

EFFECTOS DE LA CORROSION EN ELEMENTOS DE HORMIGON PRETENSADO

Ing. Mariela Cordero, Ing. José Eduardo Martel, Ing. Raúl D. Benito, Dr. Rodolfo F. Danesi
*Laboratorio de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán,
Casilla de Correo 134, Correo Central, (4000) San Miguel de Tucumán, Argentina*

RESUMEN

Desde la década del '50 en adelante se construyeron numerosos puentes con la tecnología del hormigón pretensado. Con el tiempo, comenzaron a producirse colapsos parciales o totales en construcciones de este tipo, como consecuencia de problemas de corrosión bajo tensión en los aceros de pretensado. Al ser el fenómeno de difícil observación directa, y los métodos no destructivos de detección poco eficientes hasta el momento, puede pasar desapercibido hasta provocar en la estructura una degradación incontenible de difícil recuperación.

En este trabajo se presenta el estudio numérico - experimental del fenómeno desde el punto de vista estructural. Se estudian los efectos de la corrosión sobre las propiedades mecánicas de elementos sometidos a flexión predominante, cuya determinación permitiría predecir y diagnosticar un posible ataque corrosivo en los tendones de pretensado. Esto posibilitaría a su vez proponer procedimientos tecnológicos de reparación y refuerzo en caso de ser necesarios.

ABSTRACT

From the decade of the '50 till now a great number of bridges using the technology of prestressed concrete were built. As time went by, partial or complete collapses of structures of this kind occurred as a consequence of corrosion under tension in the prestressing steel. The phenomenon is of difficult direct observation and the non destructive methods are at present not efficient enough to detect the problem before the structure suffers serious damage.

A numerical and experimental study of the phenomenon from the structural point of view, is presented in this work. The effects of corrosion are studied in relation with the mechanical properties of elements under predominant flexural states. As a consequence, a possible corrosive attack to the prestressing tendons. could be predicted and diagnosed, allowing technological procedures of reparation and reinforcement to be proposed.

INTRODUCCION

Existen numerosos trabajos sobre estudios de corrosión en aceros, generalmente relacionados con aceros estructurales clásicos como perfiles y barras laminadas de distintos tipos de composiciones químicas. Sin embargo, por el tipo de exposición y por sus condiciones de trabajo, el acero para pretensado constituye un tipo de material especialmente sensible y propenso a sufrir las consecuencias de este proceso electroquímico, cuyo estudio necesita ser profundizado.

Autores como Podolny¹, abundan en datos estadísticos que confirman la necesidad de atender en forma urgente el estudio de este fenómeno que atenta contra la seguridad de las construcciones que involucren la tecnología del pretensado. Diversas instituciones, tales como el Prestressed Concrete Institute han dado prioridad a los estudios sobre el particular, promoviendo a su vez proyectos tendientes a atenuar el impacto económico y funcional que plantea la revisión de gran cantidad de construcciones en servicio que requieren ser analizadas y posiblemente reparadas.

El presente trabajo analiza los efectos de la corrosión bajo tensión en una viga pretensada de sección doble T, con dimensiones típicas de las empleadas para puentes. El estudio parte de simular tanto numérica como experimentalmente las consecuencias del proceso gradual de deterioro provocado por la corrosión sobre el comportamiento estructural del elemento analizado. Los modelos numérico y experimental fueron sometidos a estados de carga que provocaron estados tensionales representativos de las condiciones de trabajo reales. Las comparaciones entre los resultados obtenidos sobre los modelos numérico y experimental permiten considerar la factibilidad de, mediante un método mixto que combine el análisis numérico juntamente con ensayos de campo, determinar si una estructura pretensada puede presentar algún grado de deterioro por corrosión.

DESCRIPCION DEL PROCESO DE CORROSION

La corrosión² de la armadura en el hormigón consiste en la oxidación destructiva del acero, provocada por el medio que lo rodea. Así, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales:

- Un Anodo, donde ocurre la oxidación.
- Un Cátodo, donde ocurre la reducción.
- Un Conductor Metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
- Un Electrolito: en este caso el hormigón, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.

Las consecuencias del proceso en un elemento de hormigón armado son:

- El acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido.
- El hormigón puede fisurarse o delaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al generarse.
- La adherencia armadura - hormigón disminuye o desaparece.

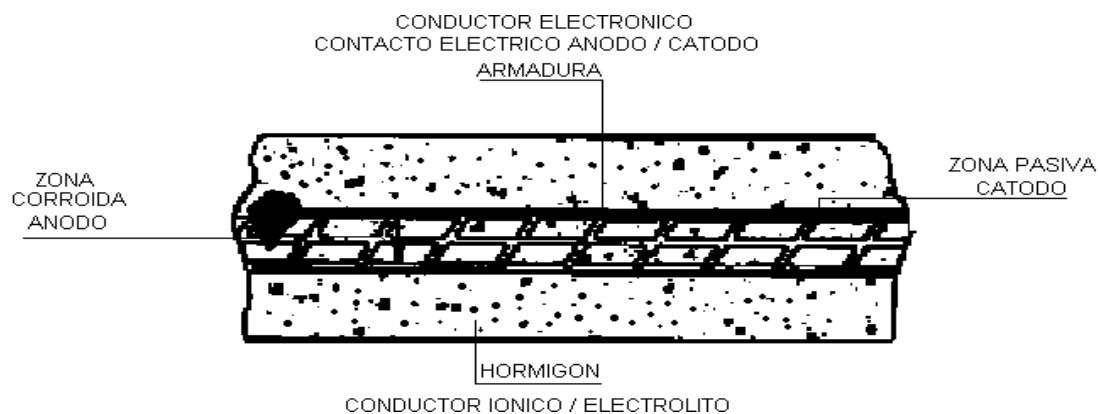


Fig. 1: PROCESO DE CORROSION

La corrosión bajo tensión: es el tipo de corrosión localizada que ocurre cuando se dan conjuntamente dos circunstancias: esfuerzos de tracción sobre el acero y un medio agresivo. Esto ocurre preferentemente en hormigón pre- o postensado, donde se utilizan aceros de alta resistencia debido, en general, a la presencia de hidrógeno atómico difundiendo a través del metal. Este hidrógeno puede provenir de diferentes fuentes: corrosión del acero, protección catódica, etc. La corrosión bajo tensión es un fenómeno muy específico, generalmente asociado a una mala calidad del hormigón, o la presencia de determinados iones, generalmente aportados por algunos aditivos. En el caso de aceros pretensados, la presencia de picaduras por corrosión causada por iones cloruro, puede inducir a que el acero presente corrosión por tensiones. Este daño es considerado del tipo catastrófico, ya que está asociado a una pérdida de ductilidad y a la posterior fluencia de la armadura.

DESCRIPCION DE LA VIGA PROTOTIPO ANALIZADA

Como prototipo objeto del estudio numérico – experimental se seleccionó un elemento estructural representativo de las construcciones de puentes del país. Se trata de una viga de puente carretero de calzada convencional, calculada según la reglamentación de la Dirección Nacional de Vialidad, bajo la suposición de colaboración uniforme entre todas las vigas que soportan el tablero. La viga es de hormigón pretensado de sección doble T, cuya disposición típica formando parte del tablero de un puente se ilustra en la Fig. 2.

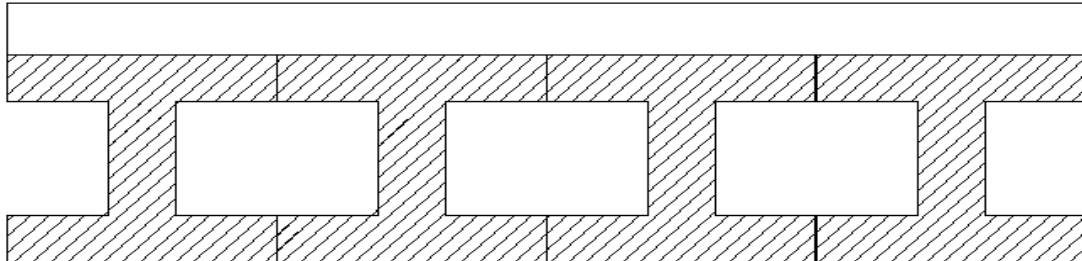


Fig. 2: DISPOSICION DE LAS VIGAS EN UN PUENTE

Características geométricas de la viga (Fig.: 3 y 4)

La longitud de la viga (Fig.3) es de 13,80 m, mientras que las dimensiones de la sección transversal se detallan en la Fig.4 y se describen a continuación:

Ala viga = 0,40 m

Altura viga = 0,40 m

Altura capa superior = 0,10 m

En cuanto a la armadura dispuesta en la viga, consta de armadura tesa y armadura no tesa. Longitudinalmente, la armadura no tesa consiste de 2 barras de 8 mm de diámetro y 2 barras de 10 mm de diámetro, dispuestas en el ala superior de la viga tal como detalla la Fig. 4. Transversalmente, la armadura consiste de estribos de 8 mm de diámetro, cuya forma se detalla en la Fig.3. Estos estribos de hallan distanciados 0.07 m entre sí en metro inicial de cada extremo, mientras que su separación es de 0,13 m en la zona central de la viga. Por su parte, la armadura tesa consiste de 20 trenzas de 3 cables de 3 mm cada una dispuestas en la forma que se indica en la Fig.4.

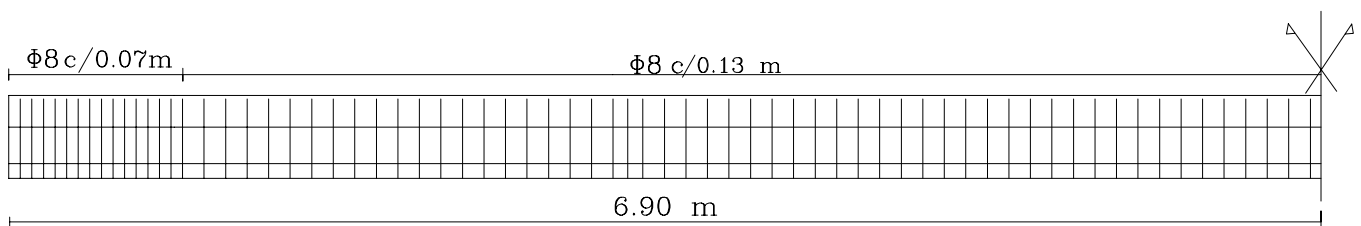


Fig. 3: VISTA LONGITUDINAL DE LA VIGA

En la Fig. 4 se puede apreciar que se considera solidaria con la viga parte de la sección de tablero existente sobre la misma, vinculada por los estribos que actúan en este caso también como conectores de corte.

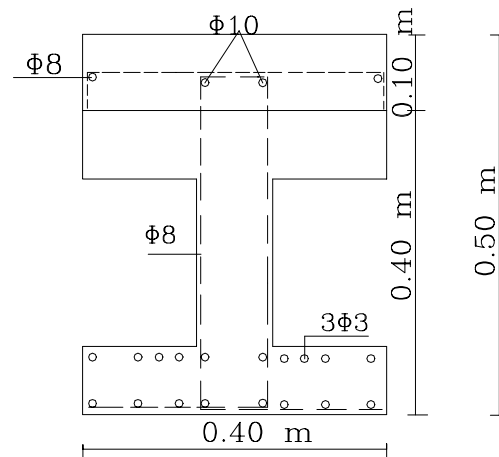


Fig. 4: SECCION TRANSVERSAL DE LA VIGA

DESCRIPCION DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

El sistema de cargas considerado consiste en lograr un estado de flexión pura en la zona central de la viga, bajo cargas puntuales que varíen entre las que producen el momento mínimo hasta el máximo de servicio. Debido a que el fenómeno de corrosión se produce con el transcurso del tiempo, se decidió acelerar el proceso provocando mecánicamente la reducción progresiva de la armadura, consecuencia a la que conduce el proceso electroquímico actuando en el tiempo. La “corrosión” localizada se provocó en la sección media de la viga. En cada reducción de armadura se la sometía al sistema de cargas antes mencionado, estudiando su comportamiento en cada caso.

Este mismo ensayo se simuló con el programa de Elementos Finitos, ABAQUS³ para verificar si se podía utilizar esta herramienta numérica para predecir el comportamiento estructural del modelo en forma correcta ante la presencia de este fenómeno electroquímico.

INSTRUMENTACION DEL MODELO

Se colocaron transductores de desplazamientos potenciométricos en el centro y en los tercios de la luz, sobre la cara inferior de la viga, con el objeto de medir los desplazamientos verticales en dichos puntos. Los instrumentos utilizados tienen un rango de 200 mm y una sensibilidad de 0.01 mm. Para registrar las deformaciones de los potenciómetros se empleó un equipo adquirente de datos KYOWA (UCAM 10).

También se colocó en uno de los tercios de la viga un flexímetro para comparar los resultados con los de los potenciómetros. En los extremos se colocaron dos clinómetros, uno en cada extremo, para medir giros de la viga en cada aplicación de carga.

DISPOSITIVO DE APOYO Y CARGA

En la Fig. 5 se muestran el dispositivo de apoyo y carga empleado en el ensayo. El modelo se dispuso simplemente apoyado, sobre rodillos que posibilitaron el giro libre en un extremo y el giro y desplazamiento longitudinal en el otro, con una luz entre apoyos de 13,30 m.

La carga se aplicó en los tercios de la luz, mediante dos gatos hidráulicos marca AMSLER de 200/100 KN de capacidad uno. Los mismos se aplicaron sobre dos celdas de carga de 200 KN. cada una, estando éstas colocadas sobre la viga. Los gatos se encontraban conectados a un pulsador AMSLER P960. Las celdas se encontraban conectadas al adquirente de datos antes descrito, permitiendo corroborar los valores de carga registrados por el pulsador de aplicación de cargas.

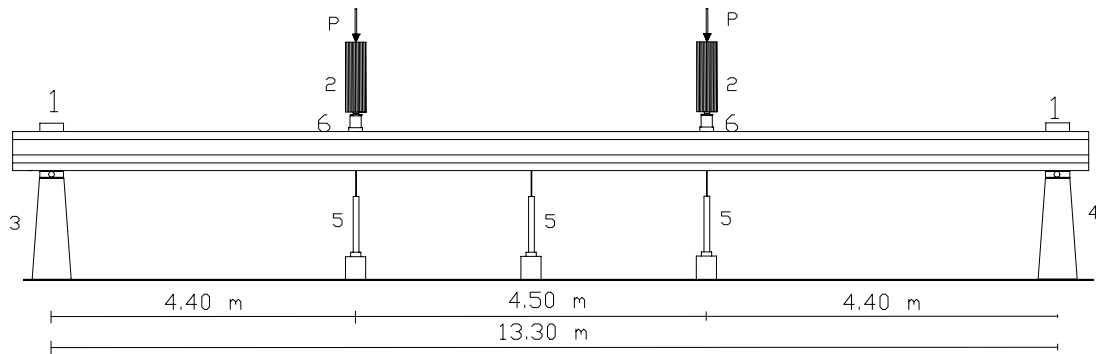


Fig. 5: DISPOSITIVO DE APOYO Y CARGA. INSTRUMENTACION

1. CLINOMETROS
2. GATO HIDRAULICO (vinculado al pórtico de carga)
3. APOYO MOVIL
4. APOYO FIJO
5. TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTOS POTENCIOMETRICOS
6. CELDAS DE CARGA

DESARROLLO DEL ENSAYO

El modelo se ensayó a flexión pura. Las cargas se aplicaron en forma estática dividiéndose en 6 escalones en total. En cada uno de ellos se tomaron las lecturas del instrumental correspondientes. El ensayo se desarrolló con normalidad, hasta alcanzar la carga de fisuración. Para determinar el comportamiento hasta agotamiento de la viga, se continuó con el ensayo hasta que los potenciómetros comenzaron a acusar la inestabilidad de la viga. Llegado a este punto, se procedió a la descarga total de la viga. Para simular un efecto relativamente moderado de corrosión, se procedió a cortar el 10 % de la armadura en la sección media de ésta. Una vez finalizado el proceso de degradación, se tomaron las lecturas iniciales de los instrumentos y se volvió a cargar la viga hasta el valor de carga en que la viga comenzaba a volverse inestable, y se descargó. Se redujo la armadura en otro 10%, se cargó de igual forma que en la etapa anterior, y así se continuó hasta reducir la armadura en un 50%. En cada etapa del ensayo, la carga final fue reduciéndose debido a que la capacidad de la viga fue disminuyendo a medida que se redujo la sección de acero. La viga no fue llevada a rotura ya que no era el fin del ensayo obtener la carga última.

DESCRIPCION DEL MODELO NUMERICO

La viga pretensada se analizó utilizando el programa de Elementos Finitos, ABAQUS³. En la formulación de varios de sus elementos, este programa permite la incorporación de armadura. Para el caso de la formulación del elemento tridimensional, permite la introducción de armadura activa y pasiva según direcciones arbitrarias. Por esta razón la viga objeto del estudio fue modelada mediante elementos sólidos tridimensionales. En el sentido longitudinal se consideraron 100 elementos, mientras que la sección transversal fue dividida en 10 partes como se describe en la Figura 6. De esta manera, el modelo de elementos finitos contó con un total de 1000 elementos tridimensionales de 8 nodos. Como también se puede observar en la Figura 6, se consideró para la modelización la porción de tablero colaborante con la viga, teniendo en cuenta las distintas propiedades de los materiales constituyentes. La armadura tanto tesa como no tesa (longitudinal y transversal) fue dispuesta respetando las cuantías y posiciones de la viga prototipo. En cuanto a las condiciones de sustentación y a las posiciones de las cargas, se usaron las mismas que reprodujeran las existentes en el estudio experimental.

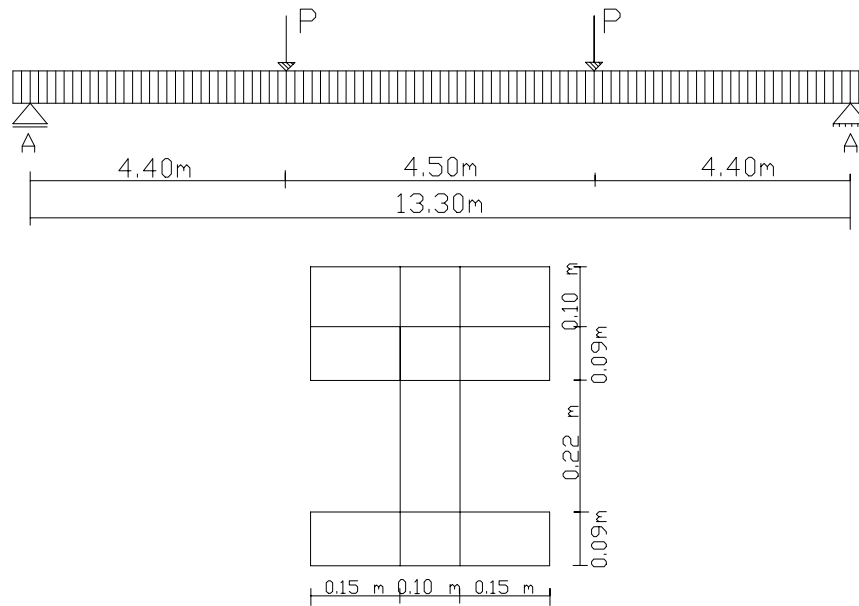


Fig. 6: MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

A: Apoyos

P: Cargas

DESARROLLO DEL ESTUDIO NUMERICO

Para la definición de las propiedades mecánicas de los materiales a considerar para el modelo numérico se contó con información provista por fabricantes y con resultados de ensayos propios. La Tabla 1 muestra las propiedades correspondientes a los materiales involucrados en el modelo

Tabla 1: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

	MODULO ELAST. [Gpa]	TENSION DE FLUENCIA [MPa]	TENSION DE ROTURA [Mpa]	DENSIDAD [MPa / m]	COEFICIENTE DE POISSON
HORMIGON VIGA	45	32	47	245	0.18
HORMIGON TABLERO	40	23	32	245	0.18
ACERO TESADO	2.1E5	460	540	796	0.3
ACERO NO TESADO	1.96E5	1600	1750	796	0.3

El modelo de hormigón armado requirió la introducción de parámetros adicionales para representar adecuadamente fenómenos complejos, tales como la adherencia entre hormigón y acero, la colaboración del hormigón a la resistencia a tracción aún después de fisuración y el efecto de arco mediante el cual la armadura resiste tensiones de corte en secciones fisuradas. Se adoptaron para estos parámetros los valores aconsejados en la bibliografía consultada, de acuerdo a las propiedades mecánicas determinadas para los materiales del modelo. Particularmente en el rango no lineal de comportamiento se verificó la elevada sensibilidad del modelo numérico a variaciones en los parámetros citados, pudiendo conducir a la falta de convergencia de resultados aún para valores de carga alejados del agotamiento de la capacidad de la viga.

El ensayo se realizó aplicando las cargas en 6 escalones en forma creciente hasta llegar a las que produjeran las deformaciones específicas asociadas con fisuración. Para simular el proceso de deterioro por corrosión se procedió a quitar la continuidad en los elementos de armadura en forma progresiva coincidentemente con el protocolo seguido en el estudio experimental.

ANALISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Durante el ensayo se realizaron mediciones de giros y flechas. Con los datos obtenidos, luego de ser procesados, se graficaron las curvas cargas- desplazamiento para cada etapa del ensayo. Se obtuvieron, también, los valores de rigidez de la viga para cada reducción de armadura, quedando registrada la disminución de las pendientes de las curvas para cada etapa del proceso, logrando de esta forma un excelente indicador de la presencia de corrosión sobre un elemento estructural, cuando a simple vista éste no acusa ningún problema.

Las curvas obtenidas en este ensayo se muestran en la Fig. 7, donde la caída de la pendiente de la curva queda claramente representada.

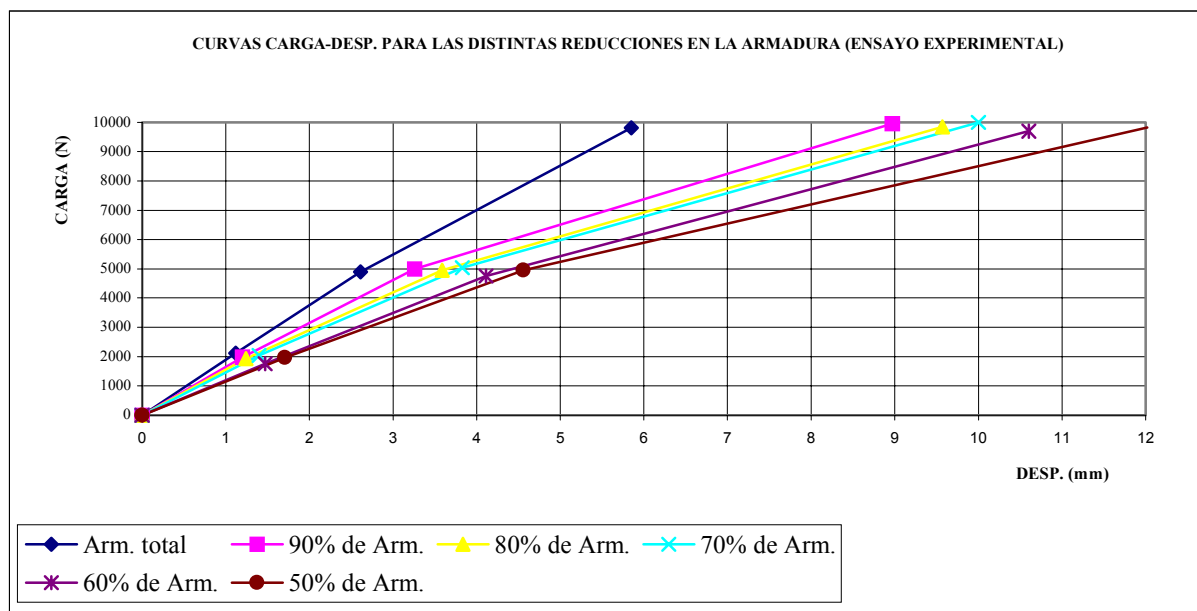


Fig. 7: PERDIDA DE RIGIDEZ EN FUNCION DE LA DEGRADACION DE LA ARMADURA

ANALISIS DE RESULTADOS NUMERICOS

Durante el ensayo se obtuvieron las tensiones, deformaciones y los desplazamientos que se producían en el modelo a medida que se reducía la sección del acero. Para tener datos comparativos con los experimentales se procesaron los datos de las flechas y se trazaron las curvas carga- desplazamientos con ellos, para cada uno de los estados planteados. También se analizó la pérdida de rigidez que sufre la viga en función de la degradación de los cables de pretensado. Se graficó la caída de la pendiente de las curvas. Los resultados obtenidos coinciden con los de la parte experimental.

Se presentan a continuación las curvas obtenidas mediante la utilización de la técnica numérica.

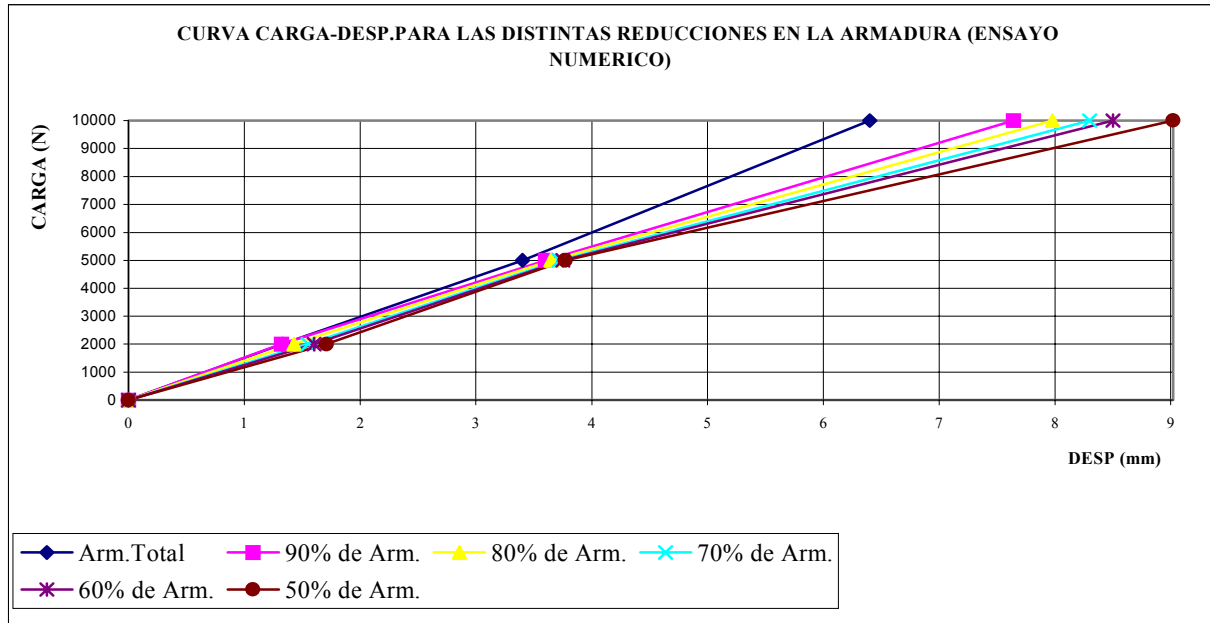


Fig. 8: PERDIDA DE RIGIDEZ EN FUNCION DE LA DEGRADACION DE LA ARMADURA

CONCLUSIONES

- De los resultados numéricos – experimentales, se infiere que el proceso de corrosión es posible de interpretar como una reducción localizada de sección, que produce pérdida de rigidez flexional en la pieza.
- De los resultados numéricos, se concluye que el Método de Elementos Finitos puede simular este proceso , en forma acabada.
- Las curvas comparativas de los resultados numéricos y los experimentales, coinciden plenamente en el rango lineal, con tendencia a divergir en la etapa post-elástica. Esta zona puede mejorar su ajuste a través de una mejor modelación de los parámetros involucrados.

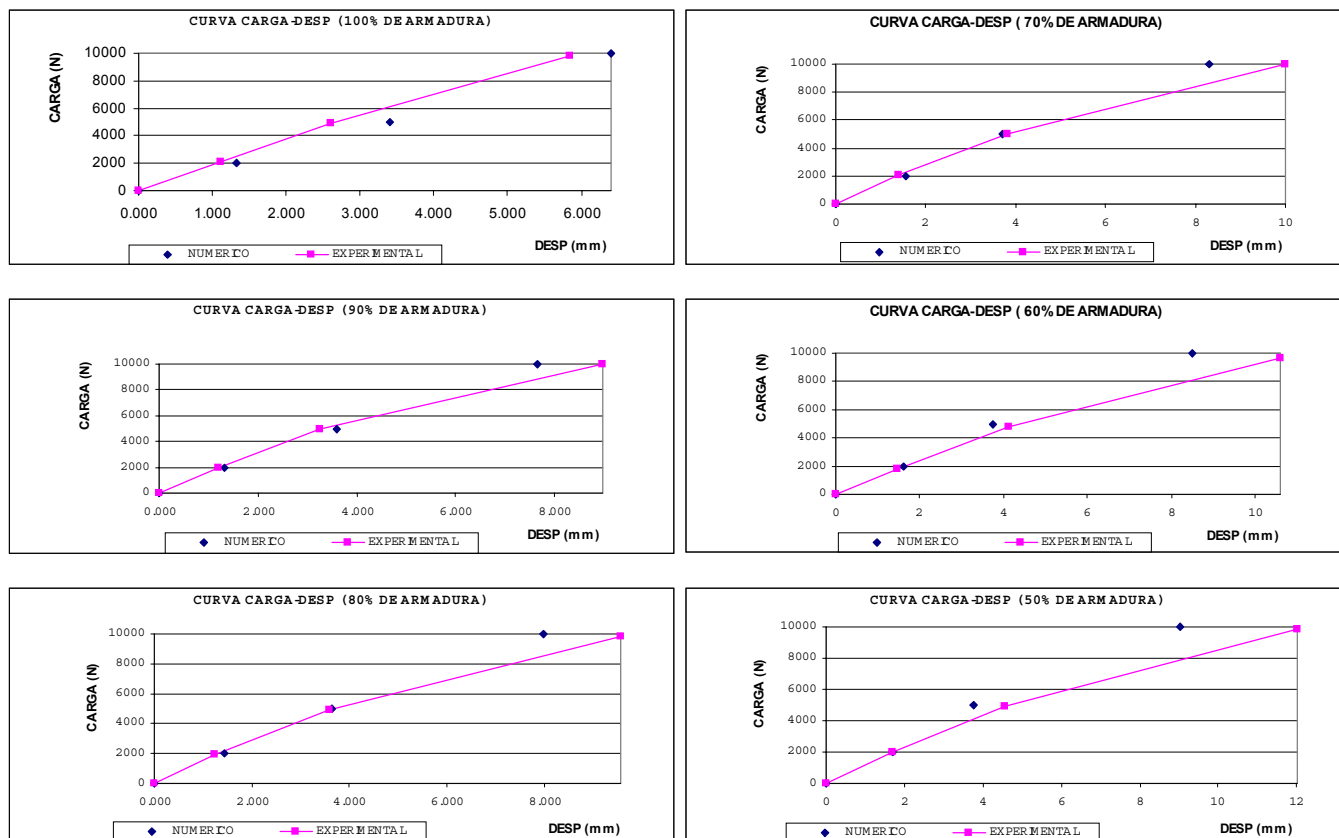


Fig. 9: COMPARACION DE RESULTADOS NUMERICOS Y EXPERIMENTALES

- Se propone como método precoz de detección del problema de corrosión en estructuras de puentes, al de la medición de la rigidez a través de un ensayo de carga y la obtención de los correspondientes diagramas P- δ . Este procedimiento, efectuado en diferentes momentos de la vida útil de la estructura, como ser la puesta en servicio y en períodos recomendables de no más de un año calendario entre ellos, daría como resultado la obtención de rigideces inferiores a la inicial en caso de producirse el fenómeno de la corrosión de los aceros (ya sea de armaduras tesas o no tesas). De esta forma, al disponerse de la herramienta del Método de Elementos Finitos para reproducir el fenómeno, y su correspondencia con la sección de armaduras disponibles en el puente, se posibilita la determinación “no destructiva” de la armadura residual, y por consiguiente, la ubicación de en qué zona de confiabilidad estructural se encuentra en ese momento la estructura.

Así, es posible permitir la detección y/o reparación de la obra, como también determinar el grado de confiabilidad estructural de la misma.

Se han desarrollado, además otros dos métodos de auscultación basados en la medición de la resistencia eléctrica de los cables de pretensado y el de la medición de las frecuencias naturales de las estructuras estudiadas. Estos trabajos se publicarán próximamente, pero su efectividad ha sido comprobada en laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Empresa TENSOLITE S.A. por la donación de la viga pretensada. También agradecen la colaboración del FOMECE.

REFERENCIAS

- PODOLNY, WALTER JR., “Corrosion of Prestressing Steels and Its Mitigation”, Special Report, PCI Journal, Vol.37, No.5, September-October 1992, pp. 34-55.

2. “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”, Durar, Red Temática XV. B, Durabilidad de la Armadura, Julio 1998.
3. ABAQUS / Standard, Versión 5.7-3.
4. “Conferencia Internacional sobre Evaluación y Rehabilitación de Estructuras de Hormigón e Innovaciones en Diseño”, American Concrete Institute (ACI), Hong Kong, 12/91.
5. FREEMAN, S. A., “Assesment of Structural Damage and Criteria for Repair”. Proceed. Of the 3rd Vs/Japan Work Shop for Urban Earthquake hazard Reduction, Publication No 93-B, EERI, Oackland, California 1995.
6. KOTSOVOS M. et al (1994) Structural Concrete design: An Appraisal of Safety. 11th Hellenic Conf. On Concrete, Techn, Chamber of Greece, Corfu.
7. ALLEN, W (1989) Failures, Research and Feed-back. Proc. Conf. Building Defects, Kensington, London, February 1989.
8. UNIDO/UNDP (1984) Repair and Strengthening of Historical Monuments and Buildings in Urban Nuclei, 6, Vienna.
9. ZAVLIARIS K (1994) Repairs in Reinforcement Concrete Structures. General Report. Proceed. 11th Hellenic Conf. On Concrete, Techn, Chamber of Greece, Corfu.
10. PODOLNY, W., Jr., “Corrosion Protection of Prestressing Steels”, Vol. 2, FIP-XIth International Congress on Prestressed Concrete, Hamburg, June 4-9, 1990, pp. T57-T61.
11. SZILARD, R., “Corrosion and Corrosion Protection of Tendons in Prestressed Concrete Bridges”, ACI Journal, Vol. 66, N^o. 1, January 1969, pp. 42 - 59.
12. SCHUPACK, M. , “A Survey of the Durability Performance of Post-Tensioning Tendons “, ACI Journal , Vol. 75, N^o. 10, October 1978. pp. 501-510.