

# Capacidad remanente en vigas de hormigón que presentan corrosión localizada en el acero de refuerzo

## *Remaining structural capacity of concrete beams with localized corrosion of the embedded reinforcing steel*

A. A. TORRES-ACOSTA <sup>(\*)</sup>, M. MARTÍNEZ-MADRID <sup>(\*)</sup>, A. MUÑOZ-NOVAL <sup>(\*\*)</sup>  
<sup>(\*)</sup> Instituto Mexicano del Transporte, México <sup>(\*\*)</sup> Universidad Marista de Querétaro

Fecha de recepción: 17-XII-02

Fecha de aceptación: 2-IV-03

MÉXICO

### RESUMEN

*Este trabajo presenta una investigación experimental que relaciona la pérdida de capacidad de carga por flexión en vigas de hormigón reforzado y la pérdida de acero debido a la corrosión localizada en el refuerzo. Se utilizaron en esta investigación vigas de hormigón (100x150x1.500 mm) con la parte central contaminada con cloruros, colocados éstos durante la fabricación del hormigón. Durante la etapa experimental se aceleró la corrosión del acero de refuerzo mediante la aplicación de una corriente anódica de 200  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  entre 48 y 183 días. Al finalizar el periodo de corrosión acelerada, las vigas fueron probadas por flexión, utilizando el método de aplicación de la carga en tres puntos. Además, se estimó la pérdida promedio de la penetración de la corrosión,  $x_{\text{PROM}}$  utilizando el método gravimétrico. Los resultados obtenidos a la fecha, presentaron una disminución del 20% en la resistencia a la flexión cuando la corrosión localizada obtenida fue de solamente un 14% de pérdida de radio.*

### SUMMARY

*This work presents an experimental investigation which correlates the flexure load capacity loss of reinforced concrete beams with the amount of steel cross section loss due to localized corrosion of the embedded steel. Concrete beams (100x150x1500 mm) with the central portion contaminated by chlorides, placed during mixing of the concrete, were used in this investigation. By applying a 200  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  constant anodic current for approximately 48 to 183 days, further acceleration of the corrosion process was achieved. After the corrosion-acceleration period was over, the specimens were tested in flexure under three-point loading. In addition, the average corrosion penetration,  $x_{\text{AVER}}$  was estimated for each corroded beam from gravimetric metal loss. The results obtained show a decrease as high as 20% in the flexure load capacity values from the localized corroded specimens with only 14% of rebar radius loss.*

**PALABRAS CLAVE:** agrietamiento, capacidad portante en flexión, hormigón reforzado, corrosión acelerada, durabilidad del hormigón.

**KEYWORDS:** cracking, flexure load capacity, reinforced concrete, accelerated corrosion, concrete durability.

## 1. INTRODUCCIÓN

Es bien conocido, que el recubrimiento del hormigón protege a las barras de refuerzo (también llamadas

## 1. INTRODUCTION

Concrete cover protects reinforcing steel bars (also known as rebars) in concrete. A sound concrete cover

armaduras) contra los agentes agresivos del medio ambiente. Un recubrimiento de hormigón sano provee a la armadura de una barrera física previniendo que agentes químicos (iones de cloruro, dióxido de carbono, etc.) lleguen a la superficie de ésta. Además la alcalinidad del agua del poro del hormigón protege químicamente a la armadura contra la corrosión. Sin embargo, en un ambiente marino, los iones cloruro del agua de mar o brisa marina, se acumulan en la superficie de el hormigón y lentamente penetran hasta la armadura ubicada en el interior. Cuando la concentración de cloruros en la armadura excede el valor crítico, la capa pasiva protectora en la superficie de esta armadura se rompe y comienza la corrosión activa. Aunque se desconoce el tipo de productos de corrosión que se forman en la interfase armadura/hormigón durante el proceso de corrosión, es de todos conocido que los productos de corrosión tienen menor densidad que el acero original, resultando en una expansión del volumen en la interfase, dando como resultado el agrietamiento del hormigón. Por lo tanto, la corrosión del acero causa daño en el mismo acero, el hormigón y en el anclaje, entre los dos materiales. Son pocos los estudios que se han dedicado a investigar el tema de la capacidad remanente, de estructuras de hormigón debido a la corrosión de la armadura (1-9). Por lo tanto, esta investigación, intenta ahondar en el tema, presentando los resultados de un programa experimental para determinar la relación empírica, entre la degradación por corrosión y los cambios en la capacidad de carga de vigas de hormigón reforzado, utilizando un proceso de corrosión acelerado. Esta investigación forma parte del "Plan Nacional Mexicano de Evaluación de Puentes Dañados por Corrosión" que realiza el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (10).

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para este estudio, se hicieron doce vigas de hormigón de 100x150x1.500 mm, reforzadas longitudinalmente con una varilla del #3 (10 mm de diámetro nominal). Con la intención de no usar ciclos de mojado y secado para iniciar la corrosión en las vigas de este estudio, se colocaron cloruros en el agua de amasado durante la fabricación del hormigón en una zona de la viga donde se deseaba generar corrosión en la armadura. Se usaron tres zonas activas diferentes de corrosión en las armaduras (en la Figura 1 se define como  $L_c$ ) ubicadas en la zona central de la viga. Las longitudes utilizadas fueron: 25 mm (en las vigas V07 y V08), 250 mm (en V04, V05, V06, V10, V11, y V12), y 1000 mm (en V03 y V09). La contaminación se obtuvo añadiendo un 3% por peso de cemento de cloruros ( $\sim 12 \text{ kg/m}^3$ ) durante el mezclado, utilizando NaCl (sal de mesa), de la misma manera como se ha

*physically provides a direct barrier preventing chemicals (chloride ions, carbon dioxide, etc.) from approaching the surface of the steel bar. In addition, high alkalinity in concrete chemically protects the embedded bar against corrosion. In a marine environment, however, chloride ions from seawater accumulate on the surface of the concrete and slowly migrate through the concrete cover to the underlying bar. When the chloride ion concentration at the bar depth exceeds a critical threshold value, the protective passive layer on the bar surface breaks down and active steel corrosion begins. Although there are still discrepancies on the corrosion product types formed at the steel/concrete interface, it is well established that these corrosion products have smaller mass densities than steel, resulting in volume expansion and concrete cover cracking. Thus, steel corrosion may cause damage in steel, concrete, and the bond between them. Quite few investigations, at the moment, are dealing with the concept of remaining structural capacity of concrete elements due to corrosion of the embedded steel (1-9). Therefore, this investigation presents the results of an experimental program to determine any relationship between corrosion degradation of concrete simply-supported beams and the flexure load capacity changes based on an accelerated corrosion methodology. This investigation is part of the "Mexican National Plan of Corroding Bridge Infrastructure Evaluation" of the Mexican Transport Research Institute (IMT, in Spanish) (10).*

## 2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

*In the present study twelve 100x150x1500 mm concrete beams reinforced longitudinally with one #3 (10 mm in diameter) reinforcing bar (rebar) were made. To eliminate the need to use wet/dry cycles using salt water, chlorides were introduced at the location of the reinforced specimen where the damage was intended. Three different chloride contaminated length sections located at the middle of the beam ( $L_c$  in Figure 1) were used: 25 mm (in V07 and V08), 250 mm (in V04, V05, V06, V10, V11, and V12), and 1000 mm (in V03 and V09). The chloride ion contamination of 3% by weight of cement ( $\sim 12 \text{ kg/m}^3$ ) was obtained by adding NaCl (table salt) during concrete mixing, as used in earlier*

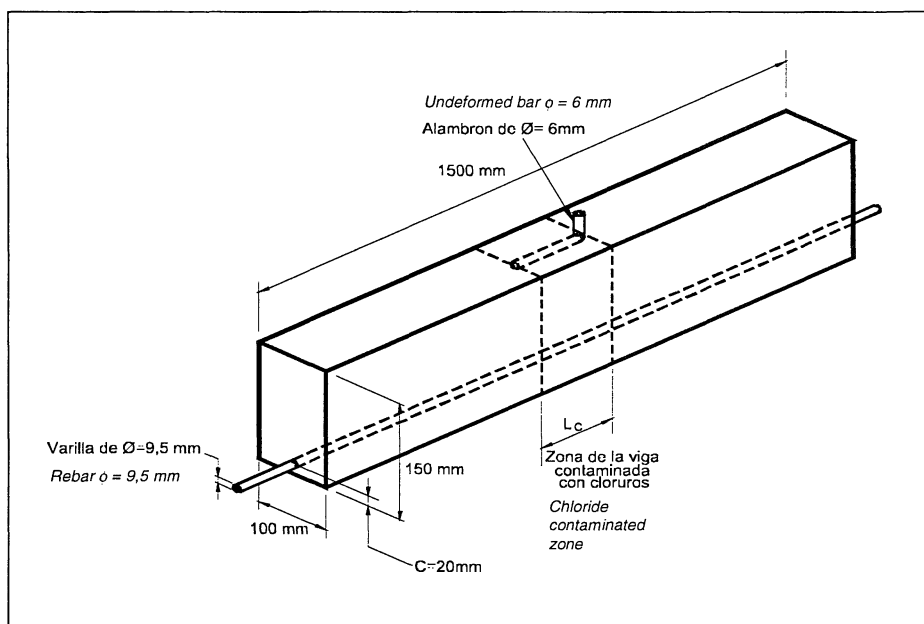


Figura 1.- Dimensiones de la viga.

Figure 1.- Beam dimensions.

hecho en investigaciones previas (11, 12). Las vigas se fabricaron utilizando moldes de madera en una fábrica de hormigón. La proporción de agua-cemento fue de 0,5, con cemento Portland Tipo I ( $389 \text{ kg/m}^3$ ), arena de sílice estándar ( $685 \text{ kg/m}^3$ ) de tamaño #20-#30, y árido grueso a base de basalto triturado ( $1.042 \text{ kg/m}^3$ ) con un tamaño máximo nominal de  $\sim 19 \text{ mm}$ . El hormigón fabricado alcanzó una resistencia característica a 28 días de  $37 \text{ MPa}$  valor obtenido utilizando cuatro cilindros de hormigón simple de  $\phi 76 \times 305 \text{ mm}$ .

Para acelerar el proceso de corrosión se le aplicó a las vigas una corriente anódica nominal en la varilla de refuerzo # 3. Una varilla de acero liso de  $6 \text{ mm}$  de diámetro fue utilizada como un cátodo interno. Estos cátodos (acero liso) fueron colocados dentro del hormigón para aplicar corriente en la zona contaminada por los cloruros. La densidad de corriente anódica utilizada fue de  $200 \mu\text{A/cm}^2$  y fue aplicada en tres periodos diferentes:  $\sim 40$  días,  $\sim 80$  días, y  $\sim 180$  días de acuerdo con el daño nominal por corrosión deseado. Este daño corresponde a 10, 20, y 30% de pérdida de radio del refuerzo, respectivamente. Se utilizó un galvanostato de múltiples canales para aplicar la corriente deseada a cada viga. Mayor información del galvanostato utilizado se encuentra en trabajos previos (11, 12). Se inició el proceso de corrosión acelerada aproximadamente 50 días

*studies (11, 12). The specimens were cast in wood molds at a concrete factory. The concrete used a water-cement ratio of 0,5; Type I Portland cement ( $389 \text{ kg/m}^3$ ); standard silica sand ( $685 \text{ kg/m}^3$ ) 20-30 sieve size; and crushed basaltic coarse aggregate ( $1042 \text{ kg/m}^3$ ) with a maximum nominal size of  $\sim 19 \text{ mm}$ . The average 28-day compressive strength ( $37 \text{ MPa}$ ) was obtained by testing four  $\phi 76 \times 305 \text{ mm}$  cylinders.*

*To accelerate corrosion, a nominal constant anodic-current was impressed on the single #3 rebar. A 6-mm diameter steel rod worked as the internal cathode. This created a current delivery element on the chloride-contaminated portion of each beam. An anodic current density of  $200 \mu\text{A/cm}^2$  (electrical current divided by rebar's geometric surface area at the chloride contaminated zone) was applied for a period of  $\sim 40$ ,  $\sim 80$ , or  $\sim 180$  days according to the desired nominal corrosion damage (10, 20, and 30% rebar radius loss, respectively). A custom made multi-channel galvanostat provided a regulated current source for each specimen. More details may be found elsewhere (11, 12). The corrosion acceleration process was then initiated at approximately 50 days after casting. When the targeted rebar radius loss was*

después de fabricar las vigas. Durante el proceso de corrosión acelerada, se realizó también, una vez cada dos semanas, un monitoreo de apertura de grietas. El procedimiento del levantamiento de las grietas es presentado en investigaciones previas (11-13). Cuando se alcanzó el valor nominal de pérdida de radio del refuerzo, se dejó de aplicar la corriente anódica y cada viga fue desconectada del galvanostato, en espera de iniciar la etapa de prueba de flexión.

Después de que el período de corrosión acelerada finalizó, las vigas fueron ensayadas en la máquina universal para realizar la prueba de flexión, utilizando el procedimiento de aplicación de la carga en tres puntos. La prueba se llevó a cabo utilizando una máquina universal servo-hidráulica marca INSTRON, modelo 8503 (carga máxima nominal de 500 kN). Las vigas se colocaron simplemente apoyadas sobre una viga "I" de acero, la cual se colocó sobre el pistón de la máquina universal. De esta manera, la celda de carga quedó centrada en la viga, aplicándose así tres cargas (2 reacciones y una carga aplicada en el centro de la viga y opuesta a la dirección de las reacciones). Los resultados de la prueba obtenidos de la máquina universal (carga y desplazamiento del pistón) fueron guardados automáticamente por una computadora portátil conectada al sistema servo-hidráulico de la máquina universal.

Después de finalizada la prueba de flexión, las barras de refuerzo fueron extraídas del hormigón. El procedimiento para determinar la penetración promedio de la corrosión,  $x_{PROM}$ , del acero de refuerzo fue similar al utilizado en investigaciones anteriores (11-13). El valor obtenido de  $x_{PROM}$  se calculó de la pérdida de masa por corrosión utilizando la ecuación siguiente:

$$x_{PROM} = \frac{\Delta W_G \cdot 10^3}{\rho_{Fe} \cdot \pi \cdot \phi \cdot L} \quad [1]$$

donde  $x_{PROM}$  está dado en mm,  $\Delta W_G$  es la pérdida de masa ( $m_0 - m_f$ ) en gramos,  $\phi$  y  $L$  son el diámetro ( $\phi = 9,5$  mm) y la longitud de la zona corroída en mm, y  $\rho_{Fe}$  es el valor de la densidad del hierro ( $7,86$  g/cm<sup>3</sup>). La pérdida del radio del refuerzo se define en esta investigación como al cociente entre  $x_{PROM}$  y el radio original del refuerzo,  $r_0$ .

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todas las vigas se midieron los anchos y longitudes de las grietas producidas durante la etapa de corrosión acelerada. Se generaron grietas paralelas a las barras de refuerzo en todas las vigas a las que se les aplicó corriente anódica. La mayoría de las vigas con corrosión (7 vigas de las 10 corroídas) presentaron una

achieved, the applied current was stopped and each beam specimen was then disconnected from the supplier/galvanostat system and was kept positioned in their respective metallic supports for further evaluation. The crack monitoring was performed once every other week during the entire accelerated corrosion process. The crack monitoring procedure is presented elsewhere (11-13).

After the corrosion-acceleration stage ended, the beams were tested up to failure under bending by a three-point loading procedure. The test was performed using an 8503 INSTRON Universal Servo hydraulic Testing Machine (nominal maximum capacity of 500 kN). The beams were simply supported on top of a custom made steel "I" beam, and one centered load was applied by the hydraulic actuator. The testing machine loading rate was 1 mm/min. The output of the testing machine (load and actuator displacement) was stored automatically by a PC computer interlaced to the testing machine.

The rebars were retrieved from the concrete after the testing program. The procedure used in this investigation to estimate the average corrosion penetration,  $x_{AVER}$  of the reinforcing steel, is similar to the one performed by previous studies (11-13). The value of  $x_{AVER}$  was obtained from the mass loss using the following equation:

where  $x_{AVER}$  is given in mm,  $\Delta W_G$  is the gravimetric mass loss ( $m_0 - m_f$ ) in grams,  $\phi$  and  $L$  are the rebar diameter ( $\phi = 9,5$  mm) and corroding zone length in mm, and  $\rho_{Fe}$  the steel density ( $7,86$  g/cm<sup>3</sup>). The rebar radius loss (RRL) is defined in this investigation as the ratio between  $x_{AVER}$  and the initial rebar radius,  $r_0$ .

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Crack widths and lengths were recorded for all specimens. All accelerated corrosion beams developed surface concrete cracks. The cracks were parallel to the rebar. Most of the corroding specimens (7 out of 10) presented only one crack parallel to the rebar at

sola grieta paralela al refuerzo en la cara más cercana a ésta. Las vigas con corrosión generalizada (V03, V09), y una de las vigas con corrosión localizada (V10), pero con un tiempo de aplicación de la corriente mayor, presentaron más de una grieta por corrosión. En la Tabla 1 se presentan los resultados de ancho máximo de grieta,  $CW_{MAX}$ , para cada una de las vigas, el cual fue medido después de alcanzar el valor nominal de pérdida de radio del refuerzo y justo antes de que las vigas fueran probadas en flexión.

Después de las pruebas de flexión, el refuerzo fue retirado del hormigón y se limpió su superficie de los productos de corrosión formados utilizando una solución de HCL con inhibidores de corrosión (11-13). Después de la limpieza, la pérdida de masa del refuerzo al final del experimento ( $\Delta W_G$ ) fue calculada restandole el valor de la masa final al de la masa inicial. El valor de  $x_{PROM}$  (considerando que la corrosión fue uniforme en la zona anódica del refuerzo) del refuerzo se calculó utilizando la Ecuación 1. Los valores estimados de  $\Delta W_G$ ,  $x_{PROM}$  y la pérdida de radio del refuerzo,  $x_{PROM}/r_0$ , se dan en la Tabla 1.

the concrete surface closest to the rebar. Beams with generalized corrosion (V03, V09 with  $L_c = 100$  cm), and only one beam with localized corrosion (V10 with  $L_c = 25$  cm), but with more than 10% rebar radius loss presented more than one corrosion crack. Table 1 list the resulting  $CW_{MAX}$  values for each beam after reaching the target rebar radius loss and just before the beams were tested by flexure.

After the flexure test was performed on each beam, the rebar was retrieved from the concrete and the corrosion products cleaned employing a corrosion-inhibited HCl solution (11-13). The final mass loss of the steel rebar ( $\Delta W_G$ ) was estimated afterwards by subtracting the post- from the pre-corrosion masses. The  $x_{AVER}$  values for the rebar were calculated using Equation 1 (assuming that the corrosion is uniform at the anodic region of the rebar). The estimated values of  $\Delta W_G$ ,  $x_{AVER}$  and rebar radius loss,  $x_{AVER}/r_0$  are presented in Table 1.

TABLA 1/TABLE 1  
Resultados experimentales  
Experimental results

Viga Beam	$L_C$ (mm)	$CW_{MAX}$ (mm)	$\Delta W_G$ (gm)	$P_{MAX}$ (kN)	$x_{AVER}$ (mm)	RRL ( $x_{AVER}/r_0$ )	$RLC_{CORR}$
V01	-	-	-	9,1	-	-	-
V02	-	-	-	10,8	-	-	-
V03	100	7,0	85,1	9,0	0,363	0,076	0.905
V04	25	4,0	19,9	10,2	0,339	0,071	1.025
V05	25	4,0	21,0	9,5	0,358	0,075	0.955
V06	25	8,0	40,1	9,0	0,684	0,144	0.905
V07	2,5	0,3	3,2	9,6	0,546	0,115	0.965
V08	2,5	0,4	2,7	9,2	0,460	0,097	0.925
V09	100	11,0	83,3	10,2	0,355	0,0747	1.025
V10	25	8,0	37,1	7,7	0,633	0,133	0.774
V11	25	2,0	12,9	9,8	0,220	0,046	0.985
V12	25	0,8	12,6	9,5	0,215	0,045	0.955

$L_C$  = Longitud activa de corrosión  
 $CW_{MAX}$  = Ancho máximo de grieta  
 $\Delta W_G$  = Pérdida gravimétrica de masa  
 $P_{MAX}$  = Carga máxima registrada en la prueba de flexión

$L_C$  = Active corrosion length  
 $CW_{MAX}$  = Maximum crack width  
 $\Delta W_G$  = Gravimetric mass loss  
 $P_{MAX}$  = Maximum load registered during flexure tests

$x_{PROM}$  = Penetración promedio de la corrosión (Ec. 1)  
RRL = Pérdida de radio del refuerzo =  $x_{PROM}/r_0$   
 $RLC_{CORR}$  = Capacidad de carga remanente (Ec. 2)

$x_{AVER}$  = Average corrosion penetration (Eq. 1)  
RRL = Rebar radius loss =  $x_{AVER}/r_0$   
 $RLC_{CORR}$  = Residual load capacity (Eq. 2)

La Figura 2 presenta los diagramas de Fuerza-Desplazamiento obtenidos durante las pruebas de flexión para las vigas: (a) V09 (corrosión generalizada, con  $x_{\text{PROM}}/r_0 = 0,075$ ); (b) V04 (corrosión localizada, con  $x_{\text{PROM}}/r_0 = 0,071$ ); (c) V10 (corrosión localizada con  $x_{\text{PROM}}/r_0 = 0,133$ ); y (d) V02 (control). En esta investigación  $P_{\text{MAX}}$  corresponde a la carga justo antes de la aparición de grietas transversales por flexión y la deformación plástica del refuerzo (ver Figura 2).

De la Figura 2 se observa que el valor de la pendiente en la porción de los diagramas de Fuerza-Desplazamiento antes de llegar a la porción horizontal, en todas las vigas usadas en esta investigación, fue de entre 2 y 3. Sin embargo, las vigas con corrosión generalizada presentaron un comportamiento diferente a lo anterior. Cuando alcanzaron el 40% de  $P_{\text{MAX}}$ , el valor de la pendiente pasó de 3,06 a 0,87 (Figura 2a). Este comportamiento posiblemente se debe a una disminución en la resistencia de anclaje entre el refuerzo corroído y el concreto. Sólo las vigas V03 y V09 presentaron este comportamiento, indicando que la disminución de esta resistencia de anclaje es más crítico cuando éste se corroe en forma generalizada.

Los valores medidos de  $P_{\text{MAX}}$  para todas las vigas de esta investigación se presentan en la Tabla 1. Se observaron pequeños cambios en el valor de  $P_{\text{MAX}}$ , indicando que la pérdida de capacidad en flexión de vigas con refuerzo corroído localizadamente (y con  $x_{\text{PROM}}/r_0 < 0,14$ ) es marginal. Este mismo comportamiento se observó en las vigas con corrosión generalizada (V03 y V09), según Tabla 1. Para el caso

Figure 2 presents the Load-Displacement data recorded for beams: (a) V09 (generalized corrosion with  $x_{\text{AVER}}/r_0 = 0.075$ ); (b) V04 (localized corrosion with  $x_{\text{AVER}}/r_0 = 0.071$ ); (c) V10 (localized corrosion with  $x_{\text{AVER}}/r_0 = 0.133$ ); and (d) V02 (control). In this investigation,  $P_{\text{MAX}}$  corresponds to the load just before the appearance of transverse flexure cracks and yielding of the steel reinforcement (see Figure 2).

As observed in Figure 2, the slope value of the Force-Displacement diagram, elastic portion, for all specimen tested was between 2 and 3, approximately. On the other hand the slope of the force-displacement diagram for generalized corrosion beams showed a deviation, changing from a value of 3,06 to a value of 0.87 after reaching a load as high as 40% of  $P_{\text{MAX}}$  (Figure 2a). It is believed that this is due to a sudden decrease of interfacial bond between the corroding reinforcing steel and the concrete. Only V03 and V09 presented this behavior, indicating a detrimental effect on bond strength of steel embedded in concrete only when generalized corrosion is present.

The estimates of  $P_{\text{MAX}}$  for all beams tested in this investigation are listed in Table 1. Small changes were observed on the  $P_{\text{MAX}}$  values registered in this investigation, indicating little effect on the flexure capacity when localized corrosion degradation, no

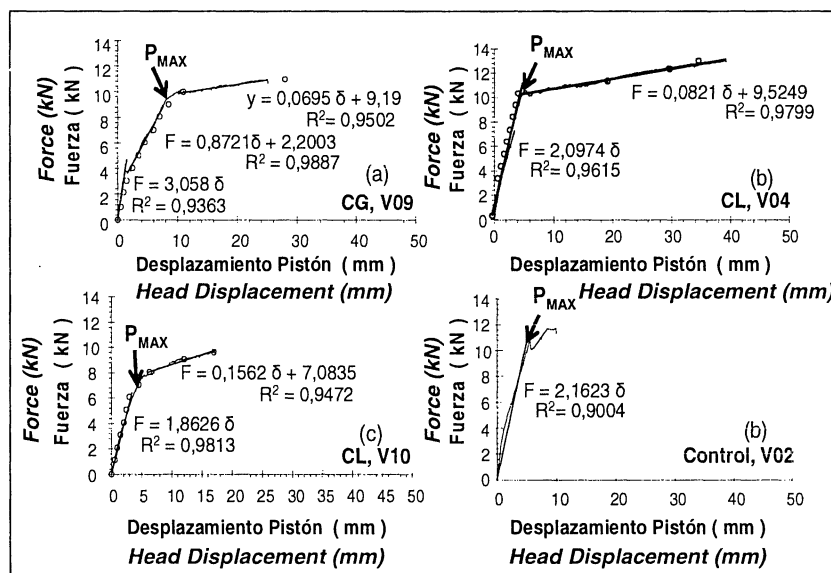


Figura 2.- Diagramas de Fuerza-Desplazamiento para las vigas (a) V09, (b) V04, (c) V10 y (d) V02. CG = corrosión generalizada ( $L_c = 100$  cm). CL = corrosión localizada ( $L_c = 25$  cm). El desplazamiento corresponde al movimiento del pistón de la máquina universal.

Figure 2.- Force-Displacement diagrams for (a) V09, (b) V04, (c) V10, and (d) V02. CG = generalized corrosion ( $L_c = 100$  cm), CL = localized corrosion ( $L_c = 25$  cm). The displacement corresponds to the servo-controlled machine's head displacement.

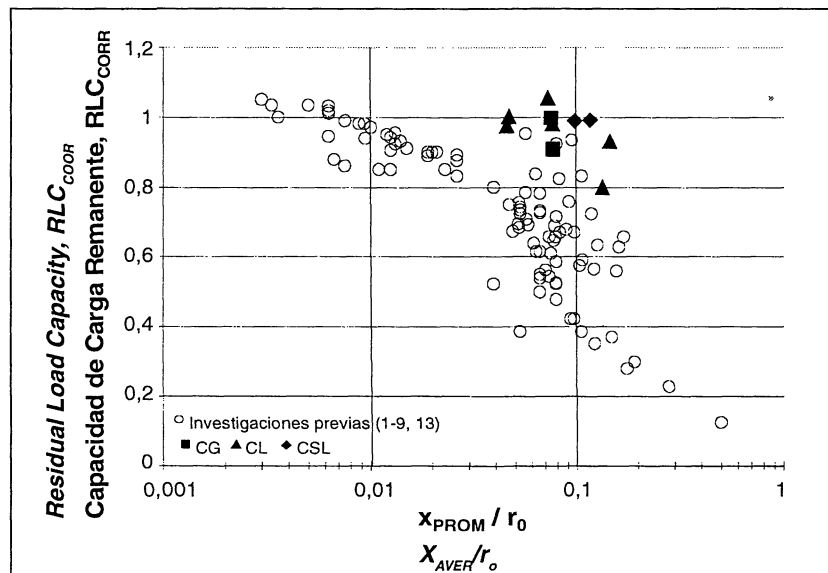


Figura 3.- Relación  $RLC_{CORR}$  vs.  $x_{AVER}/r_0$  para los resultados de investigaciones previas (1-9, 13) y los obtenidos en esta investigación. CG = corrosión generalizada ( $L_c = 100$  cm), CL = corrosión localizada ( $L_c = 25$  cm), CSL = corrosión sub-localizada, ( $L_c = 2.5$  cm).

Figure 3.-  $RLC_{CORR}$  vs.  $x_{AVER}/r_0$  for the results of previous (1-9, 13) and the present investigation. CG = generalized corrosion ( $L_c = 100$  cm), CL = localized corrosion ( $L_c = 25$  cm), CSL = highly localized corrosion ( $L_c = 2.5$  cm).

de las deflexiones, existe un comportamiento significativamente diferente entre los valores de corrosión generalizada y corrosión localizada ya que los primeros presentaban mayores deflexiones para la misma magnitud de la carga que la que presentaron las vigas con corrosión localizada y las de control. Este fenómeno debe de ser estudiado con mayor detalle, ya que los resultados que se obtuvieron en esta investigación son limitados a dos vigas por condición.

Los valores experimentales de  $P_{MAX}$  fueron utilizados para determinar la Capacidad de Carga Remanente por corrosión,  $RLC_{CORR}$ , de cada una de las vigas corroídas en la Tabla 1. Estos valores fueron calculados dividiendo el valor de  $P_{MAX}$  de cada viga corroída,  $P_{MAX-CORR}$ , entre el valor promedio de las vigas sin corrosión (de la Tabla 1 el promedio entre V01 y V02 es 9,95 kN) de la siguiente manera:

$$RLC_{CORR} = \frac{P_{MAX-CORR}}{9.95} \quad [2]$$

La Figura 3 muestra los valores de  $RLC_{CORR}$  de la Ecuación 2 en función de la relación penetración de la corrosión promedio y el radio inicial del refuerzo,  $x_{PROM}/r_0$ , con los resultados obtenidos de previas investigaciones (1-9, 13) (con el símbolo "◊") y los resultados de la presente. La información obtenida de investigaciones previas fue obtenida solamente con probetas de concreto reforzado pequeñas y corroídas en toda su longitud (1-9, 13), contrariamente a los datos

higher than  $x_{AVER}/r_0 = 0.14$ , is present. Similarities regarding  $P_{MAX}$  are observed for generalized corrosion specimens (V03 and V09) in Table 1, but the beam deflexion performance observed was significantly different than the observed from the localized corrosion and control beam specimens.

The experimental values of  $P_{MAX}$  were used to estimate the corroding Residual Load Capacity ratio,  $RLC_{CORR}$ , listed in Table 1. These values were estimated by dividing individual  $P_{MAX}$  values for corroded beams  $P_{MAX-CORR}$ , by the average  $P_{MAX}$  values for the non-corroded (control) ones (from Table 1, the average  $P_{MAX-CORR}$  for V01 and V02 was 9.95 kN) as follows:

Figure 3 shows the  $RLC_{CORR}$  values, from Equation 2, as a function of the ratio of the average corrosion penetration to the initial radius,  $x_{AVER}/r_0$ , for previous investigations (1-9, 13) (with "◊" symbol) and this investigation. The previous information is related to small, full-length corroded reinforced concrete elements only (1-9, 13), contrarily to the experimental data obtained in this investigation with localized-corrosion beams. A trend can be observed in Figure 3

obtenidos en este trabajo con corrosión localizada. De la Figura 3 se puede observar una tendencia muy marcada, presentándose una disminución en el valor de  $RLC_{CORR}$  cuando  $x_{PROM}/r_0$  aumenta para ambos casos corrosión generalizada y corrosión localizada. Los resultados para corrosión generalizada y pérdida de radio de 10% ( $x_{PROM}/r_0 = 0,1$ , igual a un 19% de pérdida de sección transversal del refuerzo) muestran una disminución en promedio del 40% en la capacidad de carga por corrosión ( $RLC_{CORR} \sim 0,6$ ). Por otro lado, los resultados para corrosión localizada con un valor de pérdida de radio similar, muestran una disminución en promedio de  $RLC_{CORR}$  de sólo el 5% ( $RLC_{CORR} \sim 0,95$ ). Si esto es confirmado en trabajos futuros se podría inferir que existe un efecto mitigante en la pérdida de resistencia cuando la corrosión es localizada. Esto significa que una corrosión generalizada del refuerzo produce una pérdida de capacidad portante más significativa que cuando la corrosión del refuerzo es localizada.

Los resultados presentados aquí pertenecen a una investigación en curso. Una segunda parte de esta investigación (14), es el estudio de un método no destructivo alternativo, basado en monitoreo de los parámetros de vibraciones, para detectar los cambios de la rigidez de vigas de concreto debido a la corrosión del refuerzo. Un tercer programa experimental (15) se lleva al cabo con el fin de determinar los cambios en la rigidez en flexión de vigas de concreto reforzado por corrosión, incluyendo el determinar fórmulas empíricas que relacionen varios parámetros como la pérdida de rigidez en flexión y el valor medido de pérdida de radio del refuerzo, definido en este trabajo. Los resultados experimentales de estas tres fases que forman el proyecto completo serán analizados en un futuro con un modelo numérico que correlacione la degradación por corrosión y los parámetros de vibraciones medidos.

#### 4. CONCLUSIONES

El efecto de la corrosión en la resistencia a la flexión ha sido estudiado experimentalmente utilizando vigas de concreto reforzado con diferentes longitudes de acero en proceso de corrosión. Este trabajo incluye también la información para formular una relación empírica entre la pérdida de resistencia a la flexión con base a la cantidad de acero (pérdida de radio del refuerzo) por corrosión. Basado en los resultados experimentales obtenidos, se pueden definir las siguientes conclusiones:

1) Para un proceso de corrosión generalizada, las grietas generadas en el hormigón por la expansión de los productos de corrosión se desarrollan más rápidamente (en ancho y longitud) que aquéllas generadas por corrosión localizada, corroborando los resultados obtenidos en investigaciones anteriores en este tema.

*that as the  $x_{AVEK}/r_0$  ratio increases,  $RLC_{COR}$  decreases for both localized and full-length corrosion. The results for full-length corrosion may indicate that with a  $x_{AVEK}/r_0$  of 10% ( $x_{AVEK}/r_0 = 0,1$ , which gives a 19% cross section loss), the member capacity will decrease 40% ( $RLC_{CORR} \sim 0,6$ ) in average. Contrarily, results for localized corrosion indicate for similar  $x_{AVEK}/r_0$  values the member capacity will decrease only 5% ( $RLC_{CORR} \sim 0,95$ ) in average. If confirmed by future work, this finding would indicate some mitigating effect in corrosion induced strength loss when corrosion is localized, in that more concentrated corrosion would be needed to cause a decrease in strength than if the corrosion were uniform.*

*The results presented here are part of an ongoing investigation. As a second part of this investigation (14), an alternative non destructive method based on vibration monitoring to detect stiffness changes due to corrosion, is presented elsewhere. A third experimental program (15), using the same beam elements of this investigation, was performed to determine the flexure stiffness changes on a corroding beam. This included the determination of an empirical equation which correlates parameters such as the percentage stiffness loss and the rebar radius loss. The results of a numerical model that correlates degradation with vibration parameters will be presented in the near future.*

#### 4. CONCLUSIONS

*The effect of corrosion on flexure strength changes was investigated experimentally for reinforced concrete beams with corroding steel zones of various lengths. This work attempts also to obtain information contributing to the development of an empirical relation to predict flexure strength loss based on the rebar radius loss due to corrosion. Based on the experimental results obtained with this investigation the following conclusions are drawn:*

*1) For a generalized corrosion process, the cracks evolve more rapidly than for localized corrosion, supporting the findings of previous investigations with localized corrosion effects on concrete cracking development.*



2) Los resultados obtenidos a la fecha indican que para una pérdida de radio del refuerzo de un 14% debido a la corrosión localizada de éste, produce un efecto insignificante en la capacidad en flexión de vigas, disminuyéndose únicamente un 10% su capacidad de carga en flexión.

3) Por el contrario, la corrosión del refuerzo incrementa las deflexiones producidas por las cargas actuantes cuando la corrosión es generalizada. Se cree que el aumento en estas deflexiones producto de la corrosión generalizada del refuerzo es debido a una disminución en el anclaje entre el refuerzo y el hormigón.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, y a la compañía APASCO SA de CV (Grupo Holcim), su apoyo económico para la realización de esta investigación con número ET-73: "Capacidad Estructural de Elementos de Hormigón Reforzado Dañados por Corrosión." Las opiniones y resultados obtenidos en esta publicación son de los propios autores y no necesariamente de las instituciones que representan.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) J. G. Cabrera: Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. *Cem. & Conc. Composites*, Vol. 18 (1996), pp. 47-59.
- (2) P. S. Mangat, and M. S. Elgarf: Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement, *ACI Struct. J.*, Vol. 96, nº 1 (1999), pp. 149-158.
- (3) P. S. Mangat, and M. S. Elgarf. "Strength and serviceability of repaired reinforced concrete beams undergoing reinforcement corrosion," *Mag. of Conc. Res.*, Vol. 51, nº 2 (1999), pp. 97-112.
- (4) J. Rodríguez, L. M. Ortega, and J. Casal: Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement, *Constr. and Build. Mats.*, Vol. 11, nº 4 (1997), pp. 239-248.
- (5) J. Rodríguez, L. M. Ortega, and J. Casal: Load bearing capacity of concrete columns with corroded reinforcement," in *SCI 4<sup>th</sup> international symposium on corrosion of reinforcement in concrete construction*, pp. 220-230. Cambridge, UK, 1996.
- (6) A. A. Almusallam, A. S. Al-Gahtani, M. Maslehuddin, M. M. Khan, and A. R. Aziz: Evaluation of repair materials for functional improvement of slabs and beams with corroded reinforcement, *Proc. Insts. Civ. Engrs., Structs., & Bldgs.*, Vol. 122 (1997), pp. 27-34.
- (7) A. A. Almusallam, A. S. Al-Gahtani, A. R. Aziz, and Rasheeduzzafar: Effect of reinforcement corrosion on bond strength, *Constr. and Build. Mats.*, Vol. 10, nº 2 (1996), pp. 123-129.
- (8) R. Huang, and C. C. Yang: Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion. *Cem. And Concr. Composites*, Vol. 19 (1997), pp. 131-137.
- (9) Y. Tachibana, K. Maeda, Y. Kajikawa, and M. Kawamura: Mechanical behaviour of RC beams damaged by corrosion of reinforcement, in *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, Eds. C.L. Page, K.W.J. Treadaway, and P.B. Bamforth, 1990.
- (10) M. Martínez-Madrid, A. Torres-Acosta: Mexican National Plan of Evaluation and Diagnosis of Bridge Corrosion-Induced Damaged - Phase I, Bridge Discrimination, (in Spanish). Final report: 029/2002. Mexican Transport Research Institute, Sanfandila, Querétaro, Mexico, 2002.
- (11) A. Torres-Acosta, and A. Sagüés: Concrete Cover Cracking with Localized Corrosion of Reinforcing Steel, in *Proceedings 5<sup>th</sup> CANMET/ACI Int. Conf. Durability of Concrete*, V. Malhotra (Ed.), pp. 591-611. ACI International, Farmington Hills, Michigan, EE.UU., 2000.
- (12) A. Torres-Acosta: Cracking Induced by Localized Corrosion of Reinforcement in Chloride Contaminated Concrete, Ph.D. Dissertation, University of South Florida, Tampa, Florida, EE. UU., 1999.
- (13) A. Torres-Acosta, and M. Martínez-Madrid: Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment, *Mats. Civil Eng.*, Vol. 15, nº 4 (2003), pages not yet available.
- (14) M. Fabela-Gallegos, D. Vazquez-Vega, A. Torres-Acosta, M. Martínez-Madrid: Vibration Monitoring to Detect Corrosion Degradation in Reinforced Concrete Beams, Paper No. 03283. NACE International, Houston, Texas, EE. UU., 2003.
- (15) A. Torres-Acosta, M. Fabela-Gallegos, J. Hernández-Jiménez, M. Martínez-Madrid, and A. Muñoz-Noval: Stiffness Loss of Concrete Beams due to Corrosion of the Reinforcing Steel, Paper No. 03282. NACE International, Houston, Texas, EE. UU., 2003.

\* \* \*

2) *The results obtained to date indicate that for rebar radius loss due to corrosion as high as 14% has little effect on the flexure load capacity. The results obtained show decreases as low as 10% in the flexure load capacity when only 14% rebar radius loss due to localized corrosion.*

3) *Contrarily, corrosion of the embedded steel has a marked effect on the obtained deflections when generalized corrosion was present. It is believed that this deflection performance was primarily due to the loss or breakdown of the steel/concrete interfacial bond.*

## ACKNOWLEDGMENTS

*The authors are indebted to the Instituto Mexicano del Transporte (Mexican Transport Research Institute) Queretaro, Mexico, and APASCO SA de CV (Holcim Group), with grant number ET-73: "Structural capacity of Corrosion-Induced Damaged Reinforced Concrete Elements.", for the support for this investigation. The opinions and findings in this paper are those of the authors and not necessarily those of the funding agencies.*

# MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Monográfico dedicado a

## LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA CONSTRUCCIÓN

La revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, editada en el Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA, dedica un número doble (Nº 247/248) a: *Los Materiales Compuestos en la Construcción*.

*Los Materiales Compuestos en la Construcción* es una temática muy actual ya que incide en el desarrollo y aplicación de Nuevos Materiales ("Composites"), que son el futuro en el campo de la Construcción. Uno de los sectores productivos que más influyen en el PIB es el de la construcción, con lo cual resulta necesario involucrar al sistema de I+D en el desarrollo de nuevos materiales compuestos basados en el cemento. En estos términos se presentaba en la última convocatoria de proyectos de investigación de la CICYT y dentro del Programa Nacional de Materiales, lo referente a las investigaciones en el Área de Materiales Compuestos (B.O.E. 7 de noviembre de 1997). *Los Materiales Compuestos en la Construcción* constituyen un tema estratégico, tanto para los ingenieros de caminos, canales y puertos como para los ingenieros de materiales.

Este número monográfico se compone de dos partes. La parte I se dedica a los materiales compuestos de matriz de hormigón. Son tratados temas claves como la dosificación, la interfase en sistema acero-hormigón y la implantación de nuevas fibras como son las acrílicas. La parte II se concentra en los denominados materiales compuestos de matriz orgánica, analizándose en profundidad las nuevas tecnologías tipo sandwich, textiles o de parrilla.

En este número especial se recogen trabajos de investigación originales e inéditos, en los que también se presentan las amplias posibilidades de aplicación de estos materiales. Los autores de estos trabajos, tanto los nacionales como los internacionales, son especialistas reconocidos en su respectivos campos científicos.

Los artículos que componen este número especial son:

- **Materiales Compuestos en la Construcción: Introducción** (*Composite Materials in Building: Introduction*)  
A. Miravete
- **Dosificación de hormigón reforzado con fibras de acero** (*Mix design of steel fiber reinforced concrete*)  
E. Moreno y M. Fernández Cánovas
- **Estudio de la interfase en los hormigones reforzados con fibras** (*Interface study of fiber reinforced concrete*)  
A. Pacios y M. Fernández Cánovas
- **Hormigones reforzados con fibras acrílicas** (*Concretes reinforced with acrylic fibres*)  
T. Amat
- **Fabricación y diseño de estructuras parrilla** (*Manufacture and design of composite grids*)  
Stephen W. Tsei, Kevin K.S. Liu y Philippe M. Manne
- **Características de los elementos resistentes tipo sandwich contruidos en materiales compuestos avanzados a partir de tejidos tridimensionales** (*Characteristics of sandwich-type structural elements built of advanced composite materials from three dimensional fabrics*)  
L. Castejón, M.A. Jiménez y A. Miravete
- **Materiales compuestos realizados a partir de nuevas tecnologías textiles** (*Composite materials from new textile technologies*)  
M.A. Jiménez, L. Castejón y A. Miravete
- **Los composites y la construcción: su ayer, hoy y mañana** (*Composites and construction: yesterday, today and tomorrow*)  
J. Manso
- **Conclusiones finales** (*Final conclusions*)  
A. Miravete