

# Influencia del estado superficial del acero en la corrosión del acero de refuerzo del hormigón expuesto en ambientes marinos

## *Effect of steel surface conditions on reinforcing steel corrosion in concrete exposed to marine environments*

E. ANZOLA, R. MALAVÉ, A. CONTRERAS, M. RIVERO, H. BOLOGNINI, M. ROJAS, I. REYES

Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado

Persona de contacto/Corresponding author: rmalave@ucla.edu.ve

Fecha de recepción: 5-V-04

Fecha de aceptación: 21-I-05

VENEZUELA

### RESUMEN

En el contexto de esta investigación, se tomaron en consideración métodos y ensayos experimentales de laboratorio, que permiten hacer una evaluación de la corrosión del hormigón armado expuesto en ambientes marinos. Por una parte se evaluó el comportamiento electroquímico de dos condiciones de estados superficiales del acero embebido en el hormigón, exponiéndolo en un ambiente marino simulado y, por otra parte, se estudió la adherencia entre el acero y el hormigón, con los mismos estados superficiales usados para la evaluación electroquímica. Las probetas se fabricaron de hormigón con acero de refuerzo en su interior, adecuándolas para realizar los ensayos de potenciales de corrosión y velocidades de corrosión. Para la evaluación de la adherencia acero/hormigón se elaboraron 56 probetas cilíndricas de 7x15 cm con acero de 3/8" y 11,5 cm de longitud de anclaje, las cuales previamente fueron expuestas al ambiente natural marino durante 28 y 190 días. Todas las probetas fueron elaboradas con hormigón premezclado. De los resultados de la evaluación de la corrosión según el estado superficial del acero de refuerzo, se puede concluir que tras de disolver el óxido que se encontraba inicialmente sobre la superficie, la alcalinidad del cemento logró pasivar el acero. El estudio de adherencia indica como resultado que la capa de óxido formada por el deterioro del acero contribuye a una mayor adherencia.

**PALABRAS CLAVE:** corrosión, estado superficial, acero, hormigón, adherencia.

### 1. INTRODUCCIÓN

La corrosión es un fenómeno que ataca de forma destructiva las estructuras de hormigón armado, siendo éste uno de los principales factores causantes de la disminución o acortamiento de la vida útil, durabilidad y funcionamiento de las mismas.

Este proceso de corrosión se presenta con mayor frecuencia en ambientes agresivos y zonas costeras, debido a la presencia de cloruros existentes en la atmósfera, unido

### SUMMARY

Laboratory methods and experimental tests were deployed in the present study to evaluate corrosion in reinforced concrete exposed to marine environments. Reinforcing steel exhibiting two different surface conditions prior to embedment in concrete were studied, one the one hand to assess the electrochemical behaviour of the bars during exposure of the concrete specimens to a simulated marine environment, and on the other to determine the strength of the steel / concrete bond. The reinforced concrete specimens prepared were adapted as required for electrochemical potential and corrosion rate testing. A total of 56 7x15-cm cylindrical specimens containing 3/8" steel rods anchored at a depth of 11.5 cm were made to evaluate the steel / concrete bond and exposed to a natural marine environment for 28 or 190 days prior to testing. All the specimens were made with ready-mixed concrete. It may be concluded from the results of the corrosion tests on reinforcing steel with different surface conditions that the oxide initially covering the bars was dissolved and the steel passivated by the alkalinity in the concrete. The chief finding of the bonding study was that the layer of oxide formed in pre-embedment steel deterioration contributed to establishing a better bond.

**KEYWORDS:** corrosion, surface condition, steel, concrete, bonding.

### 1. INTRODUCTION

Corrosion, a process that destroys reinforced concrete structures, is one of the chief causes of the shortening of their useful life, durability and serviceability.

Corrosion appears more frequently in aggressive environments and coastal areas due to the presence of chlorides in the atmosphere, a condition that may be

además a las prácticas constructivas desligadas de las condiciones ambientales, a los materiales utilizados y al desconocimiento o incumplimiento de normas que se deben seguir durante la ejecución. Se puede citar entre alguna de las prácticas comunes, el inadecuado estado superficial del acero de refuerzo utilizado en las obras, el cual influye significativamente en la adherencia acero/hormigón y, por consiguiente, en la vida útil de la estructura (1-4).

A continuación presentamos un estudio realizado en el eje costero Centrooccidental venezolano (Tucacas-Chichiriviche) sobre los diferentes estados superficiales del acero de refuerzo utilizados en elementos de hormigón armado. Por lo que se planteó como objetivo general evaluar el comportamiento del hormigón en cuanto a la resistencia a la corrosión y la adherencia del hormigón/acero con materiales y condiciones de trabajo, generalmente usadas en la zona.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales

Los materiales utilizados para la elaboración de las probetas provienen de la zona costera seleccionada como sitio de estudio, esto es el eje Tucacas-Chichiriviche de Venezuela. Las probetas fueron elaboradas con hormigón premezclado y se encuentran compuestas por cemento Portland Tipo I, áridos de la zona en estudio, agua potable proveniente del abastecimiento de la localidad y un aditivo plastificante de alto rango. Según información de la planta premezcladora la resistencia de diseño fue de 25 MPa y una relación agua/cemento de 0,65, se desconoce el contenido de cemento, siendo este diseño el más solicitado para las edificaciones. En las probetas se empleó acero al carbono con un esfuerzo de cedencia de 42 MPa y de diámetro 3/8".

### 2.2. Variable en estudio

Se tipificaron dos estados superficiales para el acero de refuerzo, según el tiempo de exposición al ambiente natural marino antes de ser usadas en el hormigón, con el fin de simular las condiciones del acero más usadas en las construcciones de la zona. Los cuales se identifican en la Tabla 1.

### 2.3. Evaluación del comportamiento electroquímico de los dos estados superficiales

#### 2.3.1. Elaboración de probetas

Se elaboraron 22 probetas de hormigón armado cilíndricas de 10x20 cm, con acero de 3/8" en su interior y electrodos de grafito para efectuar los ensayos electroquímicos

aggravated by a number of other factors, including construction practice unsuited to environmental conditions, the use of inappropriate materials and the unawareness of or non-compliance with building codes and standards. One common practice that may be cited in this regard is the use of reinforcing steel with inappropriate surface conditions, which has a significant effect on the steel/concrete bond and therefore on the service life of structures (1-4).

*A description follows of a study conducted on the reinforcing steel, and more specifically different surface conditions of the material, used along the western-central coast of Venezuela (from Tucacas to Chichiriviche) to reinforce concrete members. The overall aim of this study was to evaluate concrete corrosion resistance and steel / concrete bond strength, using the materials and working procedures prevailing in the area.*

## 2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

### 2. 1. Materials

*The materials used to make the specimens were acquired in the area selected as the site of the study, namely the western coast of Venezuela, between Tucacas and Chichiriviche. The concrete in the ready-mixed specimens comprised Type I Portland cement, local aggregate, water from the municipal water supply and a super-plastifying admixture. According to the information provided by the mixing plant, the design strength was 25 MPa and the water / cement ratio 0.65, although the cement content was not specified. This is the design most commonly used by local builders. The specimens were reinforced with 3/8" carbon steel bars with a yield strength of 42 MPa.*

### 2.2. Variable studied

*The two surface conditions defined for the reinforcing steel differed in the length of pre-embedment exposure to the natural marine environment; these exposure times simulated the conditions to which such steel is commonly subjected in the area, as summarized in Table 1.*

### 2.3. Evaluation of the electrochemical behaviour of the two surface conditions

#### 2.3.1. Making specimens

*Twenty two cylindrical concrete specimens were made for each surface condition; the specimens, measuring 10x20 cm, were reinforced with 3/8" steel bars and fitted with graphite electrodes under a 5-cm cover of concrete*

TABLA 1/*TABLE 1*  
 Especificación de los estados superficiales del acero de refuerzo en estudio  
*Surface conditions of the reinforcing steel studied*

Tiempo de exposición del acero de refuerzo <i>Exposure time</i>	Estado superficial <i>Surface condition</i>	Nomenclatura <i>Nomenclature</i>
1 semana / <i>1 week</i>	Sano / <i>healthy</i>	I
1 año / <i>1 year</i>	Daños significativos / <i>Significant damage</i>	II

con un recubrimiento de 5 cm, para cada estado superficial del acero. Una vez fraguadas las probetas, fueron expuestas por 28 días al ambiente natural marino, luego fueron llevadas al laboratorio y se inicio un proceso de exposición acelerado en solución salina al 3,5 % de NaCl por 635 días sumergiéndolas a 1/3 de su altura.

### 2.3.2. Ensayos realizados

Para efectuar la evaluación electroquímica se realizó un seguimiento de las propiedades electroquímicas del acero a través de mediciones de potencial y de velocidades de corrosión.

#### 2.3.3. Medición de potenciales

Este ensayo determina la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de las armaduras y el electrodo de referencia colocado en contacto con la superficie del hormigón (5), se realizó cada siete (7) días de exposición. Se empleó para la medición un multímetro digital modelo WAVETEK DM27XT, con un electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub> (cobre / sulfato de cobre) durante 635 días, siguiendo la norma ASTM C876-87(6).

#### 2.3.4. Velocidad de corrosión

Para medir la velocidad de corrosión se utilizó la técnica de resistencia a la polarización o Polarización Lineal a través de un potenciómetro 263 A. Dicha técnica se fundamenta en la medida de la resistencia aparente de una celda de ensayo cuando un electrodo se polariza anódica y catódicamente con un valor sobrepotencial de 20 mV. La resistencia aparente se determina midiendo la corriente eléctrica drenada y el potencial aplicado externamente y la misma es inversamente proporcional a la densidad de la corriente o velocidad de corrosión (7). Para ello se utiliza una expresión matemática que calcula la velocidad de corrosión, como se define a continuación:

$$I_{corr} = B/R_p \quad [1]$$

donde:

$I_{corr}$  = Velocidad de corrosión ( $\mu A/cm^2$ )

B = Constante (26 mV-52 mV)

$R_p$  = Resistencia a la polarización en  $\Omega \cdot cm^2$

*for the electrochemical tests. Once the concrete had set, the specimens were exposed to the natural marine environment for 28 days and then taken to the laboratory for an accelerated weathering process consisting of immersion, up to one third of their height, in a 3.5% NaCl solution for 635 days.*

#### 2.3.2. Tests conducted

*The electrochemical properties of the steel were monitored by measuring the corrosion potential and rate.*

#### 2.3.3. Measuring corrosion potential

*This test determines the difference in the electrochemical potential between the reinforcing steel and the reference electrode in contact with the surface of the concrete (5); readings were taken weekly. Measurements were taken with a WAVETEK DM27XT digital multimeter using a Cu/CuSO<sub>4</sub> (copper/copper sulphate) reference electrode throughout the 635-day test period, as specified in standard ASTM C876-87 (6).*

#### 2.3.4. Corrosion rate

*Linear polarization techniques were used to measure the corrosion rate with a 263A potentiostat. This technique is based on the measurement of the apparent resistance of a test cell when an electrode is subjected to anodic and cathodic polarization at an overpotential of 20 mV. The apparent resistance, determined by measuring the drain current and the electrochemical potential externally applied, is inversely proportional to the current density or corrosion rate (7), which is calculated from the following mathematical expression:*

$$I_{corr} = B/R_p \quad [1]$$

where:

$I_{corr}$  = Corrosion rate ( $\mu A /cm^2$ )

B = Constant (26 mV-52 mV)

$R_p$  = Polarization resistance in  $\Omega \cdot cm^2$

Las mediciones se llevaron a cabo cada 15 días de exposición en el ambiente agresivo simulado.

### 2.3.5. Inspección visual

Al final de la exposición se cortaron todas las probetas longitudinalmente, se extrajo el acero de refuerzo y se observaron las condiciones físicas del mismo.

### 2.3.6. Estudio de la adherencia acero/hormigón para dos estados superficiales del acero de refuerzo

Un método para obtener estos valores consiste en medir la fuerza aplicada y asumir una distribución uniforme de la tensión, esto sólo es posible para pequeñas longitudes de anclaje. En el caso de longitudes mayores la tensión de la adherencia local y el deslizamiento varían considerablemente a lo largo de la barra de acero y los resultados de los ensayos pueden ser difíciles de evaluar. En este último caso, la tensión de adherencia local y el deslizamiento se determinan indirectamente midiendo la deformación del acero y desplazamiento final de la barra.

Este estudio se realiza bajo la teoría del ensayo pull-out (1) en el cual generalmente la longitud adherente se sitúa en el centro de una probeta prismática o cilíndrica de hormigón, de diferentes dimensiones, algunas veces relacionadas con el diámetro de la barra o simplemente un valor constante. El objetivo es medir el deslizamiento de la barra del extremo opuesto al que se aplica la carga, respecto de la superficie de la probeta de hormigón. Para tal fin, se elaboraron probetas cilíndricas de hormigón de 7 cm de diámetro y 15 cm de altura, en las cuales se coloca una varilla de acero en su interior de 3/8" de diámetro y 4,53" de longitud de anclaje, garantizando que la falla ocurra por adherencia y no por fluencia del acero, utilizando los dos estados superficiales en estudio. El método de ensayo seguido es una adaptación realizada en el Decanato de Ingeniería Civil de la UCLA (8). El número de probetas elaboradas fue 56, 14 para cada estado superficial y tiempo de exposición, para ser ensayadas, luego de expuestas al ambiente natural, durante 28 y 190 días.

## 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 3.1. Evaluación del comportamiento electroquímico de los dos estados superficiales

#### 3.1.1. Medición de potenciales

Las medidas de potencial ofrecen información sobre la probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo de una estructura de hormigón armado. La norma ASTM C-876-87 (6), establece como criterio de valoración del potencial que mayores de -200 mV indican probabilidad de que el acero se esté corroyendo menos del 10%, po-

*Measurements were taken at 15-day intervals in the simulated aggressive environment.*

#### 2.3.5. Visual inspection

*At the end of the exposure period, all the specimens were split longitudinally to remove the reinforcing bars for inspection.*

#### 2.3.6. Study of steel/concrete bonding for two surface conditions of the reinforcing steel

*One method for obtaining these values consists in measuring the force applied and assuming uniform stress distribution, although this is only possible for very short anchorage lengths. Where greater lengths are involved, the considerable variations in local bonding and shear stress along the steel bar make the results difficult to interpret. In such cases, local bonding and shear stress are determined indirectly by measuring steel deformation and final slip.*

*In the pull-out technique (1) used in the present study the embedded end of the bar is generally positioned in the centre of a prismatic or cylindrical concrete specimen, either of standard dimensions or of a size that varying in keeping with the bar diameter. The object is to measure slip at the end of the bar opposite from where the load is applied, with respect to the surface of the concrete specimen. Cylindrical specimens measuring seven cm in diameter by fifteen cm high were prepared for this purpose. One 3/8" steel rod with one or the other of the two surface conditions studied was embedded in each of these specimens to a depth of 4.53" to guarantee that failure would be due to anchorage breakdown and not to steel deformation. The test method used is an adaptation designed at the UCLA School of Civil Engineering (8). A total of 56 specimens, fourteen per surface condition and exposure time, were prepared and tested after exposure to the natural environment for 28 or 190 days.*

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Evaluation of the electrochemical behaviour of the two surface conditions

#### 3.1.1. Measuring corrosion potential

*Electrochemical potential measurements provide information on the probability of reinforcing steel corrosion in reinforced concrete structures. According to standard ASTM C-876-87 (6), electrochemical potential values of over -200 mV indicate that the probability of steel corrosion is under 10%; values between -200 mV and -350 mV are indicative of fluctuation between*

tencial entre -200 mV y -350 mV indican una variación entre el estado pasivo y activo o zona de incertidumbre y potenciales menores a -350 mV indican un 90% de probabilidad de que exista corrosión en el acero.

Como se observa en la Figura 1, se registra una disminución progresiva de los potenciales, en los dos estados superficiales utilizados, pasando de un estado pasivo al inicio de la exposición, a un estado activo, habiendo ocurrido este cambio entre los 238 días y los 294 días de exposición para el estado superficial II y I respectivamente. Se observan ciertas oscilaciones pero siempre manteniéndose en estado activo hasta el corte del estudio a los 625 días, los dos están activos con  $E < -350$  mV, con potenciales menos negativos el estado superficial (I) estabilizado en -400 mV y el acero con un año de exposición (II) con potenciales en -570 mV. Esto indica una alta probabilidad de corrosión, según la valoración aplicada no observándose una diferencia significativa entre los dos estados superficiales de acero estudiados.

### 3.1.2. Velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión o intensidad de corrosión ( $i_{corr}$ ) permite establecer el nivel de corrosión de las armaduras. Los criterios de valoración utilizados (9) son los siguientes para valores de  $i_{corr}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ): < 0,1 el nivel de corrosión es despreciable, entre valores de 0,1 y 0,5  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  se considera corrosión moderada, para valores entre 0,5 y 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  el nivel de corrosión se considera elevado y, para valores mayores de 1  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , el nivel de corrosión es muy elevado.

En los resultados de este ensayo, Figura 2, se observa para el estado superficiales I, velocidades muy bajas desde el inicio hasta los 635 días del estudio lo anterior parecía no coincidir con los resultados obtenidos en la medición de potenciales, aunque se entiende que el potencial indica un valor cualitativo de la corrosión y sólo establece la probabilidad de la misma, en cambio la veloci-

*corrosion passivity and activity, i.e., probability is uncertain in this range; and where potentials of under -350 mV are observed, the probability of steel corrosion is over 90%.*

*Figure 1 shows that the electrochemical potential declined steadily in all specimens, regardless of the surface condition of the steel, with the change from initial passivity to corrosion activity recorded at 238 and 294 days for surface conditions II and I, respectively. Despite certain fluctuations, the values remained in the corrosion range through conclusion of the study after 635 days: the electrochemical potentials were less negative for surface condition (I), which stabilized at -400 mV, while the potential for the steel exposed to weathering for one year prior to embedment (II) declined to -570 mV. This indicates a high probability of corrosion, as described above, and no significant differences between the two surface conditions studied.*

### 3.1.2. Corrosion rate

*Corrosion rate or intensity ( $i_{corr}$ ) is a measure of the degree of reinforcement corrosion. The evaluation criteria used (9) were as follows: for  $i_{corr}$  values ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) < 0,1, corrosion is negligible; at values between 0,1 and 0,5  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , corrosion is regarded to be moderate; where values range from 0,5 to 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , corrosion is severe and values of over 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  corrosion indicate very severe corrosion.*

*The results for this trial given in Figure 2 show very low rates for surface condition I from the outset through the 635 days the study lasted, a finding that would appear to be at odds with the half-cell potential readings. Electrochemical potential, however, is a qualitative indication of the probability of corrosion, whereas the corrosion rate quantifies the activity or otherwise of that*

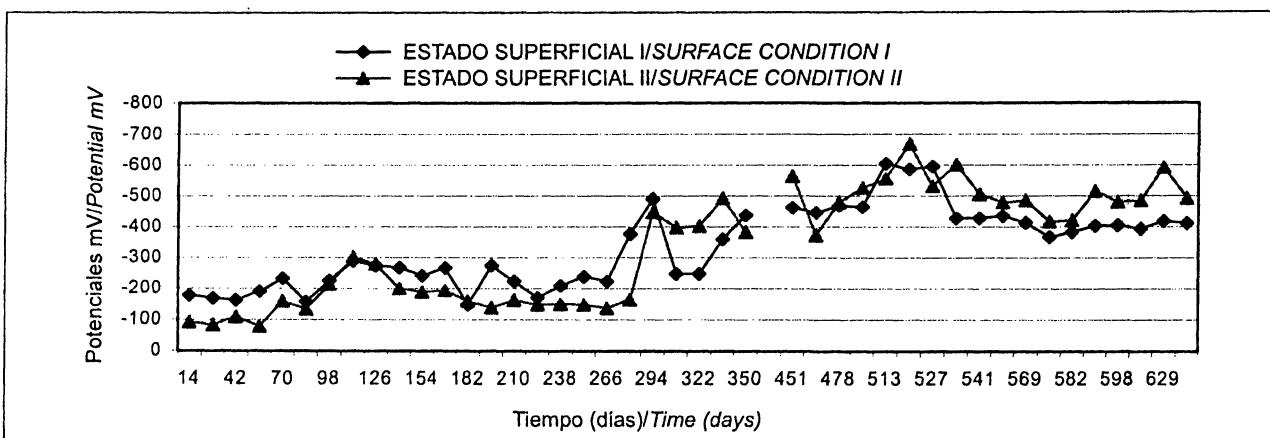


Figura 1.- Medición de potenciales.  
Figure 2.- Electrochemical potential readings.

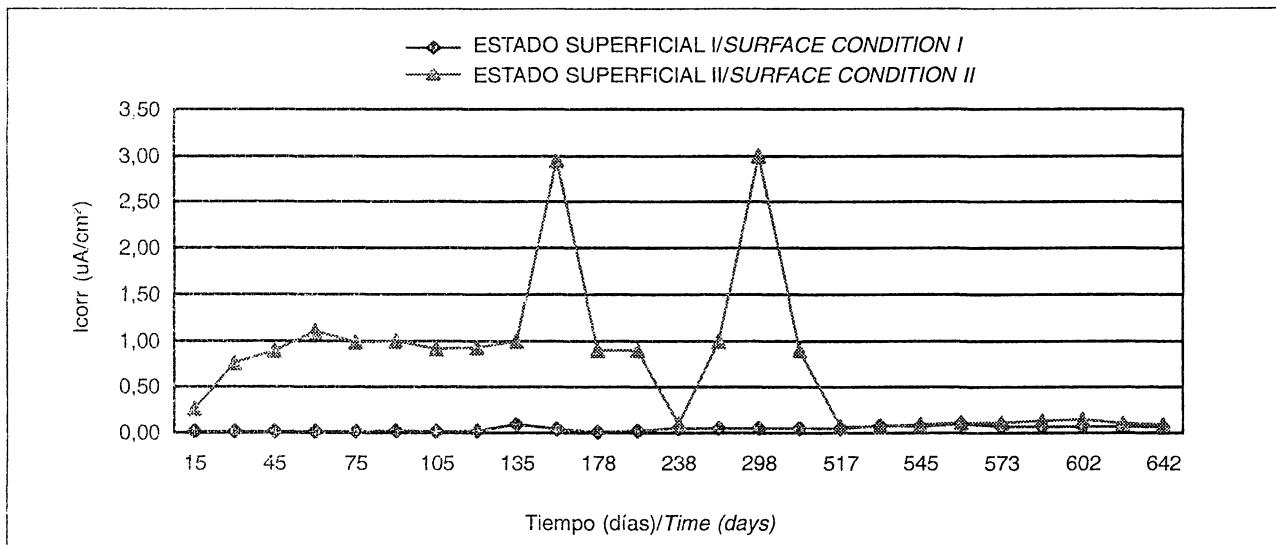


Figura 2.- Velocidad de corrosión. Vs-Tiempo.

Figure 2.- Corrosion rate Vs-Time.

dad de corrosión cuantifica la acción o no de dicho proceso. En tanto el estado superficial II, al inicio de la exposición presentó velocidades de corrosión altas y constantes de  $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  hasta los 135 días, luego se presentan fluctuaciones entre el estado de actividad y pasividad hasta estabilizarse a partir de los 517 días en valores muy bajos de  $0,1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  aproximadamente, analizando este comportamiento se entiende como un efecto de pasivación en el acero de refuerzo.

### 3.1.3. Inspección visual

La inspección visual fue realizada a las probetas con la finalidad de aclarar dudas sobre la contradicción de los resultados obtenidos en las mediciones de potenciales y en la velocidad de corrosión. Se pudo observar, después de haber concluido el período de exposición, que el estado superficial I presentó una apariencia sana, lo que indica que conservó sus condiciones iniciales. El estado superficial II presentó una apariencia sana con la que no se contaba antes de la elaboración de las probetas, esta observación ratifica los valores obtenidos en el ensayo de velocidad de corrosión. En función a estos resultados se puede concluir que el acero fue pasivado, al estar en contacto con el hormigón, éste disolvió la calamina existente y permitió la formación de la capa pasiva proveniente de los álcalis del cemento, en toda la longitud de las cabillas.

### 3.1.4. Estudio de la adherencia acero/hormigón para dos estados superficiales del acero de refuerzo

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los esfuerzos cortantes promedios últimos  $\tau$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) en la falla y el desplazamiento  $\delta$  (mm) obtenido en el momento del ensayo, para los dos estados superficiales estudiados a diferentes tiempos de exposición: a los 28 días (tiempo en el

process. Surface condition II, in turn, exhibited high and constant corrosion rates of  $1 \frac{1}{4}\text{A}/\text{cm}^2$  at the outset and through 135 days, followed by fluctuations between activity and passivity, to finally stabilize at very low values of approximately  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  after 517 days; this behaviour was interpreted to be the outcome of reinforcing steel passivation.

### 3.1.3. Visual inspection

The specimens were visually inspected to clarify doubts about the contradiction between the electrochemical potential readings and corrosion rate findings. The healthy appearance of the surface condition I bars after the exposure period was interpreted to mean that they had conserved their initial characteristics. The surface condition II bars looked healthier than when embedded in the specimens, an observation that ratified the corrosion rate findings. On the grounds of these results, it may be concluded that the steel was passivated on contact with the concrete: according to this interpretation, the existing rust would have been dissolved by the alkalis in the cement, which would have formed a passive protective layer along the entire length of the bars.

### 3.1.4. Study of steel/concrete bonding for the two surface conditions of the reinforcing steel

Table 2 gives the results for the mean ultimate shear stress values - $\tau$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )- and the slip  $\delta$  (mm) recorded at failure, for the two surface conditions studied after the two exposure times: 28 days (time in which concrete is expected to reach its design strength, in this case

TABLA 2/TABLE 2  
Resumen de esfuerzos adherentes y desplazamientos a diferentes tiempos de exposición  
*Bond stress and slip at different exposure times*

Estado superficial <i>Surface condition</i>	28 días de exposición <i>28 days of exposure</i>		190 días de exposición <i>190 days of exposure</i>	
	$\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)
I	52.89	9.90	69.02	10.07
II	72.37	9.65	80.72	14.35

cual se espera que el hormigón adquiera su resistencia de diseño, que, para este caso, fue de 250 kg/cm<sup>2</sup>) y a los 190 días. En ambos casos expuestos en el ambiente marino natural.

En los resultados de los ensayos de adherencia a los 28 días de exposición, se pudo observar que los esfuerzos y desplazamientos registrados al momento de la falla, indican que el estado superficial II obtuvo mayor esfuerzo que el I y un desplazamiento casi igual para las dos condiciones de estado superficial. Estos resultados estarían indicando la influencia que tiene la capa de óxido sobre la armadura en el incremento de la adherencia acero/hormigón.

A los 190 días de exposición, como se muestra en la Tabla 2. Se observa que el estado superficial II opuso mayor resistencia a la falla que el estado superficial I, posiblemente por la capa de óxido que presentaba el acero cuando fueron realizadas las probetas, la cual producen mayor adherencia entre el acero/hormigón, sin embargo, el estado superficial I, a pesar de haber alcanzado menor esfuerzo adherente que el II, el desplazamiento fue menor. Cabe destacar que el desplazamiento fue más grande para un mayor grado de deterioro presente en el acero al producirse la falla, a pesar de incrementarse el esfuerzo de adherencia.

Sin embargo, estos esfuerzos adherentes obtenidos para los dos estados superficiales estudiados, son superiores al esfuerzo límite de adherencia, igual a 25,5 kg/cm<sup>2</sup>, el cual se calcula según ACI 318-77(10), de la siguiente manera:

$$M = 4,67 \cdot \sqrt{f'c} / db \leq 370 \text{ psi (25,5 kg/cm}^2\text{)} \quad [2]$$

siendo  $f'c$  la resistencia del hormigón y  $db$  el diámetro de la cabilla.

#### 4. CONCLUSIONES

- El estado superficial (II) con inicio de corrosión fue pasivado, debido posiblemente a que el proceso de corrosión que se había iniciado en el acero antes del vaciado, al entrar en contacto con el hormigón, la alcalinidad del cemento disolvió el óxido presente y permitió la formación de la capa pasiva, en toda su longitud, pasivando el metal.

250 kg/cm<sup>2</sup>) and 190 days. In both cases the specimens were exposed to a natural marine environment

*The bonding test results after 28 days of exposure showed that, at failure, the surface condition II bars resisted greater stress than the condition I rods while slip was nearly identical for the two surface conditions. These findings provide evidence of the beneficial effect of the oxide that covered the reinforcing steel on the strength of the steel/concrete bond.*

*As Table 2 shows, after 190 days of exposure the surface condition II bars were more failure-resistant than the surface condition I rods, possibly because the steel/concrete bond was strengthened by the layer of oxide covering the former when the specimens were made. Nonetheless, despite the lower stress level, the slip recorded for the condition I bars was smaller than for the condition II steel. In other words, slip at failure was greater in the steel that was more deteriorated, despite its greater bond strength.*

*The bond strength values obtained for both surface conditions studied were, however, greater than the 25,5 kg/cm<sup>2</sup> ultimate bond stress calculated, in accordance with standard ACI 318-77 (10), from the following expression:*

$$M = 4,67 \cdot \sqrt{f'c} / db \leq 370 \text{ psi (25,5 kg/cm}^2\text{)} \quad [2]$$

*where  $f'c$  is concrete strength and  $db$  the diameter of the rod.*

#### 4. CONCLUSIONS

*- The surface condition II steel, in which corrosion had begun to appear, reached passivity, perhaps because when the initially corroded bars came into contact with the concrete, the alkalinity from the cement dissolved the oxide and passivated the steel along its entire length.*

- El estado superficial del acero de refuerzo del concreto con residuos de óxidos, por efecto de la corrosión del acero, no influye de manera negativa en la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, todo lo contrario se obtienen esfuerzos adherentes superiores, sin embargo pudo observarse desplazamientos mayores en los aceros con mayor tiempo de exposición al aire marino, y mayor en el que estaba precorroido.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la subvención y apoyo logístico para la ejecución de este trabajo al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) y al Decanato de Ingeniería Civil de la Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado (UCLA).

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Molina, M.; Gutiérrez, J.; García, M.; López, C.: *Ensayos tipo "PULL-OUT" modificado para determinar la adherencia hormigón-acero en elementos con recubrimientos deficientes*. COLLOQUIA 2001. Madrid 2001
- (2) García, A.: *Parcial capacidad resistente de vigas de hormigón armado con pérdida de adherencia entre hormigón y acero*. V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones, VII Congreso de Control de Calidad 1999. Montevideo 1999.
- (3) Bonini, L.; Isa, M. : *Concreto de alto desempenho aderencia com a armadura*. V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones, VII Congreso de Control de Calidad 1999
- (4) Isa, M.; Helene, P.: *Influencia da corrosão por cloretos na adherencia concreto armadura*. V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones, VII Congreso de Control de Calidad 1999. Montevideo 1999
- (5) González, J.; Andrade, C.: *La corrosión en estructuras de hormigón armado. Forma de evaluación y prevenirlas*. Revista Iberoamericana de la corrosión Vol. XI, nº. 3 (1980) 27-36
- (6) ASTM C876-87 *Half cell potentials in reinforcing steel in concrete*.
- (7) Troconis, O.; Sánchez M.: *Técnicas utilizadas para el monitoreo de corrosión en estructuras de concreto reforzada con acero*. I Simposio sobre estructuras de concreto armado, control de la corrosión y rehabilitación 1992. Maracaibo 1992
- (8) Contreras, A.; Rivero, M.: *Estudio de la adherencia y resistencia a la corrosión del concreto armado en función de diferentes estados superficiales del acero refuerzo*. Trabajo especial de grado optar al título de ingeniero civil. Decanato de ingeniería Civil. Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado. 2002.
- (9) Andrade, C.: "Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras". Instituto Eduardo Torroja. España, 1988.
- (10) ACI 318-77.

\* \* \*

- *The existence of surface corrosion in the reinforcing steel does not negatively impact the bond between the concrete and the steel: on the contrary, higher stress values were obtained with steel containing oxide residues. Nonetheless, greater slip was recorded in the steel exposed to a marine environment for longer periods of time, and these slip values were higher for the pre-corroded than the healthy steel.*

## ACKNOWLEDGEMENTS

*Funding for continuation of this project was provided by the Lisandro Alvarado Central Western University. The authors wish to thank the School of Civil Engineering Materials and Construction Chemistry Laboratory technicians for their support.*