

Vigas Preesforzadas con Refuerzo Externo

Juan José Ferrer Narvaez.¹

RESUMEN

Es de gran interés para la ingeniería colombiana el efecto del refuerzo externo de elementos estructurales con elementos metálicos. La Unidad de Estructuras ha venido realizando en el transcurso de esta década estudios en elementos en concreto con refuerzos externos a flexión con resultados satisfactorios. El proyecto "Vigas preesforzadas con refuerzo externo" sirve de base en el estudio del comportamiento de este tipo de elementos estructurales y la extrapolación de los resultados obtenidos en elementos de concreto reforzado a concreto preesforzado.

INTRODUCCIÓN

EN las construcciones tanto de infraestructura como en edificaciones se puede requerir el reforzamiento de estructuras de concreto armado por alguna de las siguientes razones :

- ◆ Incremento de cargas.
- ◆ Daño en elementos estructurales.
- ◆ Mejoramiento y optimización de la capacidad de carga.
- ◆ Cambio del Sistema estructural o sistema estático.
- ◆ Defectos de diseño o construcción.

En las situaciones descritas anteriormente es necesario efectuar un reforzamiento de la estructura con el fin de que esté en capacidad de prestar el nuevo uso o necesidad, o para restaurar el uso para la que fue originalmente diseñada sin riesgo de colapso.

Existen diferentes métodos de reforzamiento tales como la colocación de acero de refuerzo simple o postensado, instalación exterior de refuerzo postensado, refuerzo con láminas metálicas o láminas sintéticas reforzadas con fibras (*Fiber Reinforced Polymer*, FRP) y adheridas a la superficie de concreto, recrecimiento o aumento de la sección de concreto con refuerzo adicional o sin éste (concreto lanzado, colocado convencionalmente o adherir como elemento prefabricado).

Desde finales de la década del sesenta ha sido posible incrementar la resistencia a la flexión y cortante de estructuras de concreto reforzado existentes, por medio de láminas metálicas adheridas posteriormente.

Una viga reforzada externamente es analizada de tal manera que la falla del concreto tiene lugar durante la fluencia del acero. Este tipo de falla dúctil se anuncia por medio de grandes fisuras y deformaciones. La resistencia a la flexión se puede calcular con sencillas condiciones de equilibrio y con el control de la cantidad de refuerzo se excluyen tipos de fallas súbitas indeseables. En caso de producirse el rompimiento de la adhesión, la rotura es de tipo brusco y la mayor parte de la banda se despega. A fin de evitar este riesgo, los extremos de las bandas se anclan por medio de otras laterales, que pegadas a los costados aumentan la superficie de anclaje, o por medio de pernos.

ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Desde principios del decenio del 90, la Unidad de Estructuras ha observado gran interés respecto al reforzamiento externo de elementos estructurales tanto para mejorar su capacidad portante como para la recuperación del elemento.

En el transcurso de estos años se ha estudiado el comportamiento de las resinas epóxicas como agente adherente de las láminas de acero (Cifuentes, 1992) ; el comportamiento del refuerzo externo para resistir cortante (Pardo, 1995; García y Guevara ,1996); modificaciones a programas de análisis estructural existentes para tener en cuenta el refuerzo externo (Gómez y Muñoz, 1995); comparación de técnicas de anclaje en los bordes de las láminas (Chavarro y Rodríguez, 1993; Alvarez y Niño, 1996); comportamiento a flexión de vigas reparadas y reforzadas externamente (Rodríguez y Romero, 1996), y el comportamiento en pórticos de las uniones reforzadas externamente (Mulet ,1996).

En los estudios de reforzamiento externo y sistemas de anclaje en vigas, se ha tenido en cuenta la relación ancho/espesor (b_l/t)

de la lámina ; se ha observado que la falta de anclaje en los extremos de las láminas produce falla súbita de la viga, es decir, comportamiento frágil. Esto sucede para relaciones b_L/t menores de 40. Se ha recomendado en trabajos de investigación anteriores la colocación de cualquier sistema de anclaje para las láminas sin importar la relación b_L/t que posea el elemento y se ha observado un aumento significativo en la resistencia última. A pesar de los esfuerzos realizados en la Unidad de Estructuras, en ningún momento se habían estudiado elementos estructurales preesforzados sometidos a reparación y reforzados externamente.

I. PREESFORZADO

El preesforzado de un miembro estructural puede definirse como la inducción de esfuerzos internos de tal magnitud y distribución que los esfuerzos producidos por las cargas aplicadas se contrarrestan hasta un grado deseado. El concreto es básicamente un material resistente a la compresión, con una resistencia a la tensión muy baja y poco confiable. El preesfuerzo aplica una precompresión al elemento que reduce o elimina los esfuerzos de tensión no aconsejables que estarían presentes de otra manera. El control de las deflexiones y de las grietas, alcanzado a través del preesfuerzo, nos permite utilizar en forma efectiva y económica los aceros de alta resistencia en forma de torones, alambres o barras, de modo simultáneo con la utilización de concretos con resistencias mucho mayores a las normales. De esta manera, el preesforzado genera un mejoramiento global del comportamiento del concreto estructural que se utiliza para cargas y luces corrientes y amplía el campo de aplicabilidad mucho más allá de los límites antiguos, llevando no sólo a luces mayores de las que se hubieran creído posibles, sino permitiendo también la utilización de formas estructurales innovadoras.

Existen al menos tres maneras de mirar el preesfuerzo del concreto:

- a. Como control de esfuerzos en el concreto, mediante el cual el concreto se precomprime de modo que la tensión producida normalmente por las cargas aplicadas se reduce o elimina.
- b. Como medio para introducir cargas equivalentes en un elemento de concreto, de forma que los efectos de las cargas aplicadas se contrarresten hasta el grado deseado.
- c. Como una variación especial del concreto reforzado en el cual se utiliza acero predeformado de alta resistencia, por lo general en combinación con concreto de alta resistencia.

II. BASES DEL ANÁLISIS TEÓRICO

Los principales aspectos de interés práctico en el comportamiento de una estructura son la resistencia y las deformaciones traducidas en deflexiones y agrietamientos que van a presentarse en la estructura cuando esté cargada.

La mecánica del concreto reforzado se basa en las siguientes premisas fundamentales:

1. Las fuerzas internas en una sección cualquiera de un elemento están en equilibrio con los efectos de las cargas externas en esta sección.
2. La deformación unitaria en una barra de refuerzo embebida es la misma que la del concreto que la rodea.
3. Las secciones transversales planas antes de la aplicación de la carga siguen en la misma condición para el elemento cargado.
4. Se supone en general que el concreto no es capaz de resistir esfuerzos de tensión. Debido al preesforzado de los elementos en estudio, el agrietamiento con las cargas de servicio puede minimizarse o aún eliminarse totalmente.
5. La teoría se basa en las relaciones reales esfuerzo-deformación unitaria y en las propiedades de resistencia de los dos elementos constitutivos.

En una viga de concreto reforzado la tensión causada por los momentos flectores es resistida por el acero de refuerzo, léase acero convencional, preesfuerzo y refuerzo externo, mientras el concreto usualmente resiste la compresión correspondiente. Esta acción conjunta de los materiales se garantiza si se impide su deslizamiento relativo.

Mientras el esfuerzo de tensión en el concreto se mantenga por debajo del módulo de rotura f_r , de manera que no se desarrollen grietas de tensión, la distribución de deformaciones unitarias y esfuerzos es esencialmente la misma que en una viga elástica y homogénea. En la figura 1 se presenta la distribución de esfuerzos por debajo del módulo de rotura f_r .

El esfuerzo en el acero para determinado valor de la deformación unitaria, en el intervalo elástico, es n veces el del concreto; por tanto, podemos tomar ventaja de esto en los cálculos, con el remplazo de la sección real transversal de acero-concreto por una sección ficticia conformada únicamente en concreto.

III. ESTUDIO EXPERIMENTAL

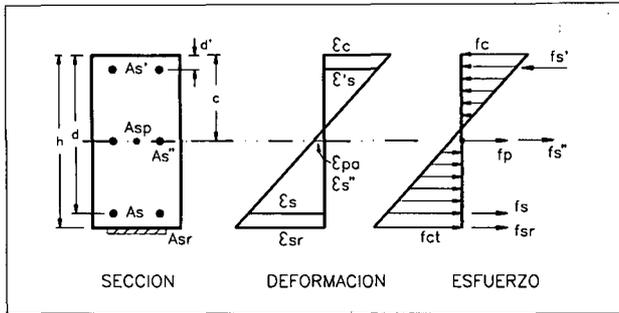


Figura 1. Condición de esfuerzos para la sección antes del fisuramiento del concreto.

Cuando el esfuerzo de tensión f_{ct} excede el módulo de rotura, se forman grietas. Si el esfuerzo de compresión en el concreto es menor que aproximadamente $\frac{1}{2} f'c$ y el esfuerzo en el acero no alcanza el punto de fluencia, ambos materiales siguen comportándose en forma elástica o casi elástica. Se debe tener en cuenta que la posición del eje neutro varía con la aplicación de la carga. Para encontrar el valor de la distancia al eje neutro c , realizamos sumatoria de fuerzas que actúan en la sección.

Para la carga última o cerca de ella, los esfuerzos dejan de ser proporcionales a las deformaciones unitarias; la distribución de esfuerzos y deformaciones unitarias es la que aparece en la figura 2. Si la distribución de esfuerzos de compresión del concreto en la carga última o cerca de ella, tuviera una forma bien definida e invariable (parabólica, trapezoidal), sería posible desarrollar una teoría completamente racional para la resistencia última a flexión.

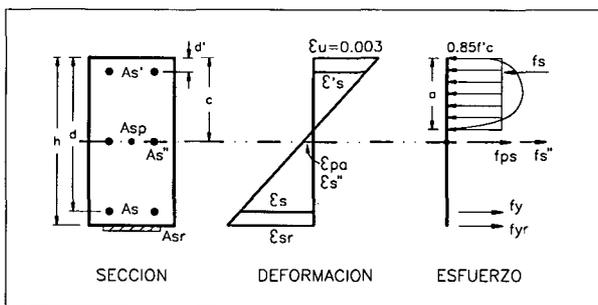


Figura 2. Condición de esfuerzos en la carga última del concreto.

El método para calcular el momento último nominal M_n , se basa en la falla de la viga por fluencia del acero sometido a tensión o por aplastamiento del concreto en la fibra extrema a compresión. Lo anterior consiste en que el esfuerzo en el acero sea igual al punto de fluencia ($f_s = f_y$) y suponer que el concreto está próximo al aplastamiento, cuando la máxima deformación unitaria alcanza $\epsilon = 0,003$. Aquí es prescindible conocer la distancia c al eje neutro para conocer la fuerza resultante a compresión en el concreto C .

El estudio consistió en la reparación y reforzamiento externo de ocho vigas preesforzadas, previamente falladas, con bandas de acero de 1,20 m de largo por 0,10 m de ancho para aumentar la capacidad portante de las mismas. Se utilizó mortero Sikatop 122 para la reparación de las vigas preesforzadas, ya que este producto produce alta adherencia y mayor resistencia, y para adherir las bandas de acero de 10 cm de ancho, en solo seis vigas, se utilizó epóxico Sikadur 31.

Para los ensayos se utilizó la máquina universal de 200 toneladas de capacidad máxima del Laboratorio de Ensayos y Maquinaria Pesada del Instituto de Ensayos e Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, IEI. Se tomaron lecturas de carga cada 500 kg y lecturas de deflexión en el centro de la luz de la viga por medio de un deformímetro mecánico, con una precisión de 0,01 mm. La aplicación de la carga puntual se realizó en el centro de la luz.

En la parte teórica, se analizó la capacidad portante a resistir por flexión de las vigas preesforzadas; éstas son vigas de 0,30 x 0,15 m de sección con una longitud de 1,60 m. Estaban reforzadas con dos varillas #4 de $f_y = 4.200 \text{ kg/cm}^2$ para flexión, dos varillas #4 de $f_y = 4.200 \text{ kg/cm}^2$ en el eje neutro de la sección y dos #4 de la misma resistencia para trabajar a compresión. Las vigas se preesforzaron por medio de un torón de $\frac{1}{2}$ " no adherido. En el momento del tensionamiento se utilizó una fuerza en el gato de 8 toneladas. El acero de preesfuerzo estaba ubicado en el centroide de la sección y no poseía excentricidad a lo largo de la viga. En la figura 3 puede observarse la distribución de refuerzo de la viga testigo.

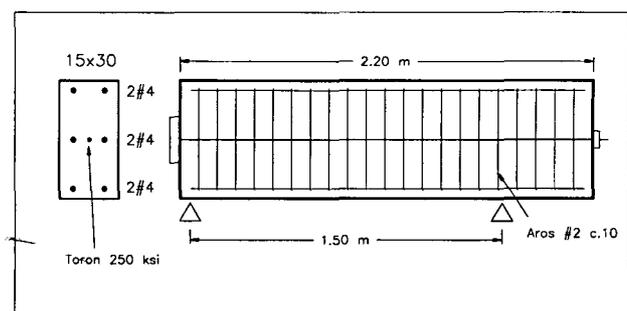


Figura 3. Distribución de refuerzo en la viga testigo

Para el reforzamiento externo de las vigas preesforzadas reparadas se utilizó lámina de acero calibre 16 ($e=1,5 \text{ mm}$). Para resistir cortante, las vigas preesforzadas poseían aros o flejes de acero #2 con $f_y=2.400 \text{ kg/cm}^2$ separados cada 0,10 m uniformemente distribuidos a lo largo de toda la viga.

“La pérdida de preesfuerzo es la reducción en la fuerza de preesfuerzo causada por la combinación de los efectos de deformación en el concreto y en el acero, incluyendo los efectos

Vigas Preesforzadas con Refuerzo Externo

de acortamiento elástico, flujo plástico y retracción del concreto, relajación del acero de preesfuerzo ; y en los miembros postensados, fricción y acortamiento del anclaje” (C.C.P. 200-94, Sección A.8.2 - Definiciones).

Se analizaron las pérdidas de preesfuerzo teniendo en cuenta los factores que incidían en el proceso y se obtuvo un valor de preesfuerzo para el momento del ensayo de 6,31 toneladas.

IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el cuadro 1 se presentan los valores teóricos y experimentales de momentos encontrados en la ejecución del proyecto :

CUADRO 1. COMPARACIÓN DE MOMENTOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

Elemento	Momento (t-m)			Carga (kg)	% variación	
	Mn	Mut	Mexp		Mn	Mut
V.TEST1	5,94	5,35	5,61	14.950	-5,62	4,87
V.TEST2	5,94	5,35	6,34	16.900	6,69	18,55
V.REXT1	6,85	6,17	7,20	19.200	5,11	16,79
V.REXT2	6,85	6,17	7,39	19.700	7,85	19,83
V.REXT3	6,85	6,17	7,13	19.000	4,01	15,57
V.REXT4	6,85	6,17	6,86	18.300	0,18	11,31
V.REXT5	6,85	6,17	7,05	18.800	2,92	14,36
V.REXT6	6,85	6,17	6,94	18.500	1,28	12,53

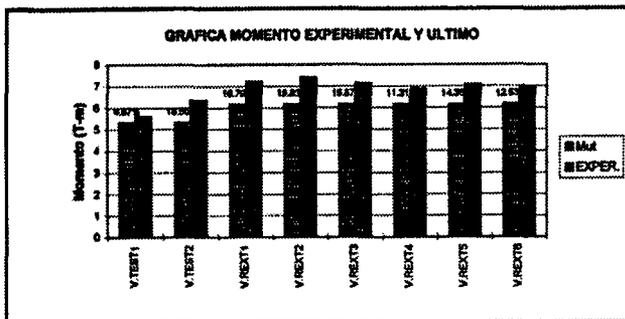


Figura 4. Gráfica de momento experimental y último

De acuerdo con lo observado en el laboratorio en el momento de realizar los ensayos se puede asegurar lo siguiente:

- ♦ La reparación efectuada en la recuperación total de las ocho vigas resultó ser muy buena, debido a que en el momento del ensayo, los apoyos reparados no presentaron ningún pernice y las vigas se comportaron monolíticamente.
- ♦ El epóxico usado para unir la lámina metálica con el concreto resultó muy eficaz, ya que soportó los esfuerzos tangenciales generados por la flexión y evitó la utilización de láminas laterales o un sistema de pernos para la fijación de la lámina.
- ♦ Debido a lo anterior, el tipo de falla presentado en las vigas fue de carácter dúctil, generando que en el elemento los

aceros, el convencional y de refuerzo, entraran en la zona de fluencia y después el concreto fallara por aplastamiento en la zona de aplicación de la carga. La deformación del acero de preesfuerzo en la carga última debió llevar a la fluencia de éste.

- ♦ Se observaron fisuras por flexión en etapas tempranas de carga, desde la fibra inferior de la viga en dirección vertical al punto de aplicación de la carga puntual. Luego se observaron fisura de corte en cercanías de los apoyos y fisuras de corte-flexión entre los apoyos y el punto de aplicación de la carga.
- ♦ Al acercarse a la carga máxima, los refuerzos alcanzaron altas deformaciones y causaron fisuración total en la zona de tensión del concreto; cuando se descargaron las vigas reforzadas externamente, se observaron deformaciones significativas permanentes en el centro de la lámina, lo cual indicó que el material llegó a fluencia.
- ♦ Al producir desplazamientos grandes después de llegar a la carga máxima se observan unas fisuras horizontales que al parecer se producen por falta de adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, provocando en algunas vigas desprendimiento en bloque de un volumen considerable de concreto que queda unido de la lámina de acero. Ninguna viga reforzada externamente sufrió desprendimiento de la lámina de acero.
- ♦ Al comparar los momentos obtenidos en la práctica con los momentos teóricos se encontró en promedio un aumento cercano al 3,50%, respecto al momento nominal Mn , y un aumento cercano al 11,80% respecto al momento último Mu .

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Respecto al ensayo de vigas preesforzadas reparadas reforzadas externamente se puede concluir:

- ♦ En las vigas ensayadas se encontró un aumento de la carga en relación con la esperada teóricamente en un promedio de 11,8% respecto al momento último. Lo anterior refleja que los valores teóricos obtenidos analíticamente pueden tomarse como valores de momento último para esperar en elementos estructurales preesforzados reforzados externamente.
- ♦ Al comparar los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio sobre las vigas reparadas se observa que el reforzamiento externo generó un incremento de 1,12 t-m en promedio equivalente a 18,76% (en el análisis teórico se esperaba un incremento del 24%).

- ♦ Como se esperaba, desde el punto de vista teórico se presentó falla de tipo dúctil en las vigas y en ningún momento de aplicación de carga hubo sospecha del colapso en la unión lámina concreto.
- ♦ Los resultados y recomendaciones aportadas en los proyectos de grado presentados por Rodríguez y Romero (1996) y Chavarro y Rodríguez (1993) hablan sobre la necesidad de usar un sistema de pernos y/o láminas laterales en forma de U, cuando la relación $b_c/t < 40$ para prevenir el desprendimiento de la lámina. La relación ancho/espesor (b_c/t) de las vigas preesforzadas ensayadas en la ejecución de este proyecto fue de 66,66.
- ♦ El sistema de reforzamiento externo con lámina, en este caso calibre 16, en vigas preesforzadas reparadas funciona. Los valores esperados para la carga última fueron cercanos a los valores obtenidos en el laboratorio.
- ♦ Se le sugirió a la Unidad de Estructuras la realización de un proyecto de grado consistente en vigas preesforzadas excéntricamente reforzadas externamente con el objetivo de verificar la relación ancho/espesor de la lámina recomendadas por Chavarro y Rodríguez (1993).

BIBLIOGRAFÍA

1. CIFUENTES CIFUENTES, Gustavo. *Refuerzo de estructuras mediante bandas de acero unidas con formulaciones epóxi*. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C. 1992
2. *CODIGO COLOMBIANO PARA PUENTES*. Comité AIS-200, Capítulo A.8, Concreto preesforzado. 1995.
3. FERNÁNDEZ CANOVAS, Manuel. *Patología y Terapéutica del Hormigón Armado*. Editorial Dossat, S.A., Madrid. 1977.
4. KHACHATURIAN, Narbey, GURFINKEL, Germán. *Concreto preesforzado*. Editorial Diana, México. 1979.
5. MULET RODRIGUEZ, Emel. *Uniones en Concreto con Refuerzo Externo*. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C. 1996
6. NILSON, Arthur H., WINTER, George. *Diseño de estructuras de concreto*. Editorial McGraw-Hill Interamericana, S.A., Santafé de Bogotá, D.C. 1994.
7. RODRIGUEZ, S, Carlos A., ROMERO R., Jorge H. *Comportamiento de vigas reforzadas externamente, reparadas*. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C. 1996