

## **CORROSIÓN DEL ACERO INOXIDABLE 304 COMO REFUERZO EN CONCRETO EXPUESTO A CLORUROS Y SULFATOS**

### **Corrosion of stainless steel 304 like reinforcement concrete exposed to chlorides and sulphates**

#### **RESUMEN**

Se evaluó la corrosión del acero inoxidable 304 y el acero 1018, embebidos en especímenes de concreto elaborados en base a las normas ASTM C470-87 y C192-81. Se elaboraron concretos de relación a/c, 0.45 y 0.65. Los especímenes estuvieron expuestos 66 semanas en dos medios agresivos, soluciones al 3.5 % de NaCl y 3.5% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La evaluación fue mediante la técnica de Resistencia a la Polarización (Rp), medición del potencial de corrosión (E<sub>corr</sub>), norma ASTM C-876-91. Los resultados demuestran una resistencia a la corrosión del acero 304 en ambos medios muy superior a la del acero 1018.

**PALABRAS CLAVES:** Concreto, Corrosión, Acero Inoxidable, Cloruros, Sulfatos

#### **ABSTRACT**

*It's evaluated the corrosion of 304 stainless steel and steel 1018, embedded in elaborated specimens of concrete on the basis of norms ASTM C470-87 and C192-81. Were elaborated concrete of ration a/c, 0.45 and 0.65 . The specimens were exposed 66 weeks in two aggressive means, solutions to 3,5% of NaCl and 3,5% of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. The evaluation was made by the technique of Resistance to the Polarization (Rp), measurement of the corrosion potential (E<sub>corr</sub>) in agreement norm ASTM C-876-91. The results far beyond demonstrate a resistance to the corrosion of steel 304 in both means the one steel 1018.*

**KEYWORDS:** Concrete, Corrosion, Stainless Steel, Chlorides, Sulphates

#### **MIGUEL BALTAZAR**

Ingeniero Civil, Ph. D.  
Profesor Investigador  
FIC-Xalapa UV  
mbaltazar@uv.mx

#### **FACUNDO ALMERAYA**

Ingeniero Metalúrgico, Ph.D.  
Investigador  
CIMAV, S.C.  
facundo.almeraya@cimav.edu.mx

#### **DEMETRIO NIEVES**

Ingeniero Civil, Ph.D.  
Profesor Investigador  
FIANS, UAT  
dnieves@uat.mx

#### **ADAN BORUNDA**

Ingeniero Metalúrgico, M. Sc  
Técnico Académico  
CIMAV, S.C.  
adan.borunda@cimav.edu.mx

#### **ERICK MALDONADO**

Ingeniero Civil, M. Sc.  
Estudiante de Doctorado  
CIMAV, S.C  
erick.maldonado@cimav.edu.mx

#### **ARTURO ORTIZ**

Ingeniero Civil, M. Sc.  
Profesor Investigador  
FIC-Xalapa UV  
arortiz@uv.mx

### **1. INTRODUCCIÓN**

La corrosión del acero de refuerzo es la causa más importante del deterioro prematuro de las estructuras de concreto reforzado [1]. En 1986 se estimó que más de 244,000 puentes en E.U.A con significado deterioro, siendo la causa principal la corrosión de las barras de refuerzo de las estructuras de concreto [2]. El SHRP de EUA estimó US \$2.000 millones para mantenimiento de puentes con problemas de corrosión [3]. Estudios en E.U.A por parte de la NACE muestran que para 1998 tan

solo en el territorio estadounidenses en lo que se refiere a puentes, los cálculos de costos directos anuales ascendían a US \$3.800 millones, esta cantidad solo para el reemplazo en los próximos 10 años de puentes con deficiencias estructurales[4].

Inicialmente el acero de refuerzo embebido en concreto está naturalmente protegido de la corrosión por la alta alcalinidad del medio que lo rodea, pH=12.2 o mayor. Sin embargo, debido al comportamiento como una membrana semipermeable del concreto se da el ingreso

de sustancias o iones agresivos (cloruros, sulfatos) [5][6]. A diferencia de las acciones correctivas o secundarias, como uso de inhibidores de corrosión, cubierta epóxica de las varillas, removimiento electroquímica de los cloruros, y que en ocasiones han fallado en proveer protección satisfactoria para el acero de refuerzo [7], el utilizar el acero inoxidable como refuerzo se considera una acción preventiva, para estructuras que estén expuestas a medios agresivos, como muelles, puentes, edificios, lo que traería como resultado un periodo de vida útil o de servicio mayor y con ello una reducción en los costos de mantenimiento preventivo y correctivo[8].

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales para la elaboración del concreto

- Cemento Ornidario CPO 30R
- Agregado Grueso: Árido silicio triturado de 19mm, Peso específico (Ss) = 2.76, Absorción = 0.5%
- Agregado fino: Arena cuarzosa, Modulo de Finura (MF)= 3.5, Peso específico (Ss)= 2.63, Absorción= 2.2 %
- Agua: Potable

### 2.2 Diseño de mezclas y elaboración de especímenes

Se diseñaron dos diferentes mezclas de concreto con relación agua/cemento = 0.45 y 0.65 [9] la tabla 1 muestra la dosificación de ambas. Los especímenes (cilindros de concreto 15x30cm), se elaboraron en base a las Normas ASTM C470-87 y C192-81.

Materiales Kg	Rel. a/c 0.45	Rel. a/c 0.65
Agua	209	209
Cemento	456	316
Grava	1035	1035
Arena	664	807

Tabla 1. Dosificación de las mezclas de concreto

### 2.3 Características del acero de refuerzo

En cada espécimen se embebieron dos varillas de acero 1018 y 304, como electrodos de trabajo y auxiliar, colocándoles una franja de 5 cm. de cinta de fluorocarbono en la parte superior, para evitar que se presenten zonas de aeración diferencial, concentración de sales o corrosión por hendidura [10], además se pintaron con pintura epóxica para tener un área determinada susceptible a la corrosión, ver figura 1. Las varillas presentaba diferentes condiciones superficiales (Limpia, Expuesta al Ambiente y Contaminada), y acero inoxidable 304

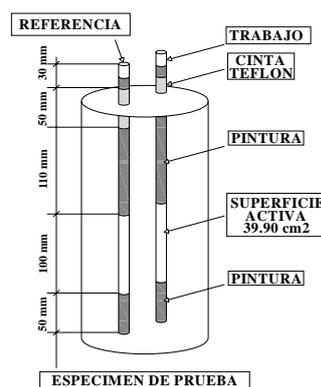


Figura 1. Especimen de concreto

### 2.4 Descripción de la nomenclatura

Para la identificación de los diferentes parámetros de estudio, se asignó una nomenclatura a cada espécimen, ver tabla 2, los números y letras se refieren:

- 4 y 6 a la relación a/c 0.45 y 0.65
- R a la técnica Resistencia a la Polarización.
- 1 Limpia 1018, 2 Expuesta al ambiente 1018,
- 3 Contaminada 1018, 4 Limpia 304
- N exposición en solución al 3.5% de NaCl
- S exposición en solución al 3.5% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Solución al 3.5 % de NaCl	Solución al 3.5 % de Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
4R1N	4R1S
4R2N	4R2S
4R3N	4R3S
4R4N	4R4S
6R1N	6R1S
6R2N	6R2S
6R3N	6R3S
6R4N	6R4S

Tabla 2. Nomenclatura de los especímenes

### 2.5 Arreglo de la Celda Electroquímica

Los especímenes estuvieron expuestos en dos medios agresivos solución al 3.5 % NaCl y al 3.5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, por un periodo de 66 semanas, para llevar a cabo la evaluación de la cinética de corrosión se empleó la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal (Rp), el valor de resistencia obtenido por esta técnica se define como la resistencia de un espécimen a la oxidación durante la aplicación de un potencial externo, La velocidad de corrosión está relacionada directamente con la Rp y se puede calcular de ella. Además esta técnica se encuentra fundamentada en la ecuación de Butler-Volmer [11]. ; los datos se obtuvieron con un barrido  $\pm 20$  mV vs. E<sub>corr</sub> y una velocidad de barrido de 10 mV/min, el equipo que se ocupó

para realizar dichas pruebas fue un Gill AC Potenciostato/Galvanostato/ZRA ACM Instruments; además se utilizó un electrodo de referencia cobre-sulfato de cobre, Cu/CuSO<sub>4</sub>; los potenciales de corrosión se midieron en base a la norma ASTM C-876-91. El arreglo experimental se muestra en la figura 2.

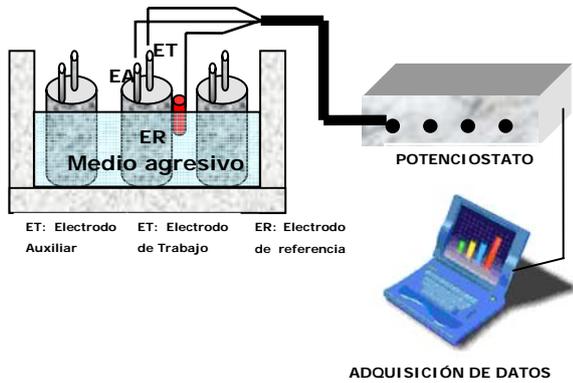


Figura 2. Celda Electroquímica de Experimentación

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Especímenes expuestos a cloruros

##### Potenciales de Corrosión

El monitoreo de potencial de media celda en los especímenes fue en la zona del centro como lo recomienda la literatura [11]. La interpretación de los valores de los potenciales de corrosión fue en base a la Norma ASTM C876-91[12], ver tabla 3.

Potenciales de corrosión Norma ASMT C876-91	
Potenciales más positivos que -200 mV	Riesgo de que ocurra corrosión es del 10%;
Si esta entre -200 y -350 mV	se tiene una incertidumbre
Si son más negativos que -350 mV	se tendrá una probabilidad del 90% de que se esté corroyendo el acero

Tabla 3. Potenciales de corrosión en concreto reforzado.

En la figura nos indica el comportamiento de los potenciales de corrosión de los diferentes especímenes en estudio, los especímenes con acero inoxidable, varían entre -200 y -250 mV, que de acuerdo a la norma de la ASTM 876 nos indica que se tiene una incertidumbre de que se este presentando corrosión, esto se debe a la película pasiva estable de gran resistencia que se forma gracias a la presencia del cromo principalmente [13].

En los especímenes con acero 1018 se tiene una influencia importante de la relación agua/cemento,

teniéndose para los especímenes de 0.65, que con el paso del tiempo su tendencia es de ser más negativos lo que indica de acuerdo a la norma ASTM C876-91 que se tiene una probabilidad de 90% de que se este corroyendo el acero. Una resistencia mayor la presentan los especímenes de relación 0.45 con potenciales de -350 a -150 mV, con una incertidumbre y 10% de probabilidad de corrosión. En los especímenes de relación 0.65 no influye la condición superficial, reportando para la semana 66 valores de -500 mV los tres estados superficiales.

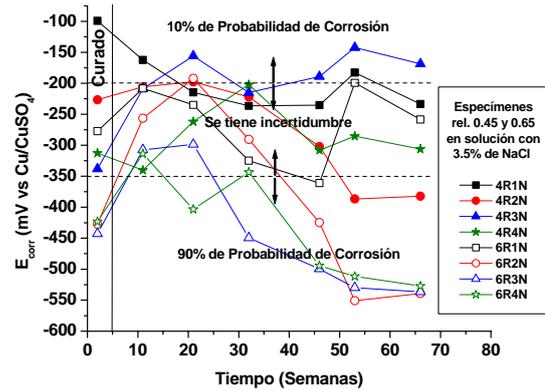


Figura 3. Potenciales especímenes en NaCl al 3.5%.

##### Resistencia a la Polarización Lineal.

En la figura 4 se observa en los especímenes con acero 304, una curva prácticamente perpendicular, lo que indica una muy baja cinética de corrosión. Los especímenes 4R2N y 6R2N presentaron unas curvas con menor demanda de corriente, indicando una cinética de corrosión menor que los especímenes 4R3N, 4R4N, 6R3N y 6R4N.

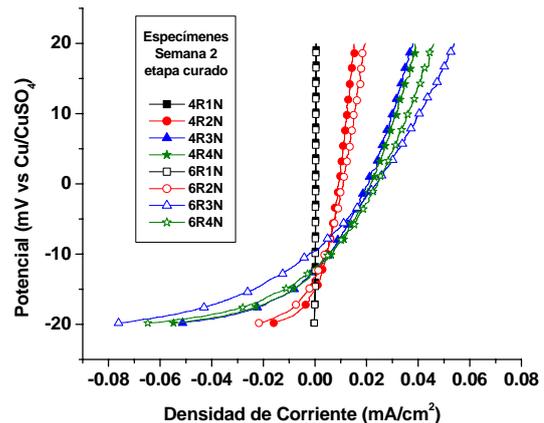


Figura 4. Curvas Rp, especímenes a solución de NaCl

De la figura 5 se tiene que los especímenes con acero inoxidable, presentan una demanda de corriente despreciable, curvas verticales, asociado a un estado pasivo del material, mostrando una gran resistencia al medio agresivo. En los especímenes con acero 1018, se

identifica una influencia determinante de la relación agua/cemento en la cinética de corrosión siendo directamente proporcional, a mayor relación mayor velocidad de corrosión, curvas más verticales en los especímenes de relación 0.45 y más inclinadas en los de 0.65, los valores de  $i_{corr}$  correspondientes a estas curvas se muestran en la tabla 3.

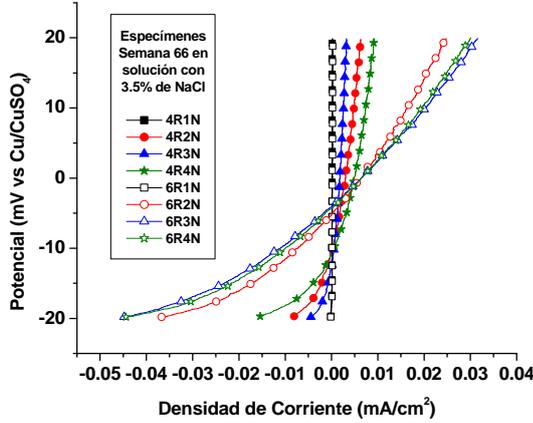


Figura 5. Curvas Rp semana 66 de exposición en solución NaCl

Especímenes	E <sub>corr</sub> (mV)	Rp ohms	i <sub>corr</sub> (mA/cm2)
4R1N	-233	245226.70	0.00011
4R2N	-382	4247.73	0.00614
4R3N	-168	8255.26	0.00316
4R4N	-306	2475.34	0.01050
6R1N	-232	154759.20	0.00017
6R2N	-539	924.76	0.02821
6R3N	-537	724.82	0.03599
6R4N	-527	764.83	0.03411

Tabla 3. Parámetros electroquímicos figura 5

### 3.2 Especímenes expuestos a sulfatos

#### Potenciales de Corrosión

En la figura 6 los valores de potenciales de todos los especímenes, acero 1018 y 304, tienen una tendencia de ser más positivo al paso del periodo de exposición, con valores menores de -200 mV, lo que indican en base a la Norma ASTM C876-91, un 10% de riesgo que ocurra corrosión.

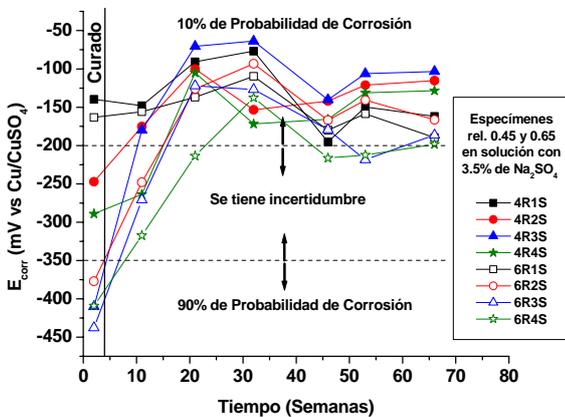


Figura 3. Potenciales especímenes en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 3.5%.  
**Resistencia a la Polarización Lineal.**

Se tiene en la figura 7, un comportamiento similar a los especímenes de la figura 4, debido a que las pruebas son de la etapa de curado, medio no contaminado.

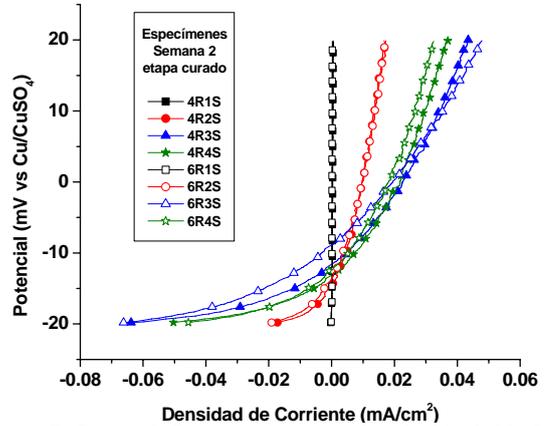


Figura 7. Curvas de Rp, especímenes para solución de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Se observa en la figura 6 que los especímenes con acero 304 presentan curvas verticales relacionadas con una demanda de corriente despreciable, y un comportamiento homogéneo en los especímenes con acero 1018, con unas curvas con tendencia vertical lo que indica una resistencia a la polarización mas alta que la de los especímenes en cloruros.

Al realizar un análisis visual no identifica una influencia determinante de la relación agua/cemento, ni de las condiciones superficiales del acero, pero al observar los datos reportados de cada espécimen en la tabla 4 se puede identificar la influencia del estado superficial del acero de refuerzo, teniendo los especímenes con acero 1018 contaminado los valores más altos de  $i_{corr}$ .

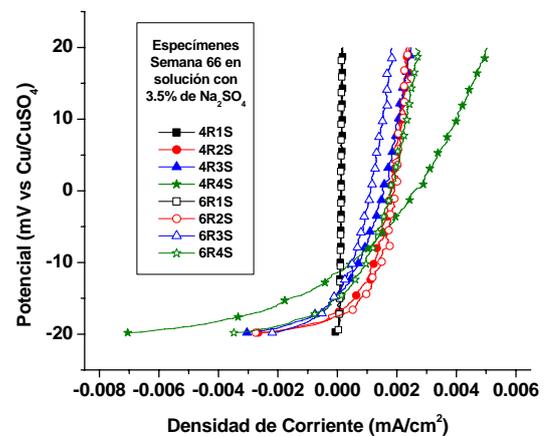


Figura 8. Curvas Rp semana 66 de exposición en solución Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Especímenes	E <sub>corr</sub> (mV)	R <sub>p</sub> ohms	i <sub>corr</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )
4R1S	-162	375722.00	0.00007
4R2S	-115	14517.09	0.00180
4R3S	-103	12431.10	0.00201
4R4S	-129	5120.87	0.00509
6R1S	-189	420975.60	0.00006
6R2S	-166	14547.29	0.00180
6R3S	-186	16775.02	0.00156
6R4S	-198	10854.37	0.00240

Tabla 4. Parámetros electroquímicos figura 8

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los potenciales de corrosión de los especímenes de relación a/c=0.65 con acero 1018 y expuestos a cloruros presentan 90% de probabilidad de corrosión.

La velocidad de corrosión en los especímenes con acero 1018 y expuestos a cloruros presentaron valores de cinética de corrosión en los de relación a/c = 0.65 de hasta 150 veces mayores que los de los especímenes con acero 304, y de 30 veces en los de relación 0.45.

En los especímenes con acero 1018 se observó una influencia determinante de la relación agua/cemento, tanto en los potenciales de corrosión como en las curvas de R<sub>p</sub>, presentando un mejor comportamiento contra la corrosión los especímenes de relación agua/cemento = 0.45.

Todos especímenes expuestos en sulfatos presentaron potenciales de corrosión más nobles (positivos), por arriba de -200 mV, lo que la norma ASTM 876 indica como un 10% de ocurra corrosión. No se observó influencia determinante de la relación agua/cemento.

La velocidad de corrosión en los especímenes con acero 1018 y expuestos a sulfatos presentaron valores de cinética de corrosión tanto en los de relación a/c = 0.65 y 0.45 de hasta 25 veces mayores que los de los especímenes con acero 304.

El acero inoxidable 304 como acero de refuerzo en concreto expuesto a cloruros y sulfatos como medios agresivos presenta una resistencia a la corrosión muy superior al acero 1018 comúnmente utilizado en las estructuras de concreto.

Se recomienda el uso inteligente del acero inoxidable en los elementos mas susceptibles a la corrosión de estructuras como puentes, muelles que estarán en contacto con medios altamente agresivos, como serían las zonas costeras, suelos contaminados, zonas industriales entre otros.

#### REFERENCIAS

- 1) Li, C.Q., Melchers, R.E., Lawanwisut, W. Magazine of Concrete Research; Vol. 57,2005 , p557
- 2) Trejo. D., Monteiro. P. and Gareth. T., "Mechanical properties and corrosion susceptibility of dual phase steel in concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 7, pp. 1245-1254, (1994).
- 3) Strategic Highway Research Program – Research Plans, Final Report, Technical Research Areas 43, TRA4-1-TRA4-60, May 1986.
- 4) Supplement to Materials Performance, 4, Julio 2002
- 5) Andrade C. Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, Vol XV. No. 4, 1984.
- 6) S.C. Kranc and A.A. Sagües; Polarization Current Distribution and Electrochemical Impedance Response of Reinforced Concrete When Using Guard Ring Electrodes, Electrochemica Acta, Vol. 38, No. 14 pp. 2055-2061, (1993).
- 7) Ping Gu, S. Elliot, J.J. Beaudoin and B. Arsenault, "Corrosion Resistance of Stainless Steel in Chloride Contaminated Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 8, pp. 1151-1156, (1996).
- 8) Comportamiento de la corrosion del acero 1018 e inoxidable en concreto expuesto a cloruros y sulfatos
- 9) Steven H. Kosmatka y William C. Panarese, "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", IMCYC 1992, pp. 91-95.
- 10) Baltazar M.A., "Corrosión por Sulfatos en Concreto Reforzado", U.A.CH, 2000.
- 11) Uruchurtu, Ch.J., Malo, M.J. y García O.E. "Técnicas Electroquímicas aplicadas al control y seguimiento de la corrosión". IMICORR. México, D.F. 1990.
- 12) Ibidem 10, pp. 54-55
- 13) Standard Test for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standars, C876-91, Vol. 04.02, Philadelphia (1992).
- 14) Inchaurrea, A., Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor, Propiedades, Transformaciones y Normas, LIMUSA, pp. 227-228.