

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
VIII CONGRESO NACIONAL

CORROSION DE LAS MALLAS DE ALAMBRES DE LOS GAVIONES

LINCOLN ALVARADO M. (1)
MARIO VALVERDE P. (2)

Los gaviones han sido usados ampliamente en el mundo desde principios de siglo. En Chile su uso se ha generalizado en la última década, tanto en defensas fluviales como en obras hidráulicas.

El comportamiento del acero cincado en las aguas de los ríos chilenos es un asunto no aclarado totalmente y que incide directamente en la vida útil de los gaviones.

En este trabajo se muestran los resultados de un estudio realizado por ENDESA, respecto a la corrosión de los gaviones en estructuras hidráulicas y defensas fluviales ubicadas en los ríos Teno, Maule y Laja.

- 1.- Ingeniero Civil. EMPRESA NACIONAL DE ELECTRICIDAD S.A.
- 2.- Ingeniero Civil Mecánico. ERICO CHILE.

1.- GENERALIDADES

Los gaviones, entendiéndose como tal a paralelepípedos de mallas de alambre rellenos con piedras, han sido usados ampliamente en el mundo a partir de principios de siglo.

En Chile su uso se ha generalizado en la última década, tanto en defensas fluviales como en obras hidráulicas.

El comportamiento del acero cincado en las aguas de los ríos chilenos es un asunto no aclarado totalmente y que incide directamente en la vida útil de los gaviones.

Las publicaciones técnicas (catálogos de fabricantes, libros y artículos) sobre gaviones solo hacen referencias generales y vagas en lo que respecta a la vida útil de las mallas de alambres.

Estudios realizados en obras construidas, tanto por el Ministerio de Obras Públicas (1985) como por la ENDESA (1987) han mostrado que el cinc de recubrimiento se pierde rápidamente (2 a 3 años) en los alambres sumergidos o humedecidos permanentemente, comenzando luego el proceso de oxidación del acero.

En este trabajo se muestran los resultados de un estudio realizado por la ENDESA en estructuras hidráulicas y obras de defensas fluviales ubicadas en los ríos Ñeno, Maule y Laja.

2.- ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL ACERO CINCO

Los recubrimientos de cinc tienen un comportamiento de protección sobre el acero, considerado como metal base, de acción triple:

- Resistencia a la corrosión que el cinc mismo tiene a la acción atmosférica.
- Protección catódica del metal base en las discontinuidades, debido al carácter o naturaleza innoble del cinc.
- Disminución de la corrosión del acero debido al recubrimiento de las áreas desnudas por productos de corrosión del cincado mismo.

La vida útil de un recubrimiento de cinc dependerá de su propia resistencia, de su espesor y de la agresividad del medio.

2.1 Comportamiento del Cincado en la Atmósfera

Los revestimientos de cinc son relativamente resistentes en las atmósferas rurales y marinas.

Experiencias efectuadas en EE.UU. (UHLIG 1971), han mostrado que probetas de acero cincado con el mismo espesor duraron 11 años en atmósfe

ras suburbanas y rurales y 8 años en atmósferas marinas. En cambio en atmósferas industriales, la vida media del cinc alcanzó a 4 años.

2.2 Comportamiento del cincado en aguas naturales

Los metales inmersos en agua dulce se corroen debido a su inestabilidad termodinámica. Condiciones del agua tales como pH, temperatura, velocidad, constituyentes, influyen en la velocidad de corrosión del cincado.

a) pH

El pH de las aguas naturales se ubica generalmente entre 4,5 y 8,5.

La tasa de corrosión del cinc entre pH = 7 y pH = 12 es baja en relación a la que alcanza con valores de pH ácidos y muy alcalinos. Esto se puede apreciar en el gráfico de la Fig. 1, según resultados de Chatalov. (UHLIG 1971).

En las aguas de pH bajos los productos de corrosión no son tan evidentes. Si el pH se ubica entre los valores 7,5 y 8,5 los productos de corrosión tienden a ser adherentes o a formar depósitos incrustantes duros que puedan dar origen a corrosión bajo depósitos (crevice corrosión). A pH muy altos, el cinc se disolverá y en presencia de iones cobre se produce picado del metal base del cincado.

b) Temperatura

A temperatura sobre 50 grados C, se produce la inversión de polaridad del cinc con relación a la del acero. Esta circunstancia hace que el cinc actúe como metal noble y no como metal de sacrificio.

c) Velocidad

La velocidad de corrosión del cinc en aguas aireadas es proporcional al movimiento del agua. Cuanto más rápido se mueve el agua, más se corroerá el cinc, porque los productos de corrosión son arrastrados o removidos y porque hay mayor suministro de O_2 en las áreas catódicas.

d) Constituyentes

Dureza: Las aguas naturales contienen sales promotoras de dureza como son: sales de sodio (cloruros, sulfatos, bicarbonatos), sales de metales pesados y sílice.

También tienen O_2 , N_2 , NH_4^+ , $SO_4^{=}$ y CO_2 disueltos.

Según su dureza las aguas naturales pueden clasificarse como se indica:

< 50 mg/l de $CaCO_3$ agua blanda
50 - 100 mg/l de $CaCO_3$ agua moderadamente blanda

100 - 150	mg/l	de CaCO_3	agua levemente dura
150 - 250	mg/l	de CaCO_3	agua moderada
250 - 350	mg/l	de CaCO_3	agua dura
> 350	mg/l	de CaCO_3	agua muy dura

Aguas blandas : son por lo general agresivas y su agresividad depende fundamentalmente del pH, son casi siempre insaturadas en carbonatos de calcio.

Aguas de dureza intermedia : tienden a producir corrosión bajo costras.

Aguas duras : Son sobresaturadas en carbonatos de calcio, por lo general no son agresivas.

- Cloruros: Aumentan la conductividad facilitando el flujo de corriente de corrosión. Reducen la efectividad de las películas pasivantes.
- Sulfatos: Favorecen la corrosión bacteriana en condiciones anaeróbicas.
- Microorganismos: Las aguas naturales pueden tener ciertas formas de vida (algas y/o bacterias) que pueden producir los siguientes efectos directos o indirectos en la corrosión del cinc.
 - Enmascaramiento por organismos vivos o muertos.
 - Alteración de composición en zonas del cincado por los propios microorganismos. Por ejemplo, las algas pueden remover el CO_2 del agua y producir oxígeno con la consiguiente aparición de celdas de aireación diferencial (pit). (SCULLY 1970).
- Gases Disueltos: El oxígeno es el constituyente más importante en el proceso de corrosión, ya que él es despolarizante catódico en soluciones neutras aireadas.

Las aguas que están en contacto directo con el aire son las que tendrían más oxígeno disuelto.

El efecto del CO_2 disuelto está ligado al contenido de bicarbonato (HCO_3),

los más importantes son el $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$

La actividad del $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ en el agua necesita un exceso de CO_2 en solución. Una cantidad insuficiente de CO_2 no mantiene $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ en solución, llegando a ser el agua, sobresaturada en CaCO_3 . Un ligero aumento de pH (zonas cáutódicas) causa su precipitación.

Si el precipitado es parejo, delgado, continuo y adherente; el cinc no se corroe; pero si es irregular, no adherente y grueso; se produce corrosión por resquicios (crevice corrosión).

Cuando el CO_2 está en exceso no hay precipitación de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)$ y el agua será agresiva. Por ejemplo un agua con Índice de Langelier (I.L.) negativo es agresiva o corrosiva, es decir, el agua contiene exceso de CO_2 y no ocurrirá precipitación de CaCO_3 .

2.3 Comportamiento del Acero en Aguas Naturales

Los siguientes aspectos inciden sobre la velocidad de corrosión del acero en agua dulce.

2.3.1 Oxígeno disuelto

En aguas saturadas de oxígeno a temperatura ambiente, la velocidad de corrosión alcanza el valor de 100 mdd ($\text{mg}/\text{dm}^2 \times \text{dfa}$). Esta velocidad disminuye después de algunos días debido a la formación de óxido de hierro que actúa como barrera para la difusión de oxígeno. El valor estacionario de la velocidad de corrosión se sitúa entre 10 y 20 mdd. (UHLIG 1971).

Estos valores se incrementan si la velocidad del agua aumenta. La velocidad de difusión al estado estacionario es proporcional a la concentración de oxígeno, o lo que es lo mismo, la velocidad de corrosión es igualmente proporcional a la concentración de oxígeno.

Se ha demostrado experimentalmente que la velocidad de corrosión del acero dulce (mild Steel) crece linealmente con la concentración de oxígeno y que para cierta concentración crítica de oxígeno, la velocidad de corrosión disminuye. Las Fig. 2 y 3 muestran el efecto antes citado.

2.3.2 Efecto del pH en la corrosión del acero

El efecto del pH en la corrosión del hierro en agua aireada blanda a temperatura ambiente, se muestra en la Fig. 4.

De esta figura se deduce que entre pH 10 y 4 la corrosión no es dependiente del pH y dependerá tan sólo de la velocidad con que el oxígeno difunde hacia la superficie del metal (a estos pH existe tendencia a formación de óxido de hierro). En cambio a pH menor que 4, los óxidos formados se disuelven y el metal queda más en contacto con el medio. A pH mayor que 10 el metal se pasiva en presencia de oxígeno disuelto.

3.- CARACTERISTICAS DEL AGUA Y SUELO

3.1 Mediciones efectuadas en Terreno

Las mediciones efectuadas en terreno (resistividad y potencial) tuvieron por objeto determinar los parámetros, propios de la naturaleza del agua de los ríos, que producen inestabilidad del cinc, como también aquellos parámetros del terreno que indicasen alguna influencia externa ocasionando una aceleración

de la velocidad de disolución del cinc.

Además se extrajeron muestras de agua y alambres para su posterior análisis y/o ensayo en laboratorio.

La medición de resistividades se efectuó en muestras de aguas extraídas de los ríos en cuestión y directamente en suelos adyacentes a los galvones involucrados.

3.2 Análisis químico del agua

Se tomaron 4 muestras de agua designadas como :

- M1 = Bocatoma del Canal Teno-Chimbarongo. Aguas del río Teno. (6.10.86)
 M2 = Canal de devolución del Proyecto Colbún. Aguas provenientes del río Maule (6.10.86)
 M3 = Canal de evacuación de la Central Antuco. Aguas provenientes del río Laja y Polcura (8.10.86)
 M4 = Bocatoma Laja de la Central Antuco. Aguas del río Laja. (9.10.86),
 cuyo análisis químico dió los siguientes resultados:

Parámetros (mg/l)	M1	M2	M3	M4
Cobre	-	-	-	-
Dureza total (CaCO ₃)	100	60	32	31
Sales totales solubles	173	151	37	46
Cloruros (Cl ⁻)	21	7	4	4
Sulfatos (SO ₄) ²⁻	76	33	-	-
Alcalinidad total (CaCO ₃)	45	32	28	30
pH	6.1	6	6.2	6.2
Indice de Langelier (20 °C)	- 2.19	- 2.66	- 2.75	- 2.73

Los valores del pH corresponden a una medición inmediata del mismo ("pH instantáneo") sin permitir que se alcance un valor constante por la acomodación del electrolito en el entorno del electrodo de medición.

3.3 Características químicas del agua de ríos comprendidos entre el Mapocho y el Bío-Bío.

Puesto que las características químicas del agua son un factor muy importante en la corrosión de los alambres, se indican a continuación algunos valores medios según estadísticas de la Dirección General de Aguas.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA (1977-1986)

RIO	Nº de Muest.	pH	Cu mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	Dureza mg/l	I.L
Mapocho en Los Almendros	39	7.26	2.31	7.1	71.6	60.2	-1.6
Maipo en El Manzano	55	7.93	0.01	85.4	248.8	229.2	-0.8
Maipo en S.Vicente de Maltagua	18	7.98	0.03	108.5	210.4	251.8	+0.4
Cachapoal en Pte. Codao	35	7.59	1.30	24.1	82.1	120.1	-0.5
Cachapoal en Boc.Canales	37	7.35	2.40	26.2	118.2	128.5	-1.0
Tinguiririca en Panamericana	44	7.31	0.07	9.2	33.6	49.8	-1.5
Teno en Longitudinal	28	7.54	0.04	25.2	49.5	60.7	-1.2
Lontué en Longitudinal	28	7.57	0.04	11.3	14.9	26.9	-1.7
Longaví en Panamericana	18	7.41	0.00	5.0	4.3	21.3	-1.9
Maule en Panamericana	19	7.62	0.00	12.1	11.5	33.6	-2.3
Maule en San Fabián en Alico	10	6.82	0.00	3.5	1.9	15.4	-3.4
Itata en Trilaleo	9	6.97	0.00	3.5	1.4	13.7	-2.6
Laja en Puente Perales	9	7.15	0.00	3.5	1.9	17.4	-2.2
Bío Bío en Rucalhue	10	7.32	0.00	4.2	5.3	19.6	-2.0

4.- MEDICIONES EN LABORATORIO

4.1 Determinación de cinc residual

La determinación de cinc residual se hizo de acuerdo con las especificaciones BS-443-82. (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1982)

Lugar	Muestra Nº	Diámetro Nóminal mm	Cinc Residual gr/m ²	Tiempo Exposición años	Condición Funcionamiento
BOCATOMA CANAL TENO-CHIMBARONGO	BCT1	2.4	0	3.5	ST-HP
	BCT2	5.0	0	9.7	ST-HP
	BCT5	5.0	85.7	9.7	ST-HP
	BCT6	5.0	0	9.7	ST-HP
PROYECTO COLBUN Obra de Entrega Río Maule	OER1	3.0	301.4	1.4	I
	OER3	3.0	143.9	1.4	ST
	OER5	3.0	126.5	1.4	ST
Obra de Distribución Terminal	ODT1	3.0	346.0	1.0	I
	ODT4	3.0	19.0	1.0	SP
	ODT5	2.4	34.0	1.0	SP (Foto N° 1)

Lugar	Muestra	Diámetro Nominal	Cinc Residual gr/m2	Tiempo Exposición años	Condición Funcionamiento
Canal Maule Norte Bajo	CMN1	2.0	351.8	3.0	I
	CMN3	2.0	144.4	3.0	ST
	CMN4	2.0	98.9	3.0	ST
	CMN5	2.0	0	3.0	SP
	CMN6	2.0	24.2	3.0	SP
	CMN7	2.0	0	2.0	SP
	Alcantarilla Los Temos	ALT1	2.8	52.4	1.2
ALT2		2.0	38.7	1.2	SP
ALT3		2.4	21.9	1.2	SP
CENTRAL ANTUCO Bocatoma Laja	BL1	2.4	251.2	3.6	I
	BL2	2.4	26.9	3.6	SP
	BL3	2.4	43.6	3.6	SP
	BL4	2.8	60.7	3.6	SP
Patio de Alta	APA1	2.4	229.6	6.2	I
	APA2	3.0	0	6.2	HP (Foto N°2)

I = Intemperie
 SP = Sumergido Permanentemente
 ST = Sumergido Temporalmente
 HP = Humedecido Permanentemente

4.2 Determinación de la disminución de diámetros de muestras de alambres oxidados

La medición de cambio de diámetro se realizó decapando electroquímicamente muestras de alambres oxidados que no tenían cinc residual. Esta limpieza se realizó en una solución de citrato ácido de amonio, colocando la muestra como cátodo en una celda de electrólisis.

A continuación se anotan los diámetros mínimos, máximos y promedios de los alambres oxidados.

Lugar	Muestra N°	DIAMETROS				TIEMPO EXPOSICION años
		MIN mm	MAX mm	PROM. mm	NOM. mm	
Bocatoma Canal Teno Chimbarongo	BCT1	2,36	2,46	2,38	2,40	3,5
Canal Maule Norte Bajo	CMN5	1,98	2,00	2,00	2,00	3,0
Canal Maule Norte Bajo	CMN7	1,22	2,00	1,74	2,00	2,0
C. Antuco						
Patio de Alta	APA2	2,54	2,86	2,82	3,00	6,3

Diámetro Promedio = Promedio aritmético de 10 mediciones a lo largo de la muestra.

5.- RESULTADOS

El análisis de las características del agua y de las muestras de alambres extraídas en terreno permitieron determinar velocidad de desgaste del cinc y velocidad de desgaste del acero.

5.1 Estimación de la velocidad de desgaste del cinc

Los alambres obtenidos en terreno han mostrado que la pérdida del cinc ha sido aleatoria en los gaviones que han permanecido total o parcialmente sumergidos en agua.

Los alambres que han permanecido en forma permanente a la intemperie, es decir solamente a la acción atmosférica, presentan excelente resistencia a la corrosión.

En cambio en los gaviones expuestos al agua se encontró que en algunas muestras, el cinc se perdió en menos de 1 año 5 meses siendo el valor más alto 14,7 años. Experiencias realizadas en el río Mapocho (MOP, 1985) mostraron que alambres testigos perdieron entre 2/3 y el total de cinc en 6 meses. Se puede decir que el valor medio de vida útil estimada es de 3.9 años. Se ha considerado como contenido inicial de cinc en los alambres 250 gr/m²; este valor no es constante y ensayos realizados muestran que normalmente supera los 300 gr/m².

El gráfico de la Fig. 1 muestra para un pH=6,1 un desgaste del cinc de 183,9 gr/m², por año, lo que implica que la vida útil sería de 1,36 años (1 año 4 meses). Esta cifra se aproxima bastante a los valores prácticos analizados. Además debe considerarse que no hay certeza de la permanencia de los alambres en agua a través del tiempo y que los alambres que están en las partes más profundas de los canales son los que han perdido el cinc en menor tiempo.

Las aguas de los ríos donde se encuentran las obras estudiadas se pueden clasificar como blandas (Laja) y moderadamente blandas (Maule y Teno) con un contenido muy bajo de iones despolarizantes (Cl⁻ y SO₄⁼) y ausencia de cobre. El índice de saturación de Langelier indica que las aguas son agresivas (índice negativo).

Por otra parte, se han inspeccionado gaviones ubicados en zonas de gran turbulencia, lo que implica un alto contenido de oxígeno disuelto que acelera el proceso corrosivo tanto generalizado como por picaduras.

Este tipo de corrosión conduce a una picadura cubierta con una pústula de orin que en su fondo y núcleo contiene un producto de corrosión de color negro tipo Fe₃O₄ y en su superficie externa una cascarilla roja de Fe O (OH). (Foto N° 1)

Además se ha encontrado, en alambres sumergidos en bocatomas Laja y Obras de Distribución, formación de lamelas, lo que sería responsable del origen de las picaduras encontradas.

5.2 Estimación de la velocidad de desgaste del acero

5.2.1 Según diagrama de Pourbaix (Pourbaix, 1963)

Con los valores de potencia (E (V) entre 0,0 y 0,4 V) y pH medidos se estimó que la velocidad de corrosión del hierro es mayor que 3 mm/año según el diagrama experimental del sistema Fe-H₂O de M. Pourbaix que se muestra en la Fig. 5. La velocidad de corrosión deducida de este diagrama no considera el efecto retardador de ésta por formación de productos de corrosión insolubles del hierro y de eventual formación de herrumbre calcárea.

5.2.2 Según contenido de oxígeno

De análisis químicos correspondientes a las aguas del río Maule en Armerillo y Central Antuco se encontró que el agua puede contener de 9 a 10 mg/l de oxígeno disuelto que equivalen aproximadamente a 7.64 ml de oxígeno/litro. Estas muestras fueron tomadas en el cauce natural y no aguas abajo de obras que producen gran turbulencia donde el oxígeno disuelto será mayor.

Con esta concentración se deduce del gráfico de la Fig. 3 que la velocidad de corrosión del hierro es de 60 mdd aproximadamente, lo que equivale a un desgaste de 0.278 mm/año, si se considera la densidad del acero igual a 7.85 gr/cm³.

5.2.3 Según el pH

El desgaste del acero según el pH de las aguas muestreadas en terreno se deduce de la Fig. 4. La velocidad de desgaste resulta ser de aproximadamente 55 mdd lo que equivale a 0.254 mm/año.

5.2.4 Según el cambio de diámetro de los alambres

La velocidad de corrosión del acero de acuerdo a la reducción del diámetro que han experimentado los alambres durante su tiempo de exposición en las aguas de los ríos estudiados varía entre 0.02 y 1.2 mm por año.

Si se consideran los parámetros químicos (pH y contenido de oxígeno) medidos resulta, como ya está dicho, una velocidad de corrosión de 0.254 mm/año (deducido de los antecedentes experimentales contenidos en la literatura técnica).

En esas condiciones un alambre de diámetro D (mm) perdería la mitad de su diámetro en un tiempo igual a:

$$T = \frac{D}{2 \times 0,254} = 2 D \text{ (años)}$$

6.- CONCLUSIONES

- Las aguas examinadas son agresivas para el cinc y el acero.
 - El cinc tiene un excelente comportamiento a la acción atmosférica de los lugares examinados.
 - La vida útil del cincado es de 1,4 años según antecedentes de literatura y variable entre 0,5 y 3,9 años según datos prácticos.
 - El acero se corroe, de acuerdo con antecedentes bibliográficos, con una velocidad media aproximada de 0,26 mm/año que varía según el contenido de oxígeno y el valor del pH de las aguas examinadas.
 - La velocidad de corrosión del acero de las muestras analizadas fluctúa entre 0,02 mm/año a 1,2 mm/año.
 - Las formas de corrosión detectadas en los alambres son: generalizada, por socavación y por picaduras.
 - Los alambres galvanizados no son recomendables para obras fluviales o hidráulicas definitivas.
 - El uso de alambres cubiertos con PVC en aguas sin arrastre o la protección de las mallas con hormigón proyectado ayuda a aumentar la vida útil de las estructuras.
 - Es de vital importancia continuar el seguimiento de las obras construidas con gaviones, para obtener información de su comportamiento en las condiciones imperantes en los ríos chilenos.
- ## 7.- BIBLIOGRAFIA
- MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS. DIRECCION DE VIALIDAD. DEPARTAMENTO DE OBRAS FLUVIALES. (1985) "Estudio de Corrosión en gaviones del río Mapocho".
 - EMPRESA NACIONAL DE ELECTRICIDAD S.A. (1987). "Estudio de Corrosión de Gaviones".
 - UHLIG HERBERT H. (1971) "Corrosion and Corrosion Control. Ed. John Wiley and Sons Inc.
 - SCULLY J.C. (1970). "Fundamentos de Corrosión". Ed. Alambra.
 - BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1982). "Specifications for Testing Zinc Coating on Steel Wire on quality requirements (BS 443)".

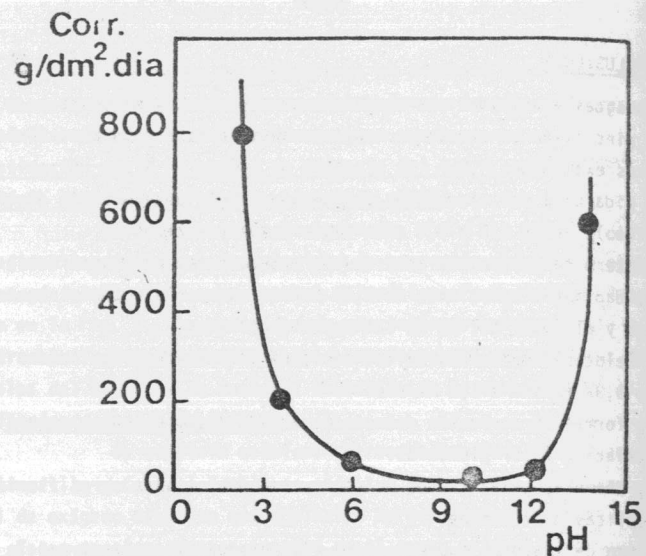


Fig. 1 Efecto del pH sobre la velocidad de corrosión de cinc.

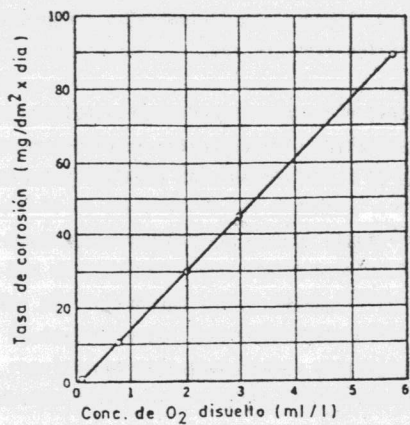


Fig. 2 Efecto de la concentración del oxígeno en la corrosión del acero dulce en agua que contiene 165 mg/l de CaCl₂ (48 h de prueba a 25 grados C). El electrolito en movimiento lento.

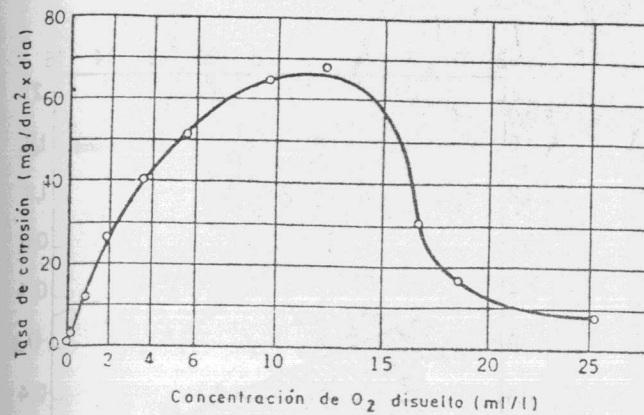


Fig. 3 Efecto de la concentración de oxígeno en la corrosión del acero dulce en agua destilada con movimiento lento (48 h de prueba a 25 grados C)

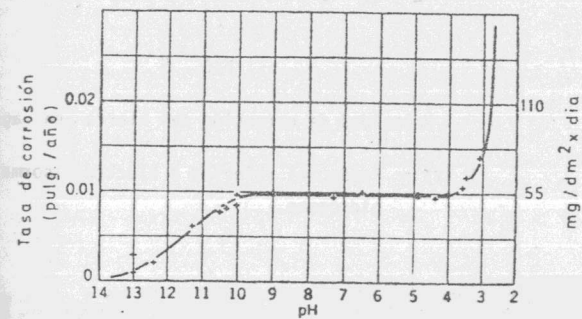


Fig. 4 Efecto del pH sobre la corrosión del hierro en agua blanda aireada a temperatura ambiente.

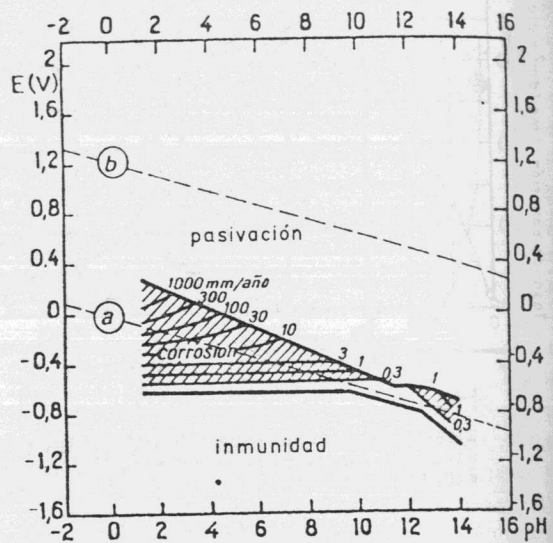


FIG. 5

Velocidad de corrosión del hierro en agua

E (V) = Potencial referido a electrodo normal de hidrógeno.



FOTO N° 1

Corrosión por picadura (pitting). Muestra obtenida después de estar 1 año permanentemente bajo agua.



FOTO N° 2

Corrosión con fuerte pérdida de material. Alambres humedecidos permanentemente durante 6 años.