

Comportamiento a cortante en vigas de concreto reforzado con deterioro por corrosión en los estribos

Shear strength behaviour on corrosion damaged stirrups of reinforced concrete beams

Bianca Guevara*¹, César Juárez*, Gerardo Fajardo*, Pedro Castro-Borges**

* Universidad Autónoma de Nuevo León UANL, MÉXICO

**CINVESTAV-IPN Unidad Mérida, Yucatán. MÉXICO

Contribución. Mejor artículo
Contribution. Best paper award
Compat 2009
PAG. 259 - 270

Resumen

Esta investigación propone realizar estudios en vigas de concreto reforzado, en las que se induzca un deterioro controlado por corrosión en el refuerzo transversal encontrando correlaciones entre diferentes grados de corrosión en los estribos y la resistencia por cortante debido a la tensión diagonal. Se fabricaron 2 series de 8 vigas con una separación de 150 y 200 mm entre estribos para cada serie. Las vigas están siendo expuestas a ciclos de humectación utilizando una solución de 3.5% de NaCl y secado al aire libre. Aquí se discuten resultados preliminares asociados al seguimiento del potencial de corrosión de los estribos antes y durante la exposición de las vigas al cloruro de sodio. Los resultados obtenidos permitirán conocer el efecto del grado de deterioro de los estribos sobre el comportamiento por cortante en las vigas, y el correspondiente patrón de agrietamiento.

Palabras Clave: Corrosión, cortante, tensión diagonal, cloruros, refuerzo transversal

Abstract

The present research intends to develop studies on reinforced concrete beams by applying controlled damage corrosion to cross-sectional reinforcements, thus finding relationships between different stirrups corrosion levels and shear strength due to diagonal tensile stress. Two series of eight beam specimens were constructed, each series having a stirrup spacing distance of 150 and 200 mm. The beams are exposed under wetting/drying cycles, with a 3.5% NaCl solution. In this paper, preliminary results are discussed related to the control of stirrups corrosion potential while the beams are exposed to NaCl. The obtained results will allow understanding the effect of stirrups corrosion level upon beams shear strength behavior, and the corresponding cracking pattern

Keywords: Corrosion, shear strength, diagonal tensile stress, chloride, cross-sectional reinforcement

1. Introducción

Históricamente, el diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica; con esta base se ha logrado tener estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio; sin embargo, se han incrementado los problemas relacionados con el medio ambiente en el que se encuentra la estructura (Hernández y Mendoza, 2006). En los últimos años, ha crecido el número de estructuras de concreto reforzado con problemas de corrosión en el refuerzo y ha resultado ser un problema serio en puentes,

1. Introduction

Historically, the design of concrete structures has been developed fulfil mechanical strength criteria; obtaining structures which bearing capacity well appropriate for service load. However, there are an increasing number of environmental problems, depending on the place where the structure is exposed. (Hernández and Mendoza, 2006). During recent years, the number of reinforced concrete structures showing corrosion damage has become a serious problem for structures such as bridges,

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: biancaguevara@live.com.mx



estructuras para estacionamientos y otras estructuras de carreteras en las cuales su principal característica es que se encuentran expuestas a la intemperie, también en estructuras expuestas a un ambiente marino y en plantas productoras de sustancias químicas. Debido a esto, la corrosión en el sistema acero-concreto, es un fenómeno que desde hace décadas despertó el interés de muchos investigadores a nivel mundial, esto debido a la importancia del concreto reforzado como el sistema de construcción más utilizado en el mundo (Park y Paulay, 1990). La corrosión del acero de refuerzo, representa en forma integral el problema de durabilidad que más afecta a las estructuras de concreto reforzado. Siendo entonces uno de los deterioros que mayor costo induce en el mantenimiento y operación de las diversas construcciones que se realizan con este material (Helene y Pereira, 2003).

En 1990 se realizó un estudio internacional del impacto que produce el costo económico originado por la corrosión en estructuras de concreto reforzado, el resultado fue que entre el 2 y el 5% del Producto Nacional Bruto (PNB) de cada país se destina a subsanar los problemas de corrosión; pero entre un 15 y 25% se pudo haber evitado si se hubiese aplicado la tecnología existente para contrarrestarla. En el Reino Unido, un país desarrollado destina 40% de la inversión en construcción a la reparación y al mantenimiento, 4% de su Producto Interno Bruto (Hernández y Mendoza, 2006). Por otra parte, en los Estados Unidos existen aproximadamente 235,000 puentes convencionales de concreto reforzado en servicio; de los cuales 21,000 están estructuralmente deficientes, esto debido al daño por corrosión inducido por cloruros (Higgins y Farrow, 2006). Se calcula un costo de 300,000 millones de dólares por fallas en la infraestructura, así mismo, se estima que de esa cantidad es posible evitar pérdidas por alrededor de 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión (Del Valle Moreno et al., 2001). Actualmente, en México se ha detectado que más del 90% de las industrias presentan deterioros por corrosión, por ejemplo en Yucatán los costos por corrosión rebasan el 8% del Producto Interno Bruto (PIB) estatal (Hernández y Mendoza, 2006).

Los principales agentes agresivos son los cloruros en regiones marinas y la carbonatación en zonas rurales e industriales. La combinación de los agentes agresivos acelera el proceso de degradación de las estructuras de concreto reforzado; pero la resistencia de éstas dependerá tanto de la resistencia del concreto como de la resistencia del refuerzo, cualquiera de los dos que se deteriore, comprometerá la estructura como un todo.

parking structures and highways, whose main characteristic is their exposure to the environment. The same occurs for structures exposed to marine environment and chemical substances in industrial factories. Due to this fact, corrosion of steel-concrete systems is a phenomenon drawing the attention of several researchers worldwide, since reinforced concrete is the most used construction system (Park and Paulay, 1990). Corrosion of reinforced steel integrally represents a durability problem that affects steel reinforcement structures to a great extent. Thus, it becomes one of the damages that cause higher costs for maintenance and operation in several constructions sites using such material (Helene and Pereira, 2003).

In 1990, an international research was developed on the economical impact derived from steel reinforced structures corrosion. The result was that between 2 and 5% of the Gross National Product (GNP), in each country, is spent to solve corrosion problems; however between 15 and 25% could have been avoided if available technology had been applied to stop it. The United Kingdom, a developed country, spends 40% of construction budget to maintenance and repair which represents 4% of its Net Domestic Product (Hernández and Mendoza, 2006). On the other hand, in The United States there are approximately 235,000 bridges, constructed with reinforced concrete, which are still in service but 21,000 of them have a defective structure because of corrosion by chloride attack (Higgins y Farrow, 2006). A total cost of 300,000 million dollars is calculated for infrastructure failure, while it is estimated that losses over 100,000 million dollars from such total amount can be avoided by taking preventive measures against corrosion (Del Valle Moreno et al, 2001). Nowadays, in Mexico it has been discovered that more than 90% of industries present corrosion damages, for example in Yucatan corrosion costs exceed 8% of Net Domestic Product (Hernández and Mendoza, 2006).

The most aggressive agents are chlorides in marine areas and carbonatation in rural and industrial areas. The combination of such aggressive agents, accelerate corrosion process of reinforced concrete structures. However their resistance will depend as much on the concrete strength as well as on reinforcement strength. If any one of them is corroded, the structure will be involved as a whole.



Sin embargo, ni la alta alcalinidad o la baja permeabilidad del recubrimiento pueden garantizar que el acero de refuerzo pueda resistir a la corrosión indefinidamente, especialmente en ambientes marinos (Austin et al., 2004). Por lo general, la acción de éstos agentes agresivos propicia que el proceso de corrosión se inicie en el refuerzo transversal (estribos), cuyo acero es el más próximo a la superficie del concreto. Esto afecta la resistencia a cortante por tensión diagonal de la estructura, la cual se requiere para soportar concentraciones altas de esfuerzos de tensión cerca de los apoyos. Usualmente el cortante es resistido por los estribos, y un deterioro importante en su resistencia podría ocasionar una falla frágil y repentina. Esto contrasta con la naturaleza de la falla a flexión la cual se inicia con una fluencia gradual en el acero a tensión, simultáneamente se presenta un agrietamiento del concreto y grandes deformaciones que advierten sobre el problema y dan la oportunidad de tomar decisiones correctivas (Nilson, 1999).

Yoon et al. (2000), investigaron la influencia del ancho de grieta en el proceso de corrosión usando diferentes proporciones de mezcla y encontraron que cuando las grietas permanecen relativamente pequeñas (< 1.0 mm), tienen poco impacto en el proceso de corrosión. Por otro lado, en grietas mayores (> 1.0 mm) se incrementa la velocidad de corrosión, lo cual reduce el funcionamiento total de la estructura (Yoon et al., 2000). Por lo tanto, es importante tomar en cuenta el ancho de grieta en el diseño por durabilidad de estructuras de concreto reforzado. En otra investigación (Vidal et al., 2007) estudiaron el comportamiento corrosivo y estructural en vigas de concreto reforzado expuestas a un ambiente de cloruros durante 17 años y se observó que después de la primera aplicación de carga a los 28 días de edad, el ancho de las grietas fue superior a 1.0 mm. También se encontró, que la penetración total de cloruros en zonas de tensión y de compresión fue de 16 mm de espesor; pero después de 5 años el contenido de cloruros excedió las normas establecidas por el RILEM y el ACI.

En otro estudio (Aveldaño et al., 2003), se analizaron los efectos producidos por la corrosión en el refuerzo de vigas de concreto sometidas a esfuerzos de tensión; esto con la aplicación de corrientes de 10 y 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ en un medio con cloruros (0.3%). Se encontró que en vigas de concreto reforzado se produjo rápidamente la aparición de las primeras grietas, pero se mantuvo con un bajo crecimiento. En cambio, se incrementaron las áreas de agrietamiento rápidamente en el caso de vigas bajo carga, manifestando grietas de espesores de 0.30 mm. Otra investigación (Yoon et al.,

Nevertheless, neither high alkalinity nor low permeability of concrete might guarantee to avoid steel reinforcement corrosion indefinitely, especially in marine environments (Austin et al., 2004). Generally, the action of such aggressive agents favors the beginning of corrosion process in the cross sectional reinforcement (stirrups), which steel is next to concrete surface. It affects the shear strength due to diagonal tensile stress in the structure, which is expected to support high concentration of tensile strength next to bearings. Usually, shear strength is provided by stirrups and a considerable loss of strength may cause a brittle and sudden failure. This differs from the nature of flexure failure, which begins with a gradual steel deformation due to tensile stress and cracks arising simultaneously as large distortions that alert the situation and give the chance to make corrective decisions (Nilson, 1999).

Yoon et al. (2000), studied cracks width influence in corrosion process by using different mixtures ratios and found that relatively small cracks (< 1.0 mm) have a minor impact in the corrosion process. On the other hand, larger cracks (> 1.0 mm) increase corrosion speed, which reduces the proper workability of the total structure (Yoon et al., 2000). Therefore, cracking width must be taken into consideration at durability design of reinforced concrete structures. In other research (Vidal et al., 2007) studied corrosive and structural behavior on reinforced concrete beams exposed to chloride environment during 17 years; and they observed that after the first load, at 28 days of age, the cracking width was superior to 1.0mm. They also found that total penetration of chloride in tensile and compression areas was 16 mm in depth, but after 5 years the content of chloride exceeded regulations established by RILEM and ACI.

Other research (Aveldaño et al., 2003) studied the effects caused by corrosion on the reinforcement in concrete beams exposed to tensile stress, which were conducted by applying 10 y 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ current to a chloride environment (0.3%). They found that reinforced concrete beams rapidly produced the first cracking failures; but those kept at a low growing rate. However, the cracking areas increased rapidly in the case of loaded beams, producing 0.30-mm wide crack. Other research (Yoon et al.,



2000), estudió la interacción entre carga, corrosión y serviciabilidad en estructuras de concreto reforzado, encontrando que a un nivel alto de carga da lugar generalmente a una reducción en la iniciación del proceso de corrosión, a una velocidad de corrosión alta y a una pérdida de la capacidad de carga, debido a la falla por adherencia entre acero-concreto. Recientemente Torres-Acosta et al. (2007) investigaron la relación entre el deterioro por corrosión de pequeñas vigas de concreto (1.50 m de longitud) simplemente apoyadas y la capacidad de carga a flexión basado en una metodología de corrosión acelerada (aplicación de una corriente de $80\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Se observó que en un ambiente seco las grietas se desarrollan rápidamente en comparación a un ambiente húmedo. Sus resultados indicaron que para una relación entre penetración de corrosión y el radio inicial de la varilla (X_{AVER}/r_0) de 0.06 y 0.1 con corrosión uniforme en un ambiente húmedo, la capacidad de carga residual disminuye hasta un 30% y 40% respectivamente, del mismo modo, si la corrosión es localizada disminuye hasta un 60% con una relación X_{AVER}/r_0 de 0.1.

Sin embargo, se ha encontrado poca información en la literatura sobre estudios del problema de deterioro en el acero transversal en condiciones de escala natural de elementos estructurales, pero la corrosión es un factor importante en la durabilidad de vigas de concreto reforzado, debido a que, modifica las propiedades mecánicas de estas como la capacidad a cortante por tensión diagonal. De tal manera, la presente investigación pretende correlacionar los parámetros de corrosión y la resistencia a cortante por tensión diagonal que permita predecir una relación confiable entre el comportamiento estructural y la durabilidad de vigas de concreto reforzado.

2. Procedimiento experimental

2.1 Materiales

Se utilizó concreto premezclado $f'c = 20$ MPa, con un tamaño máximo nominal de agregado de 19 mm y una consistencia del concreto de 85 mm, que fue medida mediante la norma ASTM C 143-00. El acero de refuerzo longitudinal, fueron varillas No. 5 (16 mm de diámetro) y varillas para el refuerzo transversal de No. 2.5 (8 mm de diámetro) con un $f_y = 420$ MPa, se preparó la superficie del refuerzo mediante una limpieza manual con un cepillo de cerdas metálicas, para retirar el óxido superficial. Las varillas longitudinales se recubrieron con una pintura epóxica a base de resinas para evitar su corrosión. Para evitar la formación de pilas galvánicas,

2000) studied the interaction between load, corrosion and service conditions in reinforced concrete structures, finding that a high level of load generally leads to a shortening of the beginning of corrosion process, to a high corrosion speed and to a loss of loading capacity, because of bonding failures between steel-concrete. Recently, Torres-Acosta et al. (2007) studied the relation between failure because of corrosion in small simply supported concrete beams (1.50 m long) and the flexure load capacity based on an accelerated corrosion method (applying $80\mu\text{A}/\text{cm}^2$ current). It was observed that dry environment favors cracking faster than dampening environments. Results concluded that a ratio between penetration and initial reinforcement radius (X_{AVER}/r_0) of 0.06 and 0.1 - steadily corroded in a wet environment - the residual load decreases up to 30% and 40% respectively. In the same way, if corrosion is located, it will decrease up to 60% at a ratio X_{AVER}/r_0 of 0.1.

However, there is little literature information about experimental studies on damage problems in cross sectional steel, under a natural conditions scale for structural elements, but corrosion is still a major factor affecting durability of reinforced concrete beams, since corrosion modifies mechanical properties, such as shear strength due to diagonal tensile stress. In this way, the present study intends to correlate corrosion parameters and shear strength due to diagonal tensile strength, in order to foresee a reliable relation between the structure behavior and reinforced concrete beams durability.

2. Experimental method

2.1 Materials

Ready mixed concrete $f'c = 20$ MPa was employed, with a maximum nominal aggregate size of 19mm; and concrete slump of 85mm, measured in accordance with ASTM C 143-00. 16-mm diameter reinforcement bars were employed (# 5) for flexure reinforcement steel and 8-mm diameter bars (#2.5) for shear reinforcement, with $f_y = 420$ MPa, the reinforcement surface was manually cleaned by using a metal brush, to remove superficial corrosion products. Longitudinal bars were covered with an epoxy resin coating to avoid corrosion. So as to avoid the formation of galvanic piles

en los puntos de contacto entre el acero longitudinal y transversal, se procedió a recubrir estos puntos con cinta de aislamiento. De igual forma, se sustituyó el alambre recocado por cintillas de nylon, esto para sujetar el refuerzo transversal con el longitudinal.

2.2 Fabricación de especímenes

Se fabricaron 16 vigas de concreto reforzado de 2000 x 200 x 350 mm, con separaciones de 150 y 200 mm entre el refuerzo transversal (ver Figura 1), y se curaron los primeros 7 días con lámina de agua dentro de la cimbra, se desmoldaron y posteriormente se le colocó una membrana de curado hasta los 28 días de edad. Para el control de la calidad del concreto se fabricaron nueve cilindros de concreto de 150 x 300 mm para determinar su resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de edad; y cilindros de 100 x 200 mm los cuales fueron utilizados para obtener la penetración de iones cloruros a diferentes tiempos durante la inducción del deterioro.

on the contact points between the longitudinal and shear steel, those points were covered with an insulation tape. Besides, wire was replaced by nylon strips in order to hold flexure and shear reinforcements.

2.2 Specimens Construction

16 2000 x 200 x 350 mm reinforced concrete beams were fabricated, each having a spacing distance of 150 and 200 mm between the longitudinal reinforcement (see Figure 1). Beams were cured for 7 days with a water sheet inside forms; then beams were unmolded and covered with a curing compound up to 28 days of age. For concrete quality control, nine 150 x 300 mm concrete cylinders were cast and tested to estimate the compression strength at 7, 14 and 28 days of age. 100 x 200 cylinders of were also prepared to obtain results on chloride ions penetration at different ages, during damage induction.

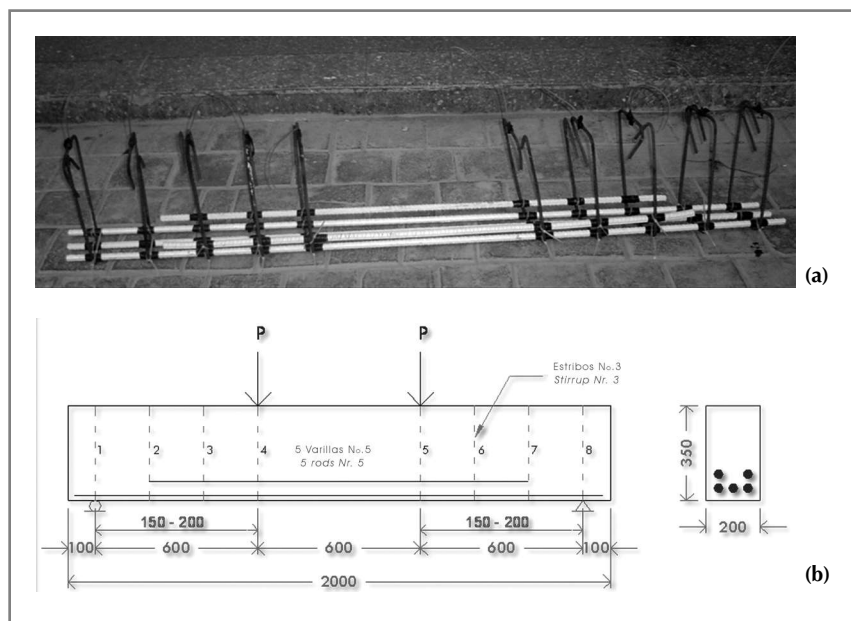


Figura 1. a) Armado del refuerzo b) Esquema del armado del refuerzo, acotaciones en mm.
Figure 1. a) Reinforcement (actual). b) Reinforcement (scheme), distances in mm.

2.3 Inducción del deterioro

Antes de iniciar el proceso de inducción de corrosión acelerada se pintó la cara superior e inferior de las vigas con impermeabilizante, para garantizar solamente la corrosión en los estribos. También, se retiró la membrana de curado de las caras laterales con cepillo de cerdas metálicas. Se tomó la lectura inicial de velocidad y potencial de corrosión de cada estribo de las 16 vigas como lecturas base para el desarrollo experimental.

2.3 Damage induction

Before beginning the accelerate corrosion induction process the upper and lower beam faces were covered with waterproofing painting, so as to guarantee corrosion on stirrups only. The curing membrane was removed from side faces by using a metallic bristle brush. Initial corrosion rate and corrosion potential in each stirrup of 16 beams were measured and taken as basis for the experimental test.

El proceso de inducción de corrosión acelerada en el refuerzo transversal de las vigas, fue realizado mediante ciclos de tres días de humectación utilizando una solución de 3.5% de NaCl y cuatro días de secado al aire libre. La humectación de las vigas se lleva a cabo por medio de esponjas de poliuretano, las cuales están sujetadas en la zona de los estribos. Estas esponjas son humectadas cada 3 horas con la solución de NaCl durante el ciclo de humectación, y para evitar la evaporación de la solución las vigas se cubren con plástico (Ver Figura 2).

The accelerate corrosion induction process for shear reinforcement, was conducted through three days dampening cycles using a 3.5% NaCl solution and four days for drying in the open air. Dampening the beams is done by employing polyurethane foams which are fixed at the stirrups zone. These foams are dampened with NaCl solution every three hours during the dampening cycle, in order to avoid the solution evaporation; beams are covered with a plastic film. (Ref. Figure 2).

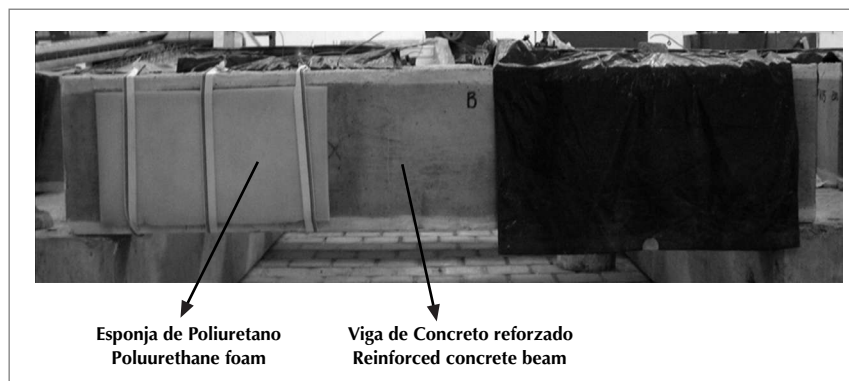


Figura 2. Inducción del deterioro de las vigas
Figure 2. Beams damage induction

2.4 Evaluación y seguimiento del deterioro

El monitoreo de parámetros electroquímicos se lleva a cabo mediante el Corrosion Rate Meter LG – ECM-06, James NDT Instruments (GECOR6) y el Galva Pulse GP 5000 de acuerdo a la norma ASTM C 876. Los niveles de corrosión incipiente ($E_{corr} > -350$ mV, despasivación del acero), moderada (Aparición y propagación de agrietamiento, ancho de grieta < 0.1 mm) y severa (propagación de agrietamiento, ancho de grieta > 0.1 mm, desprendimiento, manchas), se definieron con respecto al criterio del RILEM (Andrade y Alonso, 2004) que determina estos niveles con la clasificación de los resultados de velocidad y potencial de corrosión y mediante una inspección visual de la superficie de las vigas, esto de acuerdo a las recomendaciones de la bibliografía consultada.

2.5 Ensayo de las vigas

Una vez alcanzado los niveles de corrosión previamente definidos, las vigas serán ensayadas a flexión, lo que producirá altos niveles de esfuerzos por tensión diagonal cerca de los apoyos. Las vigas de control (sin corrosión) fueron ensayadas previamente al proceso de corrosión,

2.4 Damage evaluation and control

Monitoring of electrochemical parameters is conducted by employing the Corrosion Rate Meter LG – ECM-06, James NDT Instruments (GECOR6) and the Galva Pulse GP 5000 in accordance with ASTM C 876 regulation. The corrosion levels are incipient ($E_{corr} > -350$ mV, steel depassivation), moderate (cracking appearance and spreading, cracking width < 0.1 mm) and severe (cracking spreading, cracking width > 0.1 mm, decoupling, spots), which were defined according to RILEM (Andrade and Alonso, 2004), that determines these levels with classification results on speed and potential corrosion by means of visual inspection on the beam surface, as per recommendations in the consulted bibliography.

2.5 Beams Tests

When previously defined corrosion levels are achieved, beams will be placed under flexure strength, which will produce high levels of diagonal tensile stress near the bearings. Control beams (not corroded) were tested prior to corrosion process,

aplicando cargas concentradas a 600 mm de los apoyos (Figura 1). Para tener un control del avance de agrietamiento de las vigas se aplicó carga en etapas de 5 kN. La resistencia teórica a cortante para las vigas, se obtuvo de acuerdo con las recomendaciones del código del Instituto Americano del Concreto (ACI 318-08).

En la Figura 3 se muestra un diagrama experimental, en donde se puede apreciar el proceso por el cual se someterán las 16 vigas de concreto reforzado.

applying concentrate loads at 600 mm from bearings (Figure 1). In order to monitor the beams cracking progress, a load of 5kN was applied in different stages. The beams theoretical shear strength was obtained according to recommendations in the Code of American Concrete Institute (ACI 318-08).

Figure 3 shows an experimental diagram, indicating the experimental process underwent by the 16 reinforced concrete beams.

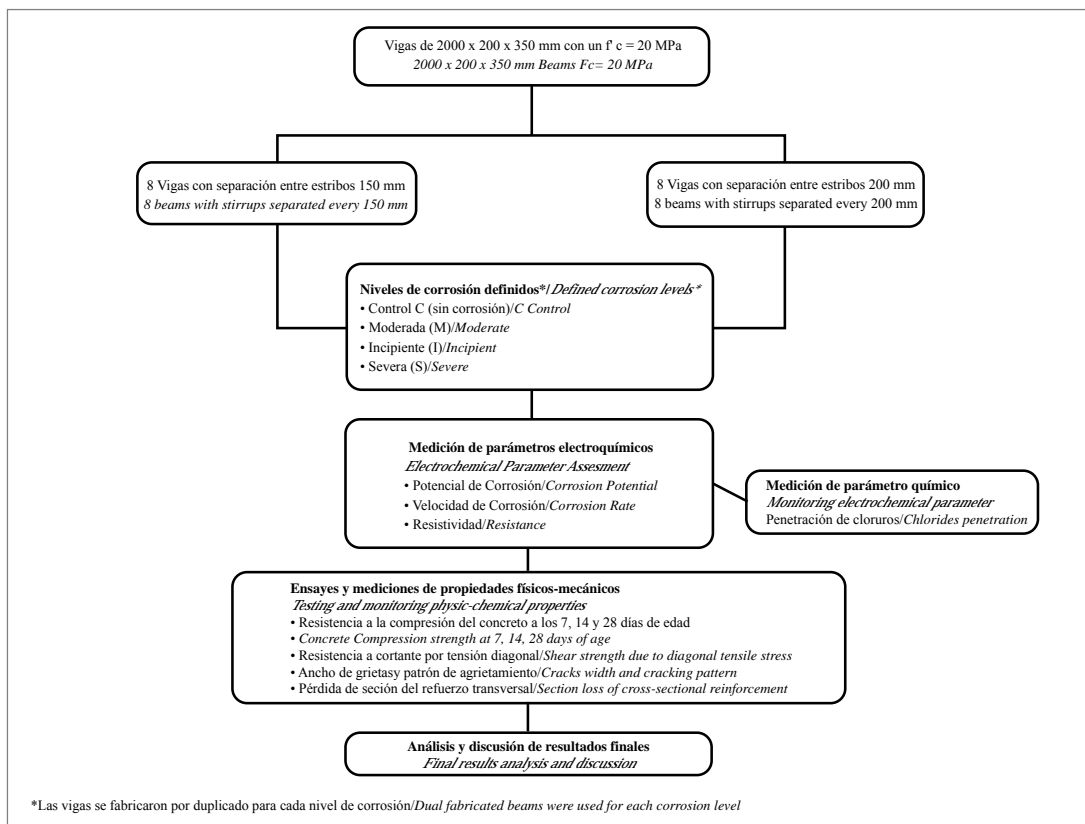


Figura 3. Diagrama experimental
Figure 3. Experimental diagram

3. Resultados preliminares

De los cilindros de concreto de 150 x 300 mm se obtuvo valores de la resistencia a la compresión de 16, 19 y 21 MPa a 7, 14 y 28 días de edad respectivamente, esto mediante un promedio de tres ensayos (como se especifica en la norma ASTM C 39/C39M-03).

De los cilindros de 100 x 200 mm los cuales se sometieron a ciclos de humedecimiento y secado, se obtuvo una concentración de cloruros acuasolubles a una profundidad de 10 mm de 0.43% ppc (por peso de cemento), y para una profundidad de 20 mm no fue determinada debido a la sensibilidad del equipo,

3. Preliminary results

From 150 x 300 mm concrete cylinders, the following compression strengths were obtained: 16, 19 and 21 MPa at 7, 14 and 28 days of age respectively, this was calculated by averaging three specimens at each age (as specified by ASTM C 39/C39M-03 regulation). From Cylinders of 100 x 200 mm, which were exposed under dampening and drying cycles, a concentration of water-soluble chlorides at 10 mm depth of 0.43% pcw (per concrete weight) was obtained; at 20 mm depth it was not possible to determine any concentration of chlorides,



por lo tanto, se obtuvo valores menores a 0.24% ppc. El valor a una profundidad de 10 mm esta por encima del límite permitido por el ACI 318-08 que es 0.15% en ambiente de Cl, esto nos dice que se verán resultados del proceso de corrosión a edades tempranas.

Con la concentración de cloruros acuasolubles previamente mencionada y el recubrimiento en las vigas (≈ 2 cm), se obtuvo el tiempo teórico en el cual los cloruros llegarán a despasivar al acero de refuerzo, este fue de 28 días aproximadamente, pero este valor puede variar debido a la multitud de parámetros que influyen (porosidad del concreto, tipo de cemento, contenido de humedad del concreto, etc.). Esto se observa en nuestras vigas ya que, tienen 98 días de exposición al proceso de deterioro y solo el 20% de los estribos están despasivados.

En la Figura 4 se observa los potenciales de corrosión a 98 días de exposición al deterioro, y de acuerdo a la norma ASTM C 876 tres de los estribos de las vigas 4, 7 y 8 se sitúan en el estado de probabilidad de corrosión alta con valores inferiores a -350 mV, por lo tanto, estas vigas están en un nivel de corrosión incipiente. Mientras que los estribos de las vigas 3, 5 y 6 presentan valores superiores a -350 mV, por lo que, se sitúan en un estado de probabilidad de corrosión baja.

because values obtained were below 0.24% pcw which is under the equipment sensitivity the value at 10mm depth is over the limit permitted by the ACI 318-08 that is 0.15% for a Cl environment. Above indicates that corrosion process results will appear at early ages.

From the water-soluble chloride concentration previously mentioned and beam covering (≈ 2 cm), the theoretical time in which chlorides would depassivate the reinforcement steel was calculated in 28 days approximately, however, this value might vary due to multiple parameters involved (concrete porosity, type of cement, concrete moisture, etc.). This can be observed in the test beams which have been exposed to damage for 98 days and only 20% of stirrups are depassivated.

Figure 4 shows the potential corrosion at 98 days from damage exposure, as per ASTM C 876 regulation, three stirrups out of beams 4, 7 and 8 are likely to be under corrosion with values under -350 mV, therefore, these beams are at an incipient corrosion level. Meanwhile, stirrups of beams 3, 5 and 6 yield values above -350 mV, so they are at a low corrosion probability condition.

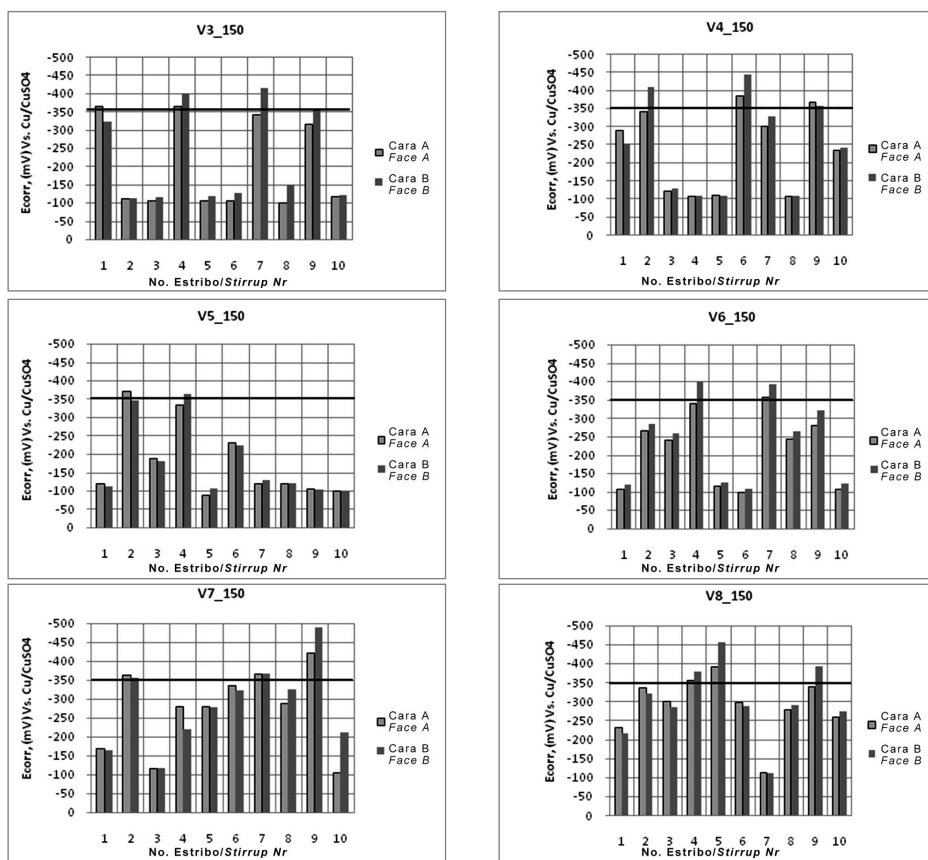


Figura 4. Potencial de corrosión del estribo medido en ambas caras de la viga, con separación de 150 mm entre estribos
 Figure 4. Stirrup Corrosion Potential measured on both beam faces, at a spacing distance of 150 mm between stirrups

*El No. de estribo está indicado en la Figura 1.

*The stirrup number is indicated in Figure 1.



En la Figura 5 se observa los potenciales de corrosión a 98 días de exposición al proceso de deterioro, en donde se aprecia que los estribos 4, 5 y 6 de las vigas 11 y 14 se sitúan en el estado de probabilidad de corrosión alta con valores inferiores a -350 mV, mientras que la mayoría de los estribos de las vigas 13, 15 y 16 se sitúan en un estado de probabilidad de corrosión baja con valores superiores a -350 mV, e incluso con valores superiores a -200 mV. Por otro lado en la viga 12 los estribos 1, 2, 3, 6, 7 y 8 presentan valores entre -200 y -350 mV y aunque esto sitúa al acero de refuerzo en una probabilidad de corrosión intermedia, se puede ver que existe una tendencia a incrementar el potencial.

In Figure 5 the corrosion potentials can be observed at 98 days of exposure to damage process, where it can be seen that stirrups 4, 5 and 6 of beams 11 and 14 are at a high corrosion condition with values under -350 mV, while most stirrups in Beams 13, 15 and 16 are at a low corrosion condition with values above -350 mV, and even above -200 mV. On the other hand, in beam 12 the stirrups 1, 2, 3, 6, 7 and 8 present values between -200 and -350 mV and even though it places reinforcement concrete at an intermediate corrosion probability condition, there is a trend to increase the potential.

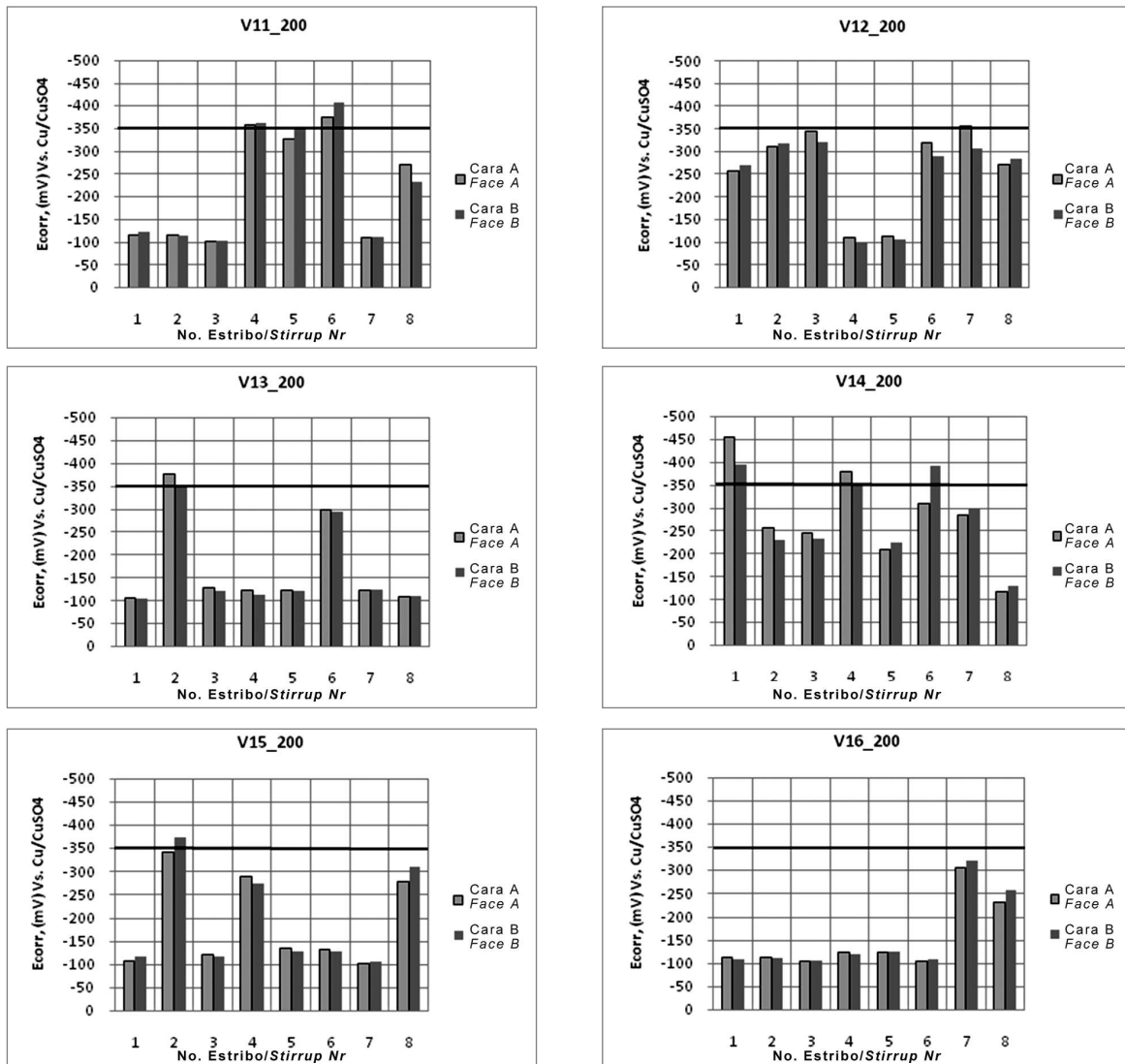


Figura 5. Potencial de corrosión del estribo medido en ambas caras de la viga, con separación de 200 mm entre estribos
Figure 5. Stirrup Corrosion Potential measured on both beam faces, at a spacing distance of 200 mm between stirrups.

*El No. de estribo está indicado en la Figura 1

*The stirrup number is indicated in Figure 1.

En la Figura 6 se aprecian los resultados del ensayo mecánico de las vigas de control, en donde se puede observar que la resistencia última a cortante para las vigas con estribos separados a cada 150 mm fue mayor en un 25% a las vigas con estribos separados a 200 mm. Se muestra la resistencia teórica a cortante, encontrándose que es similar a la resistencia obtenida en el ensayo. También se observa que la separación de los estribos no influyo en la ductilidad de las vigas ensayadas.

Figure 6 shows the results from mechanical test on control beams, where it can be observed that the ultimate shear strength of beams having stirrups separated every 150 mm was 25% higher than beams separated every 200 mm. The theoretical shear strength is proved to be similar to the shear strength obtained from the test. It is also concluded that stirrups spacing distance did not influence ductility of tested beams.

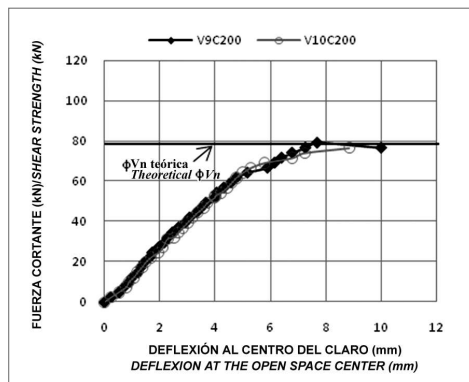
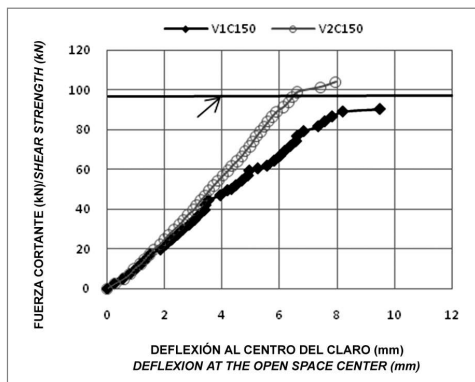


Figura 6. Deflexiones en el acero transversal
Figure 6. Deflections for shear reinforcement steel

La falla de las vigas de control fue a cortante por tensión diagonal con un patrón de agrietamiento mostrado en la Figura 7. En donde se puede observar la aportación de los estribos separados a 150 mm que generan un mayor agrietamiento en la zona de tensión ocasionado por cargas mayores y cercanas a la que provocaron la falla por cortante

Control beams failure was caused by shear strength due to diagonal tensile stress. The cracking pattern is shown in Figure 7, where we can notice the contribution of fixing stirrups every 150 mm that produced major cracking in the tensile zone, due to heavier loads which are similar to the ones causing the shear strength failure.

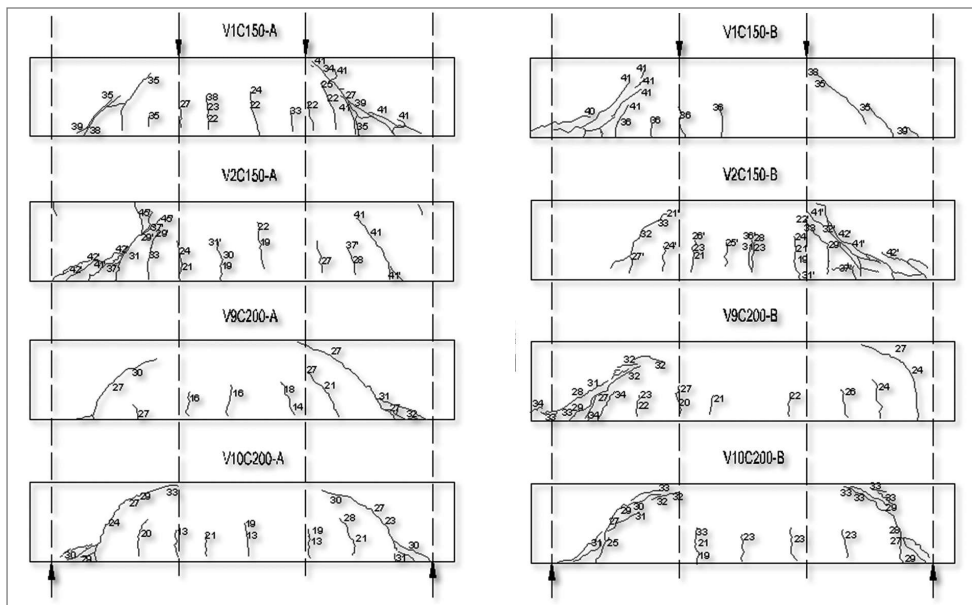


Figura 7. Patrón de agrietamiento de las vigas de control. Los valores sobre las grietas representan el número de ciclo de carga (la carga total promedio por ciclo fue de 5 kN)

Figure 7. Cracking Pattern for Control Beams. Values above cracks represent the load cycle number (total average load per cycle was 5kN)

4. Discusión y comentarios finales

Los resultados obtenidos en los potenciales de corrosión variaron de acuerdo a la separación entre estribos, ya que en las vigas con separaciones de 150 mm se pudo apreciar que presenta una tendencia a superar en menos tiempo potenciales menores a -350 mV. Mientras que las vigas con separaciones entre estribos de 200 mm, presentan valores superiores a -350 mV, esto en la mayoría de los estribos. Esto nos dice que las vigas con separaciones de 150 mm son las más próximas a alcanzar un nivel de corrosión incipiente (despasivación del acero de refuerzo), en comparación con las de separación de 200 mm.

En las vigas de control ensayadas se obtuvo que la resistencia cortante última es similar a la resistencia teórica según ACI-318-08. Además, las vigas con mayor refuerzo transversal (separación de 150 mm) presentaron mayor ductilidad lo cual era de esperarse, sin embargo, también proporcionaron un múltiple agrietamiento en la zona de cortante y tensión.

Con los resultados obtenidos hasta el momento se vislumbra la verificación de la pérdida de capacidad a cortante por tensión diagonal de vigas de concreto en función del deterioro por corrosión inducido en los estribos a través de ciclos de mojado y secado con Cl⁻.

5. Agradecimientos

Los trabajos descritos en este artículo fueron desarrollados en el Instituto de Ingeniería Civil de la FIC-UANL. Los autores expresan su más profundo agradecimiento al PAICYT y SEP por los apoyos financieros otorgados a los proyectos CA-1499-07, CA-1477-07 PROMEP/103.5/07/0293 respectivamente. A la Ing. Mercedes Balancán Zapata quién labora en el CINVESTAV-IPN Unidad Mérida, por el apoyo brindado para el desarrollo de ésta investigación y por sus valiosas sugerencias e interés mostrado. A los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil-UANL que han brindado su ayuda durante esta investigación.

4. Discussion and final comments

The obtained corrosion potential results varied with stirrups spacing, since it can be observed that beams with stirrups spacing of 150mm tend to present corrosion potentials below -350 mV in shorter periods of time. While beams with stirrups spacing of 200 mm, provide values above -350 mV, in most of the stirrups. This indicates that beams with stirrups spacing of 150 mm are most likely to reach an incipient corrosion level (depassivation of reinforced steel), in comparison to 200 mm spacing distance ones.

The tested control beams showed that the ultimate shear strength is similar to theoretical strength as per ACI-318-08. B. As expected, the beams which were heavily shear reinforced (spacing of 150 mm), showed higher ductility capacity. However, they also showed multiple cracks in shear and tensile stressed zone.

From results obtained so far, the loss capacity for shear strength due to concrete beams diagonal tensile stress can be expected based on the corrosion damage obtained at the stirrups through chloride dampening and drying cycles.

5. Acknowledgements

The experimental studies described in this article were developed at Instituto de Ingeniería Civil de la FIC-UANL. The authors express their deepest gratitude to PAICYT and SEP for the financial support provided through CA-1499-07, CA-1477-07 PROMEP/103.5/07/0293 projects, respectively. Our special thanks to Mercedes Balancán Zapata, Eng., who works at CINVESTAV-IPN Mérida Unit, for her valuable suggestions and interest shown in our research. We express our gratitude to students at the School Civil Engineering- UANL, who provided assistance during this research.

6. Referencias / References

- ACI 318S-08 (2008), American Concrete Institute, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*, 59.
- Andrade C. y Alonso C., Noviembre (2004), RILEM TC 154-EMC, "Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method", *Materials and Structures*, Vol. 37, 623-643.
- ASTM C 876-91 (reapproved 1999), "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". American Society for Testing and Materials, 461-466, Philadelphia.
- ASTM C 143-00 (2000), "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete". American Society for Testing and Materials, 1-3, Philadelphia.
- ASTM C 39/C39M-03 (2003), "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". American Society for Testing and Materials, 21-25 Philadelphia.
- Austin S.A., Lyons R. y Ing M.J. (2004), "Electrochemical Behavior of Steel-Reinforced Concrete During Accelerated Corrosion Testing", *Corrosion Engineering Section*, vol 60, No.2, 203-212.
- Aveldaño R.R., Ortega N.F. y Bessone J.B. (2004), "Corrosión bajo tensión en hormigón armado. Efectos de la Densidad de corriente y composición del medio electrolítico", *Jornadas SAM – CONAMET-AAS Simposio Materia* 521-542.
- Del Valle Moreno A., Pérez López T. y Martínez Madrid M. (2001), *El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado*, Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte (SCT), *Publicación Técnica No. 182*, 1-88 Sanfandila, Qro.
- DURAR Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura, *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (1998), CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 2ª. Edición, 37-39.
- Higgins Christopher y Farrow III William C., Enero-Febrero (2006), "Tests of Reinforced Concrete Beams with Corrosion-Damaged Stirrups" *ACI Structural Journal*, Technical Paper, 133-141.
- Helene P. y Pereira F. (2003), *Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección*. REHABILITAR, CYTED.
- Hernández-Castañeda O. y Mendoza Escobedo C. J. (2006), *Durabilidad e Infraestructura: Retos e Impacto Socioeconómico*, INGENIRÍA Investigación y Tecnología VII 1, 57-70 Universidad Autónoma de México, Distrito Federal. México.
- Nilson H. (1999), *Diseño de estructuras de concreto*, Mc. Graw Hill, Duodécima Edición, 105-121.
- Park R. y Paulay T., (1990) *Estructuras de Concreto Reforzado*, ED. Limusa Noriega, Nueva Edición, 288-294.
- Torres-Acosta A. A., Navarra-Gutiérrez S. y Terán-Guillén J. (2007), Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams, *Engineering Structures* 29, 1145-1152.
- Vidal T., Castel A., François R. (2007), "Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment", *Cement and Concrete Research* 37, 1551-1561.
- Yoon Sanchu, Kejin Wang, W. Jason Weiss y Surendra P. Shah, Noviembre-Diciembre (2000), "Interaction between Loading, Corrosion, and Serviceability of Reinforced Concrete", *ACI Materials Journal*, Technical Paper, 637-644.