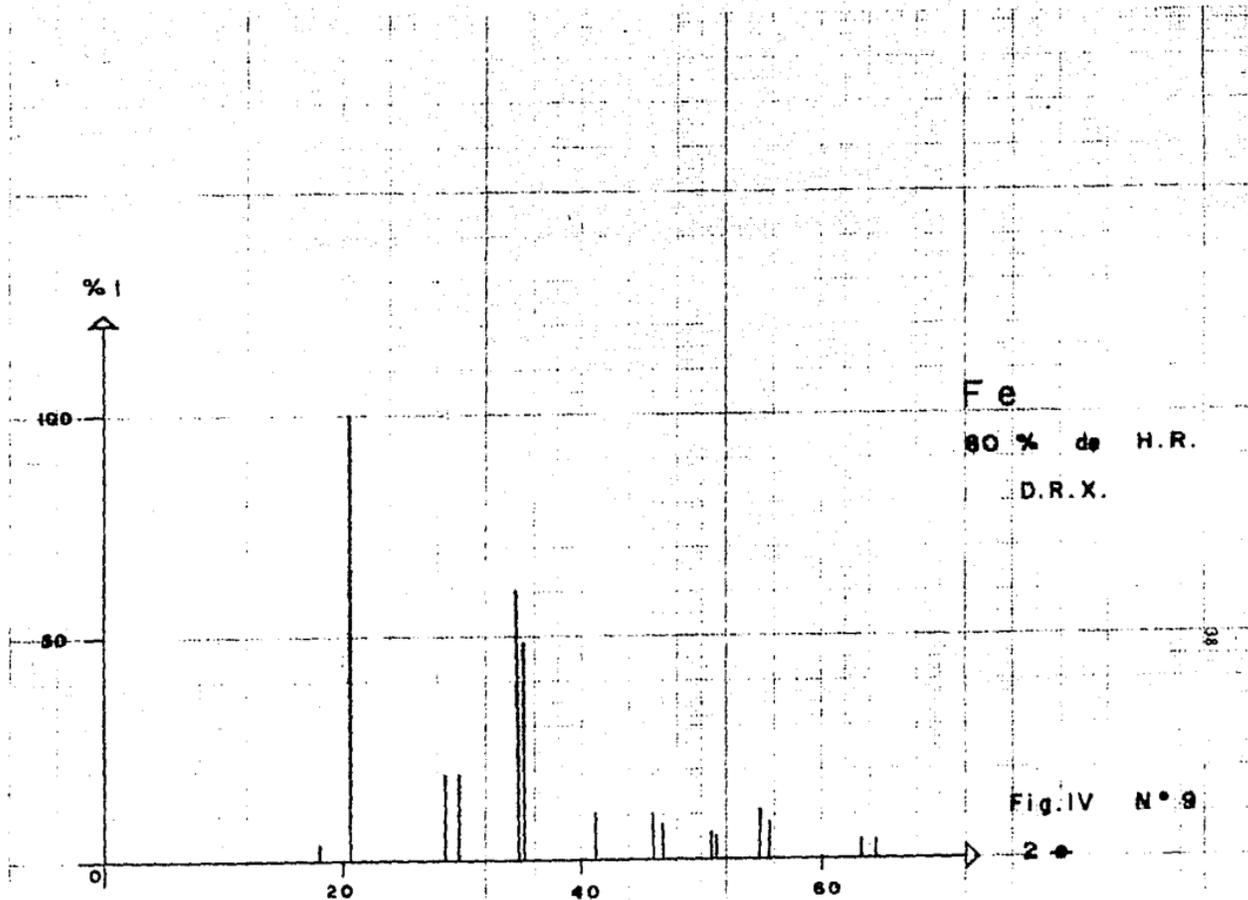
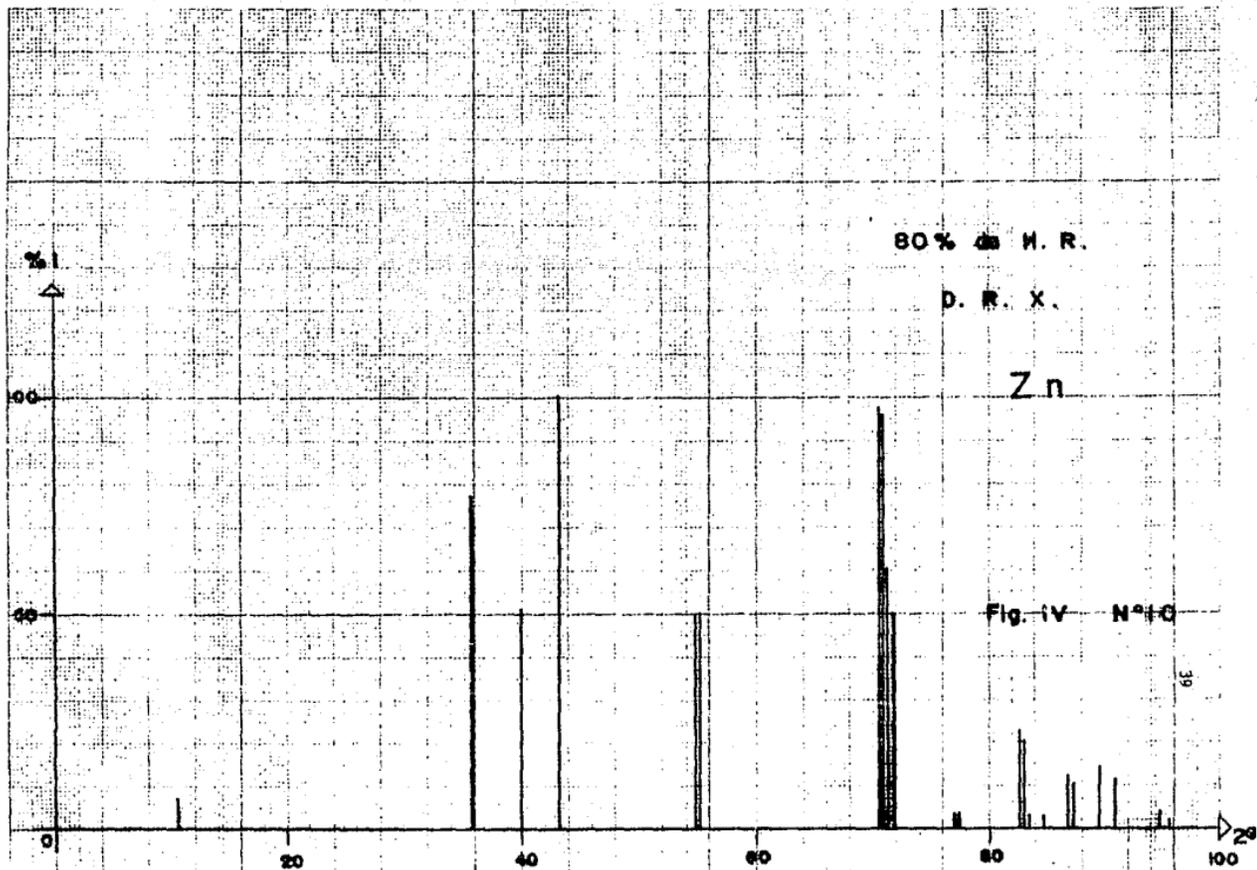


Fig. IV N° 7







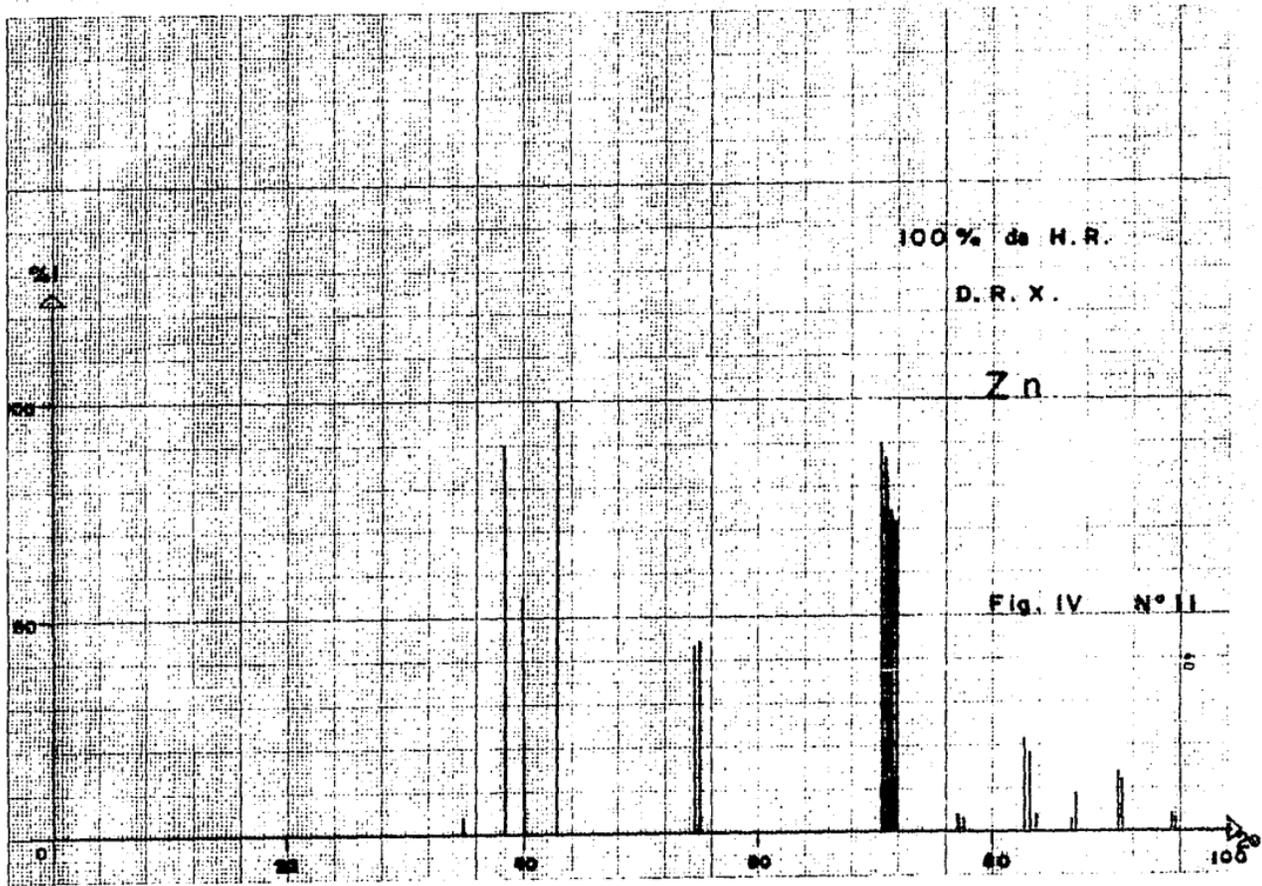


Fig IV N°12

%I

80% de H. R.

D. R. X.

Al

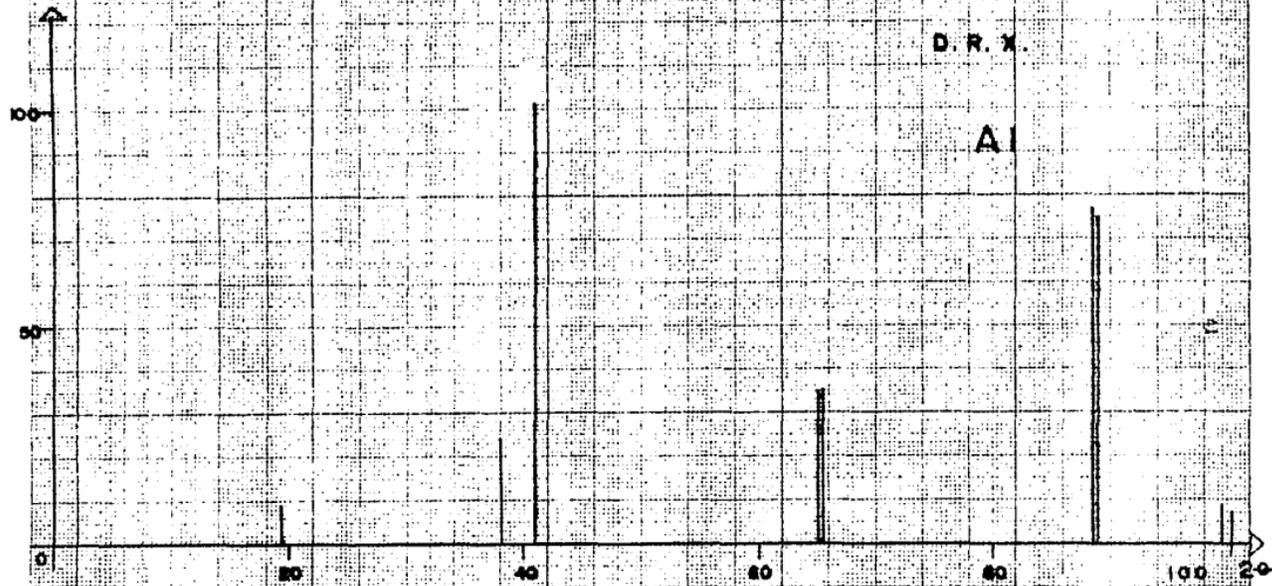


Fig. IV N° 13

100 % de H. R.

D. R. X.

Al

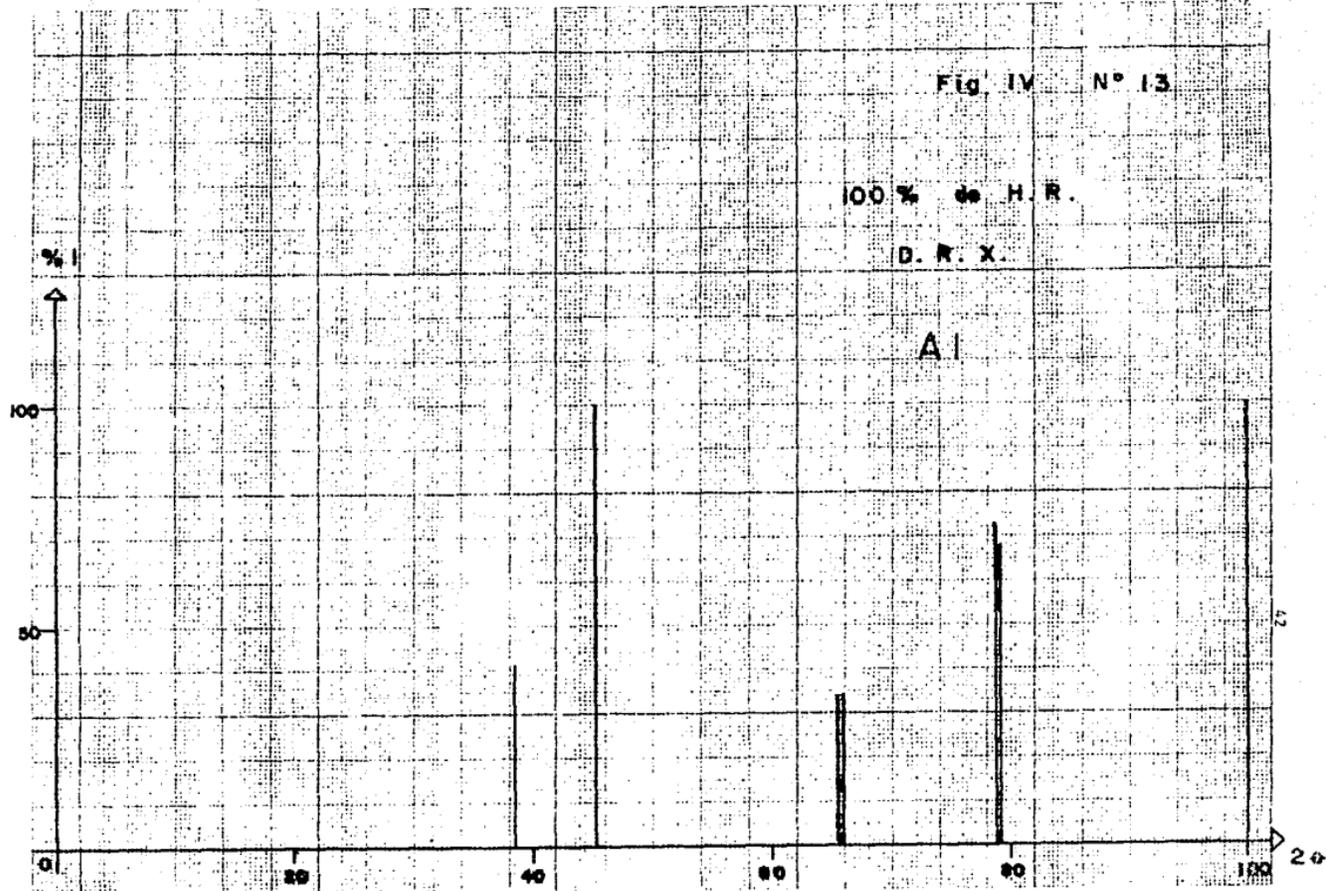


Fig. IV N° 14.

80% de H. R.

D. R. X.

Cu

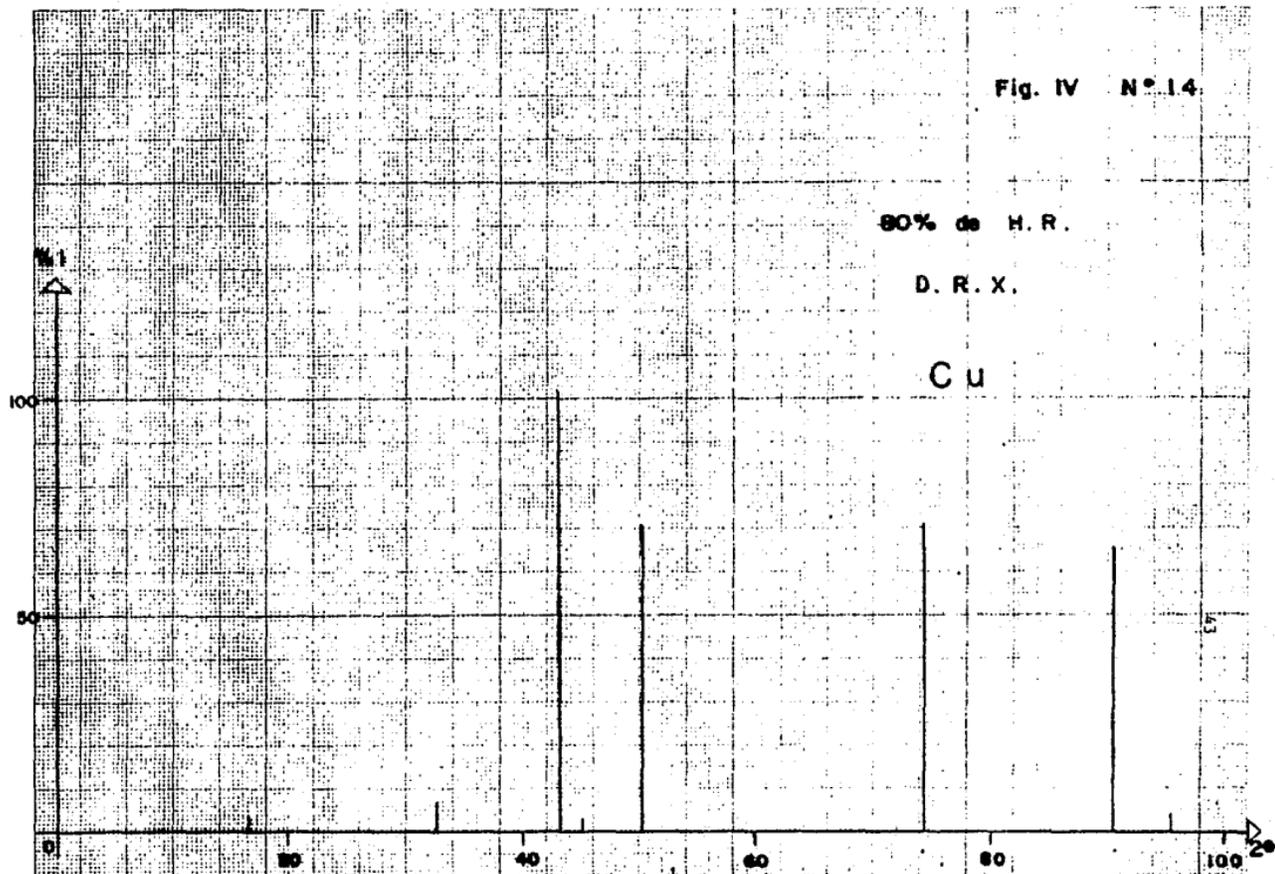
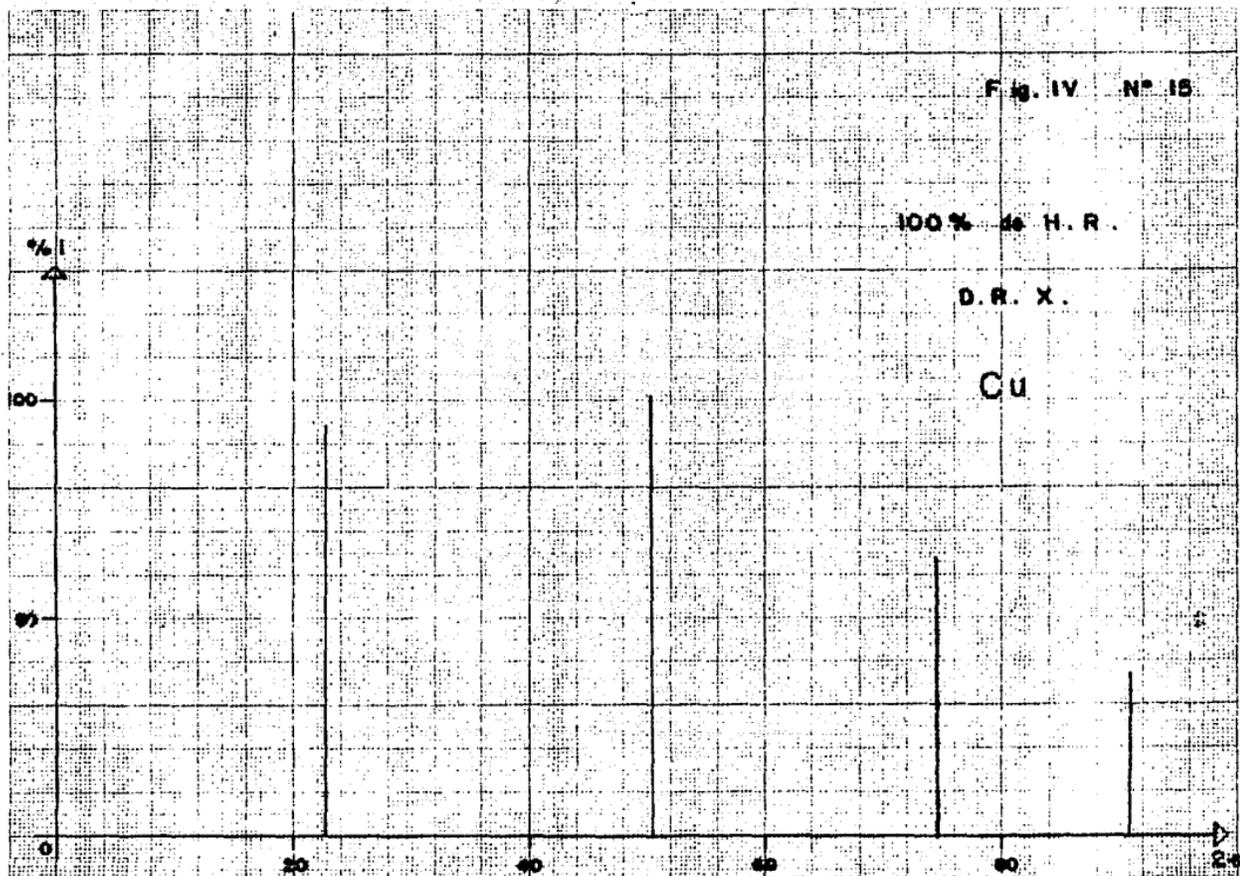


Fig. IV N° 15

100% de H. R.

D. R. X.

Cu



Fe. Influencia HR y contaminantes.

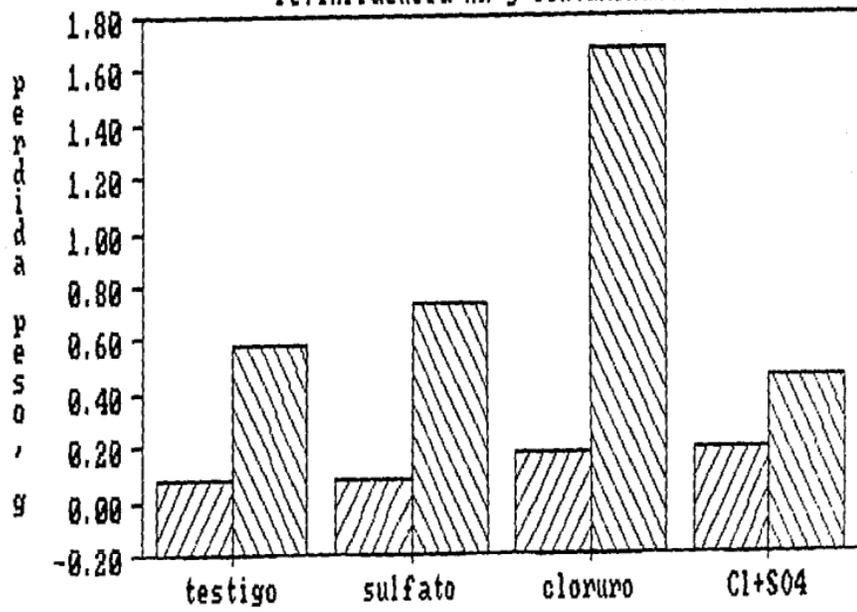


Fig. IV - 16

Zn. Influencia HR y contaminantes.

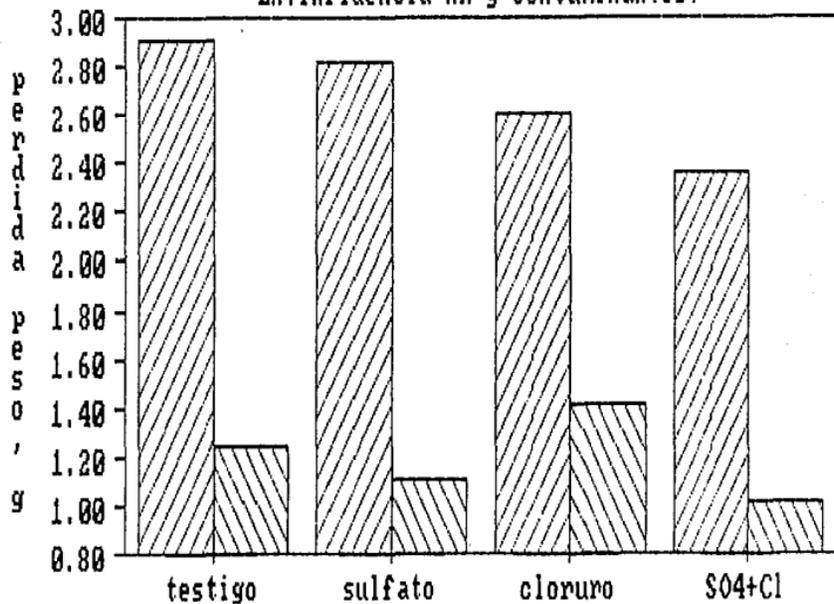


Fig. IV - 17

Al. Influencia HR y contaminantes.

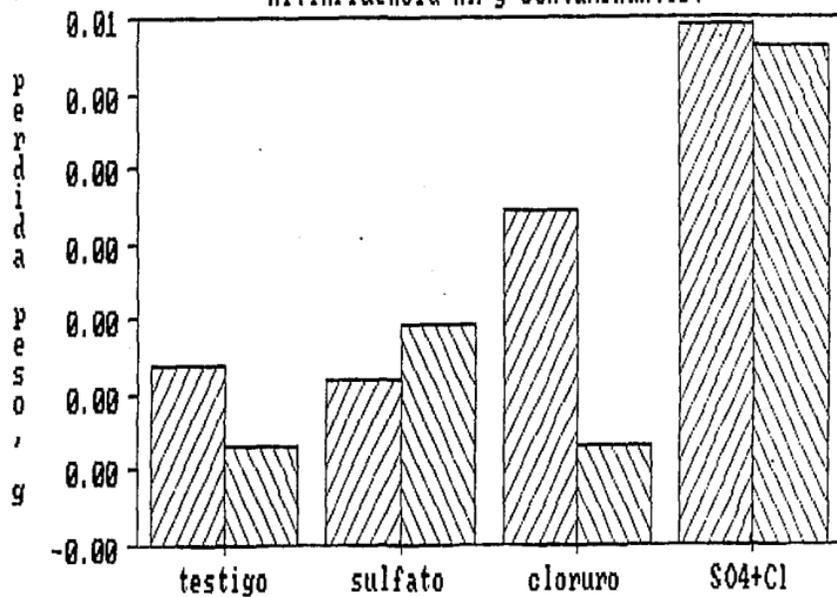


Fig. IV - 18

Cu. Influencia HR y contaminantes.

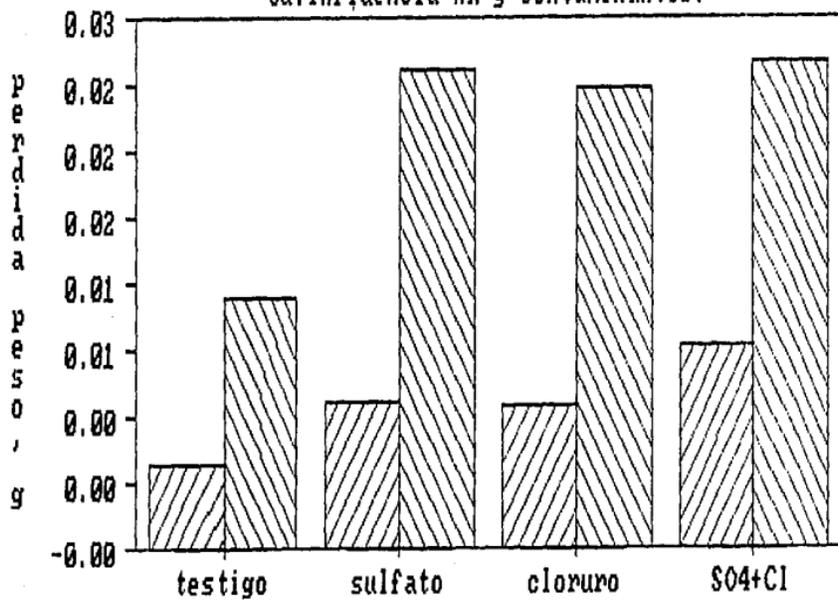


Fig. IV - 19

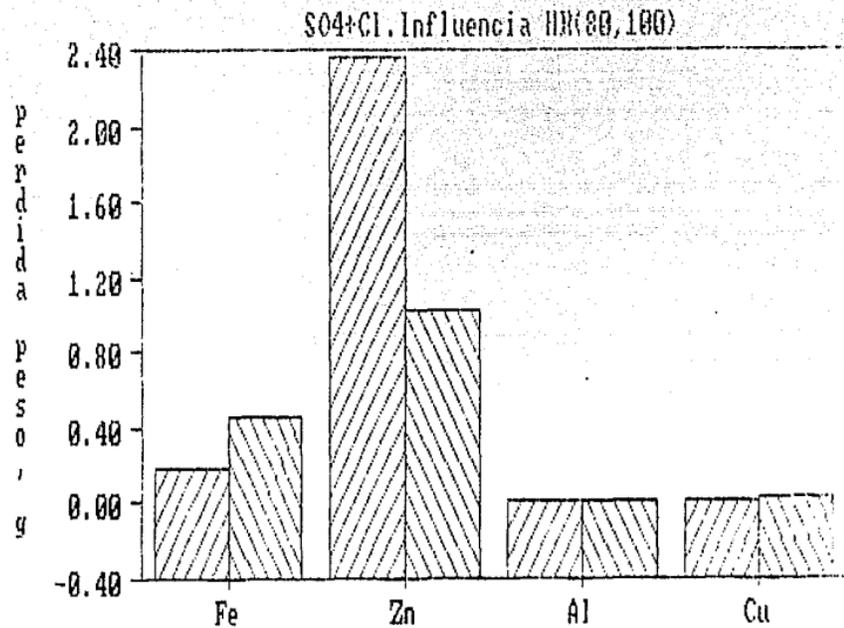


Fig. IV - 20

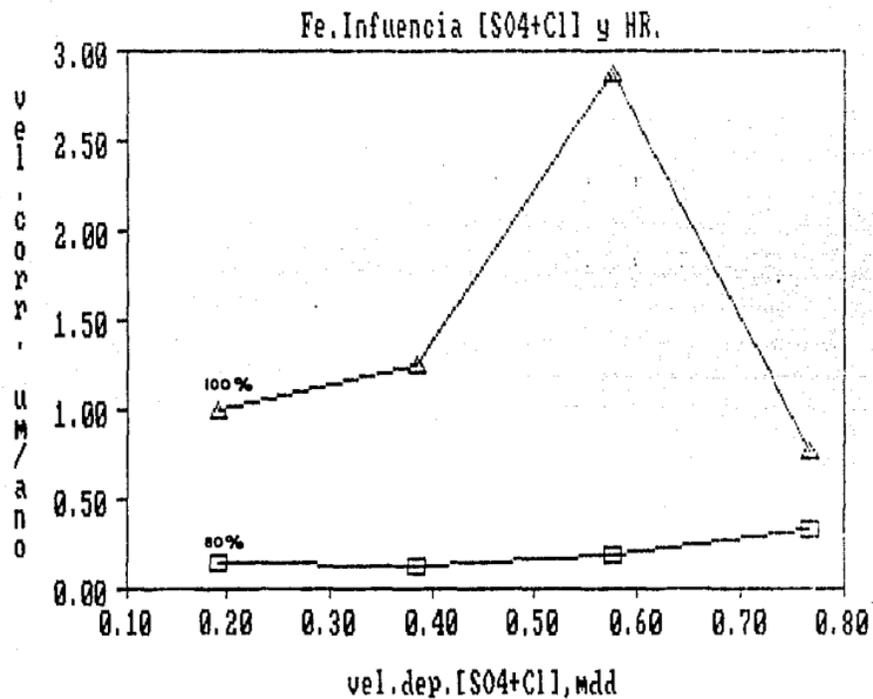


Fig. IV - 21

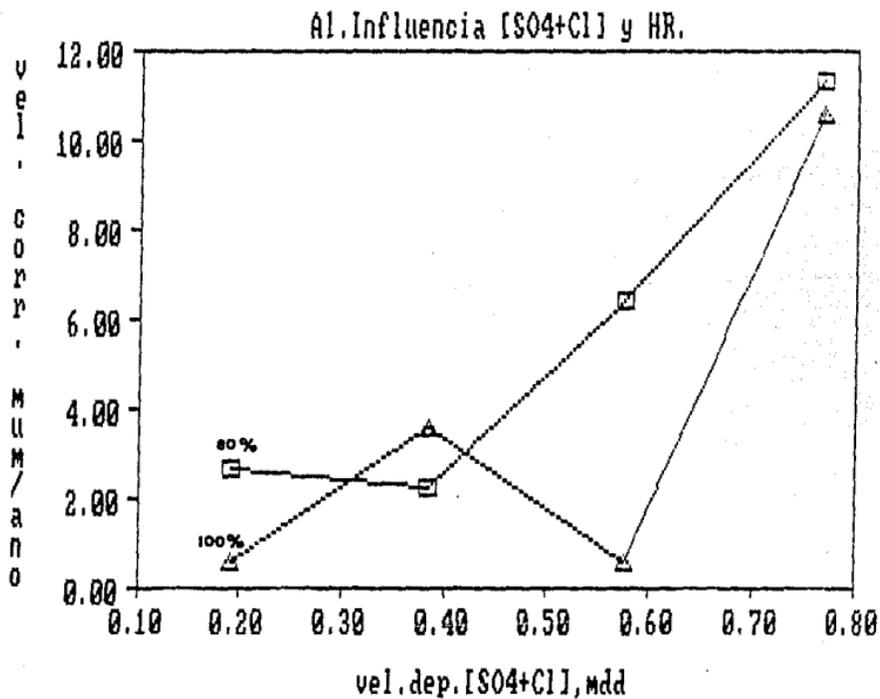


Fig. IV - 22

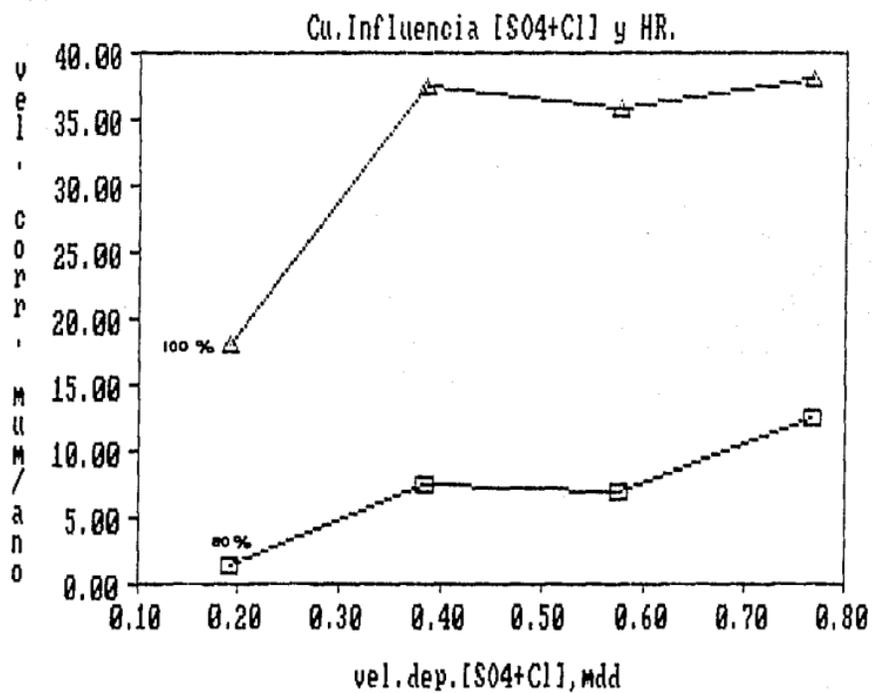


Fig. IV - 23

Zn. Influencia [SO4+Cl] y HR.

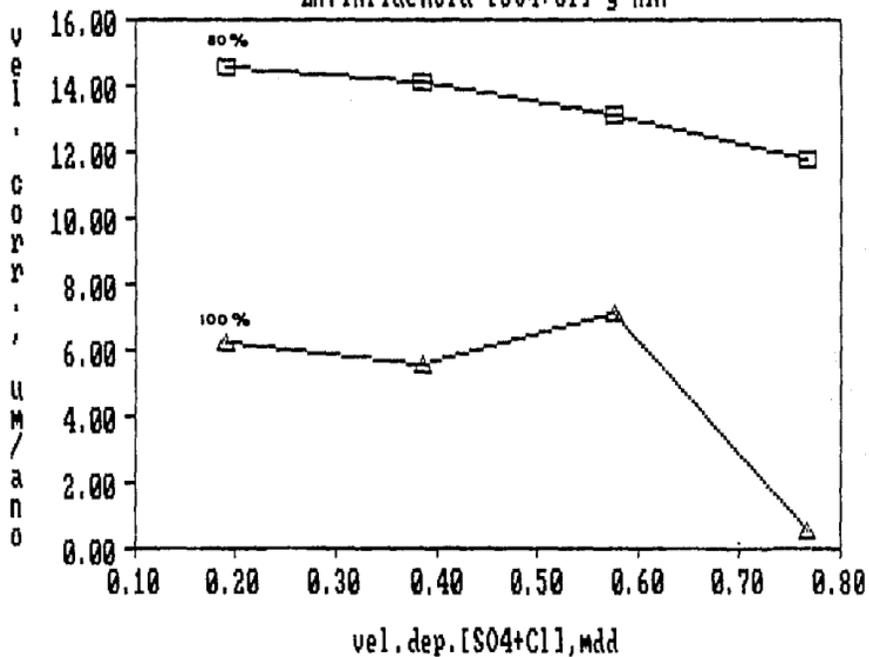


Fig. IV - 24

Nota:

Aclaración de la simbolización con relación de los contaminantes utilizados en el análisis del comportamiento en atmósferas controladas a partir de datos gravimétricos.

Concentración del contaminantes (0.1 M).

FeSO_4	-----	A.
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-----	B.
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	-----	C.
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-----	D.
NaCl	-----	E.

CAPITULO V.**DISCUSION DE RESULTADOS**

EFFECTO DE LOS PRODUCTOS DE CORROSION.

Reconocida la necesidad de la existencia de una capa depositada o adsorbida de humedad para que la corrosión se desencadene y dado que con superficies metálicas limpias no se pueden detectar dichas capas por pesada, se llevaron a cabo con probetas precorroidas los ensayos resumidos en las Figuras IV-1 a IV-8.

Aceptando una disposición uniforme de la humedad adsorbida sobre la superficie aparente (lo cual evidentemente no es real) se pueden obtener los aumentos de peso por corrosión. Esto se logró añadiendo a la probetas la contaminación un par de veces por semana y al tiempo de añadirla, se secaban y pesaban las probetas, siguiendo la evolución de la corrosión por el aumento de peso debido a la acumulación de productos de corrosión, durante los 30 días a los que se extendían los ensayos.

Estos ensayos parecen indicados para estudiar las interrelaciones entre contaminantes, grado de humedad y carácter protector de las capas - de los productos de corrosión, para poner de manifiesto el importante papel desempeñado por estas en la captación de agua de la atmósfera, hasta el punto de transformar el concepto de HR_{crit} , ya que para cada metal podría hablarse de distintas HR_{crit} en función de los productos de corrosión que lo recubran.

De la observación de las Figuras IV-1 a IV-8, podría deducirse:

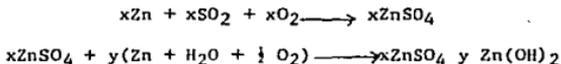
- Que si bien el agua adsorbida facilita la corrosión y la hace posible, no existe correlación estrecha entre su cantidad y el ataque producido, pues muchas veces los productos de corrosión formados en ausencia de contaminación adsorben cantidades comparables a las adsorbidas por capas contaminadas - con cloruros, sulfatos y mezclas.
- No se ha obtenido evidencia en cambio de que la contaminación con cloruros da lugar a una mayor higroscopicidad de los productos de corrosión que las adiciones de SO_2 , salvo - en el caso del Al y Fe en atmósferas saturadas de humedad.

- La corrosión de los metales no ferrosos es mucho menor que en el Fe. Como ya se ha indicado en el primer inciso, la corrosión de todos los metales aumenta al pasar de unas condiciones de HR del 80% a atmósfera saturada.
- En el caso del Al parecen resultar más agresivas las atmósferas saturadas de humedad contaminadas con Cl^- en mayor grado que con SO_2 , como se observa en la Figura IV-6.
- Para el Cu, el contaminante más agresivo parece ser el SO_2 el cual en el caso de atmósferas saturadas de humedad, parece reforzar la acción de los Cl^- .
- Respecto al Fe, la mayor cantidad de productos de corrosión se ha obtenido en atmósferas saturadas de humedad en presencia de Cl^- , resultando curioso que el SO_2 lejos de reforzar la acción de los Cl^- , la inhibe.
- En el caso de Zn, es significativo el comportamiento en atmósferas saturadas en presencia de Cl^- o SO_2 . Como se observa en la Figura IV-4, la formación de productos de corrosión es prácticamente independiente del tipo de contaminante. En cambio, cuando se encuentran juntos en una atmósfera, no solo no se potencian, sino que presentan un efecto inhibitor.

Todas estas observaciones ayudan a una mejor comprensión del fenómeno de corrosión atmosférica y ponen de relieve como cada factor de corrosión varía en significación, dependiendo de que se de aislado, o en coexistencia con otros factores de corrosión o grupos de factores. Todo cuanto antecede pone de manifiesto lo arriesgado de intentar someter la corrosión atmosférica a la rigidez de fórmulas cinéticas de validez general y específica, la aspiración siempre sentida y aún no lograda de contar con métodos cuantitativos rápidos y fiables de evaluación del efecto de cada factor de corrosión en cada circunstancia.

EFFECTO DE LA CONTAMINACION SOBRE LOS METALES ENSAYADOS.

Lo primero que resalta (Figura V-1a y b), es el ataque del Zn, respecto a los otros metales, especialmente en atmósferas con un 80% de HR, en las cuales se puede decir de un modo general, que su velocidad de corrosión es casi 10 veces mayor. Quizá el fundamento de este comportamiento resida en que en el caso del Zn los contaminantes desempeñen un papel catalítico. Puede proponerse el siguiente esquema de reacción:



que supone un consumo continuo de los contaminantes para formar los productos de corrosión. En lugar del SO₂ pueden desempeñar su papel otros estimuladores, como los Cl⁻.

El efecto de los contaminantes por separado se puede ver en las Figuras V-2 y V-3. En lo que respecta a una atmósfera urbana o industrial cuyo contaminante más significativo es el SO₂ (añadido como SO₄²⁻ en este caso) hay que destacar tanto el excelente comportamiento del Al y Cu, como que la agresividad del SO₂ para el Zn sea mayor a HR del 80% que en ambientes saturados de humedad. El Fe presenta un comportamiento intermedio.

En una atmósfera marina, se observa un comportamiento similar al descrito para el caso del Al, Cu y Zn. Si acaso cabe señalar el notable incremento de la corrosión del Fe en atmósferas saturadas de humedad (caso más frecuente de una atmósfera típicamente marina).

Admitida la importancia de las capas de humedad para que la corrosión progrese, podría aducirse que cuanto más finas fuesen las capas de humedad, mayor debería ser la corrosión, pues menor sería la distancia a recorrer por el oxígeno hasta alcanzar la superficie metálica. Que no suceda así (salvo en el caso del Zn, Figura V-4) es un indicio de que al tiem

Fe, Al, Zn, Cu. 80%HR.

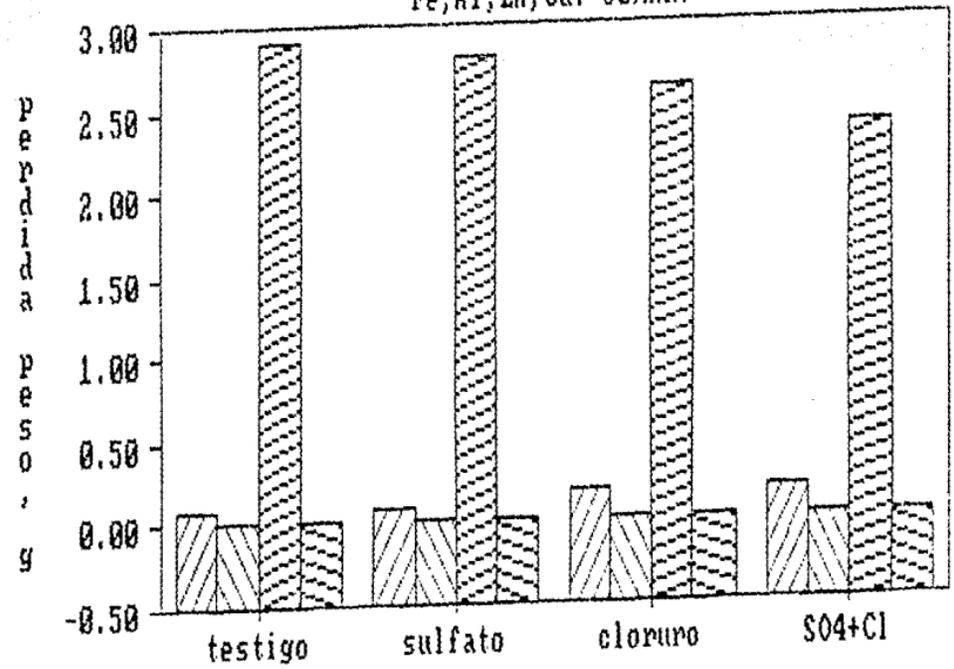


Fig. V - 1a

Fe, Al, Zn, Cu. 100% HR.

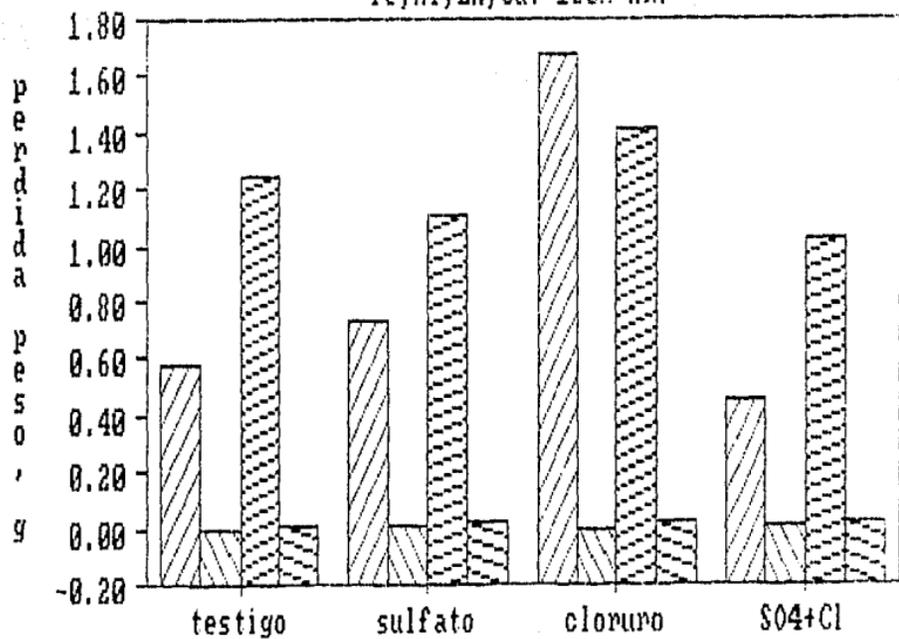


Fig. V - 1b

Sulfato. Influencia HR (80,100).

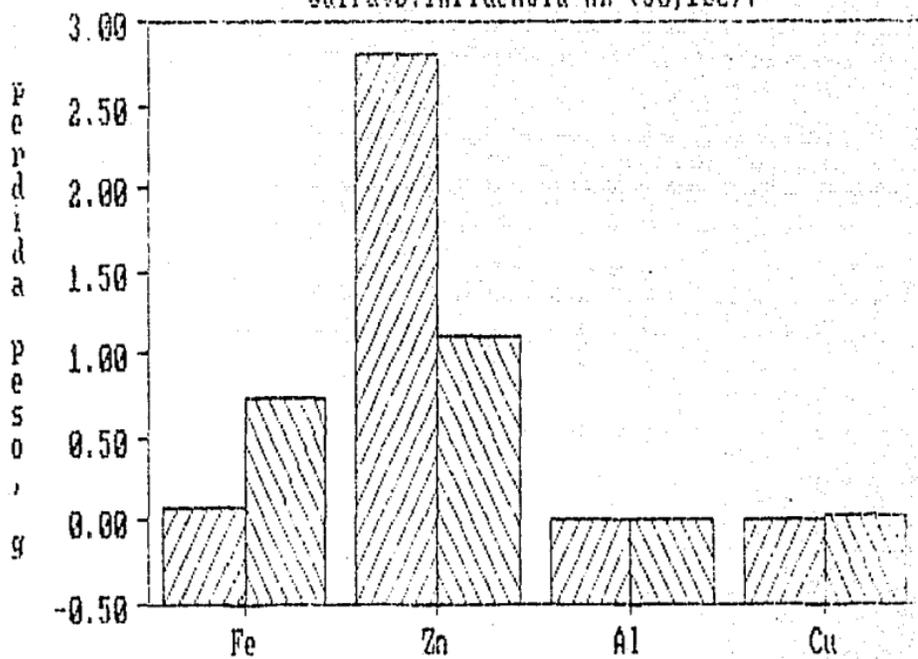


Fig. V - 2

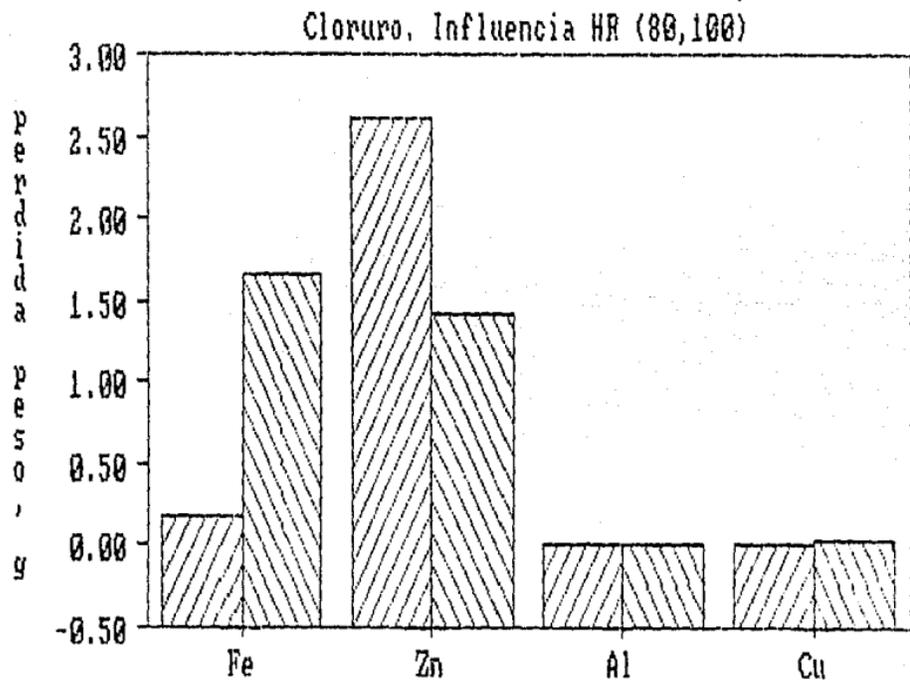


Fig. V - 3

Influencia HR (80,100)

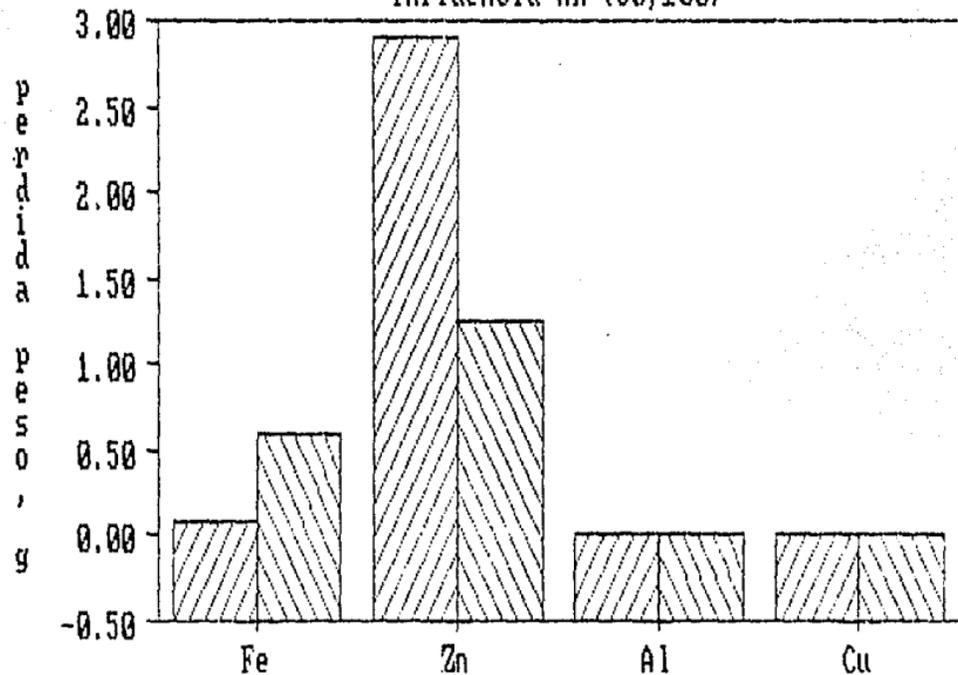


Fig. V - 4

po que se facilita el proceso catódico de reducción del O_2 , se dificulta el anódico y bien éste, o un incremento de la resistencia óhmica de las capas adsorbidas de humedad, pasan a controlar la cinética de corrosión. En el caso del Cu y Al, es claro que su resistencia a la corrosión, muy superior a la del Zn y Fe, se basa en la formación de capas de productos de corrosión protectoras que permiten su empleo, en la mayoría de los medios ambientes naturales, sin protección adicional alguna.

Si la difusión del O_2 desempeña un papel importante cabría esperar para todos los metales velocidades de corrosión parecidas en ambientes muy agresivos ya que, por ejemplo, en períodos de lluvia, el espesor de las capas de electrolito sería similar en todos los metales y el coeficiente de difusión y el gradiente de concentración en ellas también.

Todo esto se pone de manifiesto al exponer a contaminaciones fuertes las probetas de Zn recientemente preparadas (lijadas) con las que se obtienen velocidades de corrosión altas, pero que no continúan aumentando al ir formándose películas superficiales de naturaleza protectora.

Estas capas son las que realmente controlan el ataque y extraña ya menos que la combinación de contaminantes resulte en ocasiones menos dañina que cada uno de ellos por separado, o que concentraciones progresivamente crecientes de ambos carezcan de influencia significativa sobre la corrosión, pues bastaría que las características de las capas dependieran más de la naturaleza de los contaminantes presentes que de su cuantía y proporción, lo que en modo alguno contradice a la lógica.

El Al presenta una diferencia esencial con respecto a los otros metales ensayados; su tendencia a corroerse en forma de picaduras, picaduras que aparecen preferentemente en el borde las gotas y no en su centro, como cabría esperar de un mecanismo de aireación diferencial. Es posible que se alcancen en las zonas bien aireadas de los bordes, potenciales lo suficientemente altos como para superar el potencial de ruptura de la pe

lícula de óxido, a la que debe el metal su pasividad.

En el Al (Figura IV-18), es mayor la corrosión bajo el efecto combinado de Cl^- y SO_2 que cuando se debe a la acción exclusiva de los Cl^- , lo cual está en buen acuerdo con los resultados de los ensayos naturales de larga duración.

En este caso pues, los ensayos de laboratorio propuestos pese a ser acelerados, reproducen el comportamiento de los naturales, pese a las diferencias entre ambos, como:

- a) las condiciones en el laboratorio se mantienen invariables y en las atmósferas naturales las probetas quedan sometidas a ciclos de humidificación-secado.
- b) la aditividad, el sinergismo de efectos de los contaminantes o, en sentido más amplio, el efecto combinado de los mismos, depende de las variables del medio.
- c) quizá el factor tiempo, sobretodo en el caso del Al, tenga también una influencia decisiva, al darse períodos de incubación de picaduras y de propagación de las mismas, siendo muy probable que la duración de los ensayos propuestos (30 días) no exceda el período de incubación, y a largo plazo el papel esencial le corresponda al de propagación.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- En el Fe, con suficiente cantidad de contaminantes y capas superficiales espesas de electrolito, es la difusión del O_2 a través de estas - hasta la superficie metálica, la etapa que controla el proceso global de corrosión.
- Al pasar a capas invisibles de humedad adsorbida se dificulta cada vez más la reacción anódica de la que pasa a depender progresivamente el ataque.
- En el caso de los metales no ferrosos ensayados, Al, Cu y Zn, las cosas suceden como si el factor decisivo de la cuantía del ataque fueren las características protectoras de las capas superficiales de productos de corrosión formadas.
- Se ha comprobado que la corrosividad del Zn es cuanto menos un orden de magnitud superior a las del Fe, y Cu, siendo la diferencia aún más acusada con el Al.
- la higroscopicidad de los productos de corrosión formados en ambientes clorurados es en el caso del Al y Fe superior a la que evidencian los formados en ambientes contaminados con SO_2 , captando agua de la atmósfera en mayor cantidad y conservando durante períodos más largos agresividades elevadas cuando se interrumpe el aporte de contaminantes.
- son suficientes capas de humedad adsorbida de unas pocas micras de espesor (suponiendo un reparto uniforme) para que, en presencia de suficiente cantidad de contaminantes, se alcancen velocidades de corrosión considerablemente altas. Pero en algunos casos, el efecto perjudicial de los contaminantes se atenúa con el tiempo por la formación de algún producto insoluble.
- en corrosión atmosférica, dado el gran número de variables que intervienen, es muy arriesgado aventurar formulaciones muy amplias, pues - el efecto de cada factor de corrosión puede resultar condicionado por los restantes.

BIBLIOGRAFIA

1. Norma ASTM-E 104-51, 1977. pág 94-95
2. Shreir, L.L., Corrosión Vol, 1
George Newnes-Butterworths (1976)
3. Rozenfeld, I L. Corrosión Atmosférica de los metales NACE,
Houston, TX, 1972.
4. Metal Corrosion in the Atmosphere. ASTM. pub. No. 455 ASTM,
Philadelphia, pA. (1968).
5. Larrabee, C.P. Mecanismo de corrosión atmosférica de los -
Metales ferrosos. Corrosión, Vol. 15, p. 526 (1959).
6. F. MANSFELD y S. TSAI; Corrosion. Sci 20(1980), 853.
7. S. FELIU y M. MORCILLO: "La Corrosión y Protección de los -
Metales en la Atmósfera" Ed. Bellaterra, en prensa.
8. H.J. MEYER: "Corrosión Atmosférica de Metales". Ed. Verlag
Chomie. G.B.H. Weiehm. Bergstr. (1965), págs. 44-52.
9. Guttman, H., "Metal Corrosion in the Atmosphere", A.S.T.M.,
STP 435, Philadelphia (1968). p. 928.
10. Guttman, H y Sereda, P.J., "Metal Corrosion in the Atmosphere".
A.S.T.M., STP 435, Philadelphia (1968). p. 326.
11. Kucera, V y Mattson, E., "Corrosión in Natural Environments".
A.S.T.M., STP 558 (1974), p. 239.
12. Lauer, G. y Mansfeld, F., Corrosion., 26 (1970), p. 504.
13. Mansfeld, F. y Kenkel, J.V., Corrosion. Sci., 16 (1976), p. 111.
14. Mansfeld, F. y Kenkel., J.V., Corrosion., 33 (1977), p. 13.
15. Scully, J.C., Fundamentals of Corrosion, Pergamon Press, New
York (1966).
16. Sereda, P.J., "Corrosion in Natural Environments"., A.S.T.M.,
STP 558, (1974), p.7
17. Sereda, P.J., A.S.T.M., Bulletin No. 228, Febrero, 1958, p. 53
y No. 246, Mayo, (1960).. p. 47.
18. S. Felíu y M. Morcillo, Rev. Metal. CENIM 14, 198, (1978).

CAPITULO VIII

Apéndice A	Valores obtenidos como ganancia de peso (gr) (Tabla IV.1) - - - - -	71-72
Apéndice B	Valores obtenidos como ganancia de peso (gr) (Tabla IV.2) - - - - -	73-74
Apéndice C	Valores obtenidos como ganancia de peso (gr) (Tabla IV.3) - - - - -	75-76
Apéndice D	Valores obtenidos como ganancia de peso (gr) (Tabla IV.4) - - - - -	77-78
Apéndice E	Valores obtenidos por Difractogramas de Ra-- yos X. (D.R.X), (Tabla IV.5) - - -	79-80-81
Apéndice F	Valores obtenidos al 80 y 100% H.R; como ve locidades mm/año y mgr/cm ² días. (Tabla IV.6) y (Tabla IV.7) - - - -	82-83
Apéndice G	Valores obtenidos al 80% de H.R, correspon-- diente a pérdida de peso (gr). (Tabla IV.8) - - - - -	84
Apéndice H	Valores obtenidos al 100% de H.R, correspon-- diente a pérdida de peso (gr). (Tabla IV.9) - - - - -	85

Tabla IV.1

Presentación de los resultados obtenidos, considerado como ganancia de peso (gr) al 80% de humedad relativa de las probetas testigos.

t (d)	Fe	gr de p	Zn	gr de p	Al	gr de p	Cu	gr de p
3	0.0011	0.0011	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0026	0.0026
6	0.0025	0.0036	0.0163	0.0170	0.2749	0.2756	0.0004	0.0030
9	0.0110	0.0146	0.0072	0.0242	0.0012	0.2768	0.0004	0.0034
12	0.0011	0.0157	0.0016	0.0250	0.0018	0.2786	0.0010	0.0044
15	0.0021	0.0178	0.0596	0.0854	0.0007	0.2793	0.0011	0.0055
18	0.0009	0.0187	0.0598	0.1452	0.0006	0.2799	0.0003	0.0058
21	0.0012	0.0199	0.0008	0.1460	0.0012	0.2811	0.0004	0.0062
24	0.0003	0.0202	0.0027	0.1487	0.0014	0.2825	0.0006	0.0068
27	0.0007	0.0209	0.0029	0.1516	0.0001	0.2826	0.0008	0.0076
30	0.0008	0.0217	0.0034	0.1550	0.0036	0.2863	0.0023	0.0099

Tabla IV.1 (continuación)
 Probetas contaminadas con sus correspondientes sulfatos (A, B, C y D)

t (d)	Fe	gr de p	Zn	gr de p	Al	gr de p	Cu	gr de p
3	0.0007	0.0007	0.0102	0.0102	0.0593	0.0593	0.0160	0.0160
6	0.0338	0.0345	0.0014	0.0116	0.0211	0.0804	0.0076	0.0236
9	0.0093	0.0437	0.0083	0.0199	0.0213	0.1019	0.0189	0.0425
12	0.0052	0.0490	0.0080	0.0279	0.0185	0.1202	0.0061	0.0486
15	0.0046	0.0536	0.0072	0.0351	0.0232	0.1434	0.0081	0.0567
18	0.0034	0.0570	0.0053	0.0404	0.0263	0.1697	0.0061	0.0628
21	0.0071	0.0641	0.0118	0.0522	0.0336	0.2033	0.0074	0.0702
24	0.0083	0.0724	0.0045	0.0567	0.0175	0.2208	0.0063	0.0765
27	0.0077	0.0801	0.0081	0.0648	0.0364	0.2572	0.0081	0.0847
30	0.0093	0.0894	0.0139	0.0787	0.0046	0.2618	0.0108	0.0954

Tabla IV.2
 Probetas contaminadas con cloruro de sódio (E).

t (d)	Fe	gr de p	Zn	gr de p	Al	gr de p	Cu	gr de p
3	0.0116	0.0116	0.0080	0.0080	0.0127	0.0127	0.0031	0.0031
6	0.0042	0.0158	0.0014	0.0094	0.0007	0.0134	0.0009	0.0040
9	0.0060	0.0218	0.0043	0.0137	0.0033	0.0167	0.0003	0.0043
12	0.0082	0.0300	0.0020	0.0157	0.0185	0.0362	0.0014	0.0057
15	0.0081	0.0381	0.0041	0.0198	0.0046	0.0398	0.0025	0.0082
18	0.0053	0.0434	0.0005	0.0203	0.0025	0.0422	0.0017	0.0099
21	0.0081	0.0515	0.0032	0.0235	0.0031	0.0453	0.0017	0.0116
24	0.0080	0.0595	0.0095	0.0330	0.0048	0.0501	0.0121	0.0237
27	0.0064	0.0659	0.0121	0.0451	0.0151	0.0652	0.0066	0.0303
30	0.0106	0.0765	0.0231	0.0682	0.0021	0.0673	0.0108	0.0411

Tabla IV.2 (continuación)
 Probetas con combinación de contaminantes (A+E, B+E, C+E y D+E).

t (d)	Fe	gr de p	Zn	gr de p	Al	gr de p	Cu	gr de p
3	0.0216	0.0216	0.0227	0.0227	0.0642	0.0642	0.0168	0.0168
6	0.0115	0.0331	0.0049	0.0267	0.0035	0.0677	0.0022	0.0190
9	0.0169	0.0500	0.0147	0.0441	0.0107	0.0784	0.0114	0.0304
12	0.0116	0.0616	0.0090	0.0504	0.0110	0.0894	0.0037	0.0341
15	0.0126	0.0742	0.0061	0.0565	0.2110	0.3004	0.0049	0.0390
18	0.0117	0.0859	0.0074	0.0639	0.0173	0.3177	0.0047	0.0437
21	0.0143	0.1002	0.0128	0.0767	0.0273	0.3450	0.0101	0.0538
24	0.0057	0.1059	0.0138	0.0905	0.0035	0.3435	0.0044	0.0582
27	0.0153	0.1212	0.0265	0.1160	0.0167	0.3652	0.0026	0.0608
30	0.0107	0.1319	0.0256	0.1416	0.0080	0.3732	0.0040	0.0648

Tabla IV.3
 Presentación de los resultados obtenidos, considerado como ganancia de peso al 100% de humedad relativa de las probetas testigo.

t(d)	Fe	gr de p	Zn	gr de p	Al	gr de p	Cu	gr de p
3	0.0050	0.0050	0.0024	0.0024	0.0100	0.0100	0.0035	0.0035
6	0.0046	0.0096	0.0004	0.0028	0.0004	0.0104	0.0015	0.0050
9	0.0007	0.0103	0.0004	0.0032	0.0016	0.0120	0.0041	0.0091
12	0.0011	0.0114	0.0076	0.0109	0.0088	0.0208	0.0024	0.0115
15	0.0249	0.0413	0.0049	0.0158	0.0056	0.0264	0.0015	0.0130
18	0.1222	0.1635	0.0139	0.0297	0.0250	0.0514	0.0026	0.0156
21	0.0300	0.1935	0.0414	0.0711	0.0026	0.0540	0.0088	0.0242
24	0.0147	0.2082	0.0493	0.1204	0.0237	0.0777	0.0013	0.0255
27	0.0246	0.2328	0.0240	0.1444	0.0431	0.1208	0.0305	0.0560
30	0.0437	0.2765	0.0207	0.1651	0.0005	0.1213	0.0473	0.1033

Tabla IV.3 (continuación)
 Probetas contaminadas con sus correspondientes sulfatos, (A,B,C y D).

t (d)	Fe	gr de p	Zn	gr de p	Al	gr de p	Cu	gr de p
3	0.1053	0.1053	0.0418	0.0418	0.0499	0.0499	0.0054	0.0054
6	0.0051	0.1104	0.0083	0.0501	0.0201	0.0700	0.0058	0.0102
9	0.0079	0.1183	0.0031	0.0532	0.0087	0.0787	0.0390	0.0141
12	0.0088	0.1271	0.0225	0.0757	0.0252	0.1039	0.0533	0.0674
15	0.0398	0.1669	0.0381	0.1138	0.0188	0.1227	0.0211	0.0885
18	0.0460	0.2129	0.0355	0.1494	0.0410	0.1637	0.0264	0.1149
21	0.1599	0.3728	0.0083	0.1576	0.0196	0.1833	0.0145	0.1294
24	0.1139	0.4867	0.0015	0.1591	0.3922	0.5755	0.1525	0.2819
27	0.6482	0.1349	0.0278	0.1869	0.0114	0.5859	0.1460	0.4279
30	0.0826	1.2175	0.0136	0.2005	0.1035	0.6894	0.005	0.4334

Tabla IV.4
 Probetas contaminadas con cloruro de sódio (E).

t (d)	Fe	gr de p	Zn	gr de p	Al	gr de p	Cu	gr de p
3	0.0510	0.0510	0.1026	0.1026	0.1368	0.1368	0.0024	0.0024
6	0.0071	0.0581	0.0256	0.1282	0.0285	0.1663	0.0099	0.0123
9	0.0307	0.0888	0.0148	0.1422	0.0230	0.1893	0.0024	0.1447
12	0.278	0.1166	0.0275	0.1697	0.0115	0.2008	0.0009	0.0156
15	0.0309	0.1475	0.0381	0.2078	0.157	0.2155	0.0234	0.0390
18	0.3505	0.4980	0.0755	0.2833	0.0172	0.237	0.0540	0.0930
21	0.0275	0.5255	0.0366	0.3199	0.0856	0.3183	0.0038	0.0968
24	0.7909	1.3164	0.0866	0.4065	0.2760	0.5943	0.0152	0.1120
27	0.0345	1.3509	0.0743	0.4808	0.0032	0.5975	0.0494	0.1614
30	0.0293	1.3802	0.0016	0.4824	0.0310	0.6276	0.0222	0.1836

Tabla IV.4 (continuación)
 Probetas con combinación de contaminantes (A+E, B+E, C+E y D+E).

t (d)	Fe	gr de p	Zn	gr de p	Al	gr de p	Cu	gr de p
3	0.0756	0.0756	0.0099	0.0099	0.0775	0.0775	0.0064	0.0064
6	0.0163	0.0919	0.0247	0.0346	0.0011	0.0786	0.0121	0.0185
9	0.1045	0.1964	0.0133	0.0474	0.0085	0.0871	0.0390	0.0575
12	0.1249	0.3213	0.0122	0.0601	0.0485	0.1356	0.0032	0.0607
15	0.0371	0.3584	0.0626	0.1227	0.0007	0.1363	0.1339	0.1946
18	0.0010	0.3594	0.0484	0.1711	0.0134	0.1497	0.1888	0.3834
21	0.1308	0.4902	0.0321	0.2032	0.0184	0.1681	0.0157	0.3991
24	0.0968	0.6870	0.0493	0.2525	0.0107	0.1788	0.0282	0.4273
27	0.1708	0.8578	0.0100	0.2625	0.0263	0.2051	0.0189	0.4462
30	0.0308	0.8886	0.0318	0.2943	0.0299	0.2350	0.0093	0.4555

Presentación de los valores obtenidos por vía de difractogramas de rayos X (D.R.X) ., estos datos corresponden al acero del 80% H.R.

2 θ	% I
18.10	3
20.20	100
28.80	19
29.00	18
35.50	54
35.70	48
41.10	10
46.20	10
46.60	8
50.90	6
51.20	5
55.30	11
55.60	8
63.45	4
63.88	3

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Tabla IV.5 (continuación)
Valores del Zn al 80% y 100% de H.R.

20	ZI	20	ZI
11.20	7	33.15	4
36.40	76	36.36	90
39.10	50	39.20	54
43.26	100	43.30	100
54.40	50	54.34	43
54.50	53	54.38	44
70.06	96	10.15	90
70.26	96	70.33	85
70.69	60	70.68	73
70.84	50	70.79	60
77.10	3	77.10	3
77.20	3	77.30	3
82.10	22	82.20	21
82.30	20	82.40	18
83.70	3	83.90	4
84.00	3	84.10	2
86.60	12	86.65	11
86.80	10	86.90	9
89.90	14	90.00	14
90.19	11	90.30	12
94.90	3	95.00	3
95.25	2	95.30	3

Tabla IV.5 (continuación)

Valores del Aluminio al 80 y 100% de H.R.

81

20	%I	20	%I
19.80	9	38.50	41
38.60	24	45.02	100
41.02	100	45.02	34
65.10	36	65.39	34
65.20	36	78.30	72
88.30	76	78.51	67
88.45	72	99.06	100
99.10	9		
99.50	6		

Valores del Cobre al 80 y 100% de H.R.

20	%I	20	%I
16.90	4	43.30	82
32.70	7	50.50	100
43.30	100	74.11	63
45.50	3	89.99	37
50.40	70		
74.08	70		
90.10	65		
95.49	4		

Tabla IV.6

Para el 80% de humedad relativa (H.R.)

mm/año	Fe	mg/cm ² días (SO ₄ +Cl ⁻)
0.1412		12.85 mg
0.1236		25.70
0.1937		38.55
0.3233		51.40
5.5072	<u>Zn</u>	12.85
5.3268		25.70
4.9425		38.55
4.4772		51.40
0.7×10 ⁻²	<u>Al</u>	12.85
0.6 "		25.70
1.7 "		38.55
2.9 "		51.40
0.15×10 ⁻²	<u>Cu</u>	12.85
0.74 "		25.70
0.69 "		38.55
1.25 "		51.40

Tabla IV.7
Para el 100% de humedad relativa (H.R.)

mm/año (V)	Fe	mg/cm ² días (SO ₄ +Cl ⁻)
1.0009		12.85
1.2599		25.70
2.8734		38.55
0.7610		51.40
2.3618	<u>Zn</u>	12.85
2.0926		25.70
2.6764		38.55
1.9323		51.40
0.15x10 ⁻²	<u>Al</u>	12.85
0.95 "		25.70
0.15 "		38.55
0.28 "		51.40
1.8x10 ⁻²	<u>Cu</u>	12.85
3.7 "		25.70
3.6 "		38.55
3.8 "		51.40

Tabla IV.8

Presentación de las pérdidas de peso (gr), de las plaquitas experimentadas sin contaminación, al 80% de humedad relativa (H.R.)

Fe	Zn	Al	Cu
0.0822	2.9071	0.0014	0.0010

Plaquitas contaminadas con sus correspondientes sulfatos (A,B,C y D).

Fe	Zn	Al	Cu
0.0720	2.8119	0.0012	0.0049

Plaquitas contaminadas con cloruros de sódio (E).

Fe	Zn	Al	Cu
0.1710	2.6099	0.0034	0.0049

Plaquitas contaminadas con mezclas (A+E, B+E, C+E y D+E)

Fe	Zn	Al	Cu
0.1882	2.3634	0.0059	0.0083

Tabla IV.9

Presentación de las pérdidas de peso (gr), de las plaquitas experimentadas sin contaminación, al 100% de humedad relativa (H.R.)

Fe	Zn	Al	Cu
0.5828	1.2467	0.0003	0.0119

Plaquitas contaminadas con sus correspondientes sulfatos (A,B,C y D).

Fe	Zn	Al	Cu
0.7335	1.1046	0.0019	0.0249

Plaquitas contaminadas con cloruros de sodio (E).

Fe	Zn	Al	Cu
1.6728	1.4128	0.0003	0.0238

Plaquitas contaminadas con mezclas (A+E, B+E, C+E y D+E)

Fe	Zn	Al	Cu
0.4482	1.0200	0.0056	0.0253